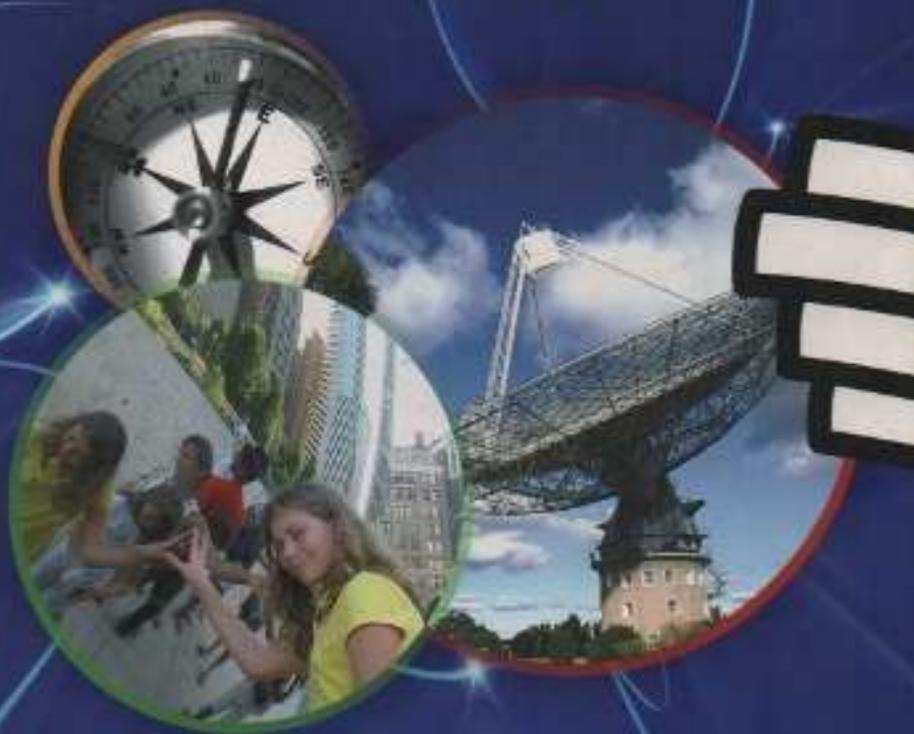


FÍSICA / 4º (1º B.D.)

interacciones

campos y ondas



editorial
contexto

Ernesto Egaña
Marcelo Berruti
Alejandro González

FÍSICA / 1° B.D.

interacciones

campos y ondas



Ernesto Egaña
Marcelo Berruti
Alejandro González

 editorial
contexto
www.editorialcontexto.com.uy

www.editorialcontexto.com.uy - Tel (02) 901 94 93

Prólogo

La reformulación programática del 2006 para el curso de primer año de bachillerato de Física nos plantea un gran desafío: alfabetizar científicamente al estudiante, cultivando el pensamiento crítico para que pueda interrelacionarse con autonomía.

El estudio de los contenidos se presta para analizar las diferentes teorías y comprender que no existen verdades definitivas. No es sencillo entender y tratar de explicar el funcionamiento de la naturaleza y su relación con el ser humano.

En “Interacciones”, intentamos acercar al estudiante a la forma en que día a día se construye el conocimiento científico. Para ello enfatizamos el análisis crítico de los modelos que explican y predicen sobre algunos fenómenos de la naturaleza. Nos fijamos como prioridad incentivar a descubrir cómo nuevas evidencias cuestionaron los modelos propuestos y llevaron, a partir de nuevas formas de pensar, a la elaboración de otros modelos. Esto resalta el aspecto cambiante y modificable de los modelos explicativos, siempre en la búsqueda de lograr una descripción más sencilla, completa o general.

Con la intención de lograr un buen planteo didáctico y además para que su estudio sea ameno, hemos dividido todos los contenidos del programa en 23 capítulos. Cada uno comienza con un estudio histórico para ubicarlos en el contexto, luego un exhaustivo análisis conceptual, donde hemos incluido un número importante de ejemplos resueltos, los cuales consideramos juegan un rol muy importante en el grado de comprensión de los contenidos abordados. Hemos procurado no hacer un desarrollo matemático muy abstracto y tedioso. Otros aspectos importantes para lograr una formación sólida científica y que no deben faltar en un texto de Física, son preguntas y problemas. Responder las preguntas ayuda al estudiante, a evaluar el grado de comprensión de los temas. Por otro lado, la resolución de problemas es fundamental en la Física para desarrollar habilidades propias del trabajo científico. Por ello hemos propuesto 252 problemas y sus resultados se pueden "descargar" de: www.editorialcontexto.com.uy.

Consideramos fundamental el trabajo experimental, en la comprensión y elaboración de conceptos, pero hemos tomado la decisión de no incluirlos en esta obra. En nuestras instituciones educativas existe una cultura importante de trabajo creativo experimental, que además caracteriza a cada centro. Cada liceo, en sus salas docentes planifica, tomando en cuenta los materiales existentes, las actividades experimentales con una extraordinaria variedad y riqueza.

Otro aspecto que queremos resaltar por su gran importancia, es la inclusión del capítulo N° 23 que incluye sugerencias metodológicas para encarar un proyecto como se plantea en la unidad IV del programa. El estudio y/o construcción de aplicaciones y su interacción con la tecnología y la sociedad promueven la reflexión sobre el desarrollo de la ciencia. Enriquece el aprendizaje al crear un ámbito en que el alumno se apropia de su formación, logrando un grado de autonomía muy importante.

Al embarcarnos en la redacción de “Interacciones” nos abocamos a una tarea que no fue sencilla. El proceso de trabajo fue sumamente fermental, enriquecido por las distintas experiencias y modalidades de cada uno. En la búsqueda de la rigurosidad, la sencillez y la presentación adecuada crecimos confrontando ideas y consensuando. El resultado nos dejó muy satisfechos. Somos partidarios del hacer, construir, crear, en todo momento con actitud positiva. Algo que siempre le hemos transmitido a nuestros alumnos es que “no hay nadie perfecto, siempre nos podemos equivocar”. Sin lugar a dudas encontrarán aspectos a pulir y otros con los que discreparán completamente. Estamos abiertos a recibir vuestros aportes y sugerencias que contribuyan a enriquecer la tarea educativa.

Este es nuestro grano de arena y nuestra contribución a la educación, fruto de un trabajo serio, dedicado y apasionado.

Llevamos adelante este proyecto siempre pensando en el estudiante, que lea, entienda, que disfrute el libro y sienta interés y curiosidad por una asignatura que ha sido y seguirá siendo motor de las grandes transformaciones en la sociedad.

Hay que reconocer que la Física ofrece un grado de dificultad importante. El nivel de aceptación de la asignatura entre los alumnos no es el deseado. Hay conceptos abstractos complejos que requieren conocimientos matemáticos que hay que manejar con fluidez. Hemos intentado priorizar lo conceptual sin dejar de utilizar las herramientas matemáticas necesarias.

Todo esto nos motivó a tratar de hacer una publicación que reduzca la brecha entre la mayoría de los alumnos y la Física.

Queremos agradecer a la Dirección del Liceo N° 58 por su incondicional apoyo y a todos los colegas que con sus aportes enriquecieron nuestra labor. Para finalizar un agradecimiento especial para el profesor Roberto Cameto, “un maestro en la enseñanza de la Física” por su lectura minuciosa, sus comentarios y sugerencias en el capítulo N° 16 de Circuitos Lógicos. Siempre con su gran sabiduría, paciencia y extrema humildad que lo caracterizan.

Alejandro, Marcelo y Ernesto.

contenido

UNIDAD 1 12

1 La luz 14

La Física y los Modelos en la Historia.....	14
Modelos Organicistas	14
Modelos Mecanicistas	15
Modelos conceptuales.....	15
Modelo Corpuscular versus Modelo Ondulatorio.....	16
Los aportes de los científicos en la antigüedad.....	17
Fundación de la óptica moderna.	19
Fuentes de luz	22
Rayos de luz	22
Propagación rectilínea	22
Formación de sombras.	23
Velocidad de la luz.	24
El intento de Galileo	25
El aporte de Römer	25
Primeras medidas en distancias “cortas”	26
Preguntas	26
Problemas.....	27

2 Reflexión de la luz 28

Reflexión especular.....	28
Reflexión difusa.....	28
Leyes de la reflexión.	28
Primera Ley de la Reflexión.....	29
Segunda Ley de la Reflexión.....	29
Preguntas	31
Problemas.....	31

3 Refracción de la luz 33

Definiciones importantes.....	34
Índice de refracción.....	34
Ley de Snell	35
Reflexión total interna	38
Determinación del ángulo incidente límite \hat{i}_L	38
Fibras ópticas.....	39
La Refracción según Fermat	39

El índice de refracción varía con el color de la luz.	40
La refracción y el modelo corpuscular.....	40
Preguntas	41
Problemas.....	42

4 Espejos..... 43

Espejos planos, imágenes.....	43
Espejos esféricos	45
Foco de un espejo esférico, cóncavo.....	45
Foco de un espejo esférico, convexo.....	45
Imágenes en Espejos Cóncavos.	46
Aplicaciones de espejos cóncavos.....	48
Imágenes en Espejos Convexos.	49
Ecuación de Espejos Esféricos.....	50
Aumento de un espejo	51
Aplicaciones de espejos convexos	53
Preguntas	53
Problemas.....	54

5 Prismas y lentes 56

Prismas	56
Lentes	58
Lentes Convergentes.....	58
Lentes Divergentes	58
Lentes Biconvexas	59
Lentes Bicóncavas	59
Imágenes en lentes convergentes	60
Imágenes en lentes divergentes.....	62
Ecuación de las lentes delgadas.....	63
Asociación de lentes. Microscopio Compuesto.	67
Preguntas	67
Problemas.....	68

6 Ondas, pulsos..... 70

Ondas	70
Clasificación de las ondas.....	71
Pulsos	73
Velocidad de propagación de un pulso en una cuerda.....	74

Reflexión y refracción de pulsos en una cuerda	75
Reflexión de un pulso en una cuerda con un extremo fijo.....	75
Reflexión de un pulso en una cuerda tensa con un extremo libre.....	76
Refracción de pulsos de ondas en cuerdas.....	76
Interferencia de ondas en una dimensión.....	79
Preguntas	81
Problemas	82

7 Ondas periódicas en una dimensión.....84

Longitud de onda.....	85
Período	85
Frecuencia	86
Reflexión de ondas periódicas en una dimensión.....	89
Refracción de ondas periódicas en una dimensión.....	89
Preguntas	91
Problemas	92

8 Ondas en dos dimensiones.....94

Características de las Ondas.....	94
Representación de las Ondas Bidimensionales.....	95
Reflexión de Ondas Bidimensionales.....	95
Refracción de ondas en dos dimensiones.....	96
Difracción de una onda	100
Interferencia	101
Principio de Huygens	103
Preguntas	105
Problemas	106

9 Difracción e interferencia de la luz108

Difracción	109
Interferencia. Experimento de Young.....	110
Color, longitud de onda y frecuencia.....	113
Preguntas	114
Problemas	115

UNIDAD 2 116

10 Electrostática118

Carga eléctrica	119
Propiedades de la carga eléctrica.....	120
Cuantización.....	120
Conservación	121
Ley de Coulomb	123
Campo Eléctrico	127
Vector Campo Eléctrico	127
Líneas de campo eléctrico.....	128
Campo eléctrico creado por una carga puntual	129
Preguntas	131
Problemas	133

11 Corriente eléctrica135

Efectos de una corriente eléctrica.....	136
Efecto térmico o efecto Joule.....	136
Efecto magnético o efecto Oersted	136
Efecto químico	136
Circuito Eléctrico.	136
Intensidad de corriente.....	140
Unidades de intensidad.....	140
Diferencia de potencial.....	141
Definición de diferencia de potencial,.....	142
Unidades de la diferencia de potencial.....	142
Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.....	142
Ley de los nudos.	142
Instrumentos de medida.....	144
Preguntas	145
Problemas	146

12 Resistencia eléctrica148

Resistencia eléctrica de un conductor.....	150
Variación de la resistencia con la temperatura.....	151
Conductores óhmicos y no óhmicos.....	152
Resistores de carbono	153
Preguntas	154
Problemas	155

contenido

13 Potencia eléctrica 157

Potencia disipada por un elemento eléctrico.	158
Otras formas de determinar la potencia eléctrica de un elemento de un circuito.	159
¿En qué unidades mide UTE la energía que nos suministra?	161
Equivalencia entre Joule y kWh	161
Lámparas comunes versus lámparas de bajo consumo.	162
Preguntas	163
Problemas.....	163

14 Circuitos eléctricos 165

Resistencia equivalente.	165
Circuitos en serie.....	166
Circuitos en paralelo.	168
Preguntas	172
Problemas	173

15 Generadores 175

Fuerza electro motriz (fem).....	175
Unidades de fem	175
Potencia de un generador.	175
Resistencia interna.....	176
Ecuación general de un circuito.	176
Curva característica de un generador.	177
¿Que sucede cuando se “agota” una pila?	177
Generadores ideales.....	179
Preguntas	180
Problemas.....	180

16 Circuitos lógicos 182

Electrónica analógica y digital	183
Circuitos lógicos.	183
Compuertas lógicas.....	184
Compuerta AND (y)	184
Compuerta lógica OR (o).	185
Compuerta NOT (no).....	186
Preguntas	187
Problemas.....	188

17 Campo magnético..... 190

La unión del magnetismo y la electricidad	191
Imanes	192
Características de los imanes.	193
Campo Magnético.	194
Características del vector campo magnético \vec{B}	195
Propiedades del campo magnético.....	195
Superposición de campos magnéticos.....	196
Campo magnético terrestre.	197
Declinación e inclinación magnética	199
Utilidad del campo magnético terrestre.....	199
Aplicaciones de los imanes	200
Preguntas	200
Problemas.....	201

18 Campo magnético generado por corrientes 203

Campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor recto.....	204
Campo magnético generado por una corriente en una espira circular.....	208
Campo magnético generado por una corriente en un solenoide.	211
Electroimanes.....	212
Preguntas	213
Problemas	215

19 Fuerza magnética.....218

Fuerza magnética sobre una carga eléctrica en movimiento	218
Módulo de la fuerza magnética.....	218
Dirección de la fuerza magnética.....	219
Sentido de la fuerza magnética	220
Definición de la unidad Tesla	220

Movimiento de un cuerpo cargado en una región donde existe un campo magnético uniforme. 223

Primer situación $v = 0$ $\frac{m}{s}$	223
Segunda situación. \vec{v} forma un ángulo de 0° o 180° con \vec{B}	223
Tercer situación. \vec{v} forma un ángulo de 90° con \vec{B} ..	223
Cuarta situación \vec{v} forma un ángulo diferente de 0° , 90° y 180° con \vec{B}	224

Aplicaciones	224
Selector de velocidades.....	224
Espectrógrafo de masas.	225

Fuerza magnética sobre un conductor recto por el que circula corriente y se encuentra dentro de un campo magnético. 226

Regla de la mano izquierda:	227
-----------------------------------	-----

Interacción entre conductores paralelos. 229

Fuerza magnética por unidad de longitud.	231
---	-----

Aplicaciones: motor eléctrico..... 232

Preguntas	233
Problemas	235

20 Inducción electromagnética238

Experimentos de Michael Faraday.....	238
Corrientes inducidas.....	239
Flujo magnético.....	240
Vector superficie \vec{S}	241
Cálculo del flujo magnético	241
Unidades de flujo magnético.	241
Ley de Faraday.....	242
Ley de Lenz.	245
Aplicación de la Ley de Faraday: transformadores.	248

Preguntas	249
Problemas.....	250

UNIDAD 3 252

21 Ondas electromagnéticas.....254

Ondas electromagnéticas	254
El espectro electromagnético.....	255
Aplicaciones	256
Preguntas	257
Problemas.....	257

22 Efecto fotoeléctrico, fotones.....258

Efecto fotoeléctrico.....	258
La crisis del modelo ondulatorio.....	260
Aportes de Einstein.	261
Interpretación de Einstein del efecto fotoeléctrico.	261
¿Qué es la luz entonces?	264
Preguntas	264
Problemas.....	265

UNIDAD 4 266

23 ¿Cómo hacer un proyecto?268

Metodología de trabajo.	269
Conclusiones.....	271
Presentación final.....	271
Autoevaluación.....	271
Ficha de evaluación del proyecto.....	272
Bibliografía	273
Otros temas que pueden resultarte interesantes:	273
Seis principios del aprendizaje por proyectos	274
Estándares intelectuales universales	276

unidad 1



La luz



Reflexión de la luz



Refracción de la luz



Espejos



Prismas y lentes



Ondas, pulsos



Ondas periódicas en una dimensión



Ondas en dos dimensiones



Difracción e interferencia de la luz

la luz rayos y ondas



unidad 2



Electrostática



Corriente eléctrica



Resistencia eléctrica



Potencia eléctrica



Circuitos eléctricos



Generadores



Circuitos lógicos



Campo magnético



Campo magnético generado por corrientes



Fuerza magnética



Inducción electromagnética

la carga eléctrica corrientes y campos



unidad 3



Ondas electromagnéticas

Ondas electromagnéticas

El espectro electromagnético

Aplicaciones

Efecto fotoeléctrico, fotones

Efecto fotoeléctrico

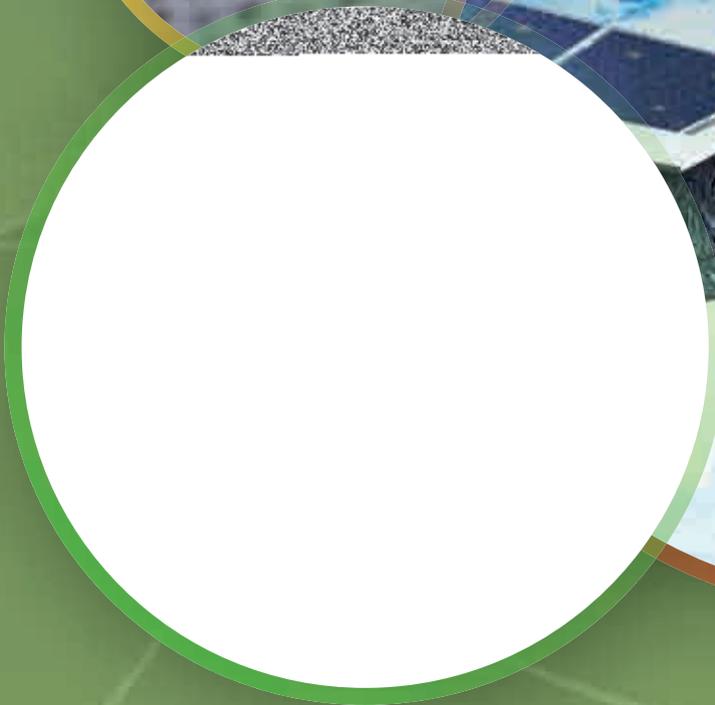
La crisis del modelo ondulatorio

Aportes de Einstein

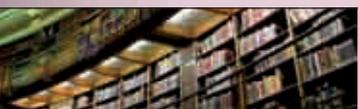
Interpretación de Einstein del efecto fotoeléctrico

¿Qué es la luz entonces?

ondas electromagnéticas y fotones



unidad 4



¿Cómo hacer un proyecto?

Metodología de trabajo

Ficha de evaluación del proyecto

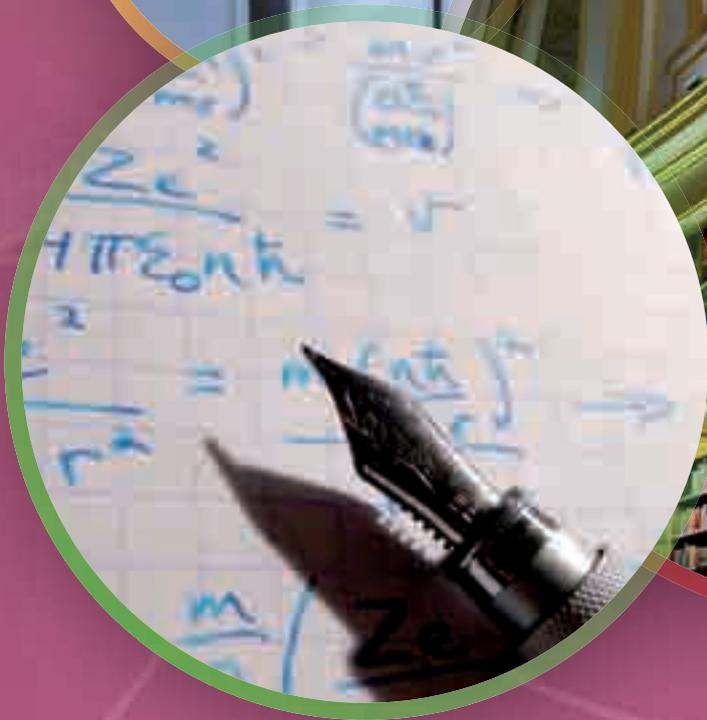
Bibliografía

Otros temas que pueden resultarte interesantes

Seis principios del aprendizaje por proyectos

Estándares intelectuales universales

proyecto



capítulo 1 la luz



Introducción

Mucho tiempo y esfuerzo le llevó a la humanidad tratar de entender su naturaleza y buscar la respuesta a la gran interrogante: **¿qué es la luz?** Aunque sabemos bastante acerca de este fenómeno gracias a la labor de numerosos científicos a lo largo de la historia, todavía queda mucho por descubrir. En estos capítulos estudiaremos algunas propiedades de la luz, sus aplicaciones, y la evolución de las ideas científicas sobre ella.

Cuando enciendes el televisor, miles de puntos luminosos se combinan para formar una imagen, la que vemos gracias a nuestros maravillosos ojos. En un reproductor de CD o DVD un laser recorre los surcos "leyendo" la información almacenada. En el supermercado, un lector óptico de códigos de barras, relaciona velozmente el producto con su precio. Líneas de fibra óptica unen continentes llevando información de un lado a otro utilizando señales de luz. Podríamos seguir describiendo otras aplicaciones de la luz y la lista sería muy extensa. Nos gustaría que este fuera el puntapié inicial para tus estudios en un área tan fascinante como es la Óptica.



Fig. 1. Luz reflejada en un CD.

La Física y los Modelos en la Historia

La rama de la Física que se dedica a estudiar el comportamiento de la luz, es la Óptica. Al igual que todas las demás ciencias, evolucionó lenta y progresivamente, hasta llegar a ser lo que es hoy en día. Para interpretar los fenómenos luminosos a lo largo de la Historia, los científicos han planteado diversas teorías, fundamentadas, organizadas y estructuradas de tal forma, que constituyen lo que llamamos un "modelo".

Modelos Organicistas

Las primeras explicaciones científicas sobre la naturaleza del mundo físico, se basaban en analogías con el funcionamiento de los seres vivos, atribuyendo a los objetos propiedades de los mismos. Un ejemplo de explicación organicista en el fenómeno de la visión sería: "los objetos se tornan visibles al ser alcanzados por rayos luminosos emitidos desde los ojos, como si fueran tentáculos". Al conjunto de teorías elaboradas según esta idea, se les denomina Modelos Organicistas. Se destacan los aportes de **Demócrito** (Fig. 2), **Aristóteles** (Fig. 3), **Epicuro** (Fig. 4) y **Lucrecio** (Fig. 5),



Fig. 2. Demócrito. Grecia 470/460 al 370/360 a.C.

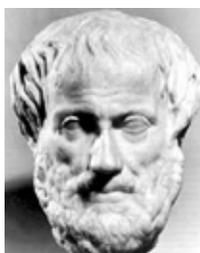


Fig. 3. Aristóteles. Grecia 384 a.C.-322 a.C.

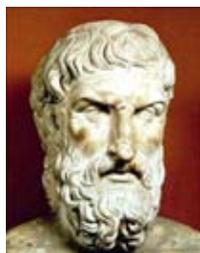


Fig. 4. Epicuro. Grecia 341 a.C. -270 a.C.



Fig. 5. Lucrecio. Roma 99 a.C. - 55 a.C.

quienes sostenían que los rayos de luz pasan del objeto al ojo, mientras **Euclides** (Fig. 6), **Empédocles** (Fig. 7) y **Tolomeo** afirmaban lo opuesto, que la propagación de los rayos de luz era desde el ojo hacia el objeto.

Modelos Mecanicistas

En una etapa posterior de la Ciencia, los científicos dejan de asignar "voluntad" o "vida" a los objetos y se dedican a describir los fenómenos e interpretarlos en función de conceptos como masa, velocidad, y otras magnitudes medibles. Al conjunto de teorías que intentaban explicar la naturaleza de este modo, se les denomina Modelos Mecanicistas, siendo **Sir Isaac Newton** el gran responsable de los logros de esta concepción de la ciencia.

A modo de ejemplo, Lord Kelvin (Fig. 8) decía:

"Nunca estoy satisfecho hasta que consigo el modelo mecánico de una cosa. Si puedo construir un modelo mecánico, entiendo el fenómeno".

Una descripción mecanicista de los fenómenos luminosos sería, considerar la luz como partículas que se mueven con cierta velocidad, e interactúan con el medio, chocan, se desvían.

Esta concepción de la Física ha posibilitado enormes progresos, pero no siempre lleva a una explicación adecuada al estudiar fenómenos más complejos, donde se hacen necesarios conceptos más abstractos como la idea de "campo" y de "onda".

Modelos conceptuales

En la actualidad la Física trata de dar explicaciones en base a esquemas conceptuales más o menos complejos, expresados en gran medida en términos matemáticos. Aparecen conceptos como "Relatividad", "Espacio-tiempo", "Cuantización", y ya no es tan sencilla su representación gráfica. La propagación de la luz pasa a ser explicada mediante campos eléctricos y magnéticos variables que viajan en forma de onda, incluso a través del vacío.

Al avanzar en el estudio de las propiedades de la luz, iremos viendo los argumentos sostenidos por los defensores de **las dos teorías** más importantes sobre su propagación:

- **la que considera a la luz como una partícula material**, denominado **Modelo Corpuscular**.
- **la que considera a la luz como una onda**, denominado **Modelo Ondulatorio**.

El debate entre estos dos modelos fue una de las discusiones más interesantes de la historia de la ciencia. Los defensores más importantes de la teoría ondulatoria fueron **Christian Huygens**, **Robert Hooke** (Fig. 9) y **Thomas Young** (Fig. 10), mientras que **Isaac Newton** (Fig. 11) fue el representante más destacado de la teoría corpuscular.



Fig. 6. Euclides, Grecia
300 - 325 a.C - 265 a.C.



Fig. 7. Empédocles, Grecia
495/490 - 435/430 a.C.



Fig. 8. William Thomson, Primer barón de Kelvin, Irlanda
1824 -1907



Fig. 9. Robert Hooke,
Inglaterra 1635 - 1703



Fig. 10. Thomas Young,
Inglaterra 1773 - 1829



Fig. 11. Isaac Newton, Inglaterra 1643-1727



Fig. 12. Fogata en estufa a leña.

Modelo Corpuscular versus Modelo Ondulatorio

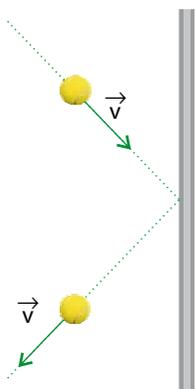
Estos modelos se han considerado antagónicos, sin embargo, en la actualidad se ha llegado a una situación que en ciertos aspectos engloba ambas concepciones. Las ideas que han surgido en este campo, además de interpretar todos los fenómenos luminosos, han abierto un nuevo panorama en la interpretación del mundo físico.

En este capítulo y en los próximos seguiremos haciendo referencia a este debate, a medida que estudiamos las propiedades de rayos de luz y ondas.

Hasta el siglo XVII, se creía que la luz estaba formada por corpúsculos que eran emitidos por los focos luminosos, tales como el sol o la llama de una hermosa fogata (Fig. 12). Estos corpúsculos viajaban en línea recta y atravesaban los objetos transparentes pero no los opacos, excitando el sentido de la vista al penetrar en el ojo. Esta idea era sostenida por Isaac Newton. Con ella pudo explicar las leyes de la reflexión y de la refracción (fenómenos que estudiaremos más adelante) aunque con algunas fallas.

A mediados de dicho siglo, empezó a abrirse paso una nueva teoría, la que sostenía que en realidad la luz se trataba de algún tipo de fenómeno ondulatorio. El padre de dicha teoría fue el físico holandés **Christian Huygens** (Fig. 13), que sostenía que la luz era una vibración (semejante al sonido Fig. 14) y que se propaga utilizando un soporte material que llamó éter (luego veremos que la luz, a diferencia del sonido, se propaga aún en el vacío).

Si bien logró explicar fácilmente la reflexión y refracción con esta teoría, no pudo hacerlo de la misma forma con la propagación rectilínea. El sonido "rodea" obstáculos mientras que la luz no. La gran reputación de Newton, también influyó para que las ideas de Huygens sobre la naturaleza ondulatoria de la luz, no fueron aceptadas por la mayoría de sus contemporáneos. Además un fenómeno característico de las ondas es la interferencia (Fig. 15), que no podía ser observada en la luz, con los medios de esa época, fortaleciendo de este modo la teoría corpuscular. De todas formas en 1678 publica "Traité de la lumière", primer intento de desarrollar una teoría ondulatoria de la luz.



La luz se refleja en un espejo como una pelotita de goma rebota en una pared



Fig. 13. Christiaan Huygens, Holanda. 1629 -1695

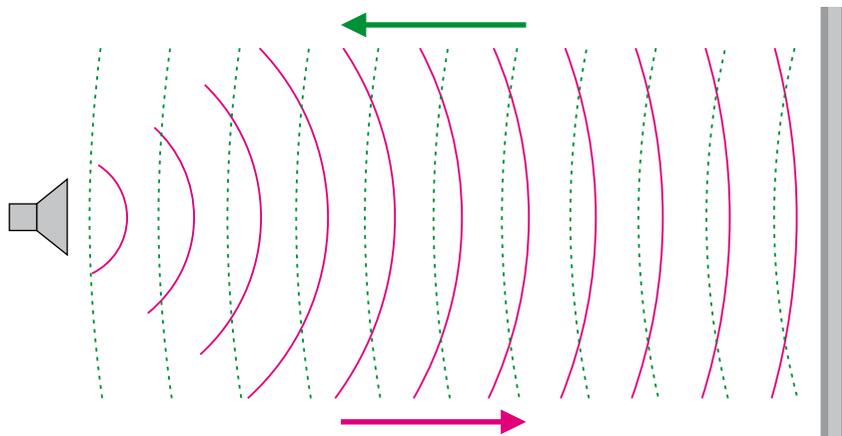


Fig. 14. La luz se refleja en un espejo como el sonido se refleja en una pared, originando un eco.

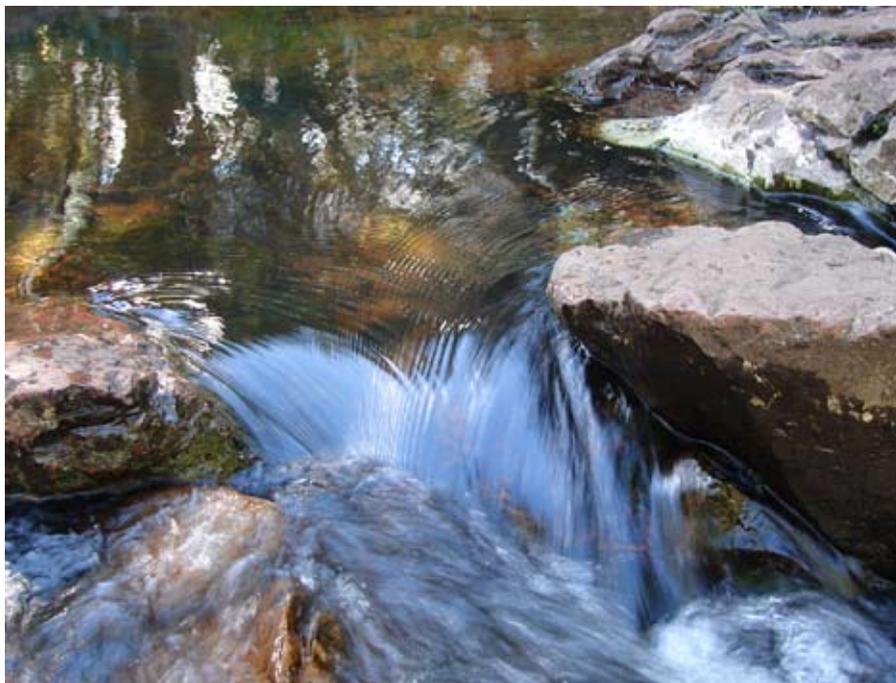


Fig. 15. Interferencia de ondas en el agua

Un siglo más adelante, un médico inglés, de nombre **Thomas Young** realizó una célebre experiencia que lleva su nombre. Encontró que si dejaba pasar luz de un solo color que procedía de una única fuente, a través de dos pequeñas rendijas muy próximas, se formaban unas bandas brillantes que alternaban con otras más oscuras. (Fig. 16). De esa forma demostró que el fenómeno de interferencia también ocurría para la luz. Basándose en este experimento (que hoy puedes realizar fácilmente en el laboratorio de tu centro de estudios), construyó un sólido argumento a favor de la **naturaleza ondulatoria de la luz**.

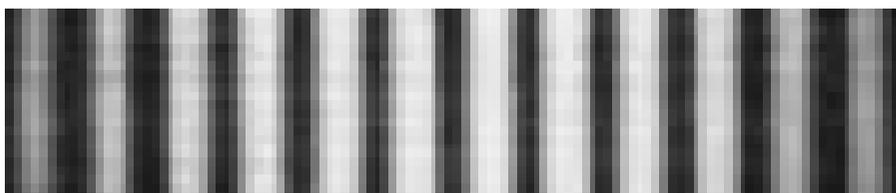
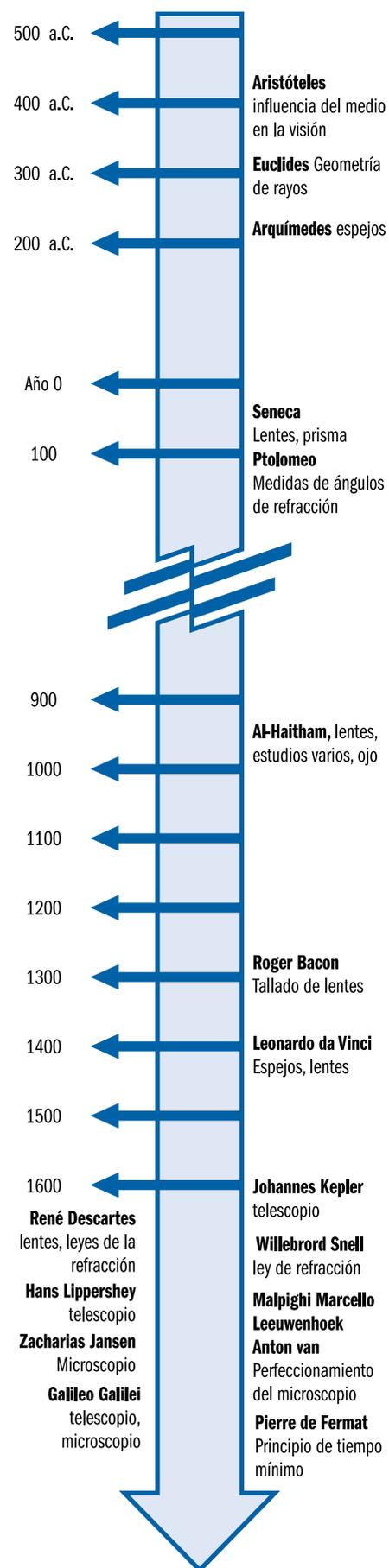


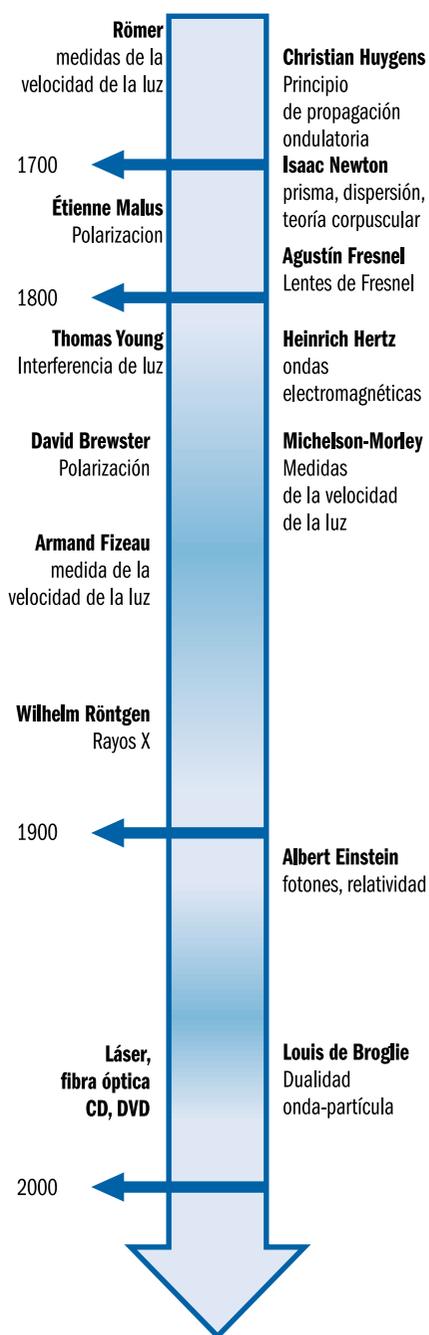
Fig. 16. Interferencia luminosa.

Los aportes de los científicos en la antigüedad.

Para llegar a la elaboración de los modelos descritos anteriormente, fueron necesarios siglos de estudios e investigaciones por parte de grandes científicos. Trataremos de brindarte una apretada síntesis de los trabajos de algunos de ellos, para que tengas más elementos acerca de cómo fue la evolución del conocimiento en esta área.

Las nociones que se tenían de la Óptica en la antigüedad, no se conocen con mucha precisión. En los restos de antiguas civilizaciones, se encontraron objetos que nos dan una idea de los intereses de los hombres por los fenómenos ópticos.





En hallazgos arqueológicos, como en tumbas egipcias, se encontraron restos de espejos metálicos que probablemente servían para desviar los rayos del sol. Se utilizaban como objetos sagrados para encender el fuego. Las lentes convergentes, (que veremos más adelante) fueron usadas como lupas desde tiempos muy remotos, las utilizaron para hacer las pequeñas inscripciones en objetos hallados en las esfinges.

En el **siglo XV** antes de Cristo, aparecen los primeros objetos artísticos de vidrio, tecnología previa necesaria para el desarrollo de las lentes. En el **siglo V a. C.** los griegos, romanos, árabes... conocían las propiedades de los espejos y utilizaban lentes de vidrio o de agua para concentrar rayos de sol y encender fuego, como la construida por **Aristófanes** en el año 424 a. C. con un globo de vidrio soplado, lleno de agua.

En la antigua Grecia, **Euclides** (recuerda que lo mencionamos dentro de los modelos organicistas como uno de los autores que consideraban a la luz como un tentáculo lanzado desde el ojo hasta el objeto) realiza observaciones geométricas muy importantes relacionadas con la propagación rectilínea de la luz.

Aristóteles (Nace 384- Muere 322 a.C. Filósofo Griego) toma distancia de la discusión entre pitagóricos y platónicos sobre si la visión es originada por la emisión o la recepción de imágenes. Sostenía que el medio existente entre el objeto y el ojo desempeñaba un papel esencial, al activarse por la luminosidad del objeto, se vuelve transparente y permite a los distintos colores viajar hasta nuestros ojos.

Arquímedes (Nace 287 – Muere 212 a.C. Matemático e ingeniero Griego), según cuenta la tradición, defendió su ciudad natal, Siracusa, empleando espejos cóncavos de gran tamaño para concentrar los rayos del Sol en los barcos enemigos y quemar sus naves. La comunidad científica duda seriamente de la veracidad de esta leyenda.

Herón (siglo I a. C. Alejandría) mecánico y constructor de máquinas. Estudió ampliamente los espejos y planteó la idea de que el rayo de luz siempre sigue el camino más corto entre el objeto y el ojo. Esta idea fue recogida y reformulada por Fermat en el siglo XVIII.

Séneca (4 adC- 65 d.C.) fue el primero en mencionar la capacidad amplificadora de las lentes convergentes, al describir la imagen de los objetos vistos a través de un globo de vidrio lleno de agua. Además describe los colores que se ven a través de un prisma transparente, propiedad que volvió a estudiar Newton varios siglos más tarde.

Claudio Tolomeo (siglo II d.C. Alejandría), astrónomo griego que en su "Libro quinto de óptica" publicó medidas realizadas con mucha precisión de los ángulos de incidencia y refracción para diversos medios, aunque no logró formular las leyes correspondientes. Sostuvo que los rayos que llegan de las estrellas se desvían al ingresar al aire, por lo cual la posición observada difiere de la real.

Fundación de la óptica moderna.

En la **Edad Media** los árabes hicieron amplios estudios sobre óptica, gracias al gran interés de la medicina islámica en el estudio de las enfermedades de los ojos. Basados en la forma del cristalino de nuestro aparato ocular construyeron y emplearon lentes de cristal o de vidrio para ampliar la imagen y facilitar la lectura. En las lentes tenemos la primera prolongación del aparato ocular humano.

El científico árabe **Al-Hasan-Ibn-Al-Haytham**, (nacido en Basra en el año 965 en lo hoy es Irak- muerto en el Cairo en el año 1039) conocido en occidente como **Alhazen** es considerado el padre de óptica moderna. Entre sus aportes más trascendentes podemos mencionar la precisa descripción de las partes del ojo, la explicación del proceso de la visión, considerando que son los rayos luminosos los que van de los objetos al ojo, fabricación de lentes, estudio de sombras y eclipses. Construyó una **cámara oscura** (Fig. 17), que consiste en un cuarto o cajón oscuro que tiene en una de sus paredes un pequeño orificio. En la pared opuesta se forma una imagen invertida de los objetos exteriores. Este aparato es el antecesor de la moderna cámara fotográfica y puedes utilizarlo para observar de manera indirecta un eclipse de sol, sin afectar tus ojos.

Anticipó que la luz viaja con una velocidad finita y a pesar de haber escrito muchos libros, solo sobrevivió "**Opticae**", obra que tuvo gran influencia sobre Roger Bacon, Leonardo Da Vinci y en Johann Kepler.

Roger Bacon (Fig. 18). Nació en Ilchester Inglaterra en el año 1214 y murió en Oxford en 1294. Fraile franciscano, notoriamente influido por la escuela árabe, logra tallar en 1266 lentes para mejorar la lectura de las personas con problemas de visión. Tenían forma similar a una lenteja, de donde proviene el nombre **lente**. En su libro "Opus maius", Bacon describe las propiedades de una lente para amplificar la letra escrita. Resalta a la óptica como indispensable para el estudio de la naturaleza, al permitir a todos, acceder al conocimiento escrito y obtener su propia experiencia visual de los fenómenos.

Leonardo da Vinci (Fig. 19). Artista italiano nacido en Vinci, Toscana en 1452 y muerto en Francia en el 1519. Estudió la estructura y el funcionamiento del ojo y formuló una teoría de la visión, en la que comparaba el ojo a una cámara oscura. Dentro de su impresionante obra creativa, diseñó máquinas para tallar grandes espejos y fue el precursor de los lentes de contacto para corregir defectos de visión.

En los siglos **XVI y XVII**, en el nacimiento de la moderna ciencia experimental, la óptica tuvo un papel fundamental, especialmente con la aparición del telescopio (el más probable inventor fue el óptico holandés **Hans Lippershey**, fabricante de anteojos) y el microscopio (probablemente inventado por **Zacharias Jansen** holandés, 1588-1632).

Estos instrumentos permitieron ampliar los límites de la percepción visual, obteniendo así imágenes de objetos muy lejanos y muy pequeños; y contraponer evidencia científica a las especulaciones filosóficas o religiosas.

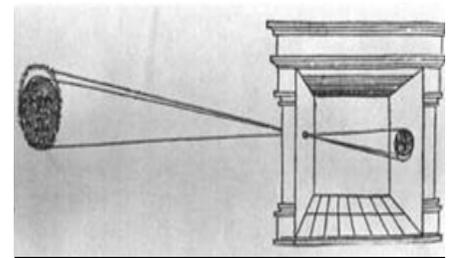


Fig. 17. Cámara oscura



Fig. 18. Estatua de Roger Bacon en el Museo de Historia Natural de Oxford

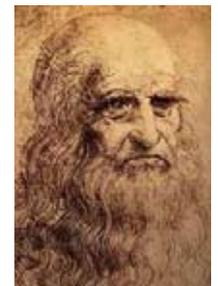


Fig. 19. Leonardo da Vinci



Fig. 20. Galileo Galilei.

Galileo Galilei. (Fig. 20). Astrónomo y Físico italiano nació en Pisa en el año 1564 y murió en Arcetri cerca de Florencia en el 1642. Fue quien realizó los primeros y revolucionarios estudios del cielo con un telescopio, construido de acuerdo al diseño de Lippershey, el cual perfeccionó llegando a 32 aumentos. El descubrimiento de los satélites de Júpiter y otras observaciones astronómicas, sirvieron de argumento en contra de la teoría geocéntrica. Esta ubicaba a la Tierra inmóvil en el centro del universo, mientras que el Sol, la Luna y demás cuerpos celestes giraban a su alrededor. El resultado de sus investigaciones lo llevó a ser enjuiciado por los tribunales de su época y ser condenado al aislamiento, además de obligarlo a retractarse públicamente.



Fig. 21. Johann Kepler

Johann Kepler. (Fig. 21). Astrónomo alemán, nació en Weil der Stadt en 1571 y murió en Ratisbona en el año 1630. Compiló y estudió minuciosas tablas de datos obtenidos por Tycho Brahe sobre el movimiento de los planetas, deduciendo a partir de ellas sus trascendentales leyes sobre el movimiento planetario. En el año 1611 publicó su obra "Dioptrice", texto fundamental para los estudiosos de la óptica durante muchos años. Kepler fue el primero que planteó que la imagen se forma en la retina, que esta imagen está invertida con relación al objeto y que el cerebro es el encargado de interpretarla adecuadamente.



Fig. 22. Willebrord Snell.

Willebrord Snell (Fig. 22). Matemático y astrónomo holandés, nació en Leiden en 1591 y falleció en 1626. Fue profesor en la universidad de su ciudad natal y se dedicó al estudio de la óptica geométrica. Repitiendo los experimentos de Tolomeo, Snell consiguió medir los ángulos de incidencia y de refracción para la superficie de separación de dos medios. A partir de tales mediciones, formuló la ley de la refracción, conocida hoy como **Ley de Snell**. La misma desempeñó un importantísimo papel en el desarrollo, tanto del cálculo para diseñar lentes e instrumentos ópticos, como de las teorías de propagación de la luz.



Fig. 23. René Descartes.

René Descartes (Fig. 23). Filósofo y matemático francés, nació en La Haye en 1596 y murió en Estocolmo, Suecia en el año 1650. Utilizando puntos de partida diferentes que Snell llegó a deducir la misma ley y la expresó de la manera que la conocemos en la actualidad. Construyó elementos ópticos y publicó un importante trabajo de nombre "La Dioptrique" donde aparece la idea de colocar una lente directamente en contacto con la córnea (lentes de contacto).



Fig. 24. Pierre de Fermat

Pierre de Fermat (Fig. 24). Matemático francés, nació en Beaumont de Lomagne en 1601 y falleció en Toulouse en 1665. A partir de un planteo similar al de Herón ("la luz se propaga siempre a lo largo de aquella trayectoria que le suponga el mínimo tiempo, incluso si para lograrlo tiene que desviarse del camino geoméricamente más corto") logró deducir la misma ley que Snell y Descartes. Este principio, en su forma más moderna es utilizado aún para estudiar fenómenos ópticos.

Marcello Malpighi. Médico italiano, nació en Crevalcore, cerca de Boloña en 1628 y murió en Roma en 1694 y **Leeuwenhoek Anton van,** Biólogo y microscopista holandés, nació en Delft en 1632 y falleció en la misma ciudad en 1723. Perfeccionaron el diseño y tallado de las lentes, logrando así observar microorganismos y glóbulos sanguíneos.

Robert Hooke. Físico inglés, nació en Freshwater en 1635 y murió en Londres en 1703. Construyó un microscopio compuesto en 1665, con él realizó cuidadosas observaciones que aparecen en su libro "Micrographia". Fue un gran defensor de la teoría ondulatoria de la luz, enfrentándose por ello a Isaac Newton.

Isaac Newton. Científico y matemático Inglés, nació en Woolsthorpe, Lincolnshire el 25 de diciembre de 1642 y murió en Londres el 20 de marzo de 1727. Además de sus contribuciones al modelo corpuscular, realizó un gran trabajo experimental sobre la descomposición de la luz al pasar por un prisma de cristal.

Benjamín Franklin (Fig. 25). Hombre de estado y científico americano, nació en Boston en 1706 y murió en Filadelfia en 1790. Se le atribuye la creación de las lentes bifocales, formadas por dos mitades de lentes: la de visión lejana y la de visión próxima montadas en un mismo aro.

Agustín Fresnel. Físico francés, nació en Broglie en 1788 y falleció en Ville-d'Ávray cerca de París en 1827. Realizó numerosos experimentos sobre interferencia y difracción y dio un gran avance a la teoría ondulatoria. Cortando una lente gruesa en anillos y montándolos como muestra el dibujo (Fig. 26) logró afinarla sensiblemente, disminuyendo su masa sin cambiar sus propiedades ópticas. Actualmente se utilizan para enfocar haces de luz potentes como las utilizadas en estudios cinematográficos o en faros (Fig. 27). La tecnología actual logró moldearlos en plástico llevando su espesor a 1mm.

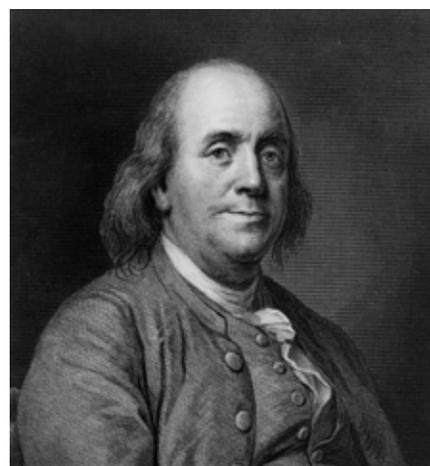


Fig. 25. Benjamín Franklin

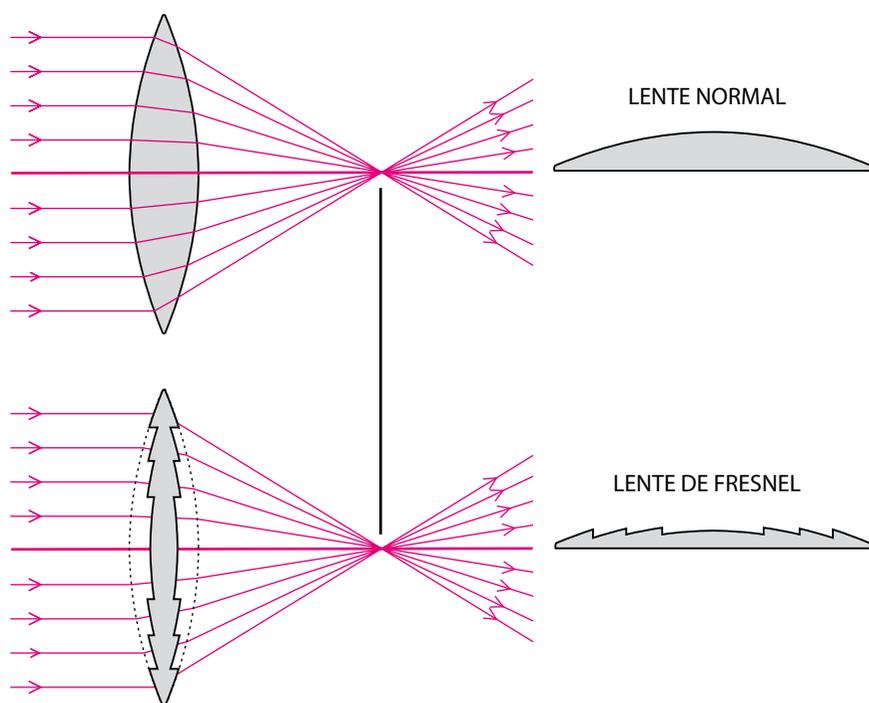


Fig. 26. Lentes de Fresnel. Un uso frecuente es en los retroproyectores.

Más adelante estudiaremos la obra relacionada con la luz de científicos más cercanos a nuestro tiempo.



Fig. 27. Lentes de Fresnel del faro de la Paloma. (Gentileza de la Prof. Gabriela Baccino).



Fig. 28. Fuentes de luz.

Fuentes de luz

En nuestra experiencia cotidiana nos encontramos con elementos que emiten luz y otros que no tienen luz propia y se tornan visibles al ser iluminados. Pondremos nuestra atención en los primeros que se denominan **“fuentes de luz”**. (Fig. 28). En el interior de éstos se dan procesos que transforman algún tipo de energía en energía luminosa. En el sol y el resto de las estrellas la luz se emite como resultado de reacciones nucleares. Una lamparita incandescente emite luz al aumentar la temperatura del filamento metálico, como resultado del pasaje de corriente eléctrica por dicho filamento.

Algunos peces de las profundidades oceánicas emiten luz. ¿Debido a qué te parece que esto ocurre?

A un cuerpo que emite luz y lo percibimos como un punto luminoso lo denominaremos **“fuente puntual”**. En la práctica una fuente extensa situada a mucha distancia puede ser considerada como puntual, por ejemplo una vela a algunos metros de distancia o cualquier estrella que no sea el sol.

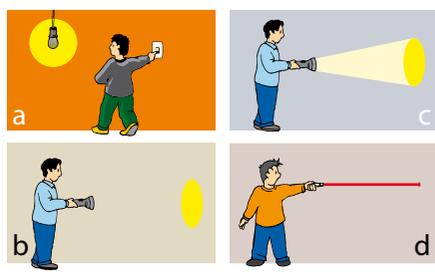


Fig. 29. Haces y rayos de luz

Rayos de luz

Cuando entras a una habitación a oscuras y enciendes una lámpara, la luz que ella emite ilumina la habitación de forma aparentemente instantánea. (Fig. 29 a) ¿Cómo se produce este fenómeno? Imagina ahora que entras a la habitación con una linterna, al encenderla observas que la luz no ilumina toda la habitación, sino que sobre la pared se dibuja un círculo luminoso. (Fig. 29 b). Si en el aire hay partículas de polvo o mucha humedad puedes observar un cono trunco de luz al que le llamaremos **haz de luz**. (Fig. 29 c). Si cambiamos la linterna por un laser, el haz es más fino. (Fig. 29 d). Imaginemos que pudiéramos obtener un haz aún más fino, obtendremos una recta luminosa a la que llamaremos **rayo de luz**. Utilizaremos esta idea de rayo para intentar explicar la propagación de la luz y sus propiedades. Lo que nos permitirá utilizar la geometría desarrollada por Euclides en su estudio.

Volviendo a la lámpara en la habitación a oscuras podemos decir que al encenderla, ésta emite rayos de luz en todas direcciones.

Propagación rectilínea

De las observaciones anteriores y de nuestra experiencia cotidiana parece bastante claro que la luz se propaga en línea recta. Esto solamente ocurre cuando el medio es **homogéneo**, es decir que todos sus puntos tienen idénticas propiedades (por ejemplo: presión, densidad, temperatura). La luz tampoco se mantiene en línea recta cuando pasa por un campo gravitatorio intenso, pero el estudio de este caso no será parte de nuestro curso.

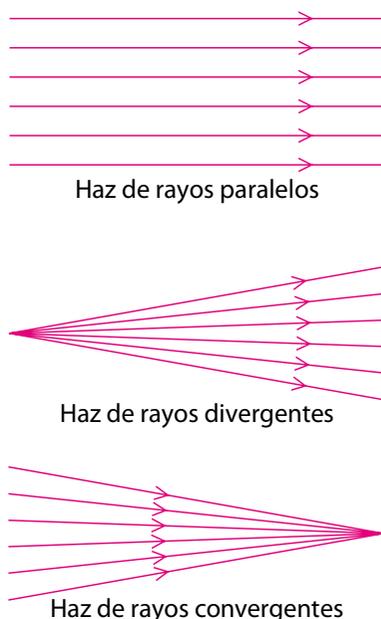
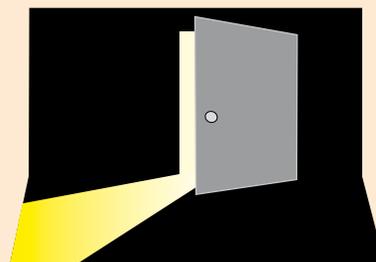


Fig. 30. Clasificación de rayos de acuerdo a su dirección.

Ejemplo N° 1

Tenemos dos habitaciones comunicadas por una puerta. Una habitación se encuentra a oscuras, la otra iluminada y la puerta está cerrada. Posteriormente se abre la puerta hasta la mitad.

Observa el piso y la pared de la habitación enfrente a la puerta que se encontraba a oscuras. ¿Qué ocurre con la oscuridad y con la luz?



Formación de sombras.

Cuando un haz de luz emitido por una fuente puntual ilumina un cuerpo opaco, detrás de él se observa una **sombra**. (Fig. 31)

Sombra: es una zona oscura a la que no llegan los rayos de luz.

Si colocamos una pantalla, en ella vemos la sombra, del cuerpo opaco.

Cuerpo opaco: es aquel que no es atravesado por un rayo de luz, como un trozo de madera.

Esta sombra queda delimitada por los rayos "límite", es decir aquellos que pasan por el borde del cuerpo. Trazando estos rayos podemos verificar que el tamaño de la sombra aumenta si alejamos la pantalla del cuerpo opaco. (Fig. 32). También logramos el mismo resultado si acercamos la fuente al cuerpo. (Fig. 33).

Si la fuente es extensa, se formará una zona de penumbra, a la que llegan algunos rayos de luz como muestra el dibujo.

Penumbra, zona donde la fuente lumínica sólo es bloqueada parcialmente y llegan algunos rayos de luz.

En los eclipses de sol se puede apreciar este fenómeno, donde la fuente extensa es el sol, el cuerpo opaco es la luna y la Tierra ocupa el lugar de la pantalla. (Fig. 35)

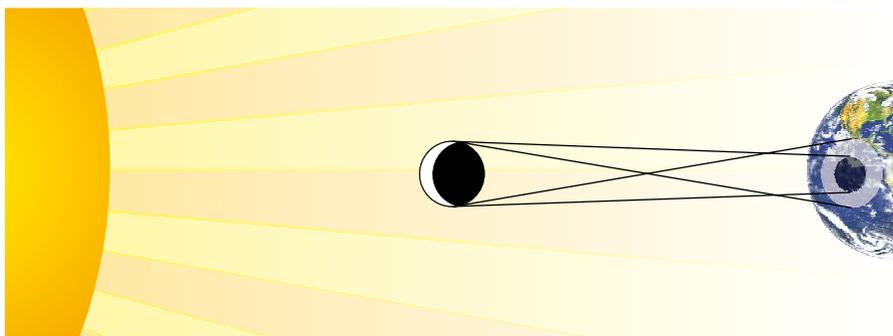


Fig. 35. Eclipse de Sol (el dibujo no está a escala).

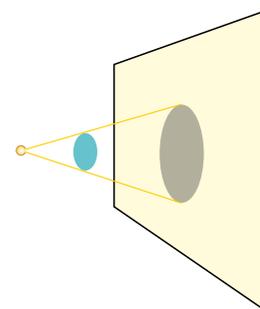


Fig. 31. Cuerpo opaco y su sombra.

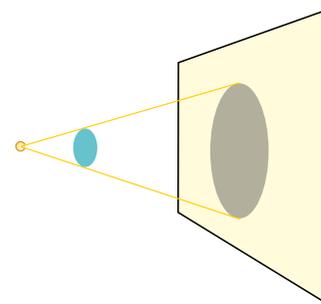


Fig. 32. Sombra aumentada por alejar la pantalla del cuerpo.

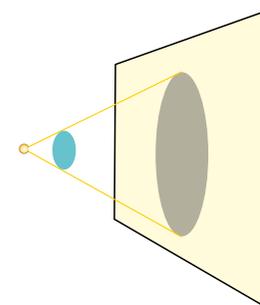


Fig. 33. Sombra aumentada por acercar la fuente al cuerpo.

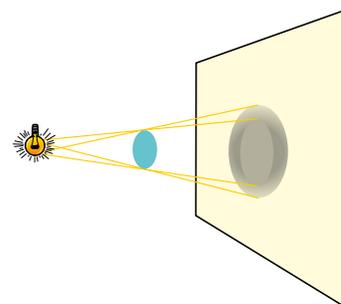


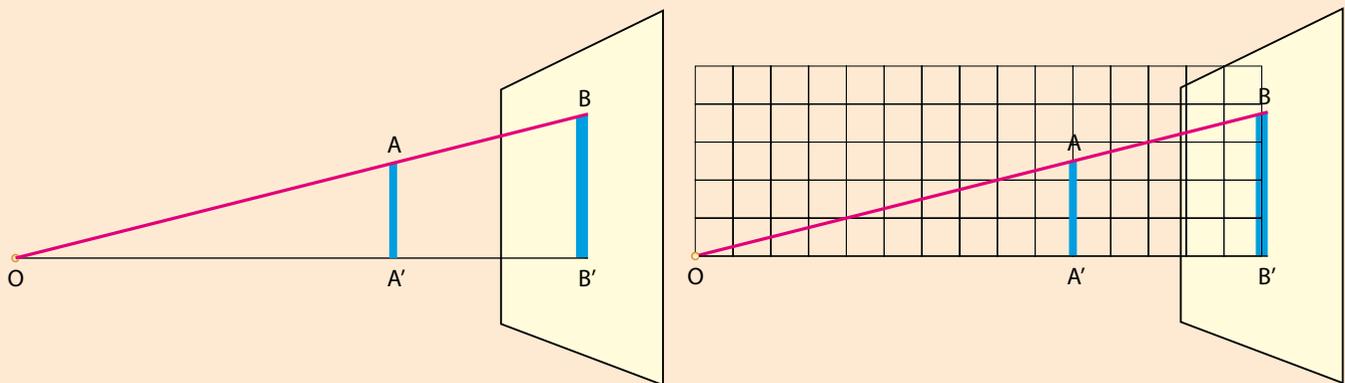
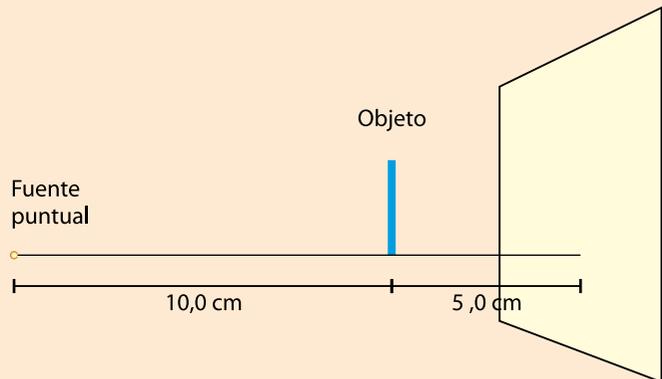
Fig. 34. Penumbra formada por una fuente extensa.

Ejemplo N° 2

Un objeto opaco de 2,5cm de altura se coloca entre una fuente luminosa puntual y una pantalla como se muestra en el dibujo. Determina el tamaño de su sombra.

a) Método gráfico: Para determinar el tamaño de la sombra realizaremos un diagrama a escala de la situación, y trazando los rayos que pasan por los extremos del cuerpo opaco (rayos límites) lograremos determinar el tamaño de la sombra. El dibujo está realizado a escala $\frac{1}{2}$, es decir que 1cm del dibujo representa 2cm reales.

En nuestro esquema la sombra quedó de 1,9cm de altura. Como el dibujo está a escala $\frac{1}{2}$, la sombra real mide el doble, 3,8cm.



b) Método analítico:

Los triángulos OAA' y OBB' son semejantes, por lo que se cumple la siguiente relación: $\frac{AA'}{OA'} = \frac{BB'}{OB'}$

Sustituyendo queda $\frac{2,5\text{cm}}{10,0\text{cm}} = \frac{BB'}{15,0\text{cm}}$ Despejamos BB' $\frac{15,0\text{cm} \times 2,5\text{cm}}{10,0\text{cm}} = BB'$ $3,75\text{ cm} = BB'$

Expresado con el adecuado número de cifras significativas

$$BB' = 3,8\text{ cm}$$

Velocidad de la luz.

Es bien notorio que la luz de un rayo (relámpago) llega a nosotros antes que su sonido (trueno). Esta diferencia es menor cuanto más cerca de nosotros caiga el rayo. Esto pone de manifiesto que el sonido viaja a una velocidad "finita" más lenta que la de la luz y que puede ser medida. Enciende una linterna e intenta medir el tiempo que demora el haz de luz en llegar a la pared. Parece llegar en forma instantánea. ¿Es así o la luz se propaga a una velocidad tan grande que es necesario utilizar distancias mayores para medirla? Esto fue objeto de investigaciones y de muchos experimentos por parte de grandes físicos.

El intento de Galileo

Galileo Galilei propuso en 1638 un método para determinar experimentalmente la velocidad de la luz. El mismo consistía en dos personas separadas cerca de 1,0 milla (1,6km), el primero destapaba una linterna a la vez que activaba un reloj. El segundo, al ver la luz del primero, destapaba su linterna. El primero, al ver la luz emitida por el segundo, detenía el reloj. (Fig. 36). De esta manera pretendía calcular la velocidad de la luz como el cociente entre dos veces la distancia entre las personas y el tiempo registrado por el reloj. Años más tarde, cuando se puso en práctica su idea, no se obtuvieron buenos resultados. Quedó claro que si la luz no se propagaba con velocidad infinita, se propagaba con una velocidad muy grande, que sólo podía medirse utilizando distancias de orden astronómico.



Fig. 36 Experimento propuesto por Galileo para medir la velocidad de la luz.

El aporte de Römer

Olaus Römer, astrónomo danés, nacido en Aarhus en 1644 y fallecido en Copenhague en 1710, logró demostrar que la velocidad de la luz era finita. Midió cuidadosamente el tiempo que transcurría entre dos eclipses consecutivos de la luna más brillante de Júpiter "Io". Encontró pequeñas variaciones en esta medida. Si la distancia Tierra-Júpiter estaba aumentando, este tiempo era más grande que si esta distancia estaba disminuyendo. En la figura 37 podemos ver una línea de tiempo en la cual aparecen marcados en negro los instantes en que lo debería comenzar a esconderse detrás de Júpiter y en color los instantes en que efectivamente se observó. Las diferencias se deben a que la luz emitida por "Io" demora más en llegar a la Tierra cuando ésta se encuentra más alejada de Júpiter.

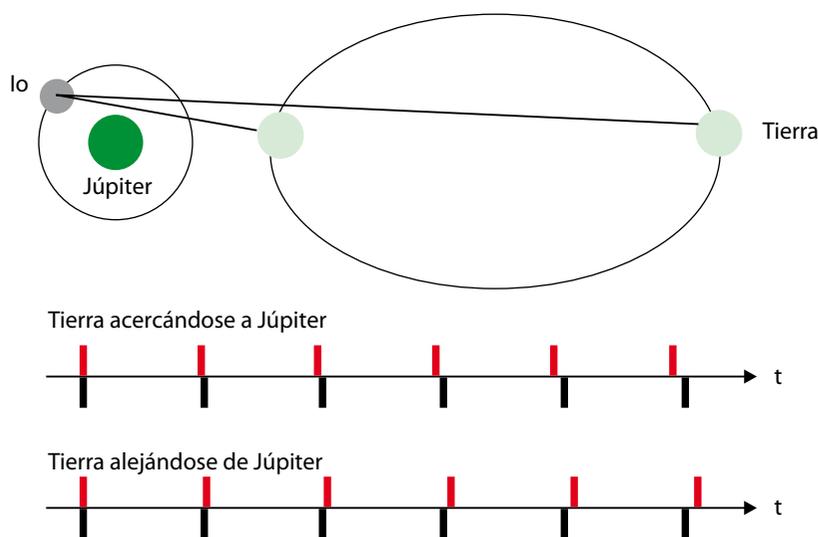


Fig. 37. La luz emitida por "Io" demora más en llegar a la Tierra cuando ésta se encuentra más alejada de Júpiter.

Cálculos posteriores basados en su planteo dieron un valor cercano a los $220.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ para la velocidad de la luz, un valor próximo al actualmente aceptado.

Primeras medidas en distancias “cortas”.

Fizeau Armand Hippolyte Louis, físico francés, nacido en París en 1819 y fallecido en Venteuil en 1896. Fue el primero en obtener medidas confiables de la velocidad de la luz realizando experimentos en distancias “cortas” (cerca de 16km) en el año 1849. La parte esencial de su dispositivo era una rueda dentada giratoria (Fig. 38). La luz pasaba por una de las rendijas, se reflejaba en el espejo y en su viaje de vuelta debía pasar por la rendija

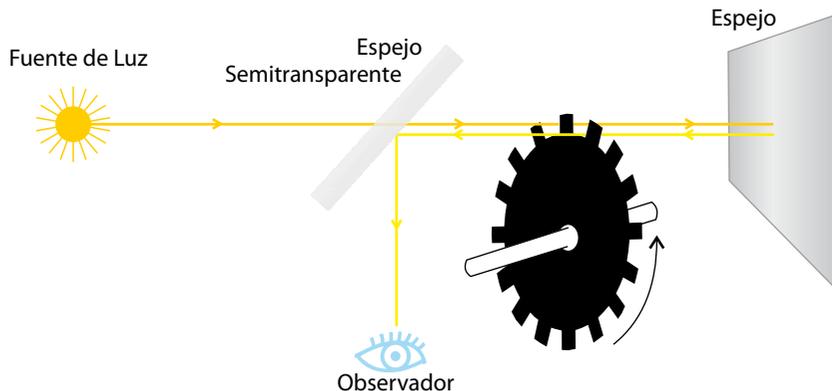


Fig. 38. Rueda dentada de Fizeau.

**La luz recorre
300.000 Km
en 1 segundo**

$$c = 3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Si redondeamos la distancia de Montevideo a Rivera en 500 km. La luz realiza **300 viajes de ida y vuelta en 1 segundo.** ¡Qué maravilla!

siguiente para ser observada. Para que esto suceda la rueda dentada debía girar a cierta velocidad (bastante grande, por cierto). Con la distancia de la rueda dentada al espejo y sabiendo la velocidad de giro y la cantidad de rendijas de la rueda, Fizeau obtuvo el valor $313.000 \frac{Km}{s}$. El método de Fizeau fue perfeccionado por Cornu, también francés. Posteriormente Jean Bernard Foucault, físico francés nacido en París en 1819 y muerto en 1868, reemplazó el disco dentado por un espejo giratorio obteniendo medidas muy precisas. Michelson Albert Abraham, polaco-americano nacido en Strelno en 1852, muerto en California en 1931, mejoró aún más las medidas, obteniendo en 1932 el resultado de $2,9977 \times 10^8 \frac{m}{s}$. El valor aceptado hoy en día es de $2,997925 \times 10^8 \frac{m}{s}$.

En nuestro curso utilizaremos $3,0 \times 10^8 \frac{m}{s}$ si trabajamos con dos cifras significativas o $3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}$ si trabajamos con tres.

La velocidad de la luz por ser un valor constante y tan importante para la Física, se representa con la letra “c” minúscula.

$$v_{Luz} = c$$

PREGUNTAS

- 1) Explica con tus palabras qué es un modelo para la ciencia.
- 2) La frase: “La luz se propaga como pequeñas esferitas de goma moviéndose en conjunto cuya velocidad depende del medio en el que se mueven” ¿a qué tipo de modelo corresponde?
- 3) De acuerdo a lo que hemos visto hasta ahora: ¿qué fenómeno relacionado con la luz no puede explicar satisfactoriamente el modelo ondulatorio?

- 4) ¿Qué nacionalidades predominan entre los científicos mencionados en el desarrollo histórico de las teorías sobre la luz? ¿Hay muchos americanos? ¿Por qué te parece que ocurre esto?
- 5) Observaste que todas las imágenes de los científicos son reproducciones de pinturas o esculturas y no fotografías.
¿A qué atribuyes esto?
- 6) Describe un experimento exitoso para medir la velocidad de propagación de la luz.
- 7) ¿La Tierra es una fuente de luz? Argumenta tu respuesta.
- 8) ¿El sol es una fuente de luz puntual? Argumenta tu respuesta
- 9) Algunos astrónomos dicen que mirando las estrellas lejanas están mirando el pasado del universo, ¿por qué?
- 10) ¿Qué es una zona de sombra? ¿Y de penumbra?
- 11) ¿Por qué la existencia de los eclipses verifica la propagación rectilínea de la luz?. Piensa en otras situaciones cotidianas donde también se verifique.

PROBLEMAS

- 1) Determina utilizando un diagrama de rayos, la altura de la sombra del cuerpo opaco cuya altura es 20cm (Fig. 39). Considera puntual la fuente de luz. Verifica tus resultados haciendo cálculos.
- 2) Si colocamos un cuadrado opaco entre una lámpara y una pantalla como muestra el dibujo de la figura 40, en esta última aparece la sombra del cuadrado. Explica para cada uno de los siguientes casos qué cambio sufre la sombra.
Justifica realizando un diagrama de rayos.
 - a. acerco el cuadrado a la lámpara
 - b. alejo el cuadrado de la lámpara
 - c. giro 60° el cuadrado
 - d. giro 90° el cuadrado
 - e. acerco la pantalla al cuadrado
 - f. alejo la pantalla del cuadrado
- 3) Un foco azul y uno rojo iluminan un rectángulo opaco, y la luz se recoge en una pantalla como muestra el dibujo de la figura 41. Determina gráficamente:
 - a) La zona a la que no llegan rayos de luz
 - b) La zona a la que sólo llegan rayos de luz roja
 - c) La zona a la que sólo llegan rayos de luz azul
 - d) La zona a la que llegan rayos de ambos colores.
- 4) Un año luz es una medida de distancia utilizada en Astronomía, y corresponde al recorrido de la luz en un año.
¿A cuántos metros equivale un año luz?
- 5) Suponiendo que las dos personas en el experimento de Galileo estuvieran ubicadas a 1,60km de distancia. ¿Cuánto demoraría la luz en realizar el viaje de ida y vuelta?

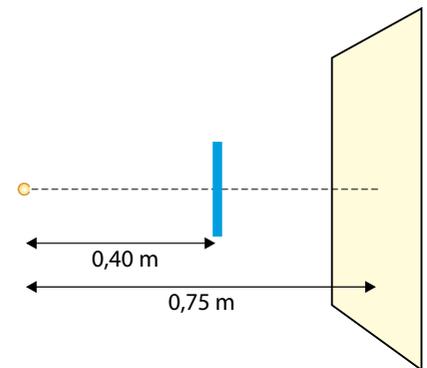


Fig. 39. Problema N° 1.

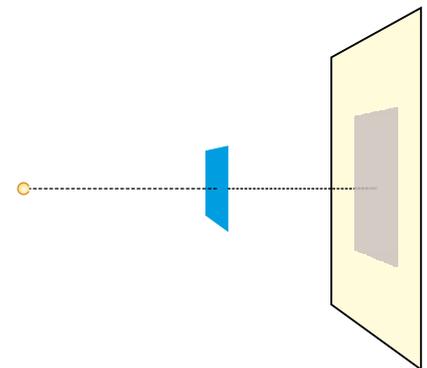


Fig. 40. Problema N° 2.

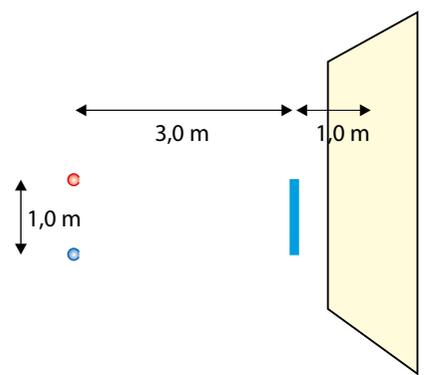


Fig. 41. Problema N° 3.

Reflexión de la luz



Ya vimos que la luz se propaga en línea recta cuando viaja por un medio homogéneo. Cuando ésta incide sobre un cuerpo opaco, parte de la luz, se refleja o sea regresa al mismo medio (reflexión). Parte puede ser absorbida.

Toda la luz se genera en alguna fuente de energía, pero la mayoría de la que llega a nuestros ojos proviene de luz reflejada. Alcanza encender una lámpara en una habitación para poder ver todos los objetos que hay en la misma, y éstos no son fuentes de luz, sino que reflejan la que proviene de la lámpara. Gracias a la reflexión podemos observar la luna, mirarnos en un espejo o enviar información por fibra óptica.

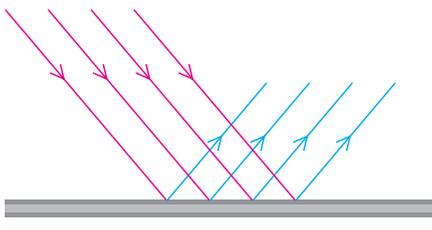


Fig. 1. Reflexión especular.

Reflexión es el cambio de dirección que experimenta la luz cuando incide en una superficie que separa dos medios, volviendo al mismo medio por donde viajaba.

La reflexión la podemos clasificar en especular y difusa, dependiendo de las características de la superficie donde se produzca.

Reflexión especular.

Si un haz de rayos paralelos incide en una superficie lisa o pulida y se obtiene un haz reflejado que también es paralelo, la reflexión es especular. (Fig. 1). Estas superficies se llaman generalmente espejos.

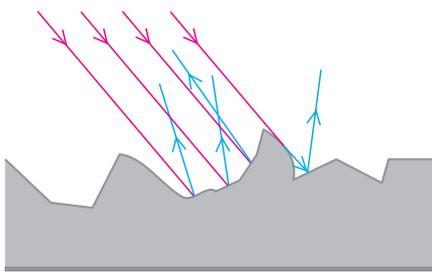


Fig. 2. Reflexión difusa.

Reflexión difusa.

Si el haz que incide es paralelo, pero los rayos reflejados no lo son entonces la reflexión es difusa. Esto sucede en superficies irregulares. (Fig. 2). Casi todos los objetos reflejan difusamente la luz, lo que nos permite verlos, independientemente de la posición que ocupemos con respecto a ellos.

Leyes de la reflexión.

A continuación definiremos términos muy importantes, los cuales deberás tener claro desde el comienzo para comprender con claridad las leyes de la reflexión.

Suponemos que alguna vez te habrás preguntado:

¿Por qué los profesores de Dibujo te enseñaron a utilizar la parte áspera de la hoja de garbanzo y no la lisa?

¡En la reflexión difusa está la respuesta!

Denominaremos :

- **Rayo incidente**, al rayo que incide sobre la superficie donde se refleja. Lo representaremos de la siguiente manera \mathbf{r}_i . (Fig. 3)
- **Rayo reflejado**, al rayo que surge de la reflexión del rayo incidente. Lo escribiremos de la siguiente forma \mathbf{r}_r .
- **Punto de incidencia**, al punto de la superficie donde entra en contacto el rayo incidente. (P_i)
- **Normal**, a la recta perpendicular a la superficie que pasa por el punto de incidencia. La representamos con la letra N.
- **Ángulo de incidencia o ángulo incidente**, al ángulo formado entre el rayo incidente y la normal. Se representa \hat{i} .
- **Ángulo de reflexión o ángulo reflejado**, al ángulo formado entre la normal y el rayo reflejado. Se representa \hat{r} .

Las leyes de la reflexión son dos y sus enunciados son los siguientes:

Primera Ley de la Reflexión

El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado pertenecen a un mismo plano.

Segunda Ley de la Reflexión

El ángulo de incidencia y el ángulo reflejado son iguales.

$$\hat{i} = \hat{r}$$

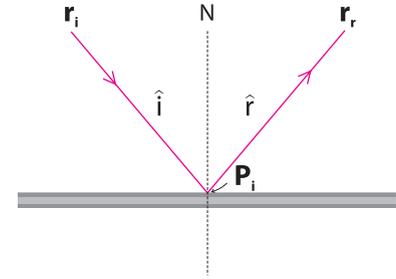


Fig. 3. Reflexión de la luz en una superficie pulida.

Normal significa perpendicular.



Ejemplo N° 1

Un rayo de luz incide sobre un par de espejos planos unidos en un vértice como muestra la figura 4. Dibuja la trayectoria del rayo al reflejarse en ambas superficies.

Primera reflexión: El rayo incidente forma un ángulo de 20° con la superficie del primer espejo plano. Como el ángulo de incidencia se mide con respecto a la recta normal, este ángulo es 70° ($90^\circ - 20^\circ = 70^\circ$). Utilizando las leyes ya estudiadas podemos asegurar que el ángulo de incidencia es igual al de reflexión, por lo que este último también es de 70° . Agreguémoslo al dibujo (figura 5).

Segunda reflexión: En el vértice de los espejos se forma un triángulo que analizaremos con más detalle (Fig. 6) Por lo tanto, el ángulo de incidencia para la segunda reflexión es de 50° . $90^\circ - \beta = 50^\circ$ (Fig. 7)

$$\hat{i}_2 = 50^\circ$$

Nuevamente aplicamos las leyes de la reflexión y tenemos que el nuevo ángulo de reflexión es de 50° (Fig. 8)

$$\hat{r}_2 = 50^\circ$$

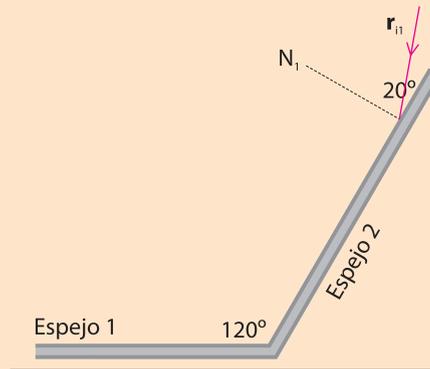


Fig. 4.

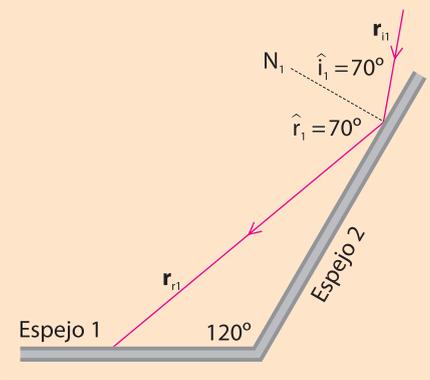


Fig. 5.

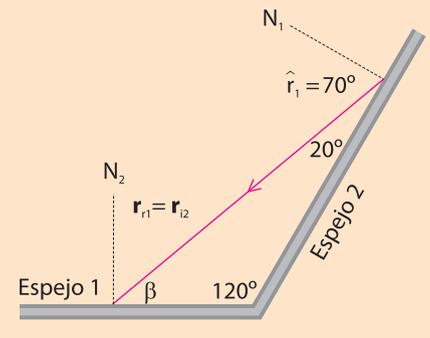


Fig. 6.

Aclaración.
Es importante observar que el rayo reflejado de la primera reflexión pasa a ser el rayo incidente en la segunda reflexión.

Recuerda que la suma de los ángulos de un triángulo debe ser 180° .
Entonces el ángulo β vale $180^\circ - (120^\circ + 20^\circ) = 40^\circ$
 $\beta = 40^\circ$

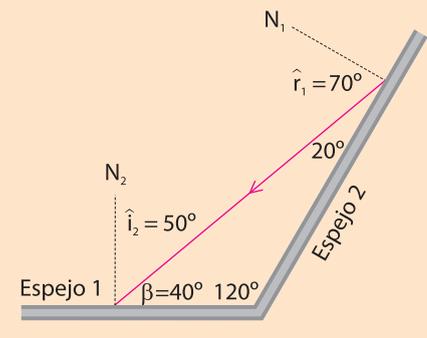


Fig. 7.

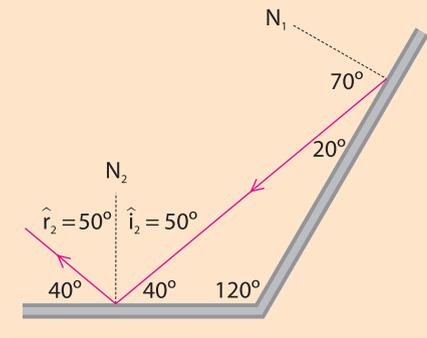


Fig. 8.

Resumiendo, la trayectoria del rayo al reflejarse en los dos espejos sería así. (Fig. 9)

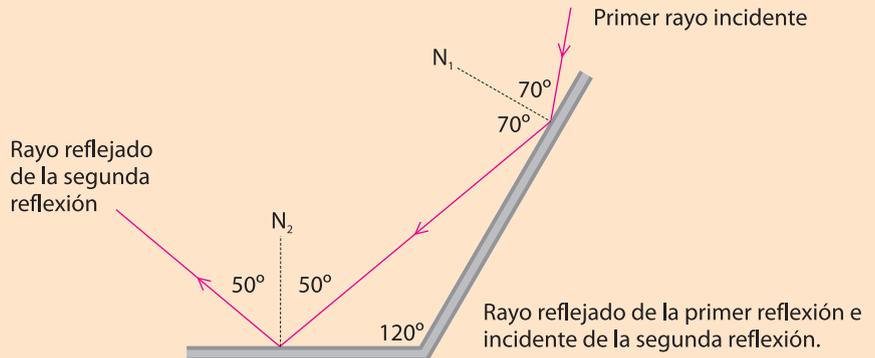


Fig. 9.

PREGUNTAS

- 1) ¿Por qué podemos ver los objetos?
- 2) ¿En qué consiste la reflexión especular de la luz? ¿Cuáles son las leyes que la rigen?
- 3) En un pizarrón de cármica ¿se produce reflexión difusa o especular? (piensa que todos los alumnos ven el pizarrón de cualquier punto de vista y a su vez a algunos les puede molestar el “reflejo”).
- 4) Menciona dos superficies en las que se produzca reflexión difusa y dos en las que se produzca reflexión especular.
- 5) Si un rayo incide en un espejo, ¿cuántas posibles direcciones puede tener el rayo reflejado?
- 6) ¿Por qué no conviene sacar fotos con flash frente a un espejo?



PROBLEMAS

- 1) Un rayo de luz incide sobre un espejo como muestra el dibujo de la figura 10. Indica los valores de α y de β . Aclara cuál es \hat{r} .
- 2) Dibuja en cada caso cómo se reflejan los rayos de luz del dibujo. Fig. 11.

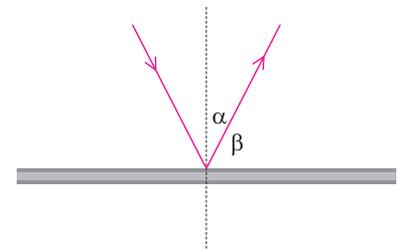


Fig. 10. Problema 1.

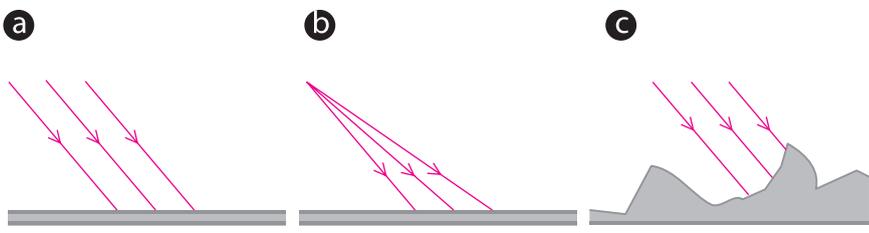


Fig. 11. Problema 2.

- 3) ¿En qué posición de las indicadas a continuación, debemos ubicar un espejo plano para que el rayo de luz se refleje como muestra el dibujo de la figura 12?

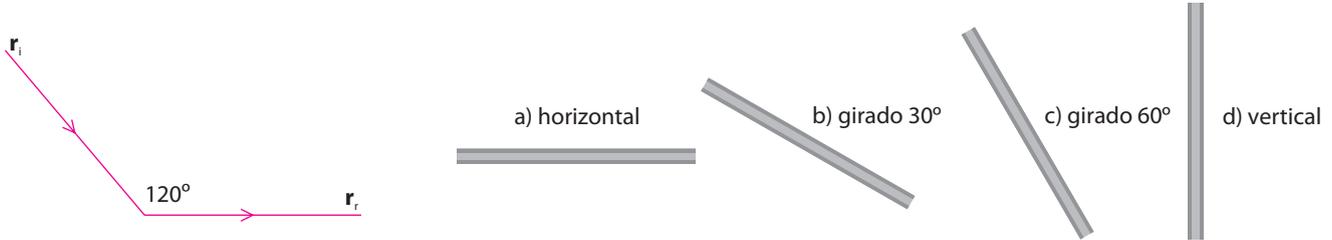


Fig. 12 Problema 3

- 4) Para detectar pequeños movimientos de una superficie, se hace incidir en ella un rayo de luz láser coincidiendo con la normal, que se refleja sobre sí mismo. Si la superficie se gira 5° ¿qué ángulo se formará entre el rayo incidente y el reflejado? (Fig. 13)

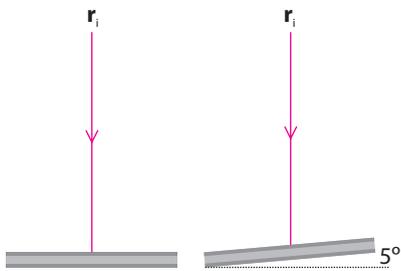


Fig. 13 Problema 4

- 5) Un rayo de luz incide sobre los espejos del dibujo. (Fig. 14)
 a. Dibuja la trayectoria que sigue luego de las reflexiones.
 b. Compara las direcciones del rayo incidente y el último reflejado.

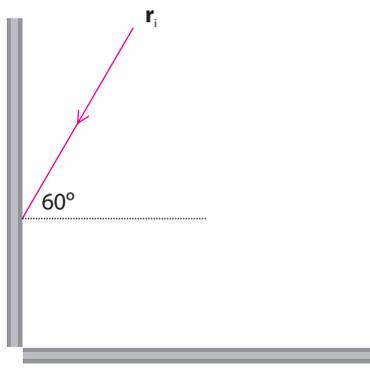


Fig. 14 Problema 5

- 6) Repite el problema anterior para los casos de la figura 15.

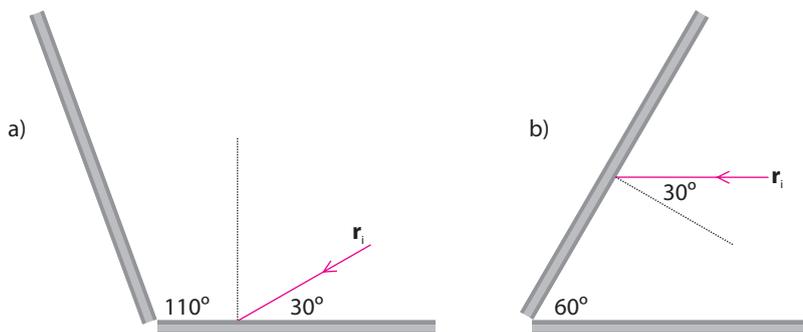


Fig. 15 Problema 6

- 7) En el caso b) del problema anterior, ¿cuál debería ser el ángulo de incidencia para que luego de las dos reflexiones el rayo de luz emerja sobre el primer rayo incidente?



Refracción de la luz



Cuando un haz de rayos de luz se propaga por un medio homogéneo, transparente y toma contacto con otro medio transparente, se observa que parte de la luz, se refleja o sea regresa al mismo medio (reflexión) y parte pasa al otro medio. Al fenómeno físico que se produce cuando la luz cambia de medio de propagación se denomina refracción.

Refracción es el fenómeno físico que se produce cuando la luz cambia de dirección, al pasar de un medio transparente a otro medio también transparente con diferentes características.

Si los medios son diferentes, se observa que al pasar el rayo al nuevo medio, éste cambia su dirección. (Fig. 1)

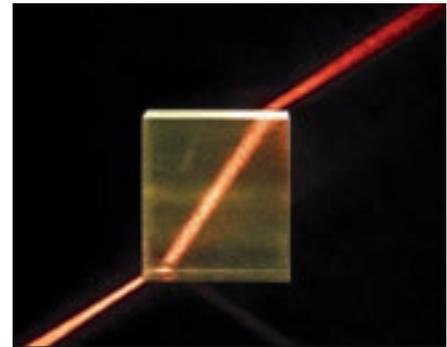


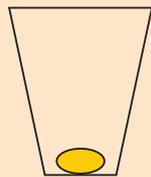
Fig. 1. Refracción de la luz. La dirección del rayo incidente cambia, cuando cambia de medio.

Experimento

Para observar dicho fenómeno con claridad, te proponemos que realices el siguiente experimento en tu domicilio.

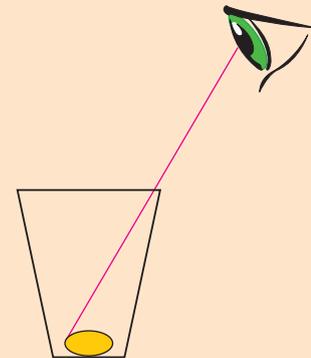
Primer paso.

Coloca una moneda en el fondo de un vaso vacío. Puede ser de cualquier material, lo importante es que sea opaco.



Segundo paso.

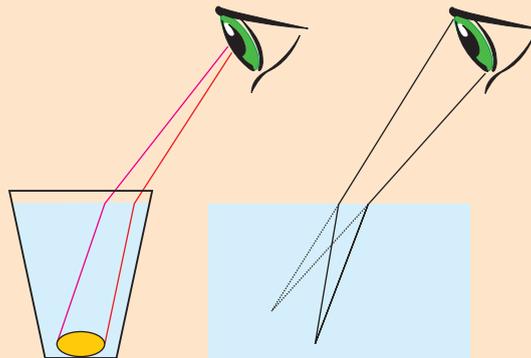
Mirando la moneda por encima del vaso, baja tu cabeza hasta que dejes de verla.



Tercer paso.

Dejando tu cabeza en la posición del paso anterior, o sea sin ver la moneda, comienza a llenar el vaso de agua.

¿Qué observas a medida que se llena el vaso de agua?
¿Ves ahora la moneda?



La refracción de la luz nos hace ver el fondo de una piscina más cerca de la superficie de lo que en realidad se encuentra

¿Esto tiene alguna relación con el experimento propuesto?

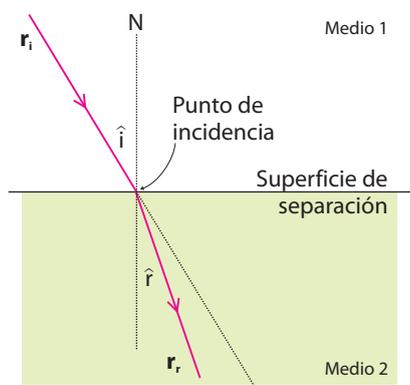


Fig. 2. Rayo de luz que se refracta, cambia de dirección al pasar del medio 1 al medio 2. (Omitimos dibujar el rayo reflejado, para centrar nuestra atención únicamente en el fenómeno de refracción y visualizarlo con mayor claridad).

Definiciones importantes

A continuación definiremos términos, los cuales deberás tener claro desde el comienzo para comprender el fenómeno de la refracción.

Denominaremos:

- **Superficie de separación de los medios**, al límite de separación entre los medios. (Fig. 2)
- **Rayo incidente**, al rayo que viaja por el medio 1 e incide sobre la superficie de separación con el otro medio. Lo representaremos r_i , de igual manera que en el fenómeno físico anterior (reflexión). (Fig. 2)
- **Rayo refractado**, al rayo que viaja por el medio 2 y que surge de la refracción del rayo incidente. Lo escribiremos r_r . (Fig. 2)

Punto de incidencia, al punto de la superficie de separación donde entra en contacto el rayo incidente. (Fig. 2)

• **Normal**, a la recta perpendicular a la superficie de separación que pasa por el punto de incidencia. La representamos con la letra **N**. (Fig. 2)

• **Ángulo de incidencia o ángulo incidente**, al ángulo formado entre el rayo incidente y la normal. Se representa \hat{i} .

• **Ángulo de refracción o ángulo refractado**, al ángulo formado entre la normal y el rayo refractado. Lo escribiremos \hat{r} .

Generalmente el rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en un mismo plano (en muy pocas sustancias cristalinas esto no sucede).

Observando en la figura se aprecia claramente que la dirección del rayo incidente y refractado no es la misma y que **los ángulos de incidencia y refracción son diferentes**.

$$\hat{i} \neq \hat{r}$$

Recuerda

Para simbolizar la **velocidad de la luz** en el vacío, universalmente se utiliza la letra **c** y su valor con tres cifras significativas es:

$$c = 3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Índice de refracción

Hemos visto que la luz tiene una velocidad finita y que su medición se logró después de muchos intentos por parte de varios científicos. Su valor es enorme para la escala de velocidades que manejamos habitualmente, aproximadamente tres millones de veces superior que la velocidad de un coche de fórmula 1.

La velocidad de la luz es diferente de acuerdo al medio en el cual se propaga y **siempre** será menor al valor de la velocidad de la luz en el vacío, "c". (Fig. 3)

Definimos el índice de refracción absoluto de un medio, al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en ese medio. Lo representamos con la letra "n" minúscula

$$n = \frac{c}{v}$$

Ejemplo 1: Cálculo del índice de refracción (n) del agua

Conociendo la velocidad de la luz en el agua $v = 2,25 \times 10^8 \frac{m}{s}$, calcularemos el índice de refracción del agua. Utilizaremos la ecuación de definición del índice de refracción $n_{H_2O} = \frac{c}{v_{H_2O}}$

$$n_{H_2O} = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}}{2,25 \times 10^8 \frac{m}{s}} = 1,33 \quad \boxed{n_{H_2O} = 1,33}$$

Medio	Velocidad (m/s)
Aire	$3,00 \times 10^8$
Agua	$2,25 \times 10^8$
Vidrio	$2,00 \times 10^8$
Diamante	$1,24 \times 10^8$

Fig. 3. Velocidad de propagación de la luz en diferentes medios.

Al realizar el cociente entre las velocidades, la unidades se cancelan. Por lo tanto **el índice de refracción no tiene unidad.**

El índice de refracción absoluto es un propiedad característica. Por lo tanto a partir de él, podemos identificar a una sustancia. En la tabla adjunta (fig. 4) observamos los valores de dicho índice correspondientes a algunos medios.

Ley de Snell

Como ya vimos el ángulo de incidencia \hat{i} es diferente del ángulo de refracción \hat{r} . Por lo tanto se nos plantea la siguiente pregunta.

¿Existirá alguna relación entre los valores de dichos ángulos ?

El matemático y astrónomo holandés W. Snell realizando experimentos, encontró que el cociente entre los senos de dichos ángulos, es constante. Expresado matemáticamente:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \text{cte}$$

Esta constante depende de las características de los medios y está relacionada con las velocidades de propagación.

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Medio	Índice de refracción
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Benceno	1.50
Aire (1 atm y 20°C)	1.0003
Ambar	1.55
Diamante	2.42
Vidrio (crown)	1.52
Vidrio (flint denso)	1.66
Cloruro de sodio	1.53

Fig. 4. Tabla de índice de refracción de algunas sustancias.

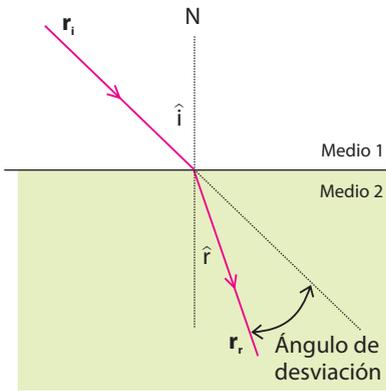


Fig. 5. Científicos anteriores a Snell no llegaron a enunciar la ley por él descubierta ya que centraban su estudio en el ángulo de desviación.

Al cociente $\frac{n_2}{n_1}$ lo definimos: **índice de refracción relativo del medio 2 con respecto al 1**, o sea $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$

También podemos relacionar la constante de proporcionalidad del cociente de los senos de los ángulos, con la velocidad de propagación de la luz en los medios. Recordando la definición de índice de refracción.

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Entonces $\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}}$

Para simplificar la expresión, invertimos el denominador, realizamos el producto de las fracciones y cancelamos "c":

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{c}{v_2} \times \frac{v_1}{c} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Entonces nos queda: $\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$

Estas ecuaciones son diferentes expresiones de la Ley de Snell.

Aplicaciones de la Ley de Snell

Utilizando esta ley, estamos en condiciones de analizar qué ocurrirá con la dirección de un rayo cuando pasa de un medio transparente a otro.

En todos los casos que vamos a trabajar los ángulos \hat{i} y \hat{r} variarán entre 0° y 90° . $0^\circ \leq \hat{i} < 90^\circ$, $0^\circ \leq \hat{r} < 90^\circ$

Si $n_2 > n_1$ implica que $\text{sen } \hat{r} < \text{sen } \hat{i}$ por lo tanto $\hat{r} < \hat{i}$, entonces el rayo refractado se acerca a la normal. (Fig. 6)
La velocidad de la luz en el medio 1 es mayor que en el 2.

Si $n_2 < n_1$ implica que $\text{sen } \hat{r} > \text{sen } \hat{i}$ por lo tanto $\hat{r} > \hat{i}$, entonces el rayo refractado se aleja de la normal. (Fig. 7)
La velocidad de la luz en el medio 2 es mayor que en el 1.

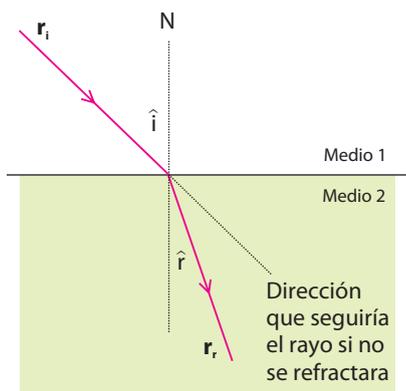


Fig. 6. Refracción de la luz cuando $n_2 > n_1$. El rayo refractado se acerca a la normal.

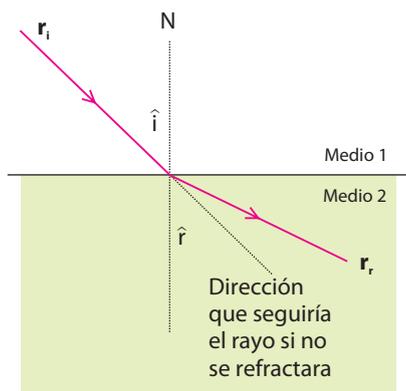


Fig. 7. Refracción de la luz cuando $n_2 < n_1$. El rayo refractado se aleja de la normal.

Ejemplo 2

Un rayo de luz incide desde el aire en la superficie del agua de una piscina, desviándose como muestra el dibujo.

a) Determina el índice de refracción relativo del agua con respecto al aire.

Utilizando la Ley de Snell

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \text{ donde } \hat{i} = 41,7^\circ \quad \hat{r} = 30,0^\circ$$

n_1 es el índice de refracción del aire, que podemos considerarlo 1,00. Sustituyendo

$$\frac{\text{sen } 41,7^\circ}{\text{sen } 30,0^\circ} = \frac{n_2}{1,00} \quad \frac{0,665}{0,500} = n_2 \quad \boxed{n_2 = 1,33}$$

Un resultado ya conocido. ¡Verifícalo en la tabla!

b) Determina la velocidad de la luz en el agua.

Recordando que $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$

Sustituyendo $1,33 = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{v_2}$

Despejando queda $v_2 = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,33}$

$$v_2 = 2,25 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad de la luz en el agua}$$

c) Otro rayo incide en la misma piscina con un ángulo de incidencia de $65,2^\circ$. Determina el ángulo de refracción.

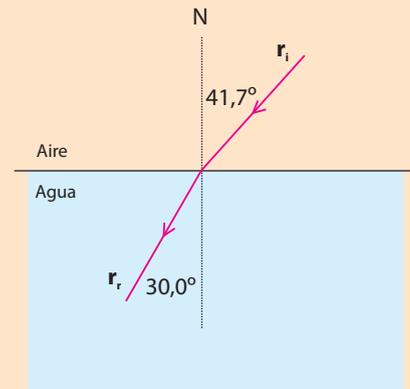
Nuevamente utilizamos a Snell $\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$

Sustituimos $\frac{\text{sen } 65,2^\circ}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{1,33}{1,00}$

Despejamos y queda $\frac{\text{sen } 65,2^\circ}{1,33} = \text{sen } \hat{r}$

$\frac{0,908}{1,33} = \text{sen } \hat{r} \quad 0,683 = \text{sen } \hat{r}$

$\text{sen}^{-1} 0,683 = \hat{r} \quad \boxed{\hat{r} = 43,1^\circ}$



Exceptuando aquellos casos donde se requiera mucha precisión (5 cifras significativas), **consideraremos el mismo valor para los índices de refracción de un medio con respecto al aire y al vacío.**

Recordando Matemática

sen^{-1} , también llamada arc sen o arcoseno es la función inversa a $\text{sen } \alpha$.

Nos permite saber qué ángulo corresponde a determinado valor de la función seno.

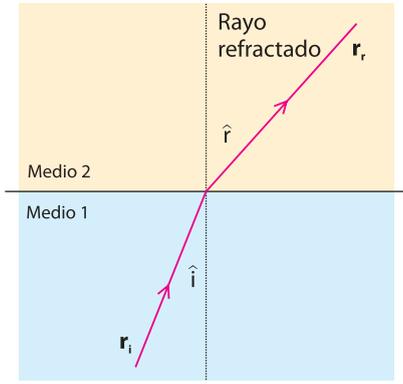


Fig. 8. Refracción común

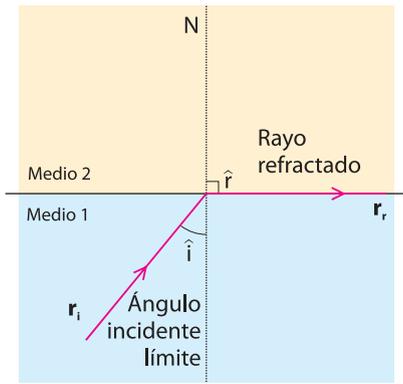


Fig. 9. El rayo refractado queda paralelo a la superficie de separación.

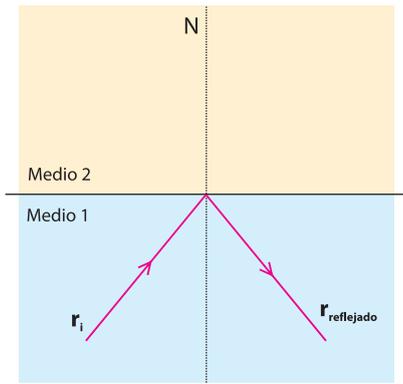


Fig. 10. Reflexión total interna. No hay refracción.

Reflexión total interna

En la figura 8 vemos un rayo de luz que pasa de un medio de mayor índice de refracción a uno de menor, $n_1 > n_2$. Recuerda que al darse esta situación, **los rayos refractados se alejan de la normal**.

En estas condiciones el ángulo de refracción \hat{r} es mayor que el ángulo de incidencia \hat{i} . Si vamos aumentando el ángulo \hat{i} también irá aumentando el ángulo \hat{r} , hasta que llega un momento en que el ángulo de refracción se hace igual a 90° , quedando el rayo refractado paralelo a la superficie de separación. (Fig. 9)

Para el ángulo máximo de refracción $\hat{r} = 90^\circ$, le corresponde un ángulo de incidencia \hat{i} , al que llamaremos ángulo incidente límite \hat{i}_L .

Si un rayo incide sobre una superficie, de tal manera que el ángulo incidente es mayor \hat{i}_L que **no se produce refracción**, toda la luz se refleja. O sea toda la luz incidente en la superficie cambia de dirección sin cambiar de medio. A este fenómeno físico se le denomina Reflexión Total Interna. (Fig. 10).

La reflexión total interna, se produce cuando el ángulo incidente es mayor que el ángulo límite.

En síntesis a medida que va aumentando el ángulo de incidencia el fenómeno de reflexión es cada vez más importante. Por el contrario el fenómeno de refracción es cada vez menor hasta que no se produce.

Determinación del ángulo incidente límite \hat{i}_L

Recordando la Ley de Snell: $\frac{\text{sen } \hat{i}_L}{\text{sen } 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$ como $\text{sen } 90^\circ = 1$

$$\text{sen } \hat{i}_L = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Por lo tanto} \quad \hat{i}_L = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Ejemplo 3

a. ¿Cuál es el mayor ángulo de incidencia posible para que un rayo de luz que incide desde el agua al aire se refracte?

El mayor ángulo de incidencia posible en este caso es el ángulo límite \hat{i}_L correspondiente a los medios agua-aire.

Utilizando $\text{sen } \hat{i}_L = \frac{n_2}{n_1}$

Sustituimos $\text{sen } \hat{i}_L = \frac{1,00}{1,33} \quad \text{sen } \hat{i}_L = 0,752$

Ya conocemos la función sen^{-1} , entonces $\text{sen}^{-1} 0,752 = \hat{i}_L$

$$\hat{i}_L = 48,8^\circ$$

b. ¿Qué le ocurre al rayo refractado si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo calculado en la parte a)?

Si el ángulo de incidencia supera los $48,8^\circ$, se producirá reflexión total interna. No habrá rayo refractado y si rayo reflejado (Fig. 11).

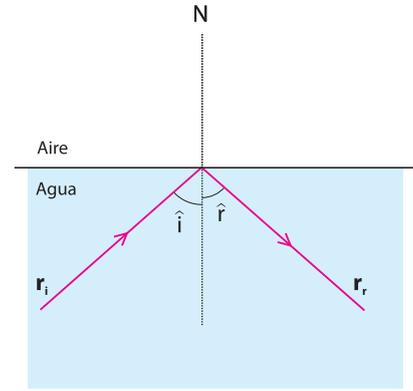


Fig. 11. Ejemplo 3

Fibras ópticas

Una importante aplicación de la reflexión total interna son las fibras ópticas. (Fig. 12). Están formadas por un núcleo de plástico o vidrio, rodeado de una "vaina" de material con un índice de refracción ligeramente inferior. Un rayo de luz que ingrese al núcleo "viajará" dentro de él sufriendo sucesivas reflexiones totales internas (Fig. 13). De esta forma se puede enviar información utilizando la luz como vehículo, en lugar de utilizar las variaciones de una corriente eléctrica a través de un cable de cobre. Entre las ventajas que ofrece, podemos resaltar el gran "ancho de banda", o sea que la fibra óptica permite un flujo mayor de información que el cable de cobre. También son muy flexibles y livianas, y la transmisión de información en su interior ocurre con muy baja atenuación.

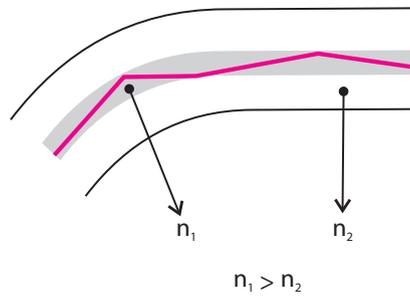


Fig. 13 Interior de una fibra óptica. El haz de luz (rojo) se propaga, realiza múltiples reflexiones en el medio N° 1 (interior) de mayor índice de refracción que el medio 2 (externo)



Fig. 12. Fibras ópticas.

El diámetro de la fibra óptica es similar al de un cabello humano.

El diámetro del núcleo que transmite la luz mide entre 10 y 50 micrómetros.

1 micrómetro es la millonésima parte de un metro.

La Refracción según Fermat

Otra manera de explicar el fenómeno de refracción, fue propuesta por **Pierre de Fermat**, a partir de su propio **principio de tiempo mínimo**, que sostenía:

La luz se propaga siempre a lo largo de aquella trayectoria que le suponga el mínimo tiempo, incluso si para lograrlo tuviera que desviarse del camino geoméricamente más corto.

¿Es una recta el camino más rápido entre dos puntos? No siempre. (Fig. 14)

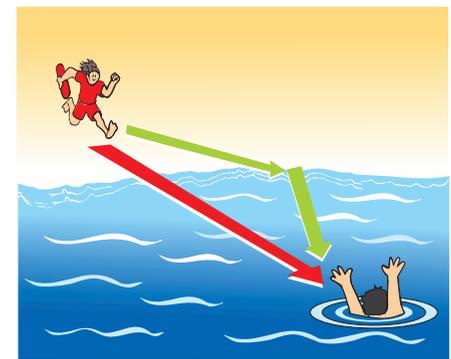


Fig. 14. El guardavidas debe llegar lo antes posible a rescatar al bañista en problemas. Como es más rápido corriendo que nadando, emplea menos tiempo siguiendo el camino verde, que si realizara el camino rojo.

El índice de refracción varía con el color de la luz

Si iluminamos con luz roja el vidrio crown y medimos los ángulos de incidencia y refracción para luego calcular el índice de refracción de dicho vidrio, se obtiene un valor de $n = 1,513$. En cambio si hacemos el experimento con el mismo vidrio, pero ahora iluminado con luz violeta, obtenemos que el índice de refracción es $n = 1,532$. Esto muestra que cada color se refracta con un ángulo levemente distinto. El violeta es el que más se desvía, el rojo el que menos.

Si un rayo de luz blanca incide sobre una de las caras de un prisma en el ángulo apropiado sufre dos refracciones que nos permiten "separar" la luz blanca en los colores que la forman. A este continuo de colores se le llama espectro de luz visible. (Fig. 15)

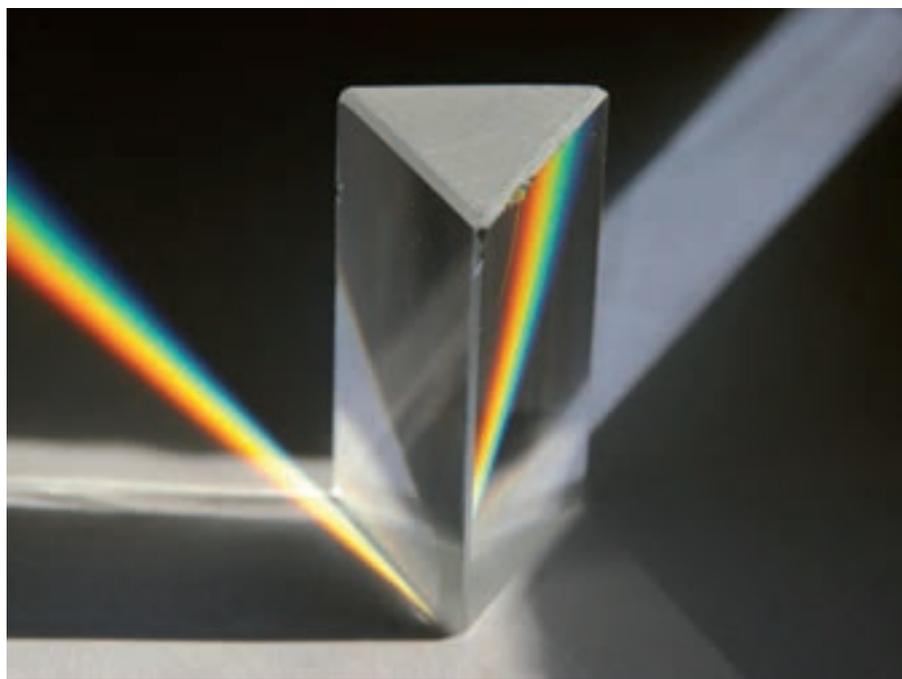


Fig. 15. Espectro de luz visible.

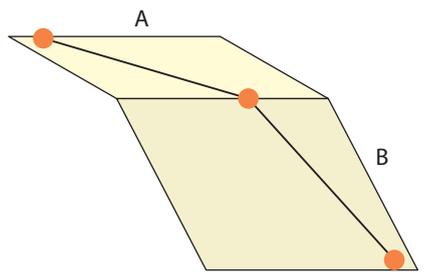


Fig. 16. Pelota que baja por el plano inclinado A, cuando pasa al plano B se desvía acercándose a la normal.

La refracción y el modelo corpuscular

El modelo corpuscular de propagación de la luz no explicaba satisfactoriamente la refracción, ya que preveía que un rayo (o un chorro de partículas) se debía acercar a la normal si la velocidad en el medio 2 era mayor que en el medio 1. Veamos este ejemplo para entenderlo un poco más. Una pelotita se mueve sobre el plano inclinado A como muestra la figura 16. Al llegar al borde, donde comienza el plano B aumenta su velocidad y se desvía, "acercándose a la normal". Puedes realizar este sencillo experimento si lo deseas.

O sea que la velocidad de propagación de la luz en el agua debía ser mayor que en el aire. La evidencia experimental demostró que esto no era así, lo cual fue un duro golpe para el modelo corpuscular.

PREGUNTAS

- 1) ¿En qué consiste la refracción? ¿Cuáles son las leyes que la rigen?
- 2) ¿Cómo se definen los índices de refracción absoluto y relativo? ¿Qué unidades tienen?
- 3) Cuando un rayo de luz pasa de un medio transparente a otro, ¿de qué depende que se acerque o aleje de la normal?
- 4) ¿Por qué el índice de refracción es una propiedad característica? Nombra otras propiedades características que hayas estudiado en cursos anteriores.
- 5) Explica la Ley de Snell. Escríbela en función de las velocidades y de los índices de refracción.
- 6) ¿Por qué el modelo corpuscular no explica satisfactoriamente la refracción de la luz?
- 7) ¿Qué es la reflexión total interna?
- 8) Para que se produzca la reflexión total interna, ¿la luz debe viajar más rápido en el medio 1 o en el medio 2?
- 9) ¿Qué es una fibra óptica? Menciona alguna de sus aplicaciones en el campo de la medicina.
- 10) ¿Qué es un crepúsculo y qué relación tiene con lo estudiado en este capítulo?



- 11) Explica por qué un remo parece quebrado cuando está sumergido parcialmente en el agua.
- 12) Sobre el asfalto en un día muy caluroso suele verse un poco "borroso" (Fig. 17) Esto ocurre porque
 - a) nuestros ojos se ven alterados por la excesiva temperatura.
 - b) la luz no se propaga en línea recta al atravesar capas de aire a diferentes temperaturas.
 - c) el vapor de agua deforma las imágenes.
 - d) la luz se refleja en la superficie del asfalto.
 Indica y justifica cuál de las anteriores afirmaciones es la correcta.



Fig. 17. Pregunta N° 12

$i(^{\circ})$	$r(^{\circ})$
0,0	
23,5	
	21,2
73,0	

Fig. 18. Problema 2.

PROBLEMAS

- Utilizando los índices de refracción que aparecen en la tabla correspondiente (Fig. 4), determina el valor de la velocidad de la luz en el ámbar, el alcohol etílico y el vidrio flint.
- Un rayo de luz incide sobre la superficie de separación entre el aire ($n=1,00$) y el vidrio ($n=1,52$). Utilizando la ley de Snell completa la tabla adjunta (Fig. 18).

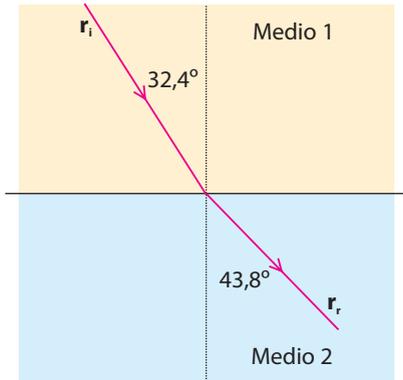


Fig. 19. Problema 3.

- Un rayo de luz sigue la trayectoria del dibujo al pasar del medio 1 al medio 2. (Fig. 19). Sabiendo que $n_1=1,40$ determina:
 - n_2
 - la velocidad de la luz en cada medio.
- Un rayo de luz se propaga en el aire e incide sobre la superficie de un vidrio crown, formando un ángulo de $60,0^{\circ}$ con respecto a la normal. Utilizando los datos que aparecen en el texto determina el ángulo de refracción para el color rojo
 - Determina el ángulo de refracción para la luz violeta. ¿son muy diferentes?

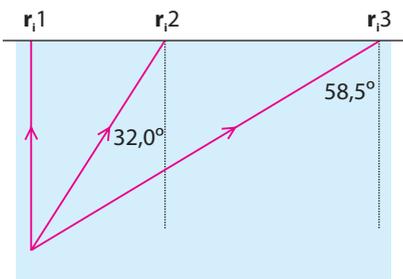


Fig. 20. Problema 5.

- Un foco debajo del agua emite luz en tres direcciones diferentes como muestra el dibujo. (Fig. 20). Continúa la trayectoria de cada rayo, calculando los ángulos correspondientes.
- Determina el ángulo límite para rayos de luz que van desde el diamante al agua.
- Dibuja la trayectoria seguida por el rayo de luz luego de incidir como muestra la figura 21 a y b. Determina los ángulos correspondientes.

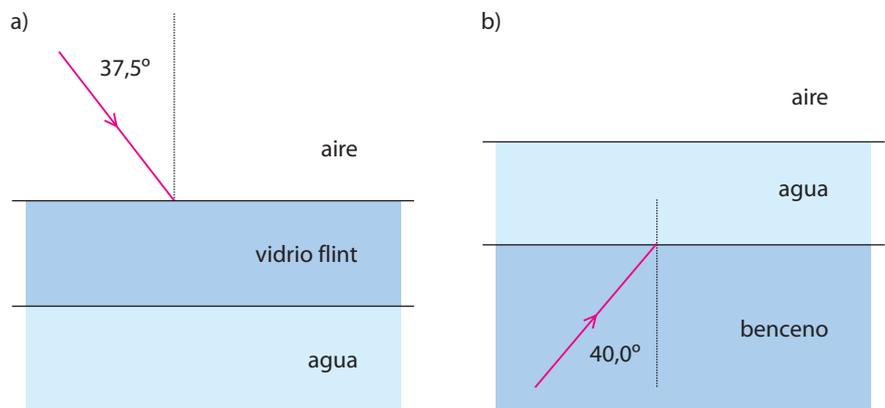
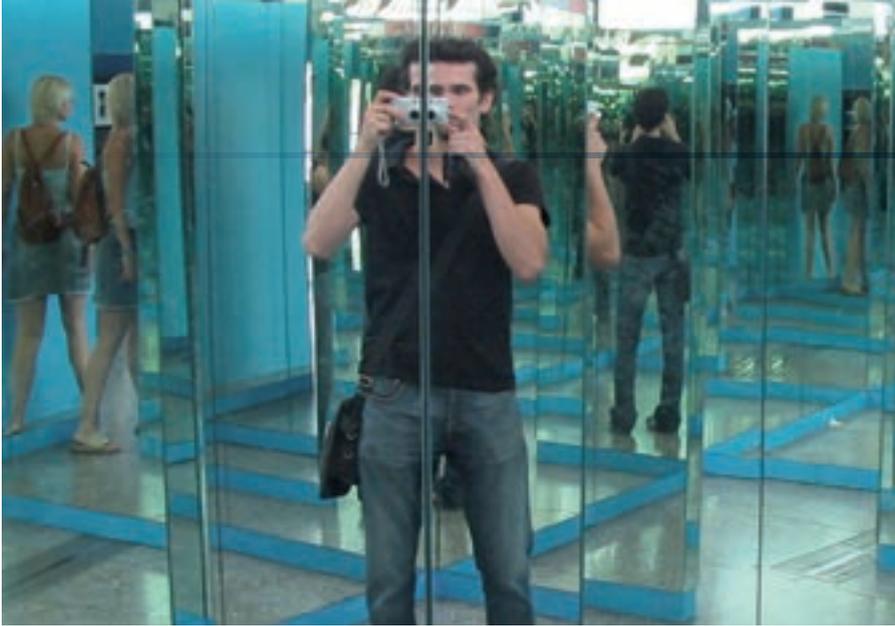


Fig. 21. Problema 7.

Espejos



Espejos planos, imágenes

En la figura 1 representamos un fuente puntual de luz ubicada en A y un espejo plano.

En ella se representan tres rayos de luz que emite la fuente y llegan al espejo plano. Aplicando las leyes de la reflexión obtenemos la dirección de los rayos reflejados. Observamos que éstos no se cortan, sino que divergen. En cambio las prolongaciones de los rayos reflejados (líneas punteadas) si se cortan en un punto detrás del espejo, que nombraremos A'.

En la figura 2 mostramos solamente los rayos reflejados y sus prolongaciones hacia atrás del espejo. Observa que los rayos parecen provenir del punto A'. Por este motivo lo consideramos la imagen de A.

La imagen que se forma con las prolongaciones de los rayos reflejados se denomina virtual.

Imagen de un objeto en un espejo plano

Considerando que un objeto está formado por infinitos puntos, la imagen de dichos puntos formará la imagen del objeto. Veamos el siguiente ejemplo.

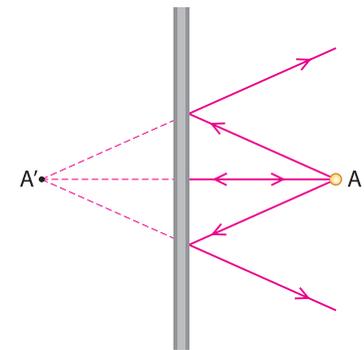


Fig. 1. Fuente puntual ubicada en "A", frente a un espejo plano.

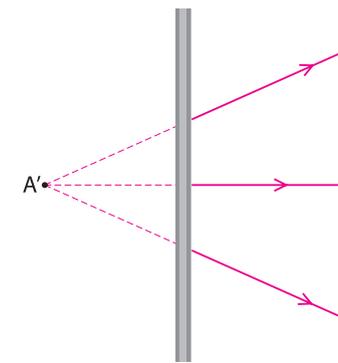


Fig. 2. Los rayos reflejados en un espejo parecen provenir del punto A'.

Ejemplo 1

Veamos cómo se forma la imagen del objeto en forma de flecha ubicado frente al espejo plano de la figura 3. Para esto, basta con encontrar la imagen del origen y el extremo de la flecha.



Fig. 3. Ejemplo 1.

Para ubicar la imagen del extremo, trazaremos dos rayos que pasen por él. Uno perpendicular al espejo (1) y otro en un ángulo cualquiera (2). Siguiendo las leyes de la reflexión, el rayo 1 se refleja sobre sí mismo, mientras que el rayo 2 se refleja con un ángulo igual al ángulo de incidencia. Los rayos reflejados no se cortan, por lo que debemos trazar sus prolongaciones. En la intersección de las prolongaciones se ubica la imagen del extremo de la flecha (Fig. 4)

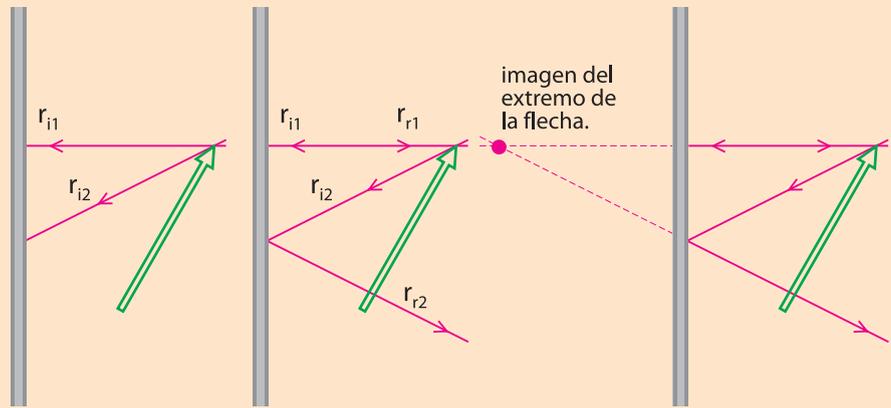


Fig.4. Ejemplo 1.

Repetimos el mismo procedimiento para obtener la imagen del origen de la flecha (Fig. 5).

Podemos observar que la imagen de la flecha es virtual, del mismo tamaño y ubicada a la misma distancia del espejo que el objeto.

Objeto e imagen se corresponden a través de una simetría axial, cuyo plano de simetría es la superficie del espejo. Esto es aplicable a cualquier objeto.

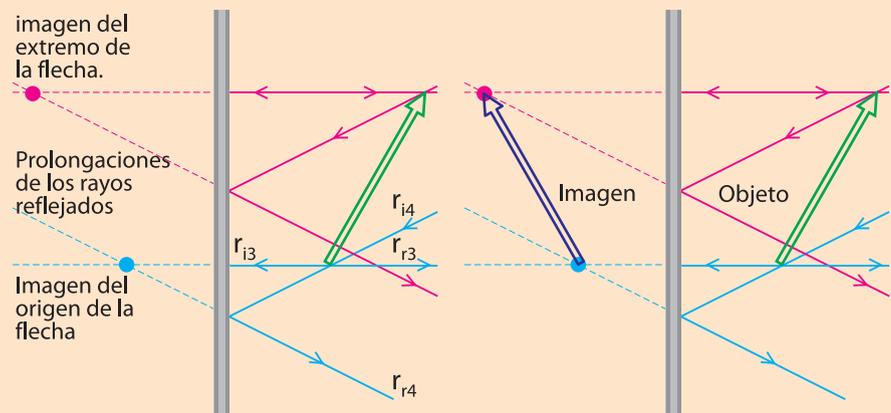


Fig.5. Ejemplo 1.

Como conclusión de este ejemplo podemos generalizar y especificar las características de la imagen de un objeto en un espejo plano:

- Características de la imagen de un objeto en un espejo plano:
- Virtual
 - Del mismo tamaño que el objeto
 - Derecha
 - La distancia del objeto al espejo es la misma que la del espejo a la imagen
 - La imagen del objeto es simétrica con respecto al espejo
 - No se puede proyectar en una pantalla

Más adelante veremos que existen otro tipo de imagen, denominada imagen real, que no se puede obtener en un espejo plano. Ésta, a diferencia de la virtual, se forma con el corte de los rayos reflejados.

Espejos esféricos

Los espejos curvos más comunes y que vamos a tratar en esta sección son los esféricos. Si tenemos un casquete esférico que está pulido en su parte interior, el espejo es cóncavo. En cambio si la superficie pulida es la externa, el espejo se denomina convexo. (Fig. 6)

Imagina una cuchara de sopa, la parte cóncava es con la que nos servimos los alimentos y la convexa es la opuesta.

Definiciones importantes

Denominaremos :

- **Eje principal del espejo**, a la recta que corta al espejo de forma simétrica.
- **Vértice**, al punto de corte del eje principal con el espejo. Lo representaremos con "V". (Fig. 7)
- **Centro de curvatura del espejo**. Lo representaremos con la letra "C".
- **Radio de curvatura**, a la distancia VC que es igual al radio de la esfera que contiene al espejo. Lo indicaremos con la letra "r".

Foco de un espejo esférico, cóncavo

Si un haz de rayos incide al espejo en forma paralela al eje principal, todos los rayos reflejados **convergen** en un punto. Por ese motivo a los espejos cóncavos también se les denomina **convergentes**. (Fig. 8)

Dicho punto pertenece al eje principal, se denomina **foco** y lo representamos con la letra "F".

El punto "F" equidista de los puntos "V" y "C", por lo que la distancia VF es la mitad de un radio de curvatura. A esta distancia se le denomina, **distancia focal**.

$$f = \frac{r}{2}$$

"f" es la distancia focal y es igual a la mitad del radio de curvatura "r".

Foco de un espejo esférico, convexo

Si un haz de rayos incide paralelamente al eje principal sobre un espejo convexo, éstos al reflejarse divergen, o sea se separan. Por ese motivo a los espejos convexos también se les llama **divergentes**.

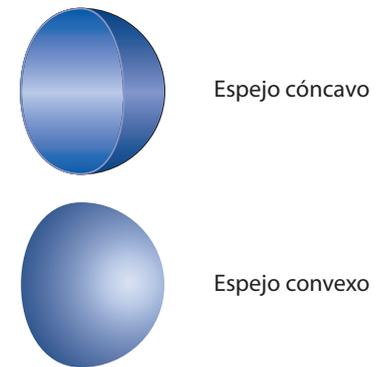


Fig.6. Espejo cóncavo y convexo.

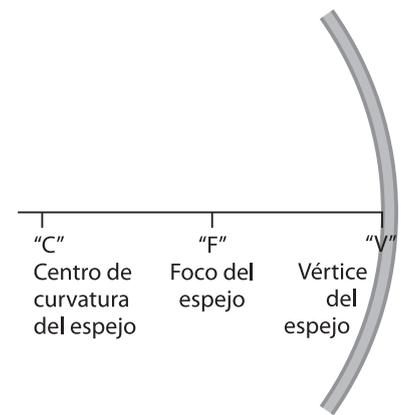


Fig.7. Espejo cóncavo.

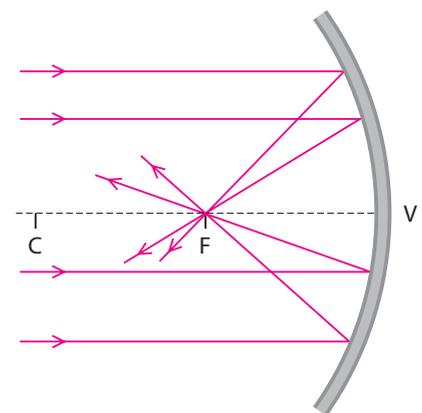


Fig.8. Los espejos cóncavos son convergentes.

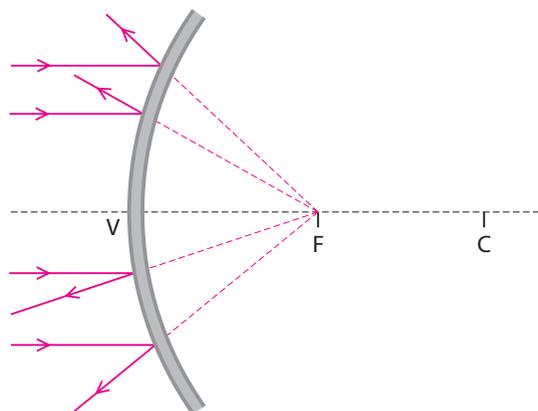


Fig.9. Reflexión de un haz de rayos paralelos en un espejo convexo. Los espejos convexos son divergentes.

Si trazamos las prolongaciones de los rayos reflejados hacia atrás del espejo, vemos que éstas convergen en un punto sobre el eje principal. A este punto lo denominamos foco del espejo convexo. Observa en la figura 9 que los rayos reflejados parecen que provinieran del foco.

Al igual que para los espejos cóncavos, la distancia entre el foco y el vértice en un espejo convexo se denomina distancia focal "f" y es característica de cada espejo.

Observa en el dibujo que **en los espejos convexos el foco "F" y el centro de curvatura "C", se encuentran detrás del espejo.**

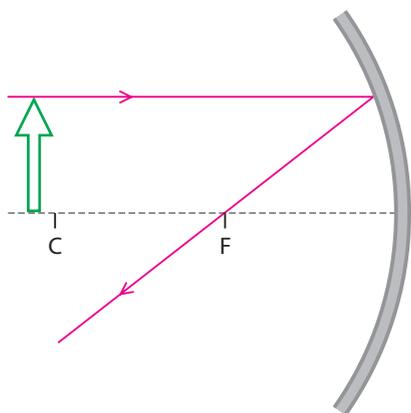


Fig. 10. Rayo luminoso que incide paralelo al eje principal del espejo, se refleja en dirección al foco.

Imágenes en Espejos Cóncavos

Para determinar las características de la imagen en un espejo cóncavo, necesitamos previamente analizar las trayectorias de determinados rayos, que se denominan **Rayos Principales**.

1. Si un rayo incide paralelo al eje principal, se refleja pasando por el foco. (Fig. 10)
2. Si un rayo pasa por "F" e incide en el espejo, se refleja paralelo al eje principal. (Fig. 11)
3. Si un rayo incide pasando por "C", se refleja sobre sí mismo, con la misma dirección pero con sentido opuesto. (Fig. 12)

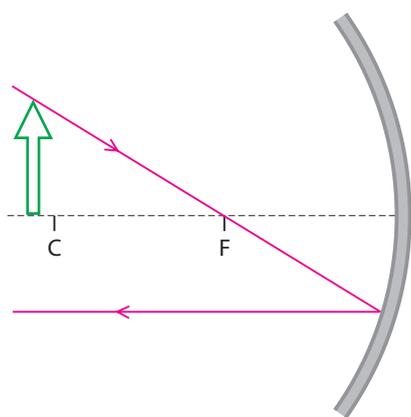


Fig. 11. Rayo luminoso que pasa por el foco se refleja paralelo al eje principal.

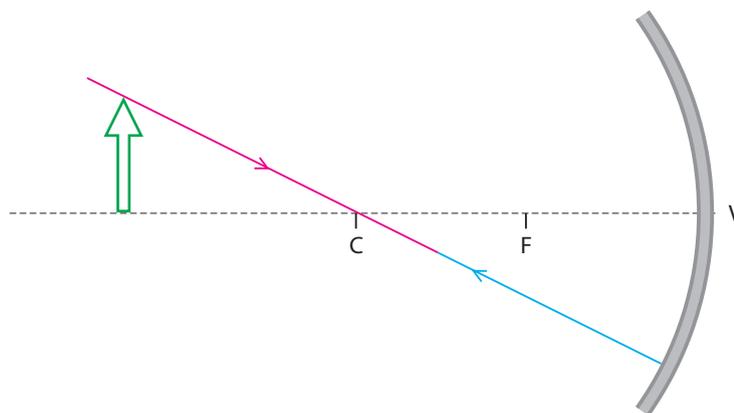


Fig. 12. Rayo luminoso que pasa por el centro de curvatura, se refleja sobre sí mismo.

Formación de imágenes

Con la ayuda de los rayos principales determinamos las características de la imagen de un objeto, en un espejo cóncavo.

El objeto que colocaremos frente al espejo será una flecha ubicada sobre el eje principal, apuntando hacia arriba.

Es importante dejar claro desde el comienzo que las características de la imagen obtenida depende de dónde esté ubicado el objeto.

Por ese motivo analizaremos distintas situaciones, en las cuales iremos variando la distancia entre el objeto y el vértice. Empezaremos desde una distancia cercana al vértice y nos iremos alejando de él.

1. Objeto ubicado entre el foco y el vértice

En primer lugar observaremos las características de la imagen de un objeto (flecha) ubicado entre el vértice y el foco. (Fig. 13).

Observa que la imagen se obtuvo a partir de las prolongaciones de los rayos reflejados, similarmente a lo que ocurre en los espejos planos. Por lo tanto la imagen obtenida es virtual.

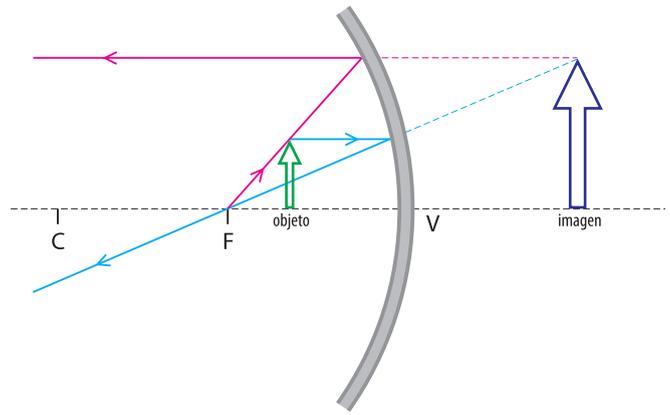


Fig. 13. Imagen de un objeto ubicado entre el foco y el vértice de un espejo cóncavo.

Objeto ubicado entre "F" y "V" en un espejo cóncavo.
Características de la imagen obtenida:

- Virtual
- Derecha
- De mayor tamaño

2. Objeto ubicado entre el foco y el centro de curvatura

En segundo lugar observaremos las características de la imagen del mismo objeto (flecha) pero ahora ubicado entre el foco y el centro de curvatura. O sea entre los puntos "F" y "C". (Fig. 14)

Observa que la imagen se obtuvo directamente por el corte de los rayos reflejados, por lo que la imagen obtenida es real.

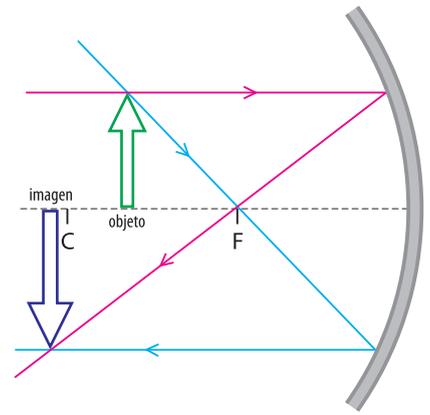


Fig. 14. Imagen de un objeto ubicado entre el foco y el centro de la curvatura en un espejo cóncavo.

Objeto ubicado entre "F" y "C" en un espejo cóncavo.
Características de la imagen obtenida:

- Real
- Invertida
- De mayor tamaño

3. Objeto ubicado sobre el centro de curvatura

En tercer lugar observaremos las características de la imagen del mismo objeto (flecha) pero ahora ubicado sobre el centro de curvatura "C". (Fig. 15)

Observa que aquí también la imagen se obtuvo directamente de los rayos reflejados. Por lo tanto la imagen obtenida es real.

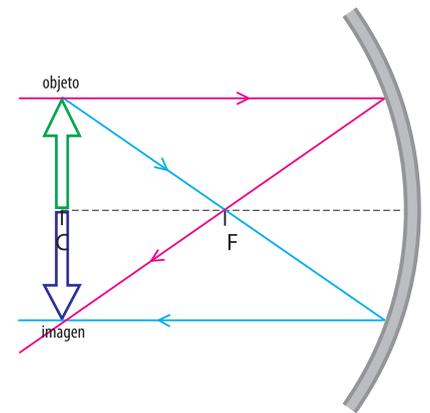


Fig. 15. Imagen de un objeto ubicado sobre el centro de curvatura de un espejo cóncavo.

Objeto ubicado sobre "C" en un espejo cóncavo.
Características de la imagen obtenida:

- Real
- Invertida
- De igual tamaño

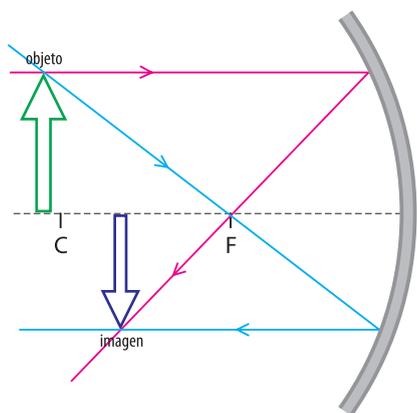


Fig. 16. Imagen de un objeto ubicado a una distancia mayor que el radio de curvatura en un espejo cóncavo.

4. Objeto ubicado a una distancia mayor que el radio de curvatura

En cuarto lugar observaremos las características de la imagen del mismo objeto, pero ahora ubicado a una distancia mayor que el radio de curvatura del espejo. (Fig. 16).

Nuevamente la imagen se obtuvo directamente del corte de los rayos reflejados. Por lo tanto la imagen obtenida también es real.

Objeto ubicado a una distancia mayor que el radio de curvatura en un espejo cóncavo.

Características de la imagen obtenida:

- Real
- Invertida
- De menor tamaño

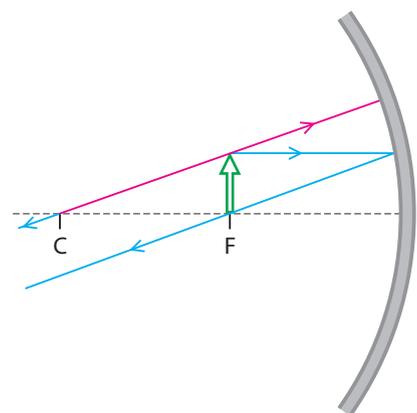


Fig. 17. Cuando el objeto está sobre el foco de un espejo cóncavo, no se forma imagen.

Caso muy particular

Por último analizaremos qué ocurre cuando colocamos el objeto sobre el foco "F" (Fig. 17). Se aprecia claramente que los rayos reflejados son paralelos y no se cortan. Por lo tanto no se forma imagen.

Cuando el objeto se ubica sobre el foco "F" de un espejo cóncavo, no se forma imagen.

Aplicaciones

Por la capacidad que tienen los espejos cóncavos de desviar los rayos de luz hacia un punto, son piezas esenciales en distintos instrumentos, utilizados en diversas profesiones: médicos, dentistas, biólogos, astrónomos, etc. (Fig. 18)

Los espejos cóncavos con distancia focal relativamente grande son utilizados por las damas coquetas para maquillarse.



Fig. 18 a) Telescopio.



Fig. 18 b) Microscopio.

Imágenes en Espejos Convexos

Para determinar las características de la imagen en un espejo convexo, necesitamos nuevamente analizar las trayectorias de los **Rayos Principales**.

1. Si un rayo incide paralelo al eje principal del espejo, se refleja en la dirección determinada por el foco y el punto de incidencia. (Fig. 19).

2. Si un rayo incide en dirección al foco "F", se refleja paralelo al eje principal del espejo. (Fig. 20).

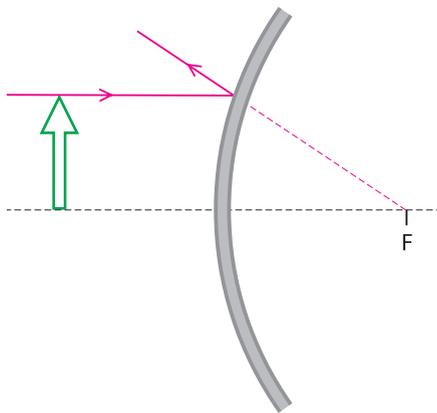


Fig. 19. Rayo luminoso que incide paralelo al eje principal del espejo, se refleja con dirección desde el foco.

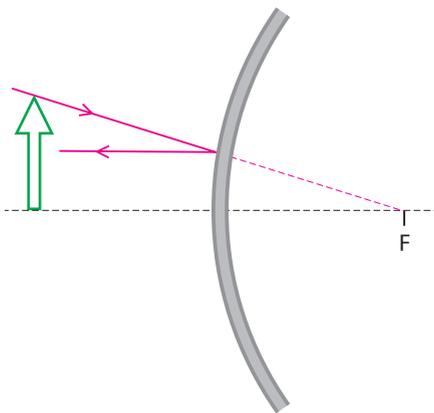


Fig. 20. Rayo luminoso que incide con dirección al foco, se refleja paralelo al eje principal del espejo.

3. Si un rayo incide en dirección al centro de curvatura "C", se refleja sobre sí mismo, en la misma dirección pero con sentido opuesto. (Fig. 21)

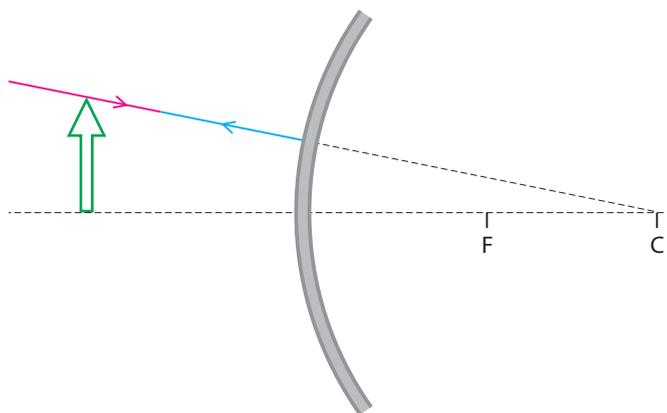


Fig. 21. Rayo luminoso que incide con dirección al centro de curvatura, se refleja sobre sí mismo.

Formación de imágenes

Nuevamente con la ayuda de los rayos principales, encontraremos dónde se forma la imagen de un objeto, en un espejo convexo.

El objeto que colocaremos delante del espejo será la misma flecha que utilizamos para los espejos cóncavos. También la ubicaremos sobre el eje principal apuntando hacia arriba. (Fig. 22)

Características de la imagen obtenida en un espejo convexo. Siempre será:

- Virtual
- Derecha
- De menor tamaño que el objeto
- Ubicada más cerca del espejo que el objeto.

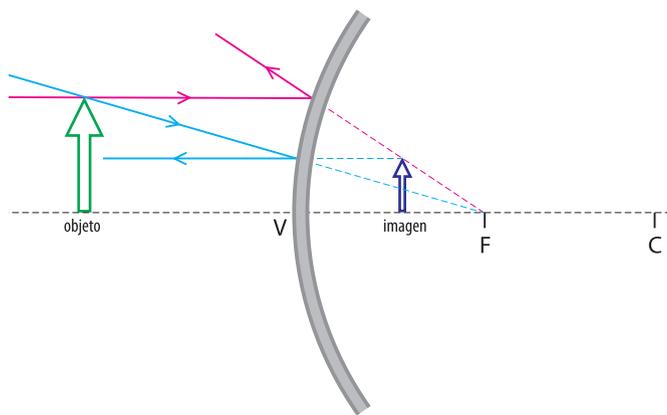


Fig. 22. Imagen obtenida en un espejo convexo.

En los espejos convexos las características de las imágenes obtenidas siempre serán iguales, no dependen de dónde esté ubicado el objeto con respecto al espejo.

Ecuación de Espejos Esféricos

Hasta ahora siempre hemos obtenido las imágenes utilizando métodos gráficos. Otro camino para abordar la formación de imágenes es el **método analítico**.

Para entenderlo necesitamos previamente definir algunos parámetros.

Definiciones importantes

Apoyándonos en el dibujo de la figura 23 definimos:

- D_o : a la distancia del objeto al espejo.
- D_i : a la distancia de la imagen al espejo.
- f : a la distancia focal.
- H_o : a la altura del objeto.
- H_i : a la altura de la imagen.

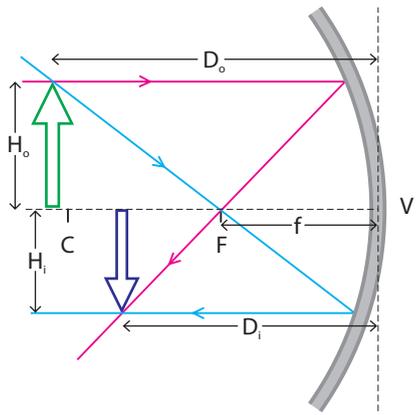


Fig. 23. Parámetros importantes de los espejos esféricos.

Todos estos parámetros son longitudes, por lo tanto su unidad en el sistema internacional es el metro, m.

Los tres primeros parámetros se relacionan de la siguiente forma:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$$

Para trabajar correctamente con la ecuación anterior es importante fijar algunos criterios:

La distancia del objeto D_o

- D_o siempre la consideramos positiva.

La distancia focal f

- si el espejo es cóncavo, f será positiva.
- si el espejo es convexo, f será negativa.

La distancia de la imagen D_i

- para imágenes reales D_i es positiva.
- para imágenes virtuales D_i es negativa.

La altura de la imagen H_i

- Si H_i es positiva la imagen es derecha.
- Si H_i es negativa la imagen es invertida.

Aumento de un espejo

El aumento de un espejo lo definimos como el valor absoluto del cociente entre la altura de la imagen y la altura del objeto.

$$A = \left| \frac{H_i}{H_o} \right|$$

Analizando la ecuación:

- Si la imagen es más grande que el objeto, entonces A es mayor que 1.
- Si la imagen es más pequeña que el objeto, entonces A es menor que 1.

La siguiente ecuación relaciona las alturas del objeto y de la imagen, con las distancias de la imagen y del objeto al espejo:

$$\frac{H_i}{H_o} = - \frac{D_i}{D_o}$$

ACLARACIÓN: Las ecuaciones planteadas tienen validez para los casos donde el radio de curvatura del espejo es mucho mayor que las dimensiones del objeto.

Ejemplo 2

Un objeto lineal vertical de 3,0cm de altura, se ubica a 15,0 cm de distancia del vértice de un espejo cóncavo de 4,0cm de distancia focal (Fig. 24). Determina todas las características de su imagen.

Método gráfico:

En primer lugar intentaremos determinar las características de la imagen haciendo un diagrama a escala. Como el objeto se encuentra sobre el eje óptico, para formar su imagen necesitamos ubicar solamente la imagen del extremo superior. Para eso trazaremos dos rayos principales. En primer lugar, un rayo que pase por el extremo superior y que incida en el espejo paralelo al eje óptico (Fig 25). Recuerda que este rayo se refleja pasando por el foco.

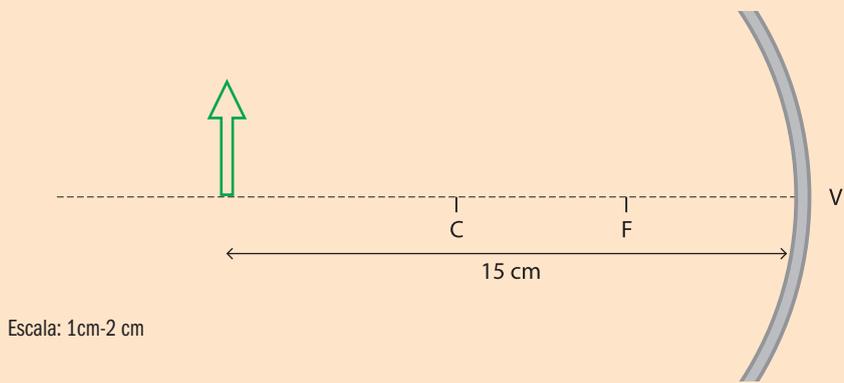


Fig. 24. Ejemplo 2.

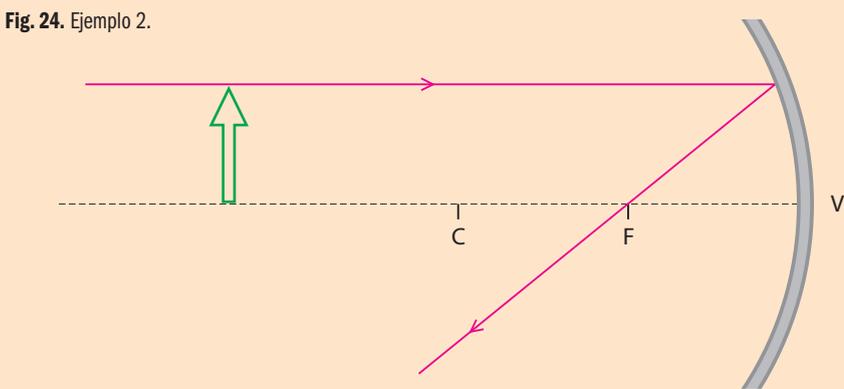


Fig. 25. Ejemplo 2.

Luego trazamos el segundo rayo que pase por el extremo superior del objeto y que incida en el espejo pasando por el foco; como hemos visto éste se reflejará paralelo al eje principal (Fig. 26).

El extremo de la imagen se forma en el punto de corte de ambos rayos reflejados. En este ejemplo las características de la imagen son las siguientes:

- **Real**, dado que se forma en la intersección de los rayos reflejados y no en la de sus prolongaciones.

- **Invertida** y de **menor tamaño** que el objeto. El tamaño de la imagen y la distancia al espejo los podemos determinar a escala.

Recuerda que estas eran las características de la imagen de un objeto cuando éste se encontraba a una distancia mayor que el radio de curvatura.

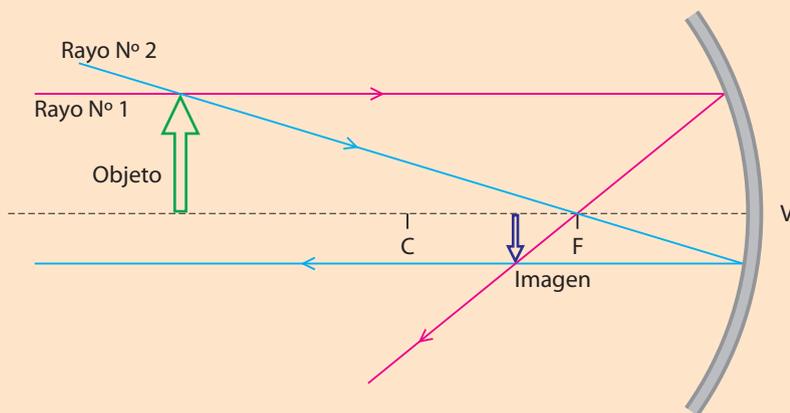


Fig. 26. Ejemplo 2.

Método analítico:

En primer lugar utilizaremos la ecuación $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$ para determinar a qué distancia del espejo se forma la imagen "D_i".

$$\frac{1}{4,0\text{cm}} = \frac{1}{15,0\text{cm}} + \frac{1}{D_i} \Rightarrow \frac{1}{4,0\text{cm}} - \frac{1}{15,0\text{cm}} = \frac{1}{D_i}$$

Tomando 60 como divisor común

$$\frac{15,0 - 4,0}{60\text{cm}} = \frac{1}{D_i} \quad \frac{11}{60\text{cm}} = \frac{1}{D_i} \Rightarrow 11 \times D_i = 60\text{cm}$$

$$D_i = \frac{60\text{cm}}{11} \Rightarrow D_i = 5,5\text{cm}$$

D_i es positiva, esto nos indica que la **imagen es real**.

En segundo lugar utilizaremos la ecuación $\frac{H_i}{H_o} = -\frac{D_i}{D_o}$ para determinar la altura de la imagen "H_i".

$$\frac{H_i}{3,0\text{cm}} = -\frac{5,5\text{cm}}{15,0\text{cm}} \quad \frac{H_i}{3,0\text{cm}} = -0,37 \quad H_i = (-0,37) \times 3,0\text{cm}$$

$$H_i = -1,1\text{ cm}$$

H_i es negativa, esto nos indica que la **imagen es invertida**.

Ahora calcularemos el aumento $A = \left| \frac{H_i}{H_o} \right| \quad A = \left| \frac{-1,1\text{cm}}{3,0\text{cm}} \right|$

$$A = 0,37$$

A es menor que 1, esto nos indica que la **imagen es de menor tamaño que el objeto**.

Aplicaciones

En la foto de la figura 27 vemos la imagen obtenida por un espejo convexo. Se utilizan para abarcar un campo de visión mayor, aunque la imagen se deforme un poco. Encontrarás espejos de este tipo como parte de la seguridad en los supermercados y en los espejos retrovisores de algunos vehículos.

Recuerda que la imagen que obtenemos en dicho espejo siempre es:

- Virtual
- Derecha
- De menor tamaño que el objeto.

Para obtener tu propia imagen en un espejo de este tipo, puedes intentar con el revés de una cuchara metálica.



Fig. 27. Imagen de un espejo convexo.

PREGUNTAS

- 1) ¿Qué características tiene la imagen de un objeto obtenida en un espejo plano?
- 2) Indica cuál de las imágenes de la Fig. 29, ilustra la imagen del cuadro (Fig. 28) que se forma en un espejo plano.

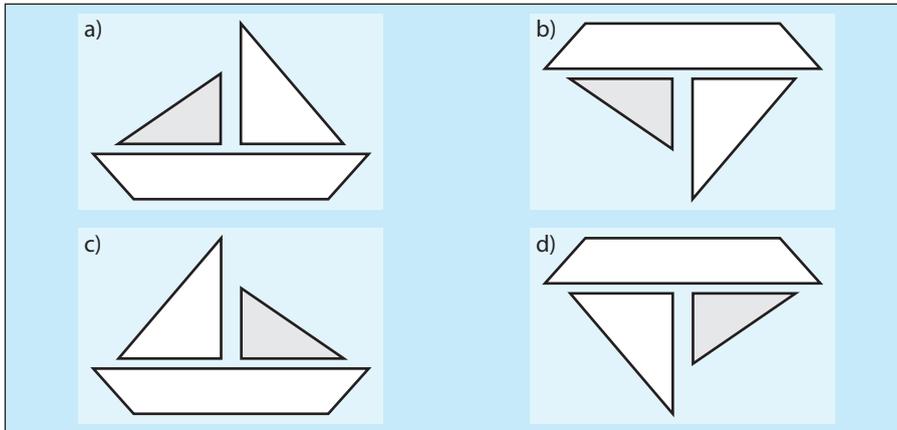


Fig. 29. Pregunta 2.

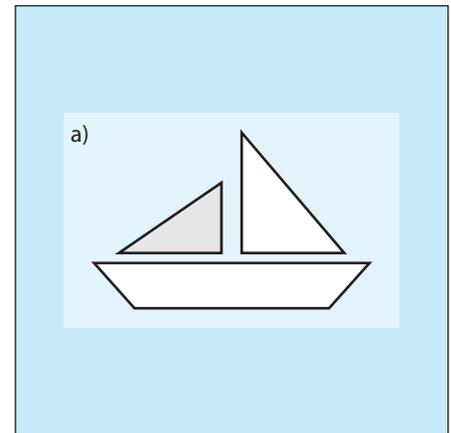


Fig. 28. Pregunta 2 Cuadro.

- 3) ¿Por qué las ambulancias y algunos otros vehículos tienen inscripciones en su frente escritas "al revés"? (Fig. 30)
- 4) ¿Qué diferencias hay entre una imagen virtual y una real?
- 5) Quizás hayas probado ubicarte entre dos espejos planos paralelos. ¿Cuántas imágenes logras ver?
- 6) Define eje principal, vértice, centro de curvatura y foco de un espejo esférico.
- 7) ¿Cómo se refleja un rayo que incide paralelo al eje principal en un espejo cóncavo?
- 8) Contesta lo mismo para un rayo que incide pasando por el foco y otro por el centro de curvatura.
- 9) Menciona aplicaciones prácticas de los espejos cóncavos.



Fig. 30. Pregunta 3.

10) Completa la siguiente tabla para un espejo cóncavo:

Ubicación del objeto	Tipo de imagen
Entre el vértice y el foco	
En el foco	
Entre el foco y el centro de curvatura	
En el centro de curvatura	
Mas allá del centro de curvatura	

- ¿Por qué te parece que no planteamos una tabla igual a la anterior para los espejos convexos?
- ¿Cómo se refleja un rayo que incide paralelo al eje principal en un espejo convexo?
- Contesta lo mismo para un rayo que incide pasando por el foco y otro por el centro de curvatura.
- Menciona aplicaciones prácticas de los espejos convexos.
- Define las distancias D_o , D_i , f , H_i , H_o , indicando en qué caso consideramos a cada una como positiva y como negativa.

PROBLEMAS

- Determina trazando los rayos correspondientes, la imagen del triángulo que se forma en el espejo plano. (Fig. 31)
- Intenta leer lo que dice en el recuadro utilizando un espejo plano. (Fig. 32)
- Completa los diagramas de rayos de la figura 33:

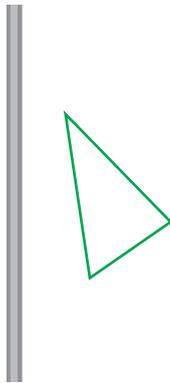


Fig. 31. Problema 1.

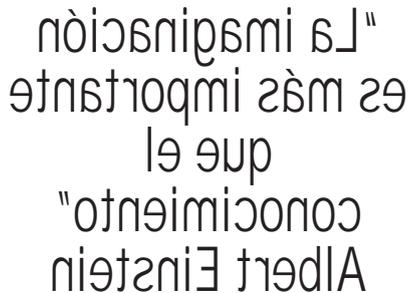


Fig. 32. Problema 2.

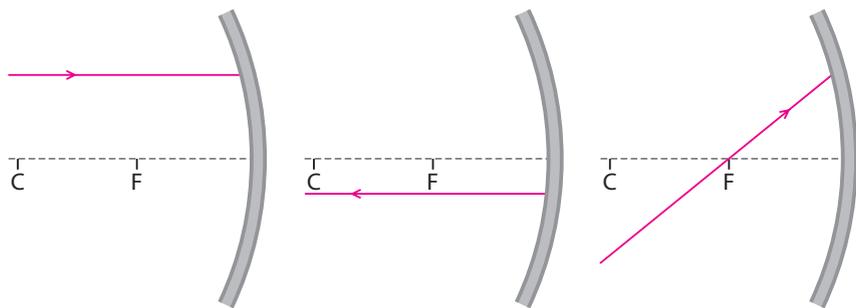


Fig. 33. Problema 3.

- Un objeto en forma de flecha vertical de 3,0cm de altura se ubica a 20,0cm de un espejo cóncavo de 9,0cm de distancia focal, sobre el eje principal.
 - Realiza un diagrama a escala de la situación.
 - Traza los rayos necesarios para encontrar la imagen del objeto.
 - ¿Es real o virtual? ¿Derecha o invertida?
 - Determina la altura de la imagen y su distancia al vértice.
 - Si movemos el objeto un poquito hacia el espejo, la altura de su imagen ¿aumenta o disminuye?

- 5) Repite el problema anterior ubicando el objeto
 - a) a 18,0cm del vértice.
 - b) a 12,0cm del vértice.
 - c) a 5,0cm del vértice.
- 6) Utilizando las ecuaciones apropiadas realiza los cálculos para verificar las respuestas encontradas por métodos gráficos en los problemas 4 y 5.
- 7) Completa los diagramas de rayos de la figura 34:

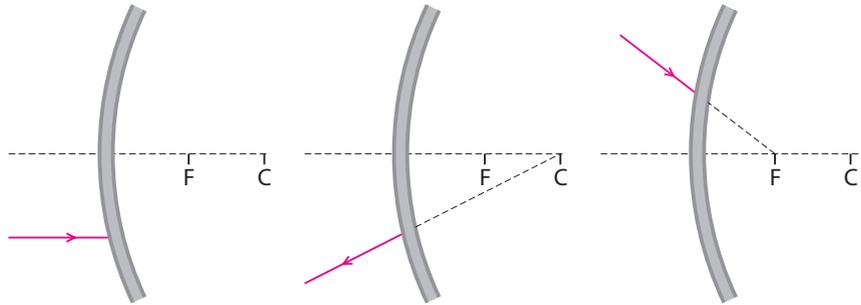


Fig. 34. Problema 7.

- 8) Un objeto en forma de flecha vertical de 5,0cm de altura se ubica a 4,0cm de un espejo convexo de 9,0cm de distancia focal, sobre el eje principal.
 - a) Realiza un diagrama a escala de la situación.
 - b) Traza los rayos necesarios para encontrar la imagen del objeto.
 - c) ¿Es real o virtual? ¿Derecha o invertida?
 - d) Determina la altura de la imagen y su distancia al vértice.
 - e) Determina el aumento del espejo.
 - f) Si movemos el objeto un poquito hacia el espejo, la altura de su imagen ¿aumenta o disminuye?
- 9) Utilizando las ecuaciones apropiadas realiza los cálculos para verificar las respuestas encontradas por métodos gráficos en el problema 8.
- 10) Un objeto de altura 5,0cm se encuentra delante de un espejo cóncavo de radio de curvatura 60cm. Si la distancia del objeto al espejo es de 15cm, determina: a) En qué lugar se forma la imagen, b) las características de la imagen.
- 11) Resuelve lo mismo que en el caso anterior, pero suponiendo que el espejo es convexo.
- 12) Los dentistas para revisar la dentadura de un paciente usan un espejo cóncavo que tiene 1,5 cm de radio. Si mantienen el espejo a 0,50cm de un diente, ¿qué características tendrá la imagen que ve el dentista del diente?
- 13) Se coloca un objeto de 1,0cm de alto delante de un espejo cóncavo de radio de curvatura 20cm. La distancia entre el objeto y el espejo es de 40cm, a) determina dónde se forma la imagen y que características tiene; b) resuelve lo mismo pero suponiendo que el objeto se ubica a 5,0cm del espejo.
- 14) Si cambiamos el espejo del problema anterior por otro convexo, responde los literales a y b nuevamente.

Prismas y lentes

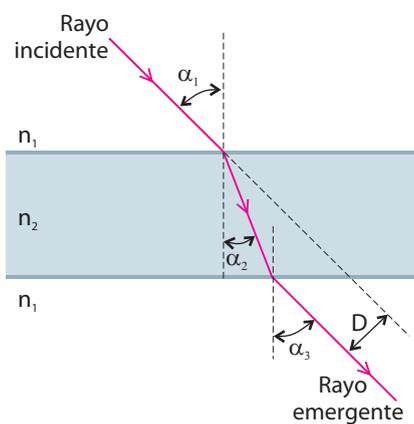


Fig. 1. Haz de luz que atraviesa un prisma de base rectangular.

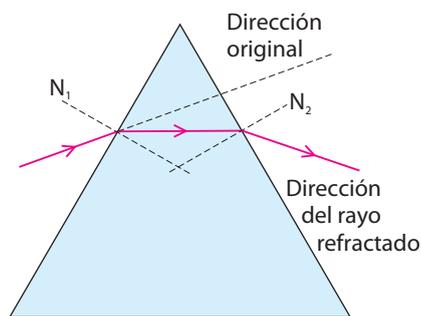


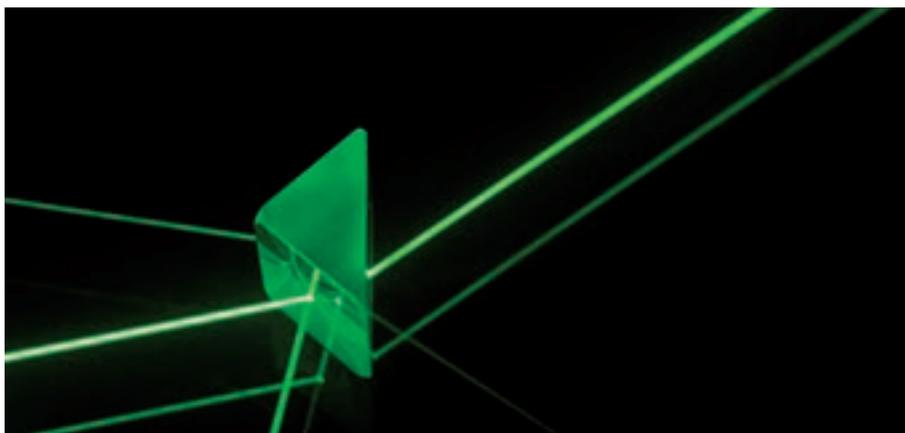
Fig. 2. Rayo de luz que atraviesa un prisma de base triangular.

Prismas

En este capítulo estudiaremos qué sucede con la luz cuando atraviesa cuerpos transparentes de diferentes formas geométricas.

Comenzaremos con un prisma de base rectangular. Supongamos que la luz incide sobre una de sus caras cuando viaja por el plano “de la hoja”, como muestra la figura 1. Si el prisma es de vidrio, el rayo de luz al ingresar en él se refracta acercándose a la normal (recordemos que $n_v = 1,52$ y $n_a = 1,00$). Cuando sale del prisma, vuelve al aire y el rayo de luz se refracta nuevamente, alejándose de la normal. Observamos en la figura 1 que el rayo emergente es paralelo al incidente (se muestra con punteado la trayectoria que seguiría el haz si no estuviera el prisma). Si hiciéramos los cálculos correspondientes aplicando la ley de Snell, obtendríamos que el ángulo incidente primero (α_1) es igual al último ángulo refractado (α_3). Como las caras del prisma son paralelas, esto resulta fácil de probar.

En forma general, si hacemos incidir luz en un cuerpo que tiene caras paralelas, el haz refractado tendrá la misma dirección que el haz incidente. No ocurre así cuando las caras del prisma u objeto transparente no son paralelas. En la figura 2 observamos la trayectoria de la luz que pasa por un prisma de base triangular. Podemos ver que los rayos son desviados en una dirección diferente a la original. Aquí el cálculo a partir de la ley de Snell no es tan sencillo, ya que las normales (N_1 y N_2) en los puntos de incidencia cuando el rayo entra y sale del prisma no son paralelas



Ejemplo 1

Un rayo de luz incide sobre una cara de un prisma triangular equilátero, de vidrio crown, con un ángulo de incidencia $\alpha_1=50,0^\circ$. (Fig. 3). Describe la trayectoria seguida por la luz determinando la dirección del rayo que emerge del prisma.

Al incidir sobre la superficie del prisma, el rayo sufre su primer refracción. (Fig. 4). Podemos determinar el ángulo α_2 de la primer refracción utilizando la Ley de Snell.

$$\frac{\text{sen}\alpha_1}{\text{sen}\alpha_2} = \frac{n_{\text{vidrio}}}{n_{\text{aire}}}$$

sustituyendo $\frac{\text{sen}50,0^\circ}{\text{sen}\alpha_2} = \frac{1,52}{1,00}$

Despejando

$$\text{sen}\alpha_2 = \frac{\text{sen}50,0^\circ}{1,52} = 0,504$$

Por lo que $\alpha_2 = \text{sen}^{-1}0,504 = 30,3^\circ$ (Fig. 4) $\alpha_2 = 30,3^\circ$

Para estudiar la segunda refracción, ampliaremos el dibujo, de manera de analizar los triángulos que se forman y determinar el valor de α_3 , ángulo de incidencia de la segunda refracción, del vidrio al aire. (Fig. 5)

Como $\alpha_2 + \beta_2 + \alpha_3 = 180^\circ$,
 $\alpha_3 = 180^\circ - (\alpha_2 + \beta_2)$
 $\alpha_3 = 180^\circ - (30,3^\circ + 120^\circ)$
 $\alpha_3 = 180^\circ - 150,3^\circ$

$\alpha_3 = 29,7^\circ$

Este ángulo de incidencia es **menor** que $41,1^\circ$, ángulo límite para la refracción del vidrio al aire, por lo que el rayo incidente se refractará. Recuerda que si dicho ángulo fuera mayor, se produciría reflexión total interna del rayo de luz y no emergería del prisma en ese punto.

Ahora podemos aplicar nuevamente la Ley de Snell para determinar α_4 que es el ángulo entre el rayo refractado y N_2

$$\frac{\text{sen}\alpha_3}{\text{sen}\alpha_4} = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{vidrio}}}$$

sustituyendo $\frac{\text{sen}29,7^\circ}{\text{sen}\alpha_4} = \frac{1,00}{1,52}$

Despejando queda

$$\text{sen}\alpha_4 = \text{sen}29,7^\circ \times 1,52 = 0,753$$

Por lo que

$$\alpha_4 = \text{sen}^{-1}0,753 = 48,9^\circ$$
 (Fig. 6)

$\alpha_4 = 48,9^\circ$

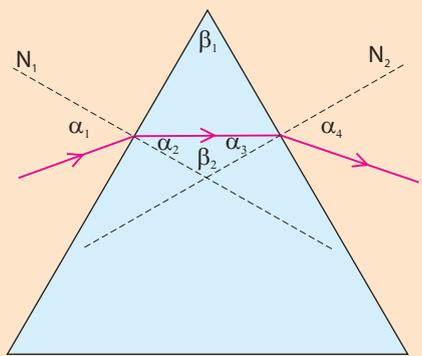


Fig. 6.

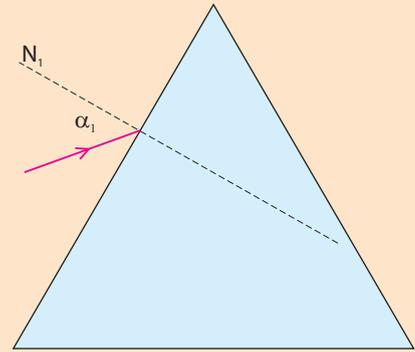


Fig. 3.

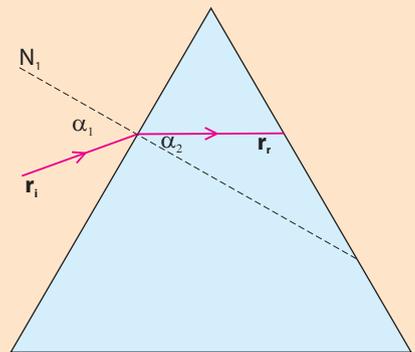


Fig. 4.

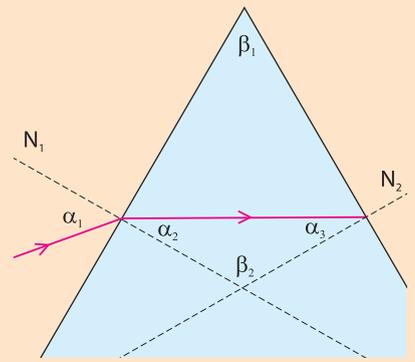


Fig. 5.

Como $\beta_1 = 60^\circ$, $\beta_2 = 120^\circ$, ya que está formado por dos perpendiculares a los lados de β_1 .

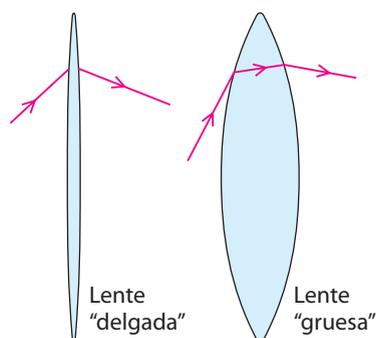
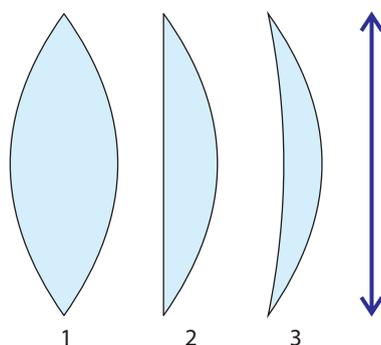
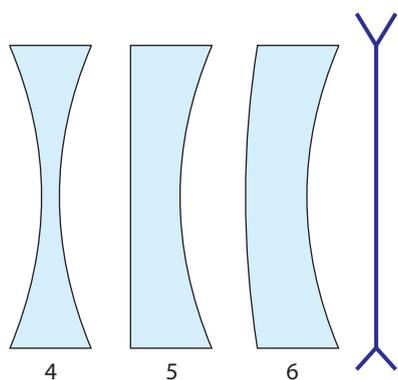


Fig. 7. Lente delgada y gruesa.

Fig. 8. Lentes convergentes:
1 biconvexas, 2 plano convexas, 3 menisco convergente.Fig. 9. Lentes divergentes:
4 bicóncavas, 5 plano cóncavas, 6 menisco divergente.

Lentes

Una lente es una porción de un medio o material transparente, limitada por dos caras, una de ellas al menos curva. Pueden ser de vidrio, cristal, agua, plástico, acrílico o cualquier material transparente. Por ej. en nuestros ojos, el cristalino es una lente que se encarga de enfocar las imágenes visuales en la retina. Su importancia en el desarrollo de la óptica, la hemos estudiado en el capítulo N° 1. Recuerda que han sido utilizados para corregir defectos de la visión; para construir lupas, telescopios, microscopios; para dirigir adecuadamente la luz láser de tu lector de CD de manera que recorra sus surcos con gran precisión, etc., etc.

Al incidir un rayo de luz en una lente, se refracta dos veces, una en cada cara. Si el grosor de la lente es despreciable comparándolo con los radios de curvatura de las caras que la forman, recibe el nombre de lente delgada. (Fig. 7)

El estudio de estas lentes nos permitirá analizar como se refracta la luz en ella, sin tener en cuenta la trayectoria de los rayos en su interior.

Según su forma las lentes delgadas pueden ser convergentes o divergentes.

Lentes Convergentes:

Son más gruesas en el centro que en los extremos. Se representa esquemáticamente con un segmento de recta y en cada extremo una punta de flecha. Según el tipo de curvatura de las caras pueden ser: biconvexas (1), plano convexas (2) y menisco convergente (3). (Fig. 8)

Lentes Divergentes:

Son más delgadas en la parte central que en los extremos. Se representan esquemáticamente por un segmento de recta y en cada extremo una punta de flecha invertida.

Según el tipo de curvatura de las caras pueden ser: bicóncavas (4), plano cóncavas (5) y menisco divergente (6). (Fig. 9)

Nosotros estudiaremos dos tipos de lentes, la biconvexa y la bicóncava. Además restringiremos el estudio a aquellas cuyas caras son simétricas.

Definiciones importantes:

Denominaremos :

- Centros de curvatura: "C" y "C'", a los centros de los casquetes esféricos que forman sus caras. Una lente puede estar compuesta por dos superficies esféricas, cada una con su centro de curvatura. (Fig. 10 y 11)
- Eje principal: a la recta que une los centros de curvatura. Éste es un eje de simetría de la lente.
- Centro óptico "O": al centro geométrico de la lente. Todas las rectas que pasan por el Centro óptico son ejes secundarios.

Únicamente estudiaremos lentes en los cuales el radio de curvatura de ambas caras es igual, o sea $OC = OC'$.

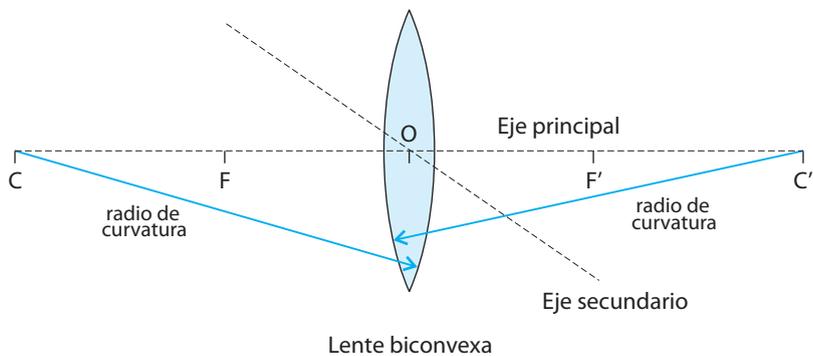


Fig. 10. Lente biconvexa.

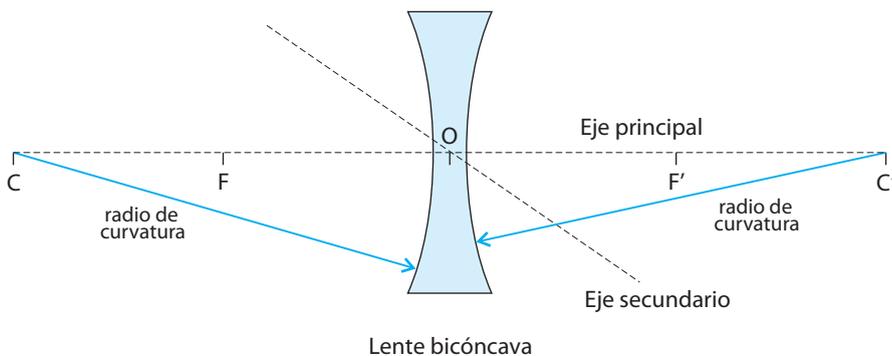


Fig. 11. Lente bicóncava.

Lentes Biconvexas:

Al incidir en dicha lente un haz de rayos paralelos al eje principal, éstos se refractan de tal manera que convergen en un punto que pertenece al eje principal. A este punto lo denominamos foco. (Fig 13)

Las lentes biconvexas refractan los rayos que inciden paralelos al eje principal hacia un punto, llamado foco. Por este motivo se denominan lentes convergentes.

- Simétricamente, si el haz incidiera del otro lado, tendríamos la misma situación, por lo que las lentes biconvexas que son convergentes tienen dos focos. A uno se lo denomina foco objeto y al otro foco imagen. (Fig. 14)
- Distancia focal "f", denominamos a la distancia entre el foco y el centro óptico.

Lentes Bicóncavas:

Al incidir en dicha lente un haz de rayos paralelos al eje principal, éstos se refractan de tal forma que divergen. Las prolongaciones de los rayos refractados, se cortan en un punto que pertenece al eje principal. A este punto lo denominamos foco. (Fig. 15)

Las lentes bicóncavas refractan los rayos que inciden paralelos al eje principal como si provinieran de un punto, llamado foco. Por este motivo se denominan lentes divergentes.



Fig. 12. Lentes bicóncava y biconvexa.

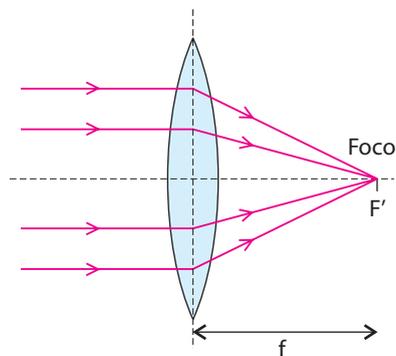


Fig. 13. Lente biconvexa convergente.

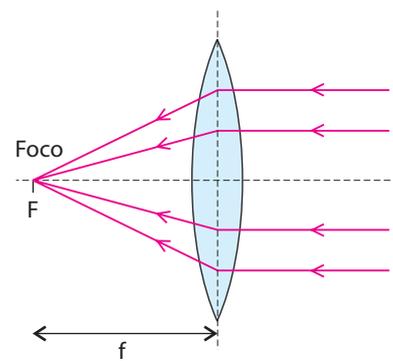


Fig. 14. Las lentes biconvexas son convergentes y tienen dos focos.

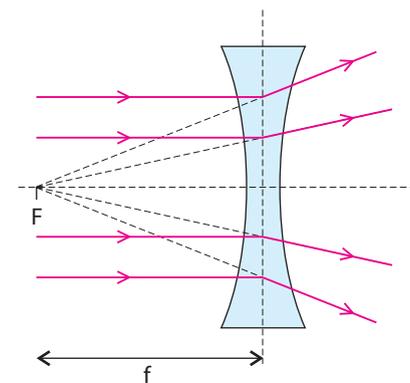


Fig. 15. Lente bicóncava divergente.

Imágenes en lentes convergentes

Para estudiar la formación de imágenes en este tipo de lentes veremos primero las características de los rayos principales, de forma análoga a lo desarrollado en los espejos esféricos. Dichos rayos son tres:

Si un rayo incide paralelo al eje principal se refracta pasando por el foco. (Fig. 16)

Si un rayo incide pasando por uno de los focos se refracta paralelo al eje principal. (Fig. 18)

Si un rayo incide pasando por el centro óptico (ejes secundarios), atraviesa la lente sin cambiar de dirección (Fig. 17)

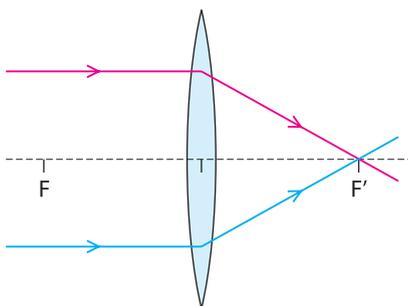


Fig. 16. Rayo que incide paralelo al eje principal se refracta pasando por el foco.

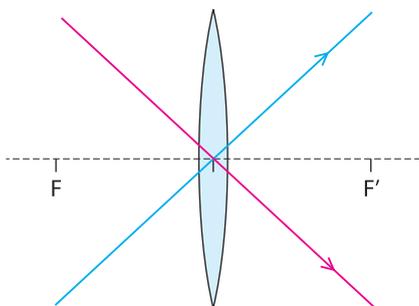


Fig. 17. Rayo que incide pasando por el centro óptico, atraviesa la lente sin cambiar de dirección.

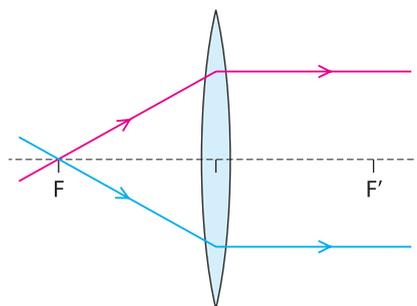


Fig. 18. Rayo que incide pasando por uno de los focos se refracta paralelo al eje principal.

Formación de imágenes

Con la ayuda de los rayos principales determinaremos las características de la imagen de un objeto (flecha).

El procedimiento que seguiremos para encontrar la imagen será similar al empleado en la formación de imágenes para espejos.

Trazaremos por lo menos dos de los rayos principales desde el extremo de la flecha. Donde se corten los rayos refractados o sus prolongaciones se formará la imagen, ya sea real o virtual. Como el origen de la flecha está sobre el eje principal, su imagen se encontrará sobre el mismo y no necesitamos realizar el trazado anterior.

• Objeto entre F y el centro óptico

Trazamos un rayo que incide paralelo al eje y se refracta por el foco y otro que incide por el centro óptico y no se desvía. (Fig. 19)

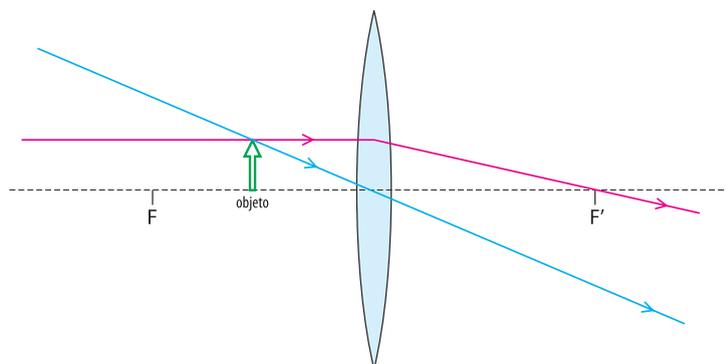


Fig. 19.

Los rayos refractados no se cortan, por lo que trazaremos sus prolongaciones. (Fig. 20)

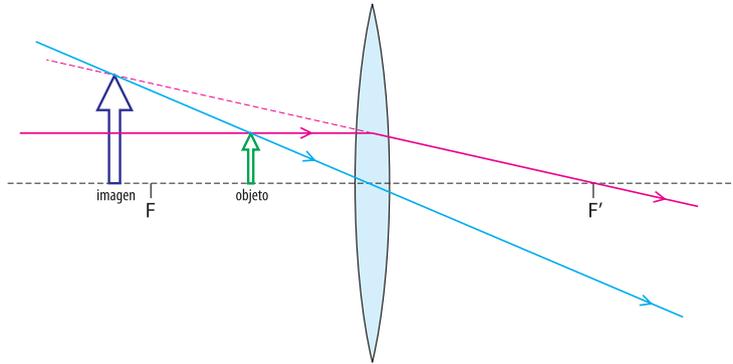


Fig.20.

- **Objeto sobre el foco F**

Trazamos los mismos rayos incidentes que el caso anterior. (Fig. 21)

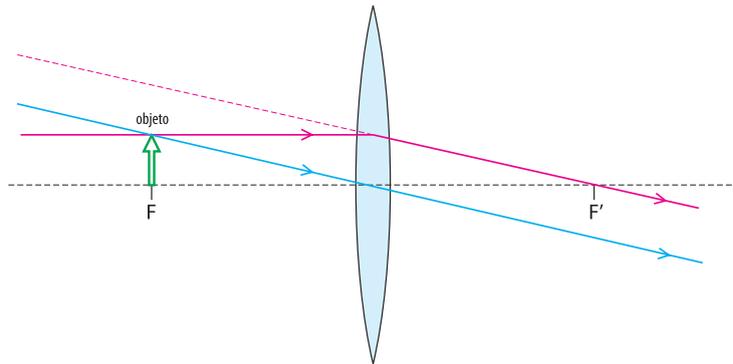


Fig.21.

Los rayos se refractan paralelos, por lo que no se cortan. Tampoco lo hacen sus prolongaciones, por lo que no se forma imagen del objeto.

- **Objeto a una distancia mayor que la distancia focal**

En este caso los rayos refractados se cortan, por lo que la imagen es real. El tamaño de la imagen dependerá de la distancia del objeto a la lente. (Fig. 22)

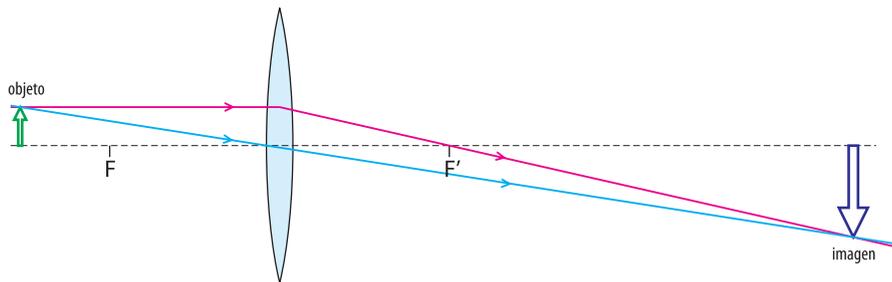


Fig.22.



Cuando el objeto se encuentra entre "F" y el centro óptico, la imagen que se forma es virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto.

Si el objeto se ubica sobre el foco "F", no se forma imagen.



Si el objeto se encuentra a una distancia mayor que la distancia focal, la imagen es real e invertida.

Imágenes en lentes divergentes

Este caso presenta grandes similitudes con el anterior, aunque también algunas diferencias. Los rayos principales se refractan de la siguiente manera

Si un rayo incide paralelo al eje principal se refracta como si proviniera desde el foco. (Fig. 23)
 Si un rayo incide de tal forma que su prolongación pasa por uno de los focos, se refracta paralelo al eje principal. (Fig. 24)
 Si un rayo incide pasando por el centro óptico (ejes secundarios), atraviesa la lente sin cambiar de dirección. (Fig. 25)

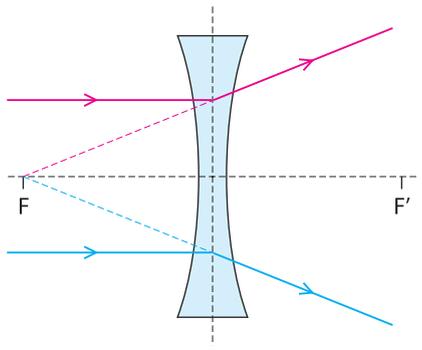


Fig. 23. Rayo que incide paralelo al eje principal, se refracta como si proviniera desde el foco.

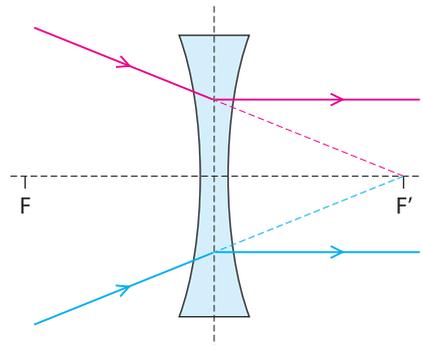


Fig. 24. Rayo que incide de tal forma que su prolongación pasa por uno de los focos, se refracta paralelo al eje principal.

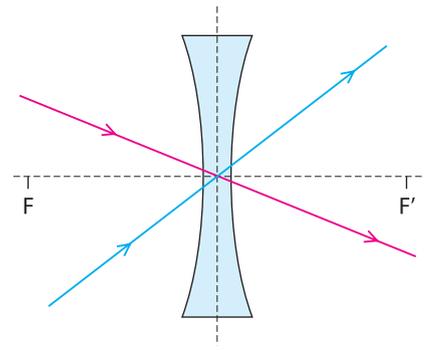


Fig. 25. Rayo que incide pasando por el centro óptico, atraviesa la lente sin cambiar de dirección.

Formación de imágenes

Estudiaremos la formación de imágenes de manera similar a las lentes convergentes, ubicando un objeto sobre el eje a diferentes distancias del centro óptico y trazando un par de rayos principales.

Si el objeto está entre el centro óptico y el foco "F" (Fig. 26), la imagen se forma con las prolongaciones de los rayos, por lo que es virtual. También es derecha y de menor tamaño que el objeto, y se ubica a una distancia menor que la distancia focal. Ocurre lo mismo si colocamos el objeto sobre el foco (Fig. 27) o a una distancia mayor. (Fig. 28).

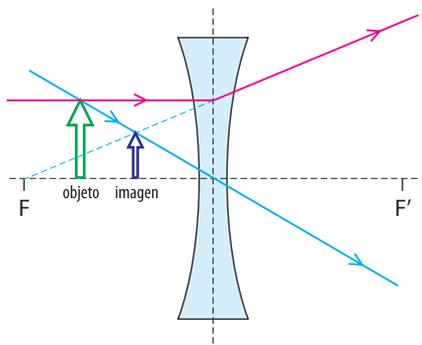


Fig. 26. Imagen formada por una lente bicóncava.

La imagen formada por una lente bicóncava siempre es:

- Virtual
- Derecha
- De menor tamaño que el objeto

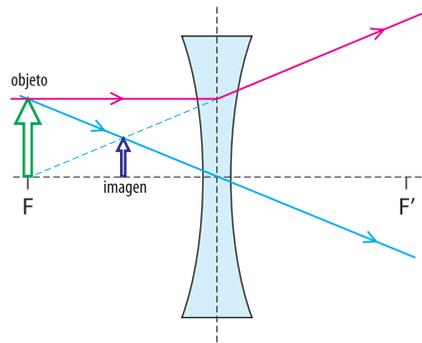


Fig. 27. Formación de la imagen de un objeto ubicado sobre uno de los focos de una lente bicóncava.

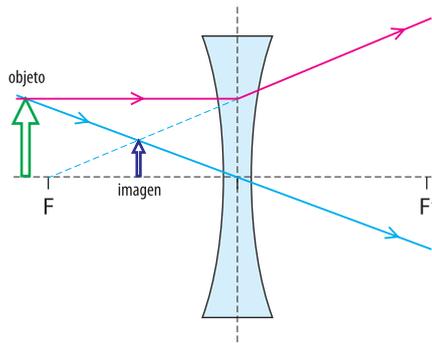


Fig. 28. Formación de la imagen de un objeto ubicado a una distancia mayor que la distancia focal de una lente bicóncava.

Ecuación de las lentes delgadas

Existe una gran semejanza entre las ecuaciones de los espejos y de las lentes. Mantendremos la misma nomenclatura con respecto a “ D_o ” y “ D_i ”, pero en este caso serán las distancias del objeto y de la imagen con respecto a la lente, la distancia focal será “ f ” nuevamente.(Fig. 29)

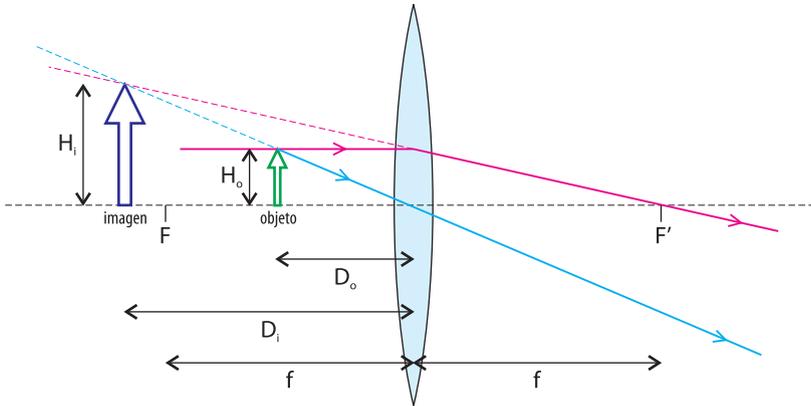


Fig. 29.

Las ecuaciones son la siguientes:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$$

$$\frac{H_i}{H_o} = -\frac{D_i}{D_o}$$

El criterio que tomaremos para las lentes es el siguiente:

- $f > 0$ si la lente es biconvexa.**
- $f < 0$ para las lentes bicóncavas.**
- $D_o > 0$ para todos los casos.**
- $D_i > 0$ si la imagen es real.**
- $D_i < 0$ si la imagen es virtual.**

El aumento se define de igual manera que para los espejos.

$$A = \left| \frac{H_i}{H_o} \right|$$

- $A > 1$ si la imagen es mayor que el objeto.**
- $A < 1$ si la imagen es menor que el objeto**

- Si $H_i > 0$ la imagen es derecha.**
- Si $H_i < 0$ la imagen es invertida.**

Ejemplo 2

Un objeto lineal vertical de 3,0cm de altura se ubica frente a una lente biconvexa delgada de 4,0cm de distancia focal, como muestra la figura 30. Determina todas las características de su imagen.

Recuerda que una lente biconvexa se representa esquemáticamente con una línea con dos puntas de flecha en los extremos.

Método gráfico: En primer lugar intentaremos determinar las características de la imagen haciendo un diagrama a escala. Al igual que en los ejemplos de espejos, lo haremos utilizando dos rayos principales. Trazamos un rayo que pase por el extremo superior y que incida en la lente paralelo al eje óptico, este rayo se refracta pasando por el foco F' . No olvides tener en cuenta que en este caso es una lente y no un espejo por lo que los rayos no se reflejan sino que se refractan. (Fig. 31) Luego trazamos un rayo que pase por el extremo superior del objeto y que incida en la lente pasando por el foco "F"; éste se refracta paralelo al eje. (Fig. 32)

La imagen del extremo se forma donde se cortan ambos rayos refractados. En este caso la imagen es **real** (se forma con la intersección de los rayos refractados), **invertida** y de **menor tamaño** que el objeto. El tamaño de la imagen y la distancia a la lente los podemos determinar a escala.

Escala: 1cm - 4cm

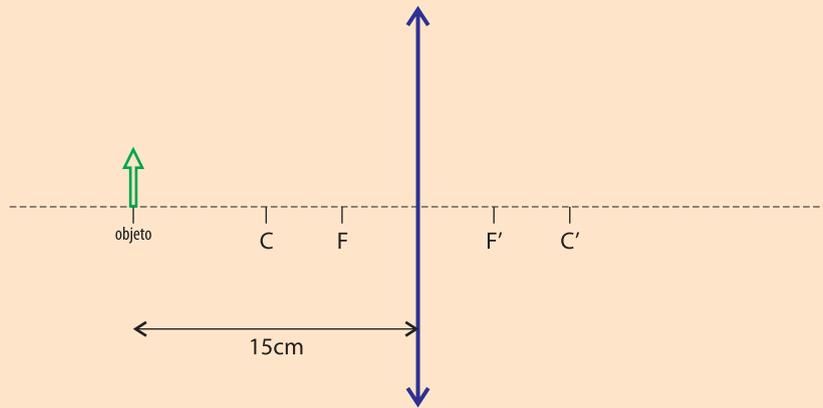


Fig. 30.

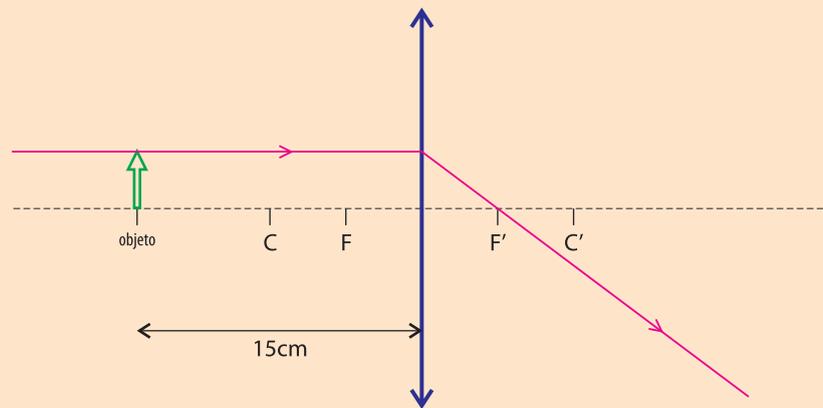


Fig. 31.

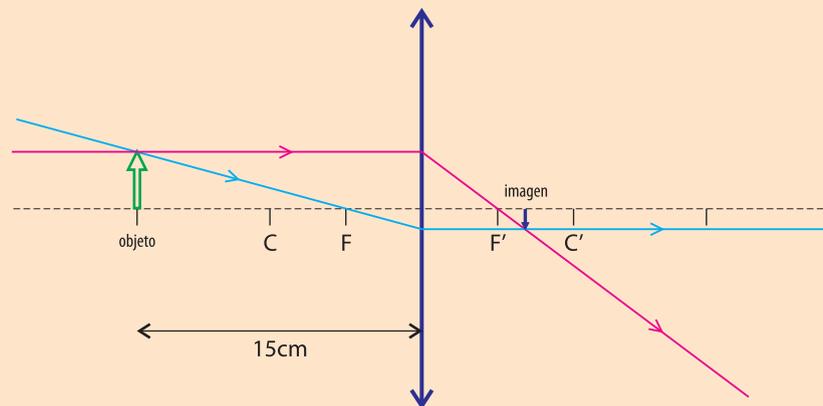


Fig. 32.

Método analítico:

Utilizando la ecuación $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$ determinaremos la distancia a la que se forma la imagen "D_i".

Como es una lente biconvexa la distancia focal es positiva.

$$\frac{1}{4,0\text{cm}} = \frac{1}{15,0\text{cm}} + \frac{1}{D_i} \qquad \frac{1}{4,0\text{cm}} - \frac{1}{15,0\text{cm}} = \frac{1}{D_i}$$

Tomando 60 como divisor común

$$\frac{15 - 4}{60\text{cm}} = \frac{1}{D_i} \qquad \frac{11}{60\text{cm}} = \frac{1}{D_i}$$

$$\frac{60\text{cm}}{11} = D_i \qquad \boxed{D_i = 5,5\text{cm}}$$

D_i es positiva, lo que nos indica que la imagen es real.

Utilizando la ecuación $\frac{H_i}{H_o} = -\frac{D_i}{D_o}$ determinaremos H_i altura de la imagen.

$$\frac{H_i}{3,0\text{cm}} = -\frac{5,5\text{cm}}{15,0\text{cm}} \qquad \frac{H_i}{3,0\text{cm}} = -0,37$$

$$H_i = -0,37 \times 3,0\text{cm} \qquad \boxed{H_i = -1,1\text{cm}}$$

H_i es negativa, lo que nos indica que la imagen es invertida.

Ejemplo 3

Estudiaremos las características de la imagen del mismo objeto, situado a la misma distancia, pero ahora de una lente delgada biconcava de 4,0cm de distancia focal. (Fig. 33)

Recuerda que una lente biconcava se representa esquemáticamente con una línea con dos puntas de flecha invertidas en los extremos.

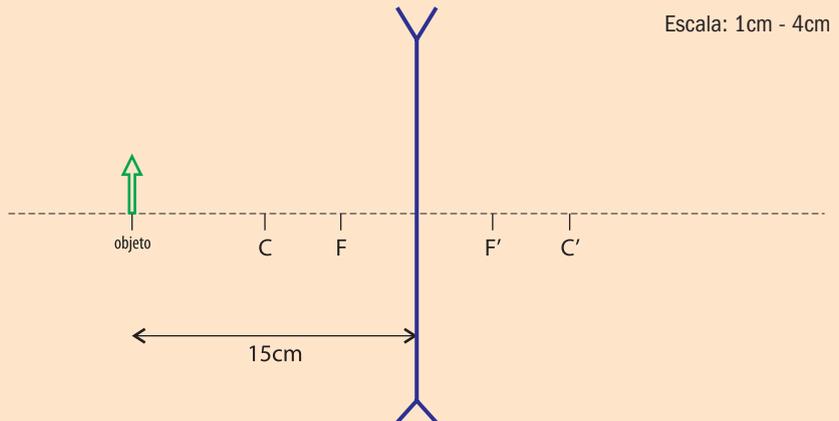


Fig. 33.

Método gráfico: Primero intentaremos determinar las características de la imagen haciendo un diagrama a escala. Al igual que en el ejemplo anterior, para formar su imagen necesitamos ubicar solamente la imagen del extremo superior. Para eso trazaremos dos rayos principales. En primer lugar, un rayo que pase por el extremo superior y que incida en la lente paralelo al eje óptico. Este rayo se refracta como si proviniera del foco F. (Fig. 34)

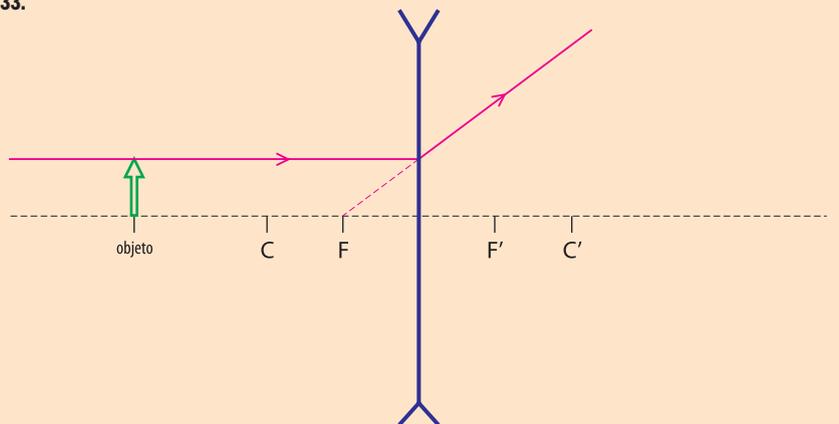


Fig. 34.

Luego trazamos un rayo que pase por el extremo superior del objeto y que incida en la lente de tal manera que su prolongación pase por el foco "F'"; éste se refracta paralelo al eje. (Fig. 35)

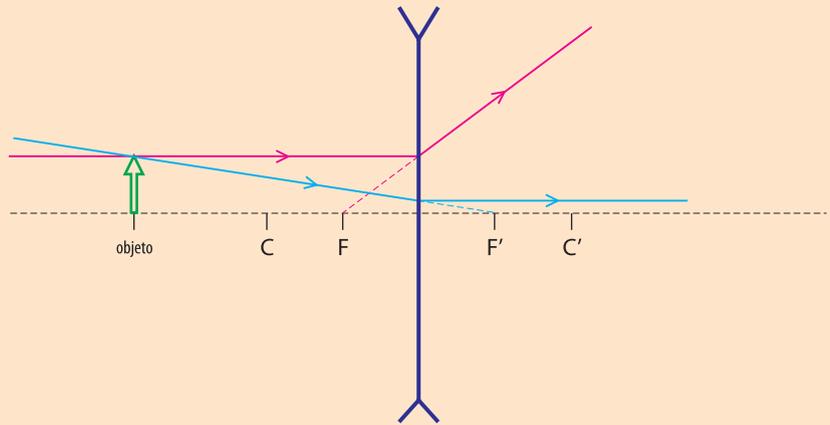


Fig. 35.

Los dos rayos refractados no se cortan, por lo tanto la imagen del extremo se forma en el punto de corte de las prolongaciones de ambos rayos refractados. (Fig. 36)

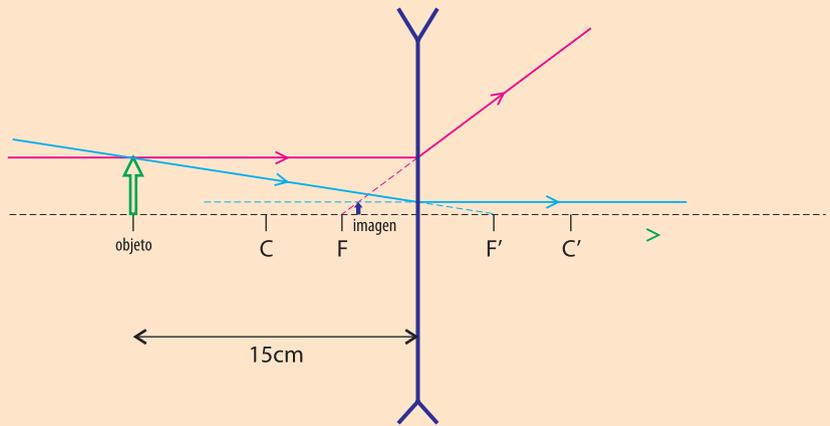


Fig. 36.

En este caso la imagen es virtual (se forma con la intersección de las prolongaciones de los rayos refractados), derecha y de menor tamaño que el objeto. El tamaño de la imagen y la distancia a la lente los podemos determinar a escala.

Método analítico:

Utilizando la ecuación $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$ determinaremos la distancia a la que se forma la imagen "D_i"

Como es una lente biconcava la distancia focal es negativa

$$\frac{1}{-4,0\text{cm}} = \frac{1}{15,0\text{cm}} + \frac{1}{D_i} \qquad -\frac{1}{4,0\text{cm}} - \frac{1}{15,0\text{cm}} = \frac{1}{D_i}$$

Tomando 60 como divisor común

$$\frac{-15 - 4}{60\text{cm}} = \frac{1}{D_i} \qquad \frac{-19}{60\text{cm}} = \frac{1}{D_i}$$

$$\frac{60\text{cm}}{-19} = D_i \qquad \mathbf{D_i = -3,2 \text{ cm}}$$

D_i es negativa, lo que nos indica que la imagen es virtual.

Utilizando la ecuación $\frac{H_i}{H_o} = -\frac{D_i}{D_o}$ determinaremos la altura de la imagen "H_i"

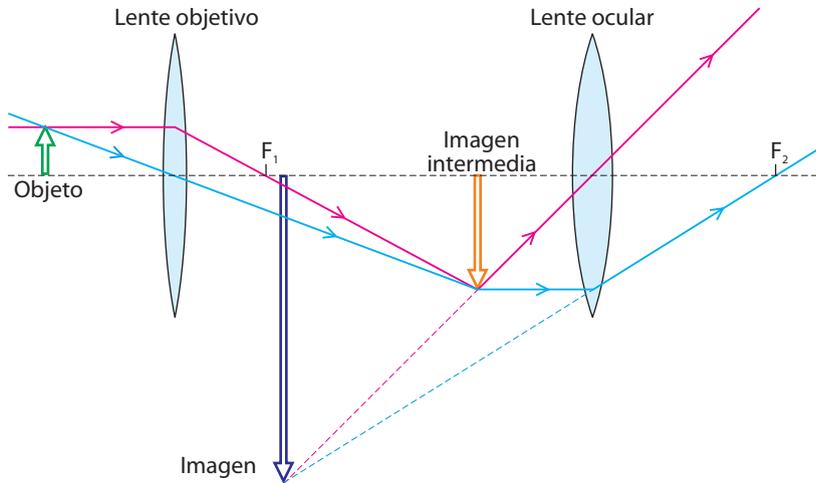
$$\frac{H_i}{3,0\text{cm}} = -\frac{-3,2\text{cm}}{15,0\text{cm}} \qquad \frac{H_i}{3,0\text{cm}} = 0,21$$

$$H_i = 0,21 \times 3,0\text{cm} \qquad \mathbf{H_i = 0,63 \text{ cm}}$$

H_i es positiva, lo que nos indica que la imagen es derecha.

Asociación de lentes. Microscopio Compuesto.

Diversos instrumentos ópticos funcionan asociando dos o más lentes. La imagen que se forma gracias a una de las lentes funciona como objeto para la otra. Un ejemplo de esto es el microscopio compuesto, en el cual se combinan dos lentes convergentes para obtener una imagen muy aumentada del objeto. Esta imagen es virtual e invertida.



Si el aumento de la lente objetivo es 20 y el aumento de la lente ocular es 5, el aumento total del microscopio será $20 \times 5 = 100$.

Fig. 37. Formación de imágenes en un microscopio compuesto. El esquema no está a escala.

PREGUNTAS

- Describe aplicaciones prácticas de prismas.
- El vidrio de una ventana es un prisma de caras paralelas. ¿Por qué la imagen a través de él no se deforma?
- Define eje principal, centro óptico, centro de curvatura y foco de una lente.
- ¿En qué dirección se refracta un rayo que incide paralelo al eje principal en una lente convergente?
- Responde lo mismo que en la pregunta 4 pero ahora para un rayo que incide pasando por el foco y otro que pasa por el centro óptico.
- Menciona aplicaciones prácticas de las lentes convergentes.
- Completa la siguiente tabla para una lente convergente:

Ubicación del objeto	Tipo de imagen
Entre el vértice y el foco	
En el foco	
Entre el foco y el centro de curvatura	
En el centro de curvatura	
Más allá del centro de curvatura	



Fig. 38. Pregunta 13.



Fig. 39. Pregunta 14.

- 8) ¿Por qué te parece que no planteamos una tabla igual a la anterior para las lentes divergentes?
- 9) ¿En qué dirección se refracta un rayo que incide paralelo al eje principal en una lente divergente?
- 10) Responde lo mismo que en la pregunta 9 pero ahora para un rayo que incide pasando por el foco y otro que pasa por el centro óptico.
- 11) Menciona aplicaciones prácticas de las lentes divergentes.
- 12) Define las distancias D_o , D_i , f , H_i , H_o , indicando en qué caso consideramos a cada una como positiva y como negativa.
- 13) ¿Qué tipo de lente te parece que está siendo utilizado en la foto de la figura 38? El objeto ¿se encuentra antes o después del foco?
- 14) Responde lo mismo que en la pregunta anterior para la foto de la figura 39.

PROBLEMAS

- 1) Continúa la trayectoria de los rayos de luz hasta que salen del prisma, calculando los ángulos correspondientes. (Fig. 40)
(Los prismas son de vidrio crown $n = 1,52$)

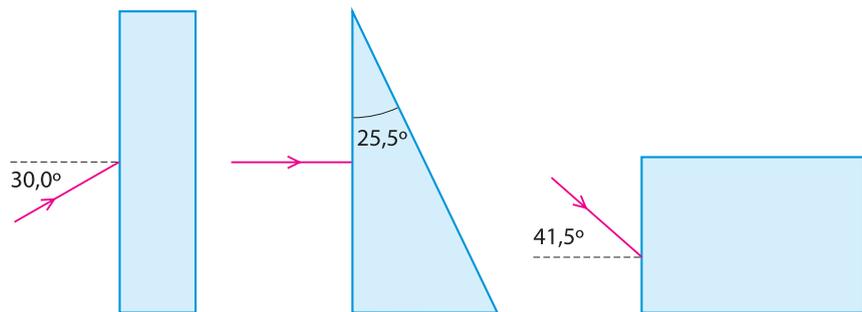


Fig. 40. Problema 1.

- 2) Completa los diagramas de rayos de la figura 41:

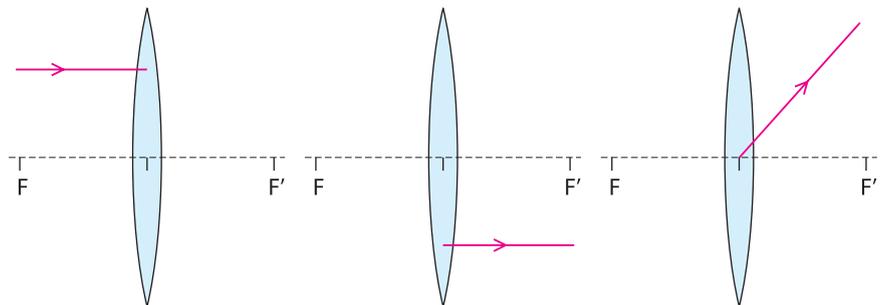


Fig. 41. Problema 2.

- 3) Un objeto en forma de flecha vertical de 3,0cm de altura se ubica sobre el eje principal, a 10,0cm de una lente biconvexa delgada de 8,0cm de distancia focal.
 - a) Realiza un diagrama a escala de la situación.
 - b) Traza los rayos necesarios para encontrar la imagen del objeto.
 - c) ¿La imagen es real o virtual? ¿Derecha o invertida?
 - d) Determina la altura de la imagen y su distancia al vértice.
 - e) Si acercamos el objeto un poco hacia la lente, la altura de su imagen ¿aumenta o disminuye?
- 4) Repite el problema anterior ubicando el objeto
 - a) a 16,0cm del vértice
 - b) a 5,0cm del vértice
- 5) ¿Qué ocurre con la imagen si ubicamos el objeto del problema N° 3 a 8,0cm de la lente?
- 6) Utilizando las ecuaciones apropiadas realiza los cálculos para verificar las respuestas encontradas por métodos gráficos en los problemas N° 3 y N° 4.
- 7) Una lente convergente de distancia focal 36cm forma una imagen real a 48cm de la lente. Calcula la distancia del objeto a la lente.
- 8) Completa los diagramas de rayos de la figura 42.
- 9) Un objeto en forma de flecha vertical de 2,5cm de altura se ubica sobre el eje principal, a 5,0cm de una lente bicóncava delgada de 9,0cm de distancia focal.
 - a) Realiza un diagrama a escala de la situación.
 - b) Traza los rayos necesarios para encontrar la imagen del objeto.
 - c) ¿La imagen es real o virtual? ¿Derecha o invertida?
 - d) Determina la altura de la imagen y su distancia al vértice.
 - e) Determina el aumento de la lente.
 - f) Si acercamos el objeto un poco a la lente, la altura de su imagen ¿aumenta o disminuye?
- 10) Utilizando las ecuaciones apropiadas realiza los cálculos para verificar las respuestas encontradas por métodos gráficos en el problema N° 9.
- 11) Un objeto se encuentra a 7,5cm de una lente divergente. Esta lente tiene una distancia focal de 15,0cm. Determina dónde se forma su imagen.
- 12) Un estudiante con una lupa de distancia focal 10cm observa una hormiga de largo 5,0mm. Si la distancia de la lente a la hormiga es de 25cm:
 - a) Determina analíticamente las características de la imagen de la hormiga.
 - b) Si ahora el estudiante acerca la lupa a 5,0cm de la hormiga ¿En qué cambia tu respuesta anterior?
- 13) Un objeto es colocado frente a una lente convergente de distancia focal 50cm. La imagen, que es real, tiene el doble de tamaño que el objeto.
 - a) Determina el aumento de la lente.
 - b) Calcula la distancia del objeto a la lente.
- 14) Calcula lo mismo que en el problema anterior suponiendo que la imagen formada por la lente es virtual.

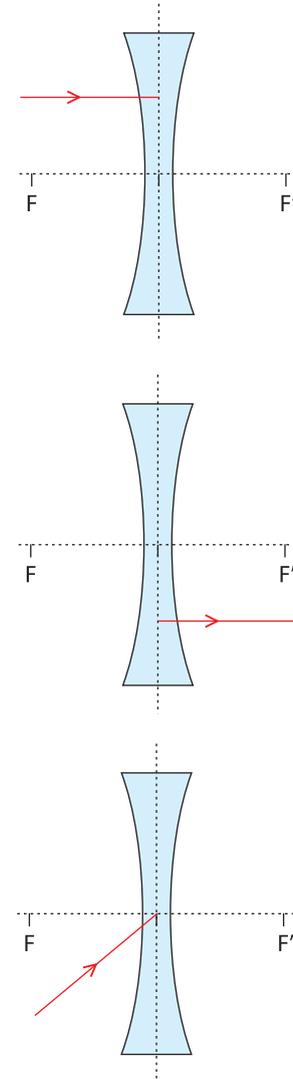


Fig. 42. Problema 8

Ondas, pulsos

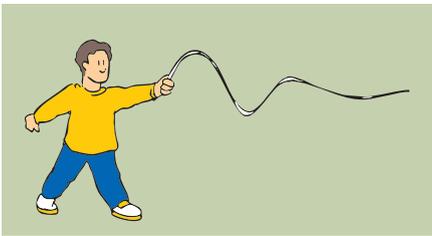


Fig. 1. La deformación realizada viaja a través de la cuerda, pero la cuerda no se desplaza.



Fig. 2. Un objeto que flota en el lago, al ser alcanzado por un "círculo", perturbación, sólo se mueve verticalmente para arriba y abajo, permaneciendo luego en el mismo lugar.



Fig. 3. Al golpear la mesa se le aporta energía al medio. Esta energía se traslada en forma de onda hasta el lápiz y la mesa no se traslada.

Introducción

Cuando una pelota de fútbol se mueve desde un punto a otro de la cancha, su energía se traslada con ella. La pelota es capaz de desarrollar trabajo cuando llega a su destino; cabeza de un compañero, palo del arco o en el mejor de los casos la red.

¿Existe una forma diferente de transportar energía? La respuesta es si.

Si agitamos el extremo de una cuerda (fig 1), la deformación que generamos viaja a través de ella, pero la cuerda no se desplaza.

Si tiramos una piedra en un lago con agua tranquila, podemos ver círculos concéntricos que aumentan su radio con el tiempo (fig 2). Una hoja que flota,, al ser alcanzada por un "círculo", sólo se mueve verticalmente para arriba y abajo, permaneciendo luego en el mismo lugar. No se traslada junto con los círculos concéntricos.

Otro ejemplo similar y muy sencillo que puedes realizar en tu hogar, es colocar un lápiz sobre una mesa metálica o de madera fina y realizar un golpe con la palma de la mano sobre la tapa de la mesa. (Fig 3). Observa que el lápiz salta, o sea sube y baja.

En todos los casos hay "algo" que se propaga por un medio, una perturbación que **no traslada materia consigo**. La deformación se mueve por la cuerda, los círculos de agua por la superficie de la piscina, pero el medio (cuerda, agua) no se desplaza. Estamos describiendo un nuevo tipo de fenómeno, donde una perturbación viaja por un medio, pero el medio no viaja con ella. Dicha perturbación transporta energía pero no desplaza materia. A estas perturbaciones se les denomina **ondas**.

Onda es toda forma de transferir energía de un lugar a otro del espacio sin desplazar materia.

Cuando estas perturbaciones viajan por un medio elástico (que luego de deformarse vuelve a su forma original) las llamamos **ondas mecánicas**.

¿Existirán ondas que no necesiten un medio para propagarse?
Más adelante daremos respuesta a esta pregunta.

Los fenómenos ondulatorios son el soporte físico, los que posibilitan el funcionamiento de numerosos electrodomésticos: radio, TV aérea, teléfonos celulares, hornos microondas y muchos más.

¿La luz se propagará en forma de ondas? Esta interrogante también la responderemos más adelante.

Clasificación de las ondas

Podemos clasificar las ondas utilizando diferentes criterios.

Primera clasificación de las ondas: Mecánicas o Electromagnéticas

El primer criterio que utilizaremos ya lo mencionamos en la hoja anterior. El mismo toma en cuenta si la onda necesita un medio material o no para propagarse. Si la onda necesita un medio material para propagarse (cuerda, alambre, lonja de un tambor, vidrio, metales, agua, etc) se les denomina **Ondas Mecánicas**. En cambio las ondas que no necesitan un medio para propagarse, como la luz, ondas de radio y televisión, microondas, etc. se denominan **Ondas Electromagnéticas**.

Ondas mecánicas son aquellas que necesitan de un medio elástico para propagarse.

Ondas electromagnéticas son las que no necesitan de un medio de propagación, se pueden propagar en el vacío.

Segunda clasificación de las ondas: Unidimensionales, Bidimensionales o Tridimensionales.

El criterio que utilizaremos para realizar esta segunda clasificación es tomando en cuenta en cuántas direcciones se propaga la onda. Si se propagan en una sola dirección se denominan unidimensionales. Ejemplos de estas son las ondas en una cuerda, cables, alambres. La única dirección de propagación es la dirección que tiene dicho medio.

En cambio si la onda se propaga en un plano, es decir en dos dimensiones, se les denomina bidimensionales. Ejemplo de éstas son las ondas en la superficie del agua, en una chapa, en una lonja de algún instrumento de percusión, etc. Por último si la onda se propaga en todas direcciones se les denomina tridimensionales. Ejemplos de estas son las ondas sonoras en el aire, ondas de radio y T.V., microondas, etc.

Considerando en cuántas direcciones se propagan las ondas, pueden ser: unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales; si se propagan en una, en dos o en tres dimensiones respectivamente.



Antena receptora de ondas electromagnéticas.

Tercera clasificación de las ondas: Ondas Longitudinales y Transversales.

El tercer criterio de clasificación está basado en la dirección del movimiento de los puntos del medio con respecto a la dirección de la velocidad de propagación de la onda.

Ondas Transversales.

En el dibujo de la fig. 4 se muestra un resorte largo (este será el medio en el que se propague una onda), con una cintita atada a una de sus espiras. Con ello estamos marcando un punto del medio para analizar las características de su movimiento cuando se propaga una onda por dicho medio.

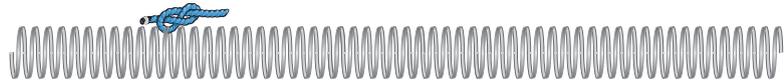


Fig. 4. Resorte (medio de propagación de la perturbación). Con la cintita atada visualizamos mejor el movimiento que tiene un punto cuando la perturbación pasa por él.

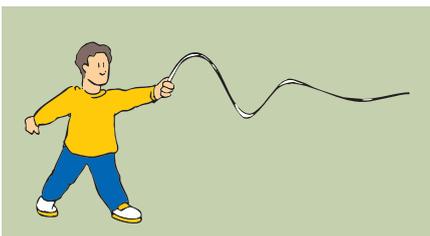


Fig 6a. Ondas transversales en una dimensión. Los puntos del medio se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación de la perturbación, que es la misma dirección de la cuerda.

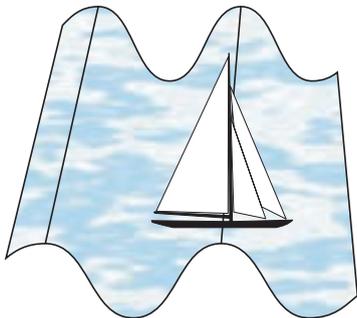


Fig 6b. Ondas bidimensionales (avanzan en el plano) y transversales en la superficie del agua. Los puntos del medio (agua) se mueven perpendicularmente a las direcciones de propagación de la perturbación.

Si tomamos el extremo del resorte y lo agitamos hacia arriba y abajo, (o sea producimos una perturbación), cada punto (y la cintita también) oscilará en esa misma dirección, mientras que el pulso (la perturbación) se propaga a lo largo del resorte. Decimos que en él se propaga una **onda transversal**, en la que cada punto oscila en forma perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación. Las ondas en una cuerda y en la superficie del agua son ejemplos de ondas transversales (fig 6a y 6b).

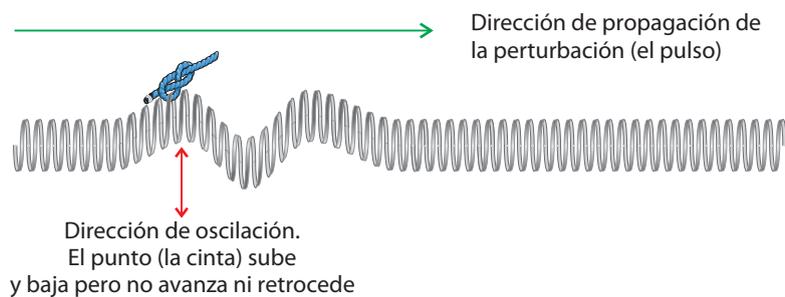


Fig. 5. Ondas transversales en un resorte largo. Cada punto oscila en forma perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación.

Una onda es transversal, cuando cada punto del medio oscila en una dirección perpendicular con respecto a la dirección de propagación de la perturbación.

Ondas longitudinales.

Si tomamos el extremo del resorte y lo agitamos hacia adelante y atrás, cada punto del resorte oscilará también hacia adelante y atrás, mientras que la perturbación se propaga hacia adelante. En este caso viaja por el resorte una **onda longitudinal**, (Fig. 7) en la que cada punto oscila en la misma dirección de propagación de la perturbación. El sonido es un ejemplo de ondas longitudinales.

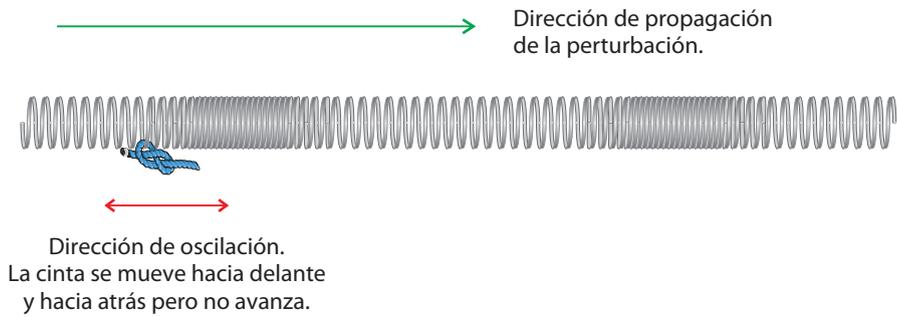


Fig. 7. Ondas Longitudinales en un resorte largo.

Al golpear la membrana del tambor (parche), ésta vibra hacia arriba y hacia abajo, comprimiendo las partículas de aire que están en contacto con ella. Al igual que las espiras del resorte, cada partícula “empuja” a su vecina y vuelve a su posición anterior (fig 8).

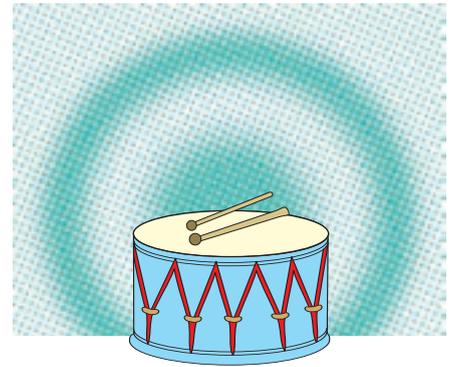


Fig 8. Ondas longitudinales de sonido en el aire. Al golpear la membrana del tambor (parche), ésta vibra, comprimiendo las partículas de aire que están en contacto con ella. Eso provoca variaciones en la presión del aire. Dicha perturbación se propaga en la misma dirección que el movimiento local de las partículas de aire.



Onda Transversal.



Onda Longitudinal.

Pulsos

Imagina que tenemos una cuerda larga atada firmemente a la pared en uno de sus extremos y una pesa colgando del otro extremo, pasando por una polea (fig 9a). La cuerda tensa se encuentra en equilibrio en la forma que muestra la figura.

En determinado momento golpeamos con una regla el punto “A” verticalmente hacia abajo (fig 9b). En las cercanías de “A” la cuerda se deforma (fig 9c). A medida que pasa el tiempo esa deformación viaja por la cuerda, pero la cuerda no se desplaza. Hemos generado una perturbación denominada **pulso** que se propaga por la cuerda.

Si observamos la secuencia de imágenes vemos que los puntos de la cuerda tienen un movimiento vertical, mientras que el pulso se propaga horizontalmente (onda transversal).

En la figura 9e observamos que el punto “B” repite el mismo movimiento que el punto “A” un tiempo después. Dicho con otras palabras, el suceso (la perturbación) que se generó en el punto “A”, se va repitiendo en todos los puntos de la cuerda a medida que son alcanzados por el pulso.

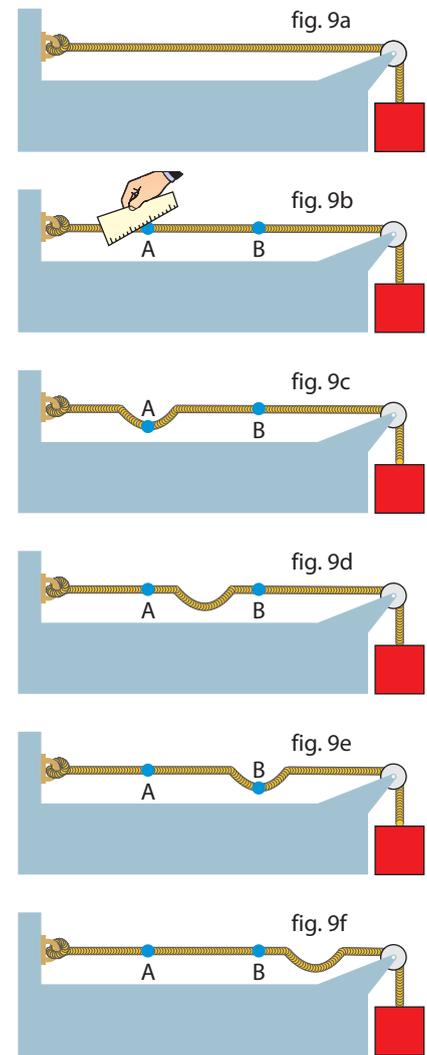


Fig 9. Al golpear el punto “A” verticalmente hacia abajo la cuerda se deforma. Hemos generado una perturbación denominada pulso que se propaga por la cuerda. Al transcurrir el tiempo la perturbación que se generó en el punto “A”, se va repitiendo en todos los puntos de la cuerda a medida que son alcanzados por el pulso, pero la cuerda no se desplaza.

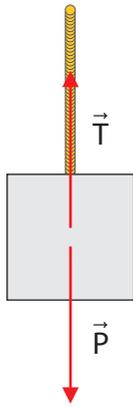


Fig 10. El Peso y la Tensión tienen el mismo módulo si la masa está en equilibrio.

Si aumento la tensión al doble, la velocidad de propagación aumenta por un factor $\sqrt{2}$.

$$v' = v \cdot \sqrt{2}$$

Si cambio la cuerda por otra con el doble de densidad lineal de masa, la velocidad de propagación disminuye en un factor $\sqrt{2}$.

$$v' = \frac{v}{\sqrt{2}}$$

Fig 11.

Cuando golpeamos con la regla en el punto "A" realizamos sobre él un trabajo, por lo tanto le cedemos cierta cantidad de energía. Esa energía se va desplazando por la cuerda. El punto "A" se la transfiere a su punto contiguo y así sucesivamente. De esta manera estamos frente a la situación de desplazar energía sin que exista transporte de materia, es decir un pulso de onda.

Velocidad de propagación de un pulso en una cuerda

La velocidad con que viaja un pulso en una cuerda no depende de cómo se generó ni de la forma que tiene, depende exclusivamente de características del medio. En este caso, depende del módulo de la fuerza tensión en la cuerda "T" y la densidad lineal de masa de la misma " μ ". Si la cuerda es homogénea " μ " se define como el cociente entre la masa de la cuerda " m_c " y su longitud " l_c ".

$$\mu = \frac{m_c}{l_c} \text{ Su unidad en el sistema internacional es } \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Si la cuerda es mantenida tensa por una pesa y se encuentra en equilibrio, la Tensión tendrá el mismo valor que el Peso de la pesa. Recuerda que $P = m \cdot g$ (Fig. 10)

La velocidad de propagación es mayor si la cuerda está más tensa y es menor si la cuerda es de mayor densidad lineal de masa. La relación entre estas variables no es directamente proporcional (fig 11). Se verifica que

$$v_p = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

La demostración de esta relación excede el propósito de este libro. Simplemente mostraremos que es dimensionalmente coherente, o sea que las unidades de ambos miembros de la igualdad coinciden.

La unidad de la fuerza es $[F] = \text{N}$ y la unidad de la densidad lineal de masa

$$[\mu] = \frac{\text{kg}}{\text{m}}. \text{ Analicemos las unidades de } \left[\sqrt{\frac{T}{\mu}} \right] = \sqrt{\frac{\text{N}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}}}}$$

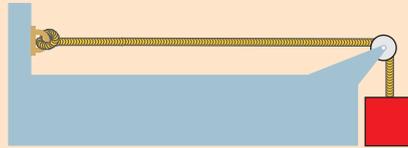
$$\sqrt{\frac{\text{N}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \times \text{m}}{\text{s}^2} \times \frac{\text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Hemos comprobado que la unidad de $\sqrt{\frac{T}{\mu}}$ es $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, que coincide con

la unidad de velocidad en el SI. Si bien esto no demuestra la validez de la ecuación, verifica la coherencia de sus unidades.

Ejemplo 1

Una cuerda de $m = 42,7\text{g}$ y $l = 5,00\text{m}$ es tensada por una pesa de $m = 1,86\text{kg}$ como muestra la figura.



a) Determina la densidad lineal de masa “ μ ” de la cuerda

De acuerdo a la definición, $\mu = \frac{m_c}{l_c}$. Convirtiendo la masa de la cuerda a kg y sustituyendo, $\mu = \frac{0,0427\text{kg}}{5,00\text{m}} = 0,00854 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$ Este resultado se puede expresar también en notación científica, de la siguiente forma

$$\mu = 8,54 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

b) Determina la velocidad con la que se propaga un pulso por la cuerda. Primero determinaremos el valor de la Tensión a la que está sometida la cuerda, que es igual al valor del Peso de la pesa que cuelga de su extremo.

$T = m \cdot g$ (“m” es la masa de la pesa, no la masa de la cuerda)

$$T = 1,86\text{ kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 18,2\text{ N}$$

Sabiendo que $v_p = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$, sustituimos $v_p = \sqrt{\frac{18,2\text{N}}{0,00854 \frac{\text{kg}}{\text{m}}}}$

$$v_p = 46,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reflexión y refracción de pulsos en una cuerda

Reflexión de un pulso en una cuerda con un extremo fijo

Analicemos qué ocurre cuando un pulso viaja por un medio (una cuerda) y llega a un extremo fijo.

Imaginemos una cuerda atada en un punto fijo “B” de una pared (fig.13). Si generamos en el otro extremo un pulso, éste viaja por la cuerda y llegará al punto “B”, donde se producirán dos fenómenos, reflexión y absorción. Gran parte de la energía vuelve a la cuerda en un pulso reflejado y el resto es absorbida por la pared. Además se observa que el pulso reflejado se invierte.

Un pulso incidente que se propaga por una cuerda con un extremo fijo, al llegar a dicho punto, se refleja. El pulso reflejado está invertido con respecto al incidente. Su velocidad cambia de sentido y su módulo permanece constante dado que el medio de propagación es el mismo.

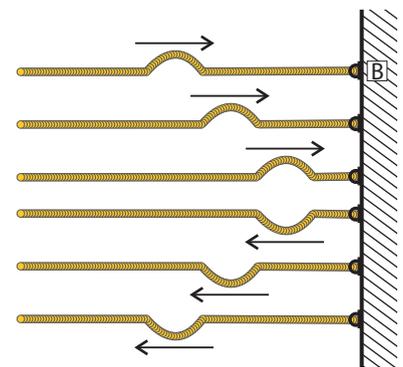


Fig 13. Reflexión de un pulso en una cuerda tensa con un extremo fijo. El pulso reflejado es invertido con respecto al pulso incidente.

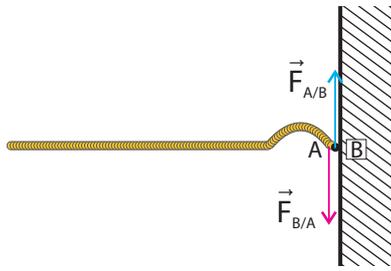


Fig 14. “A” es el último punto de la cuerda, que está unido al punto “B”, fijo en la pared. El pulso llega al punto “A”, este aplica una fuerza sobre “B” vertical y hacia arriba (acción). El punto “B” aplica por lo tanto una fuerza también vertical, con igual módulo pero sentido opuesto (reacción). Dicha fuerza hacia abajo hace que el pulso reflejado se invierta.

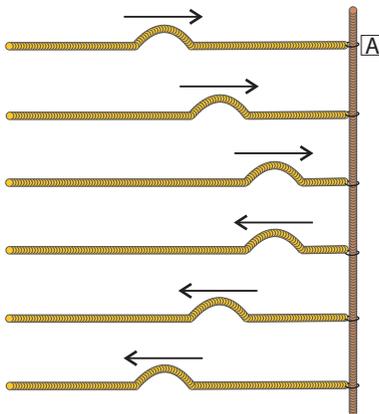


Fig 15. Reflexión de un pulso incidente que se propaga por una cuerda tensa con un extremo libre. El pulso reflejado no se invierte.

Podemos explicar la inversión del pulso reflejado a partir de la 3ra Ley de Newton (Acción y Reacción). Llamemos “A” al último punto de la cuerda, que está unido al punto “B”, fijo en la pared (fig 14). Cuando el pulso llega al punto “A”, este aplica una fuerza sobre “B” vertical y hacia arriba (acción). El punto “B” aplica por lo tanto una fuerza también vertical, con igual módulo pero sentido opuesto (reacción). Dicha fuerza hacia abajo hace que el pulso reflejado se invierta.

Los pulsos reflejado e incidente se mueven con velocidades del mismo módulo. Recuerda que la velocidad de propagación depende de la densidad lineal de masa y la tensión de la cuerda. En este caso los valores de estas magnitudes son los mismos para ambos pulsos.

Reflexión de un pulso en una cuerda tensa con un extremo libre.

Ahora veamos qué ocurre cuando el extremo de la cuerda está libre, es decir que el último punto puede oscilar libremente cuando llega el pulso incidente (fig 15). En una situación ideal, esto lo podríamos lograr sujetando el extremo de la cuerda a un anillo que pasa por una varilla vertical. Si el rozamiento entre la varilla y el anillo es despreciable, este último se movería libremente en forma vertical.

Cuando llega el pulso al punto “A”, éste mueve el anillo hacia arriba, cediéndole energía en forma de trabajo. Al bajar, el anillo cede nuevamente la energía a la cuerda, generando un pulso derecho. Al igual que en el caso anterior, cambia sólo el sentido de su velocidad de propagación, no su valor numérico (módulo).

Un pulso incidente que se propaga por una cuerda tensa al llegar a un extremo libre se reflejará sin invertirse. La velocidad de propagación cambia de sentido pero su módulo permanece constante.

Refracción de pulsos de ondas en cuerdas.

Consideremos ahora el caso en el que un pulso llega a un punto de unión entre dos medios diferentes, por ejemplo dos cuerdas atadas, de diferentes densidades lineales de masa (fig 16 a).

Si generamos un pulso en la cuerda más liviana, cuando llega a la otra, parte del mismo se refleja invertido, (en forma similar a la reflexión en un punto fijo) y el resto se transmite al nuevo medio. Se observan los dos fenómenos, reflexión y refracción.

El primer punto de la cuerda gruesa recibe un impulso hacia arriba, por lo que el pulso transmitido o refractado es derecho.

También puede ocurrir que el pulso incidente viaje por la cuerda de mayor densidad lineal de masa y se transmita a otra más liviana (fig 16 b). En este caso tendremos un pulso reflejado similar al caso de reflexión en un extremo libre, ya que la cuerda fina permite oscilar la unión de las cuerdas con mucha facilidad. El primer punto de la cuerda fina recibe un impulso

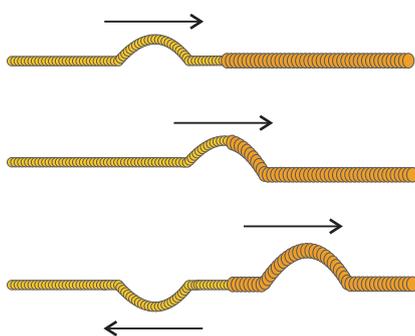


Fig 16. a Refracción y reflexión de un pulso en una cuerda tensa. Cuando éste pasa de una cuerda de menor μ a una cuerda de mayor μ , el pulso refractado es derecho. El pulso reflejado se invierte.

hacia arriba, por lo que el pulso transmitido o refractado es derecho. Por la tanto en los dos medios obtendremos pulsos derechos, tanto el transmitido (refractado) como el reflejado.

En ambos casos analizados el pulso transmitido se propaga con distinta velocidad que el pulso incidente. Recordemos que la velocidad de propagación en una cuerda depende de su densidad lineal de masa “ μ ” y de la tensión. Si las cuerdas están unidas podemos asumir que están sometidas a la misma tensión. Por lo tanto, si el pulso pasa de una cuerda menos densa a otra más densa (primer caso), la velocidad de propagación en la segunda cuerda será menor que en la primera. Si el pulso se transmite de una cuerda a otra menos densa, la velocidad de propagación en la segunda cuerda será mayor que en la primera.

Si $\mu_1 < \mu_2 \Rightarrow v_1 > v_2$
 Si $\mu_1 > \mu_2 \Rightarrow v_1 < v_2$

Si no se produce disipación de energía en la unión de las cuerdas, la energía del pulso incidente se reparte entre el pulso reflejado y el refractado.

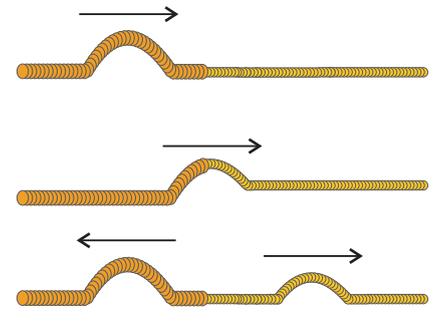


Fig 16.b. Refracción y reflexión de un pulso en una cuerda tensa. Cuando éste pasa de una cuerda de mayor μ a una cuerda de menor μ , el pulso refractado y el reflejado son derechos. No se invierten.



Ejemplo 2

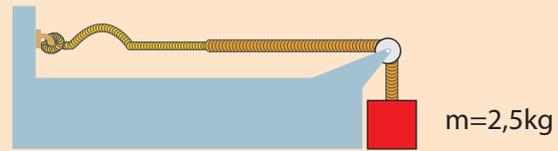
Dos cuerdas de distinta densidad lineal de masa se encuentran unidas como muestra el dibujo.

$$\mu_1 = 4,3 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\mu_2 = 8,6 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

La distancia del extremo fijo a la polea es de 10,00m y la unión de las cuerdas está en el punto medio.

Se genera un pulso en el extremo de la cuerda 1, que se propaga hacia la derecha.



a) Determina la velocidad de propagación del pulso incidente en la cuerda 1.

Como ya vimos, $v_{p1} = \sqrt{\frac{T}{\mu_1}}$. Sustituyendo $v_{p1} = \sqrt{\frac{(2,5\text{kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})}{4,3 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}}}}$

$$v_{p1} = 24 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) ¿Qué sucede cuando el pulso incidente llega al punto de unión de las cuerdas?

Como el pulso incidente llega a la unión de dos cuerdas de diferente "μ" ($\mu_1 < \mu_2$), parte del pulso incidente se refleja invertido y parte se transmite (se refracta) a la cuerda 2.

c) Determina la velocidad de propagación del pulso refractado (en la cuerda 2).

Nuevamente utilizamos la ecuación $v_p = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$.

Recordando que la Tensión es la misma en ambas cuerdas,

sustituimos $v_{p2} = \sqrt{\frac{(2,5\text{kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})}{8,6 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}}}} = 17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$v_{p2} = 17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Como era de esperar $v_{p2} < v_{p1}$

d) Determina el tiempo que emplea el pulso en llegar desde el extremo fijo a la polea.

Determinaremos en primer lugar el tiempo que el pulso incidente emplea en recorrer la cuerda 1. Como el pulso incidente viaja con velocidad constante, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Entonces $\Delta t_1 = \frac{\Delta x}{v_1}$

Sustituyendo $\Delta t_1 = \frac{5,00\text{m}}{24 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,21\text{s}$ De la misma forma determinaremos el tiempo que el pulso refractado

emplea en recorrer la cuerda 2. $\Delta t_2 = \frac{\Delta x}{v_2}$ $\Delta t_2 = \frac{5,00\text{m}}{17 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,29\text{s}$

El tiempo que emplean los pulsos incidente y refractado en llegar desde el extremo fijo a la polea es la suma de los tiempos que hemos hallado, Δt_1 y Δt_2 .

$$\Delta t_{\text{TOTAL}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 0,21\text{s} + 0,29\text{s} = 0,50\text{s}$$

$$\Delta t_{\text{TOTAL}} = 0,50\text{s}$$

Interferencia de ondas en una dimensión

Si generamos pulsos a la vez en ambos extremos de una cuerda, se propagarán a través de ella con velocidades del mismo valor pero con sentido contrario. Cuando los pulsos se encuentran, la forma de la cuerda es momentáneamente distinta a la forma de cada perturbación. Luego cada pulso continúa con sus mismas características iniciales (fig 17 y 19). A este fenómeno en el que dos perturbaciones que viajan por el mismo medio se superponen se le llama **interferencia**.

Interferencia se le denomina al fenómeno físico en el que dos perturbaciones que viajan por el mismo medio se superponen en una misma región.

¿Cómo podemos determinar la forma que adquiere la cuerda en el momento en que se superponen las perturbaciones?

La forma de la cuerda resulta de la suma de los desplazamientos que produciría independientemente cada pulso, considerando el sentido de cada desplazamiento. A esta forma de obtener la configuración de la cuerda sumando el aporte de cada pulso se le denomina **principio de superposición**. (fig. 18)

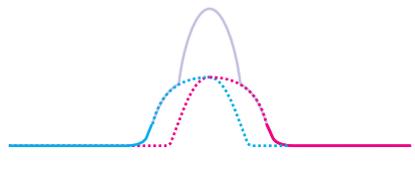


Fig 18. Principio de superposición
Superposición de los pulsos rojo y azul. El desplazamiento resultante (lila) se obtiene sumando los desplazamientos que produce cada pulso actuando por sí solo.

El principio de superposición establece que el desplazamiento resultante de una superposición de pulsos en un determinado medio se obtiene sumando los desplazamientos que produce cada pulso actuando por sí solo.

Si al superponerse los pulsos se refuerzan formando una deformación mayor que cada pulso, es un caso de **interferencia constructiva** (fig 17).

Si uno de los pulsos es invertido con respecto al otro, al superponerse se generará momentáneamente una deformación menor que cada pulso. A este caso le llamamos **interferencia destructiva** (fig 19). Si los pulsos son perfectamente simétricos, la cuerda puede estar por un instante en su posición de equilibrio, lo que hace que en dicho instante no la veamos deformada. (fig 20)

Recordemos que tanto la interferencia constructiva como destructiva son una situación momentánea, luego los pulsos continúan su camino con la forma, velocidad y energía que tenían originalmente. Este hecho es característico exclusivamente de los fenómenos ondulatorios. Dos personas que emiten sonidos frente a frente, reciben cada una el sonido que emitió el otro.

¿Qué ocurre con dos pelotas de goma que viajan en sentidos opuestos y chocan? ¿Continúa cada una su camino sin alteraciones?

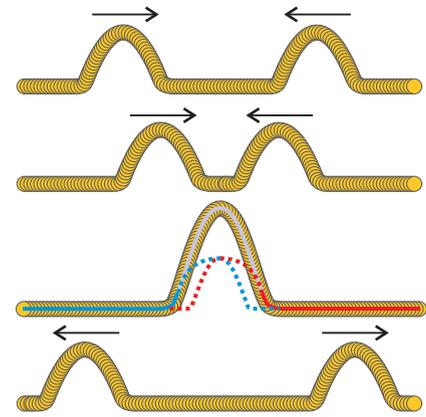


Fig 17. Interferencia constructiva.
Las dos perturbaciones viajan por el mismo medio: se superponen, se suman sus efectos, se cruzan y luego continúan su camino.

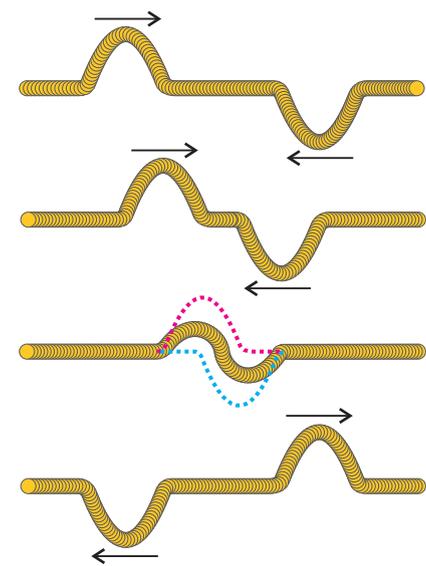


Fig 19. Interferencia destructiva.
Si uno de los pulsos es invertido con respecto al otro, al superponerse se generará momentáneamente una deformación resultante, menor que cada pulso. Se atenúan sus efectos.

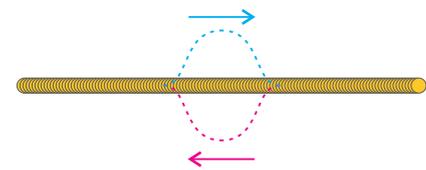


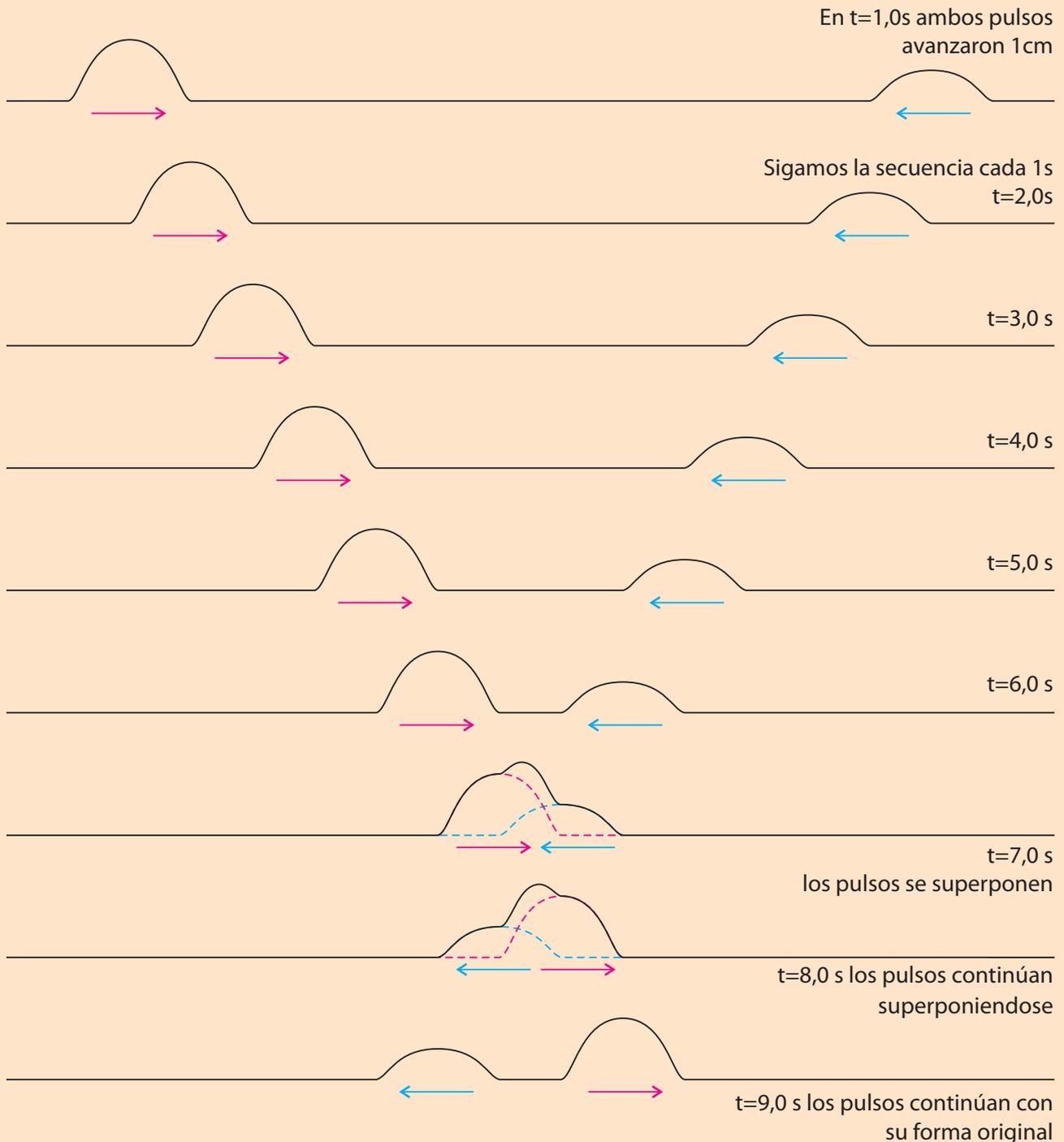
Fig 20. Interferencia totalmente destructiva.
Si los pulsos son perfectamente simétricos, la cuerda está por un instante en su posición de equilibrio, lo que hace que en dicho instante no la veamos deformada.

Ejemplo 3

En los extremos de una cuerda se generan dos pulsos que se propagan en sentidos opuestos, como muestra la figura. Ambos pulsos tienen un ancho de 2 cm y avanzan con una velocidad de 1 cm/s. Inicialmente se encuentran separados 13 cm

Dibuja la forma de la cuerda cada 1 s, entre los instantes $t=1$ s y $t=9$ s.

Aclaración: Este ejemplo es puramente teórico, difícilmente podamos recrear esta situación en una cuerda real. La aplicación del principio de superposición a situaciones reales es muy compleja.



PREGUNTAS

- 1) ¿Qué es una onda?
- 2) ¿Qué es una onda mecánica?
- 3) Explica dos formas diferentes de transferencia de energía de un lugar a otro del espacio. Una trasladando un objeto y la otra sin necesidad de transportar materia.
- 4) Nombra cuatro fenómenos ondulatorios.
- 5) Te encuentras en la orilla de un lago y ves un objeto flotando en reposo. Explica por lo menos dos formas diferentes de ponerlo en movimiento.
- 6) ¿Qué es una onda transversal? Nombra ejemplos.
- 7) ¿Qué es una onda longitudinal? Nombra ejemplos.
- 8) ¿Qué es un pulso? Nombra ejemplos.
- 9) Define densidad lineal de masa de una cuerda (μ). ¿Cuáles son sus unidades en el S.I.?
- 10) ¿En qué unidades S.I. se mide la Tensión de una cuerda?
- 11) ¿En qué unidades se mide la velocidad de propagación de un pulso?
- 12) ¿De qué depende la velocidad de propagación de un pulso en una cuerda?
- 13) Si en una cuerda aumenta cuatro veces la tensión a la que está sometida ¿cuánto cambia la velocidad de propagación de un pulso en ella?
- 14) ¿Cómo se refleja un pulso que se propaga por una cuerda con un extremo fijo?
- 15) ¿Cómo se refleja un pulso que se propaga por una cuerda que tiene un extremo libre?
- 16) ¿Qué le ocurre a un pulso al transmitirse de una cuerda a otra de mayor densidad lineal de masa " μ "?
- 17) ¿Qué le ocurre a un pulso al transmitirse de una cuerda a otra de menor densidad lineal de masa " μ "?
- 18) ¿Qué entendemos por interferencia de pulsos?
- 19) Explica cuándo se produce interferencia constructiva.
- 20) Explica cuándo se produce interferencia destructiva.
- 21) ¿Cómo se ven afectados los pulsos luego de interferir?
- 22) Un corcho flota inmóvil en el agua cuando es alcanzado por un pulso que se propaga en la superficie. Indica cuál es la mejor opción para describir el movimiento del corcho:
 - a. El corcho no se ve afectado por la perturbación.
 - b. El corcho se mueve hacia arriba y continúa moviéndose junto con la perturbación.
 - c. El corcho se mueve hacia arriba, luego hacia abajo y por último permanece inmóvil.
 - d. El corcho se hunde



PROBLEMAS

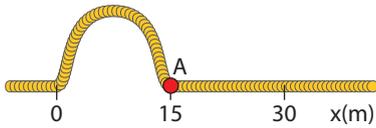


Fig. 21. Problema 1.

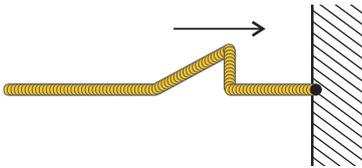


Fig. 22. Problema 2.



Fig. 23. Problema 4.

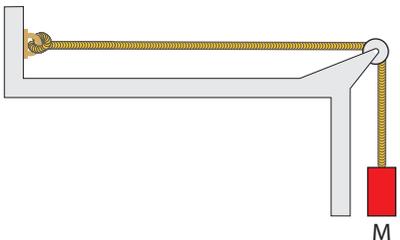


Fig. 24. Problema 6

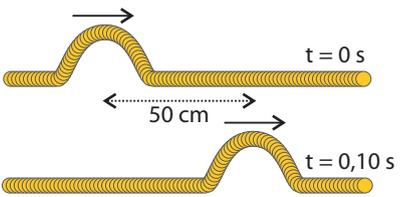


Fig. 25. Problema 8

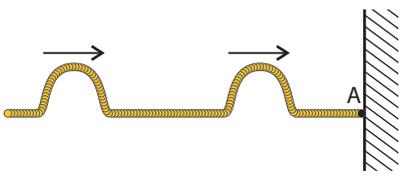


Fig. 26. Problema 9

- 1) Un pulso se propaga hacia la derecha por una cuerda con $v = 5,0 \frac{m}{s}$. En $t = 0s$ la cuerda tiene la forma que muestra la figura 21.
 - a) Representa esquemáticamente la forma de la cuerda en: $t = 0,50s$, $t = 1,00s$, $t = 1,50s$ y $t = 2,00s$
 - b) Indica en cada esquema hacia donde se está moviendo el punto "A".

- 2) Un pulso viajando a través de una cuerda incide en un punto fijo como muestra la figura 22.
 - a) Representa esquemáticamente la forma del pulso reflejado.
 - b) ¿Cuál de los dos pulsos se propaga a mayor velocidad, incidente o reflejado?

- 3) Repite el problema anterior pero considerando que el pulso incide en un punto que puede oscilar libremente.

- 4) Dos cuerdas de distinta densidad lineal de masa ($\mu_1 = 4,00 \times 10^{-3} kg/m$ y $\mu_2 = 3,60 \times 10^{-2} kg/m$) están unidas en un punto y sometidas a una tensión de 57,6N. En la cuerda 1 se genera un pulso que se propaga como muestra la figura 23.
 - a) Representa esquemáticamente los pulsos reflejado y refractado.
 - b) Determina la velocidad de cada pulso (incidente, reflejado y refractado).

- 5) Resuelve lo mismo que en el problema anterior pero suponiendo que el pulso incide desde la cuerda 2.

- 6) Un pulso se propaga por una cuerda con $v = 100 \frac{m}{s}$ (Fig. 24)
 - a) ¿Cuánto varía su velocidad si se duplica la tensión de la cuerda?
 - b) ¿Cuánto varía su velocidad si se cuadruplica la tensión de la cuerda?

- 7) Dos cuerdas de distinta densidad lineal de masa ($\mu_2 = 2\mu_1$) se encuentran sometidas a la misma tensión. Determina v_2/v_1 , relación entre las velocidades de propagación de pulsos en cada cuerda.

- 8) Por una cuerda de 10,0m de largo y $m = 500g$ se propaga un pulso. La figura 25 muestra la posición del pulso en dos instantes.
 - a) Determina la velocidad de propagación del pulso.
 - b) Determina la densidad lineal de masa de la cuerda.
 - c) Determina la tensión en la cuerda.

- 9) Dos pulsos de igual forma se propagan por una cuerda como muestra la figura 26. El punto "A" es fijo.
 - a) ¿Cuál de los pulsos se propaga a mayor velocidad?
 - b) ¿Se superponen en algún momento los pulsos? En caso afirmativo, representa esquemáticamente la forma de la cuerda en ese instante.

- 10) Por una cuerda se propagan dos pulsos con $v=1,0 \frac{m}{s}$ en sentidos opuestos. En $t=0s$ la cuerda tiene la forma que muestra la figura 27. Representa esquemáticamente la forma de la cuerda en $t = 1,0s$, $t = 2,0s$ y $t = 3,0s$.

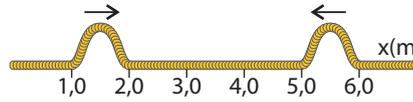


Fig. 27. Problema 10

- 11) Repite el problema anterior para la siguiente configuración de la cuerda en $t = 0s$. (Fig. 28)

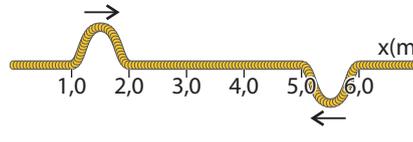


Fig. 28. Problema 11

- 12) Dos pulsos rectangulares tienen amplitud de 10cm y 12cm respectivamente. Determina la amplitud del pulso resultante cuando interfieren según las siguientes situaciones:
- Los pulsos son derechos.
 - Un pulso es invertido con respecto al otro.

- 13) Por una cuerda se propagan dos pulsos con $v=0,50m/s$ en sentidos opuestos. En $t=0s$ la cuerda tiene la forma que muestra la figura 29. Representa esquemáticamente la forma de la cuerda en $t=1,0s$, $t=2,0s$ y $t=3,0s$.

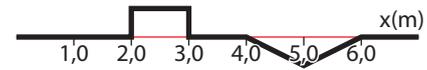


Fig. 29. Problema 13.

- 14) Repite el problema anterior invirtiendo uno de los pulsos
- 15) Se presenta la misma situación del problema 9, pero en este caso "A" es un punto que puede oscilar libremente. (Fig. 30)
- ¿Pueden superponerse los pulsos antes que se refleje uno de ellos? Justifica.
 - Representa esquemáticamente la forma de la cuerda en el instante en que los pulsos se superponen.

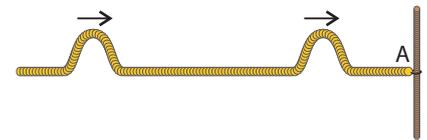


Fig. 30. Problema 15.

- 16) Por una cuerda se propaga un pulso como muestra la figura 31.
- Queremos generar un pulso que interfiera en forma constructiva con el primero ¿Qué características debería tener el pulso generado?
 - ¿Qué características debería tener el pulso generado si queremos que se produzca interferencia destructiva?

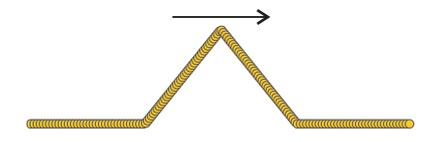


Fig. 31. Problema 16.

Ondas periódicas en una dimensión

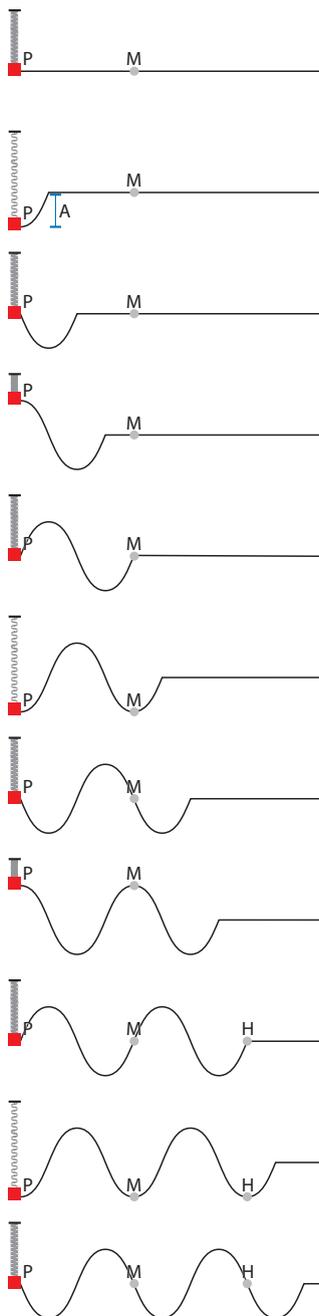


Fig 1. Onda periódica propagándose en una cuerda

Ya hemos visto como un pulso puede transferir energía de un lugar a otro del espacio sin desplazar masa. Ahora analizaremos qué ocurre cuando tenemos un conjunto de pulsos que se repiten periódicamente. En ese caso obtenemos una sucesión de pulsos, un tren de pulsos que se denomina onda periódica.

Onda periódica se denomina al conjunto de pulsos que son emitidos a intervalos iguales de tiempo. Es decir en cada período se provoca una perturbación idéntica a la anterior.

Cuando un punto del medio elástico es separado de su posición de equilibrio, se le realiza un trabajo, cediéndole energía. Ésta se propaga por las interacciones entre las partículas del medio, cada una "empuja" a su vecina. Si esto sucede, decimos que la energía se transfiere por un movimiento ondulatorio.

Pensemos en el siguiente ejemplo: una cuerda tensa y larga, con uno de sus extremos unido a una masa que puede oscilar al estar unida a un resorte (fig 1).

Separamos la masa de su posición de equilibrio una distancia "A" y la liberamos ("A" es la amplitud de la oscilación de la masa unida al resorte). Es natural pensar que el punto "P", que es el punto de la cuerda que está unido a la masa, adquiera el mismo movimiento que el cuerpo. Se moverá verticalmente alejándose de la posición de equilibrio una distancia también "A". Esta distancia la llamaremos amplitud de la onda. (Fig. 2). El mismo razonamiento podemos hacer del punto de la cuerda vecino a "P", y así sucesivamente. Esta transmisión no es instantánea, por ejemplo el punto "M" comenzará a moverse un tiempo después.

Amplitud es la máxima separación de cada punto del medio elástico con respecto a la posición de equilibrio. La representamos con la letra "A". Su unidad en el Sistema Internacional es el metro (m) y está relacionada con la energía que transmite la onda.

La energía que transfiere constantemente la masa al punto "P" comienza a viajar por la cuerda, mientras que cada punto de la misma sólo se mueve hacia arriba y abajo, al igual que la masa. Los pulsos generados viajan hacia la derecha mientras que cada punto de la cuerda oscila en forma vertical. Por lo tanto hemos generado una **onda periódica** transversal que viaja a través de la cuerda.

Es importante destacar que el sistema masa-resorte no crea la energía, algún agente externo que no se menciona en este ejemplo es el encargado de aportarla.

Un tiempo después que comienza a moverse "P", el punto "M", realiza el mismo movimiento que éste. Luego que "M" comienza a oscilar, ambos puntos tienen en todo momento la misma posición y la misma velocidad. Si siguiéramos la secuencia veríamos que sucede lo mismo con el punto "H". Diremos que los puntos que cumplen esta condición están en fase (fig 3).

Dos puntos del medio se encuentran en fase cuando están a la misma distancia de la posición de equilibrio y con la misma velocidad en todo momento.

Longitud de onda

A la distancia entre dos puntos consecutivos en fase la denominamos **longitud de onda** (fig 4). La representamos con la letra lambda del alfabeto griego " λ ". Su unidad en el sistema internacional es el metro "m", como toda distancia.

Longitud de onda es la distancia entre dos puntos consecutivos del medio, que se mueven en fase. Se representa con la letra lambda del alfabeto griego " λ ". Su unidad en el sistema internacional es el metro "m."

Período

En el tiempo que tarda una onda en viajar una distancia " λ ", cada punto de la cuerda realiza una oscilación completa. Recuerda que una oscilación completa es cuando un punto del medio que es perturbado, vuelve a estar en la posición inicial y con la misma velocidad que tenía. A este tiempo lo denominaremos período y lo representamos con la letra "T". Su unidad en el sistema internacional es el segundo "s". Todos los puntos de la cuerda se mueven con el mismo período, que es el mismo del agente externo que genera los pulsos.

Período es el tiempo que demora cada punto del medio en realizar una oscilación completa. Lo representamos con la letra "T". Su unidad en el sistema internacional es el segundo "s".

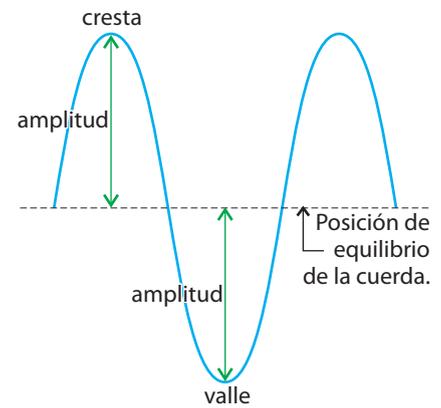


Fig 2. Amplitud de una onda. Llamaremos cresta a la elongaciones hacia arriba y valles a la elongaciones hacia abajo.

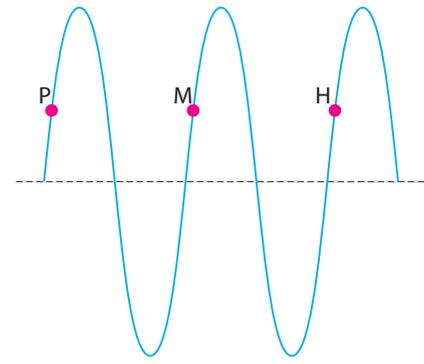


Fig 3. Los puntos "P", "M" y "H" están en fase. Están a la misma distancia de la posición de equilibrio y tienen la misma velocidad en todo momento.

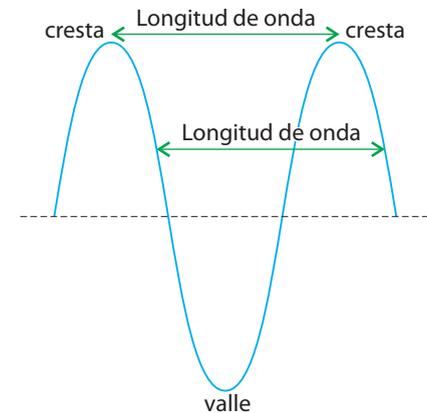


Fig 4. Longitud de onda es la distancia entre dos puntos en fase. También es la distancia entre dos crestas o valles consecutivos



Fig. 5. Heinrich Rudolf Hertz, físico alemán, nació en Hamburgo el 22 de febrero de 1857 y falleció en Bonn el 1 de enero de 1894.

En 1885 en la universidad de Karlsruhe descubrió las ondas electromagnéticas. Fue el primero en demostrar la existencia de la radiación electromagnética construyendo un aparato para producir ondas de radio.

A partir del experimento de Michelson en 1881 probó experimentalmente que las señales eléctricas pueden viajar a través del aire, como había sido predicho por James Maxwell y Michael Faraday.

También descubrió el efecto fotoeléctrico que fue explicado más adelante por Albert Einstein.

Frecuencia

Definiremos la frecuencia como la cantidad de oscilaciones o ciclos que cada punto realiza en una unidad de tiempo.

$$f = \frac{\text{N}^\circ \text{de oscilaciones}}{\Delta t}$$

Su unidad en el sistema internacional de medidas, es $\frac{1}{s} = s^{-1}$. A esta unidad se le denominó Hertz, "Hz" en honor al físico alemán. (Fig. 5)

Frecuencia es la cantidad de oscilaciones completas que cada punto del medio realiza por unidad de tiempo. Se representa con la letra "f". Su unidad en el sistema internacional es el Hertz "Hz".

Relación entre el período y la frecuencia

Analicemos ahora la relación que existe entre el período y la frecuencia. Retomemos el concepto de frecuencia, como el número de oscilaciones por unidad de tiempo:

$$f = \frac{\text{N}^\circ \text{de oscilaciones}}{\Delta t} \text{ y recordemos que el período es el tiempo que}$$

demora cada punto del medio en realizar una oscilación completa.

Por lo tanto, cuando se realiza una "1" oscilación, el tiempo que tarda en producirse es un período "T". Sustituimos en la ecuación de definición de frecuencia y nos queda expresada la siguiente relación:

$$f = \frac{\text{N}^\circ \text{de oscilaciones}}{\Delta t} = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{T}$$

Veamos otro ejemplo para reforzar la relación funcional entre el período y la frecuencia.

Si un punto demora medio segundo en cumplir un ciclo, podrá completar dos ciclos por segundo. Si demora un cuarto de segundo, podrá completar cuatro. Con este razonamiento se pone en evidencia la relación inversa entre la frecuencia y el período:

$$T = \frac{1}{f} \quad f = \frac{1}{T}$$

Velocidad de propagación de una onda

La figura 6 muestra un tren de pulsos que se mueven hacia la derecha por una cuerda tensa. En la secuencia aparece una foto instantánea de la forma de la cuerda cada un tiempo $\frac{T}{10}$ s. Se destacó con trazo azul un mismo pulso en cada imagen. Se puede observar que se desplaza hacia la

derecha. Para medir su velocidad deberíamos saber el desplazamiento del pulso y dividirlo entre el tiempo que tarda en realizarlo. Ya hemos visto que si el medio es homogéneo, la velocidad de propagación es constante, por lo que podemos utilizar una expresión del Movimiento Rectilíneo Uniforme que seguramente ya estudiaste en años anteriores.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \begin{array}{l} \Delta x = \text{desplazamiento} \\ \Delta t = \text{tiempo} \end{array}$$

Como ya hemos visto, la velocidad se mide en $\frac{m}{s}$ en el S.I.

Si observamos detalladamente la secuencias de imágenes, vemos que mientras el pulso viaja entre dos puntos en fase, todos los puntos de la cuerda cumplen una oscilación completa. La forma de la cuerda en estos dos instantes es la misma. Entonces, cuando el pulso viaja una distancia “ λ ” transcurre un tiempo “ T ”,

En un ciclo el desplazamiento que tiene la onda es igual a una longitud de onda $\Delta x = \lambda$ y el tiempo que transcurre, es un período $\Delta t = T$.

Sustituyendo en la ecuación de velocidad nos queda expresada la siguiente relación entre la velocidad de propagación, la longitud de onda y el período.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow v = \frac{\lambda}{T}$$

La ecuación recién obtenida $v = \frac{\lambda}{T}$ podemos expresarla como, $v = \frac{1}{T} \times \lambda$ que es exactamente lo mismo.

Recordando que $f = \frac{1}{T}$, y sustituyendo en la expresión anterior y nos

queda expresada la relación funcional entre la velocidad de propagación, la longitud de onda y la frecuencia.

$$v = \lambda \times f$$

Al igual que para los pulsos, la velocidad de propagación de una onda no depende del mecanismo que origine la onda, ni de su amplitud, ni de la frecuencia, ni tampoco de la longitud de onda. Es una característica propia del medio por donde viaja. Esta es una propiedad muy importante de todos los fenómenos ondulatorios. En este caso, depende únicamente de propiedades de la cuerda.

La velocidad de propagación de las ondas por una cuerda es independiente de la frecuencia y la longitud de onda. Es una característica propia del medio por donde viaja.

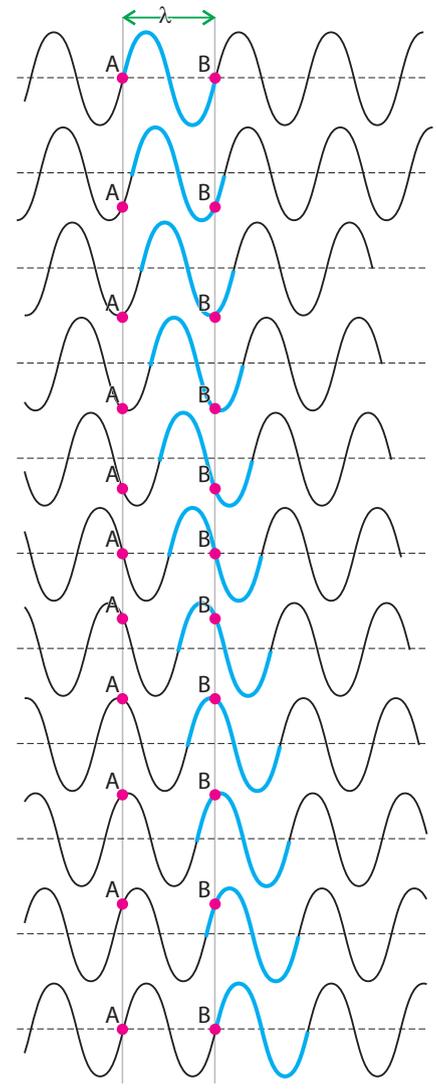


Fig. 6. Velocidad de propagación de una onda periódica en una cuerda

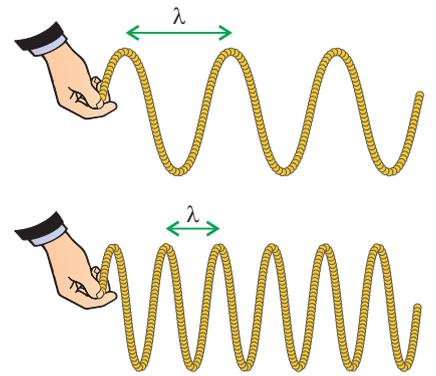


Fig. 7. Al aumentar al doble la frecuencia de la oscilación, a la misma cuerda, sometida a la misma tensión, la longitud de onda se reduce a la mitad. La velocidad de propagación de las ondas es la misma, ya que solo depende del medio.

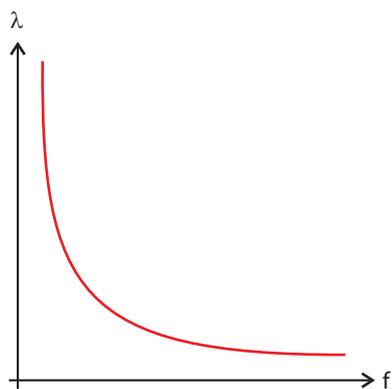


Fig. 8. La gráfica de dos magnitudes inversamente proporcionales es un arco de una curva llamada hipérbola.

La velocidad de propagación de las ondas por una cuerda es independiente de la frecuencia y de la longitud de onda. Éstas magnitudes están vinculadas de tal manera que su producto es un valor constante. (Fig. 7)

Si el agente externo que genera los pulsos aumenta su frecuencia, la frecuencia de la onda también aumentará. En este caso la longitud de la onda disminuirá de forma tal que $\lambda \times f = K$.

Es decir "λ" es inversamente proporcional a "f" (fig 8). Esta relación la expresamos de la siguiente forma:

$$\lambda \propto \frac{1}{f}$$

Ejemplo 1

En una cuerda homogénea se generan 120 pulsos cada 1,0 minutos. La cuerda tiene un largo de 16m y cada pulso la recorre completamente en 4,0s.

a) Determina la velocidad de propagación de la onda por la cuerda. La velocidad de propagación la podemos calcular como el cociente entre la distancia recorrida por cualquier pulso de la cuerda y el tiempo que demora en hacerlo:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad v = \frac{16\text{m}}{4,0\text{s}} = 4,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) Determina la frecuencia y el período de la onda en la cuerda. Si se generan 120 pulsos cada 1,0 minuto (60 segundos), quiere decir que se crean 2,0 pulsos por segundo, por lo tanto la frecuencia es de 2,0Hz. Comprobemos este razonamiento, utilizando la definición de frecuencia, $f = \frac{\text{N}^\circ \text{ de oscilaciones}}{\Delta t} \Rightarrow f = \frac{120\text{osc}}{60\text{s}} = 2,0\text{Hz}$ f = 2,0Hz
El período lo podemos calcular de la relación $T = \frac{1}{f}$

$$T = \frac{1}{2,0\text{Hz}} = 0,50\text{s} \quad \text{T=0,50s}$$

c) Calcula la longitud de onda de la onda en la cuerda.

$$\lambda \times f = v \quad \text{por lo tanto} \quad \lambda = \frac{v}{f} \quad \lambda = \frac{4,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,0\text{Hz}} \Rightarrow \lambda = 2,0\text{m}$$

d) Si aumentamos la frecuencia cuatro veces, ¿cómo varían la velocidad de propagación y la longitud de onda?

La velocidad de propagación no depende de la forma como se generan los pulsos, por lo tanto no depende de la frecuencia. Mientras no cambie la tensión y la densidad lineal de masa, la velocidad permanecerá constante.

La longitud de onda si cambiará. Considerando que $\lambda \times f = v$ constante, si la frecuencia aumenta cuatro veces, la longitud de onda debe disminuir a la cuarta parte, entonces el producto se mantiene igual.

Esto es

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{4,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{8,0\text{Hz}} \Rightarrow \lambda = 0,50 \text{ m}$$

Reflexión de ondas periódicas en una dimensión

Cuando un tren de ondas periódicas viaja por una cuerda tensa y llega a un extremo fijo que no oscila, cada uno de sus pulsos se refleja invertido. La velocidad de propagación cambia sólo de sentido, mientras que la frecuencia y longitud de onda no varían.

Si el extremo es móvil, cada pulso se refleja derecho, y la onda reflejada tiene las mismas características que la onda incidente. Lo único que cambia es el sentido de la velocidad de propagación.

Tanto en el extremo libre como fijo, la amplitud de la onda reflejada será la misma que la de la onda incidente, siempre y cuando el extremo fijo no "absorba" una fracción de la energía de la onda.

Refracción de ondas periódicas en una dimensión

Hasta aquí hemos considerado ondas que se propagan por un medio homogéneo. En nuestros ejemplos las perturbaciones viajan por una cuerda cuyos puntos tienen idénticas propiedades. No estudiaremos en este curso qué ocurre si la cuerda no es homogénea, o sea que sus propiedades van cambiando. Sí analizaremos el caso en que la onda se transmite de un medio a otro. Esto puede suceder si tenemos dos cuerdas unidas, una a continuación de la otra. Dado que los medios son diferentes, las velocidades de propagación no serán iguales.

En la figura 9 se muestra una onda periódica viajando por una cuerda, que llega al punto de unión con otra cuerda de diferente " μ ". Las cuerdas tienen diferente densidad lineal de masa y podemos suponer que la tensión en ambas es la misma. Al llegar al punto de unión, parte de la onda incidente se refleja y parte se refracta a la cuerda 2.

Refracción de ondas en una dimensión, es el fenómeno físico que se lleva a cabo cuando una onda incidente cambia de medio de propagación.

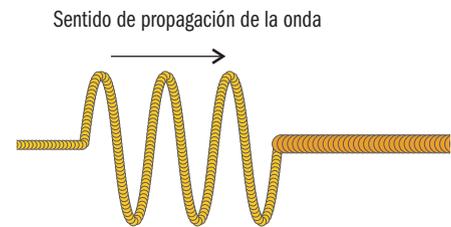


Fig. 9. Onda incidente propagándose con v_1 , λ_1 y f_1 , por una cuerda de densidad lineal de masa μ_1 .

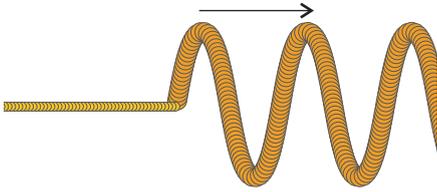


Fig. 10. Onda refractada, con su v_2, λ_2, f_2 viajando por una cuerda de μ_2 . Omitimos representar la onda reflejada para centrarnos en el fenómeno de la refracción.

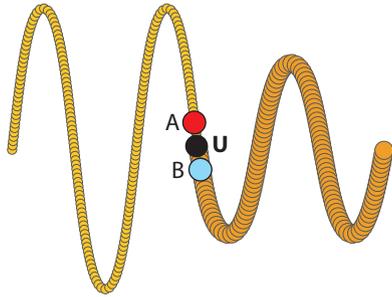


Fig. 11. "U" es el punto de unión entre las cuerdas. "A" pertenece a la cuerda 1, "B" a la cuerda 2 y vibran con la misma frecuencia.

Si $\mu_1 < \mu_2 \Rightarrow v_1 > v_2$
 Como $f_1 = f_2 \Rightarrow \lambda_1 > \lambda_2$
 Si $\mu_1 > \mu_2 \Rightarrow v_1 < v_2$
 Como $f_1 = f_2 \Rightarrow \lambda_1 < \lambda_2$

Fig. 12. Cambios en la longitud de onda al refractarse.

Analizaremos qué propiedades tiene la onda refractada (fig 10).

Recordando que $v_p = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ la velocidad de propagación será menor en la cuerda que tenga mayor densidad lineal de masa " μ ".

Veamos esto con mayor detalle. Si generamos una onda en la cuerda 1, viajará con una velocidad v_1 . Al pasar a la cuerda 2 tendrá una velocidad v_2 . Como $\mu_1 < \mu_2$, entonces $v_1 > v_2$.

Pongamos atención ahora en el punto de unión de las cuerdas (U) (fig 11). Razonando análogamente a como lo hicimos con la masa acoplada al resorte que generaba los pulsos en la cuerda, el punto de unión vibra con la misma frecuencia de sus puntos contiguos (A y B). Por lo tanto, "A y B", que son puntos de cuerdas diferentes, deberán oscilar a la misma frecuencia.

La frecuencia de una onda no cambia cuando se transmite de un medio a otro, es decir cuando se refracta.

Si las velocidades son diferentes pero la frecuencia es la misma, recordando $v = \lambda \times f$ entonces la longitud de onda en cada cuerda deberá ser diferente.

Despejando $\lambda = \frac{v}{f}$, como la frecuencia es la misma, si $v_1 > v_2$, entonces $\lambda_1 > \lambda_2$ (fig 12)

En el medio en que la onda se propaga con mayor velocidad tendrá mayor longitud de onda, en el medio en se propaga con velocidad menor, tendrá menor longitud de onda.

Ejemplo 2

En el extremo de una cuerda de $\mu_1 = 1,8 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$ se generan ondas periódicas con una frecuencia de 16,0Hz. Esta cuerda se encuentra unida a otra de $\mu_2 = 5,4 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$. Ambas están sometidas a una Tensión de 4,2N.

a) Determina la longitud de onda en la cuerda 1 (λ_1)

Como $v = \lambda \times f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f}$, para determinar λ_1 necesitamos primero calcular la velocidad de propagación.

$v_{p1} = \sqrt{\frac{T}{\mu_1}}$ sustituyendo tenemos

$$\text{que } v_{p1} = \sqrt{\frac{4,2\text{N}}{1,8 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}}} \Rightarrow v_{p1} = 48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{f} \quad \lambda_1 = \frac{48 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{16,0\text{Hz}} \Rightarrow \lambda_1 = 3,0 \text{ m}$$

b) Determina la frecuencia de la onda al viajar por la cuerda 2.

La frecuencia de la onda en la cuerda 2 es la misma que en la cuerda 1. Si no fuera así, el punto de unión entre las cuerdas debería oscilar con dos frecuencias distintas simultáneamente y esto es físicamente imposible. Por lo tanto $f_2 = f_1 = 16,0 \text{ Hz}$

c) Determina la longitud de onda en la cuerda 2 (λ_2)

Repetimos los pasos seguidos en la parte a). Primero determinamos la velocidad de propagación en la cuerda 2.

$$v_{p2} = \sqrt{\frac{T}{\mu_2}} \text{ sustituyendo, } v_{p2} = \sqrt{\frac{4,2\text{N}}{5,4 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}}} \Rightarrow v_{p2} = 28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ahora sí podemos determinar la longitud de onda en la cuerda 2.

$$\lambda_2 = \frac{v_{p2}}{f} \lambda_2 = \frac{28 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{16,0\text{Hz}} \quad \lambda_2 = 1,8 \text{ m}$$

PREGUNTAS

- 1) ¿En qué se diferencia un pulso de una onda periódica?
- 2) ¿Qué es la amplitud de una onda? ¿Cuáles son sus unidades?
- 3) ¿Cuándo dos puntos están en fase?
- 4) ¿Qué es la longitud de onda? ¿Cuáles son sus unidades?
- 5) ¿Qué es el período de una onda? ¿Cuáles son sus unidades?
- 6) ¿Qué es la frecuencia de una onda? ¿Cuáles son sus unidades?
- 7) ¿Qué relación hay entre período y frecuencia de una onda?
- 8) ¿Cuánto avanza una onda en un tiempo igual a un período?
- 9) ¿Cómo se determina la velocidad de propagación de una onda en función de la frecuencia y la longitud de onda?
- 10) Si los datos son el período y longitud de onda, ¿cómo se determina la velocidad de propagación en este caso?
- 11) Si en una cuerda viaja una onda periódica, y en determinado instante se triplica su frecuencia, ¿cómo varía su longitud de onda?





- 12) En una cuerda viaja una onda de cierta longitud de onda y período. Si queremos que la longitud de onda disminuya a la mitad, ¿cómo debemos variar el período?
- 13) Indica qué características de las ondas se verán afectadas si aumentamos al doble la frecuencia con la que perturbamos el extremo de una cuerda, manteniendo constante la tensión a la que está sometida:
 - a. Velocidad de propagación.
 - b. Período.
 - c. Longitud de onda.
- 14) En una misma cuerda generamos ondas de diferentes amplitudes ¿Cuál tendrá mayor velocidad?
- 15) En dos cuerdas idénticas sometidas a la misma tensión generamos ondas de distinta frecuencia. En la primera generamos ondas del doble de frecuencia que en la segunda. ¿En qué cuerda la onda se propaga con mayor velocidad? ¿En cuál tiene mayor longitud de onda?
- 16) Midiendo el tiempo que transcurre entre que vemos el destello de un rayo y escuchamos el trueno y dividiéndolo entre tres, obtenemos aproximadamente la distancia en km a la que cayó el rayo. Explica por qué este cálculo es una buena aproximación.
- 17) Una onda periódica viaja por una cuerda y pasa a otra que tiene mayor densidad lineal de masa. Suponiendo que la tensión es la misma en ambas cuerdas, explica cómo varían la frecuencia, el período, la velocidad de propagación y la longitud de onda en la segunda cuerda.

PROBLEMAS

- 1) Mi abuelo escucha radio Clarín que transmite en AM, a una frecuencia de 560 KHz. Determina el período y la longitud de la onda, sabiendo que las ondas de radio se propagan a la misma velocidad que la luz.
- 2) Cuando pulso la cuerda de una guitarra para emitir la nota LA, esta genera ondas de sonido de frecuencia 440 Hz. Determina la longitud de onda y el período del sonido generado. $V_{\text{SONIDO}} = 3,4 \times 10^2 \text{ m/s}$
- 3) Se generan ondas periódicas en una cuerda de tal forma que la distancia entre dos valles sucesivos es de 0,80m y cada punto demora 0,10s en cumplir un ciclo. Determina su frecuencia y velocidad de propagación.
- 4) Una onda periódica se propaga por una cuerda hacia la izquierda. En cierto instante, la forma de la cuerda es la que muestra en la figura 13. Cada punto de la cuerda demora 0,20s en completar un ciclo.
 - a) Determina su amplitud, frecuencia y longitud de onda.
 - b) Determina su velocidad de propagación.
 - c) Un instante después, el punto "P" ¿se encuentra por encima o por debajo de la posición que muestra la figura?

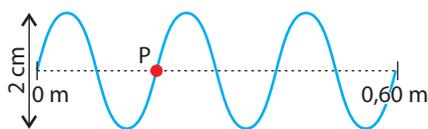


Fig. 13. Problema 4

- 5) Una onda periódica se propaga en una cuerda de $l = 50,0\text{m}$ y $m = 400\text{g}$. La cuerda está sometida a una tensión de 500N
- Determina la velocidad de propagación de la onda en la cuerda.
 - Si la frecuencia de la onda es 10Hz , determina la distancia entre dos crestas consecutivas.
- 6) Una onda periódica de $\lambda = 20\text{cm}$ y $T = 0,12\text{s}$ se propaga por una cuerda.
- Determina su frecuencia.
 - Determina su velocidad de propagación.
 - Si se duplica su frecuencia sin variar la tensión ¿cómo varía su velocidad de propagación? ¿cómo varía su longitud de onda?
- 7) En una cuerda se generan 4 pulsos por segundo. La cuerda tiene un largo de 20m y cada pulso la recorre completamente en $2,0\text{s}$.
- Determina la velocidad de propagación de la onda.
 - Determina su longitud de onda.
 - Si la cuerda está sometida a una tensión de $12,5\text{N}$, determina su densidad lineal de masa.
- 8) Tres cuerdas perturbadas con la misma frecuencia se ven como muestra la figura 14. Ordena en forma creciente:
- Sus longitudes de onda.
 - Sus velocidades de propagación.
- 9) Tres cuerdas de igual densidad lineal de masa y sometidas a la misma tensión se ven como muestra la figura 15. Ordena en forma creciente:
- Sus longitudes de onda.
 - Sus velocidades de propagación.
 - Sus frecuencias
- 10) En el extremo de una cuerda de $\mu_1 = 4,8 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$ se generan ondas periódicas con una frecuencia de $12,0\text{Hz}$. (Fig. 16). Esta cuerda se encuentra unida a otra de $\mu_2 = 1,2 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$. Ambas están sometidas a una tensión de $5,4\text{N}$.
- Determina frecuencia y longitud de onda en la cuerda 1.
 - Determina frecuencia y longitud de onda en la cuerda 2.

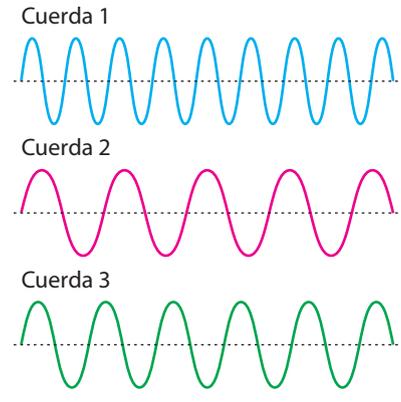


Fig. 14. Problema 8.

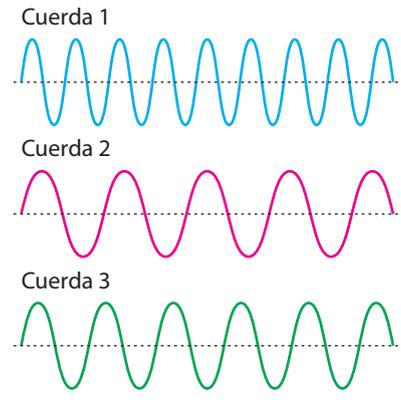


Fig. 15. Problema 9.

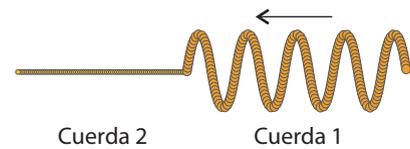


Fig. 16. Problema 10.



Ondas en dos dimensiones



Fig. 1. a) Ondas bidimensionales circulares provocadas por un agente externo puntual,
b) Ondas bidimensionales planas provocadas por un agente externo recto.



Fig. 2. Cubeta de ondas.

Introducción

Hasta ahora hemos estudiado casos en que las ondas se propagan en una sola dirección, llamadas unidimensionales. En una cuerda horizontal, una perturbación puede propagarse a la derecha o a la izquierda, pero no hacia arriba ni hacia abajo. Si perturbamos rítmicamente la superficie del agua, se generan ondas que se propagan en un plano. Recuerda que a éste tipo de ondas se les denomina **ondas bidimensionales**. Si el agente externo que genera la perturbación es puntual, se producirán ondas circulares. Si es un objeto recto extenso como una regla, se producen ondas planas (fig 1)

Denominamos **frente de ondas** a la línea que une todos los puntos contiguos del medio que se encuentran en fase en cierto instante. Los frentes de ondas circulares aumentan uniformemente de radio a medida que pasa el tiempo, mientras que los frentes de ondas planos se mueven paralelos entre sí, en una dirección y sentido determinado.

En los liceos, el estudio experimental de las ondas en dos dimensiones, suele realizarse utilizando una **cubeta de ondas** (fig 2). El generador de ondas vibra y, junto con él lo hace un elemento puntual o plano en contacto con el agua. Este agente externo producirá ondas circulares o planas en la superficie del agua que está en la cubeta. Un foco en la parte superior emite luz que ilumina la cubeta. La luz al atravesar el agua se refracta. Crestas y valles actúan como lentes convergentes y divergentes; y en la pantalla debajo de la cubeta se forman imágenes de las ondas generadas en el agua, que nos facilitan su estudio.

Características de las Ondas

Algunas características de las ondas unidimensionales en una cuerda tensa, siguen siendo válidas en ondas que se propagan en un plano.

- La velocidad de propagación de las ondas depende únicamente de las características del medio.
- Amplitud, frecuencia, período y longitud de onda se definen de la misma forma.
- La frecuencia de las ondas es la misma que la frecuencia de la fuente externa que las origina.
- $v_p = \lambda \cdot f$

Representación de las Ondas Bidimensionales

Para representar este tipo de ondas de forma sencilla, lo haremos siempre utilizando una "vista aérea", donde aparecerá con trazo grueso la línea que representa una cresta (frente de ondas) (fig 3). Si es necesario trazaremos punteado la línea que representa los valles (frente de ondas).

Aquí también podríamos aplicar el concepto de rayo para visualizar el desplazamiento de los pulsos de las ondas. La figura 4 representa frentes de onda que viajan por el agua en la cubeta. Si trazamos líneas perpendiculares a estos frentes, con el mismo sentido que la velocidad de propagación, obtenemos "rayos" que representan dirección y sentido de la propagación del frente de ondas. En el caso de las ondas circulares, obtenemos direcciones radiales y sentido hacia fuera. Para los frentes rectos, líneas paralelas, resultado esperable ya que la dirección y el sentido de la velocidad de propagación es única.

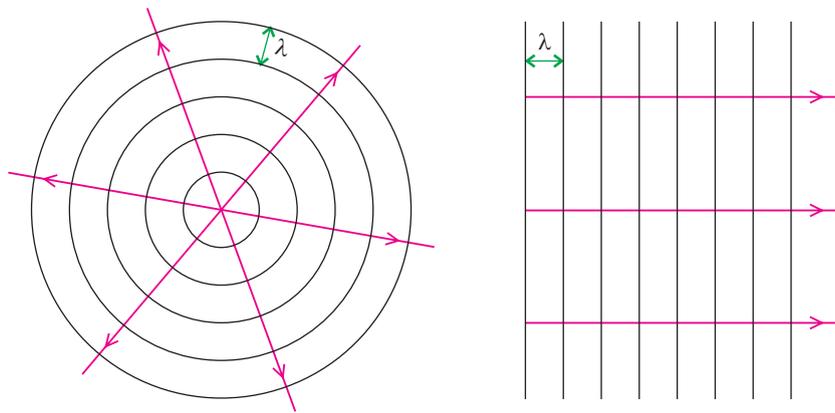


Fig. 4. Representación esquemática de ondas circulares y planas. Los "rayos" representan dirección y sentido de la propagación del frente de ondas. En las ondas circulares son radiales y en las ondas planas son paralelos.

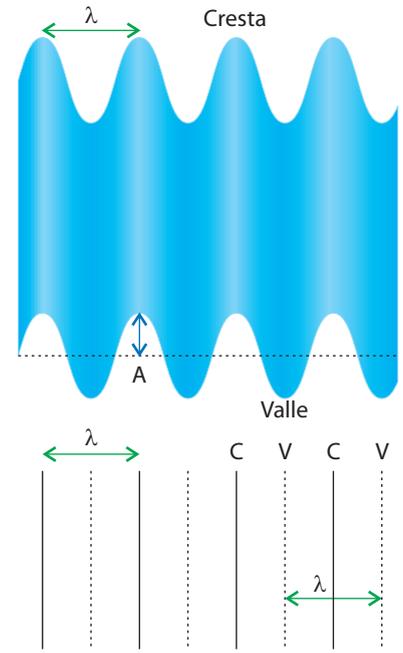


Fig. 3. Representación esquemática de una onda bidimensional. Las crestas se representan con trazo grueso y los valles con trazo punteado. La distancia entre dos frentes de onda consecutivos es la longitud de onda " λ ".

Reflexión de Ondas Bidimensionales

Supongamos que un frente de ondas planas se propaga en la cubeta e incide en una barrera fija también plana (fig 5). El frente de ondas se refleja obteniéndose una onda reflejada también plana. En la figura trazamos los rayos que representan la propagación de los frentes de ondas incidente y reflejado.

Denominaremos:

Ángulo incidente al formado entre las direcciones de los rayos incidentes y la dirección normal a la barrera. Se representa \hat{i} .

Ángulo reflejado al ángulo formado entre las direcciones de los rayos reflejados y la dirección perpendicular (normal) a la barrera. Se representa \hat{r} .

Se cumple la segunda Ley de la Reflexión ya estudiada en el capítulo N° 2, la que nos especifica la relación entre los ángulos incidente y reflejado.

$$\hat{i} = \hat{r}$$

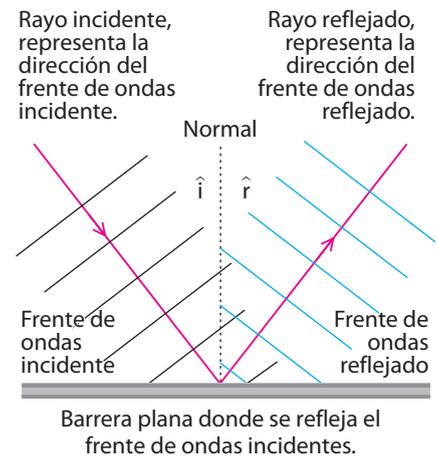


Fig. 5. Reflexión de ondas planas en un obstáculo plano.

Frecuencia, velocidad de propagación y longitud de onda en la reflexión de las ondas bidimensionales.

La frecuencia de las ondas incidente y reflejada es la misma. Como ambas ondas se propagan en un mismo medio, su velocidad es la misma. Recuerda $v_p = \lambda \times f$. Si la v_p y la frecuencia permanecen constantes podemos concluir que las longitudes de onda de las ondas incidente y reflejada son iguales.

Refracción de ondas en dos dimensiones

Ahora supongamos que en lugar de una barrera tenemos en la cubeta dos zonas con diferentes profundidades. El cambio en la profundidad es una modificación de las propiedades del medio, por lo que la velocidad de las ondas en el agua será distinta en ambas regiones. La velocidad en la zona de mayor profundidad será mayor que en la de menor profundidad.

¿Cambia alguna otra característica de las ondas al cambiar la velocidad de propagación?

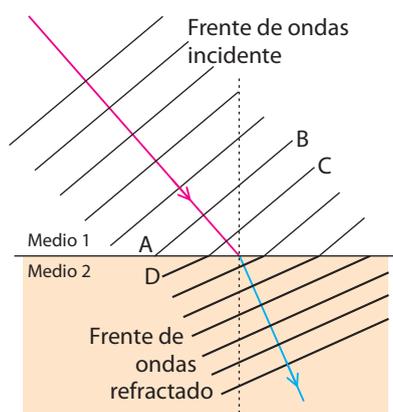


Fig.6. Refracción de una onda plana. Cambio de dirección de un frente de ondas al cambiar de medio. Al disminuir la velocidad de propagación del frente de ondas, su dirección cambia, acercándose a la normal.

Analicemos la figura 6 que representa esta situación. Un frente de ondas planas incide de forma oblicua en la frontera que separa dos medios. El punto "A" del pulso "AB" llega al otro medio y al ingresar al medio 2 cambia de velocidad, moviéndose (en este ejemplo) más lento. El punto "B", que aún no ha cambiado de medio, mantiene su velocidad. Esta diferencia momentánea de velocidades hace que el frente de ondas al cambiar de medio, cambie de dirección.

Esta desviación la podemos explicar de la siguiente forma: en un intervalo de tiempo Δt el punto "A" se desplaza una distancia "AD", mientras que el punto "B" en ese mismo tiempo se desplaza una distancia "BC". Como las velocidades son diferentes (en este caso la velocidad en el medio 1 es mayor que en el medio 2), "BC" es mayor que "AD".

Si trazamos los rayos que representan la dirección de propagación del frente de onda incidente y refractado, observamos que al cambiar de medio se acercan a la normal. Dicho de otra forma, el ángulo que forman los rayos incidentes con la normal \hat{i} , es menor que el ángulo que forman los rayos refractados con la normal \hat{r} . En cambio si la velocidad de las ondas en el medio 2 es mayor que en el medio 1 los rayos refractados se alejan de la normal.

Frecuencia, velocidad de propagación y longitud de onda en la refracción de una onda bidimensional.

En el capítulo anterior vimos que la frecuencia de una onda que se transmite de una cuerda a otra no cambia. Esta propiedad sigue cumpliéndose para ondas en dos dimensiones. La frecuencia de las ondas refractadas e incidentes es la misma. Las velocidades de propagación son diferentes en cada medio.

Como $v_p = \lambda \times f$ se deduce que:

si v_{p1} es mayor que $v_{p2} \Rightarrow \lambda_1$ es mayor que λ_2 (Fig 7).

Analicemos con más detalle la refracción de un pulso plano. La figura 8 muestra un pulso plano "AB", justo en el momento que comienza a cambiar de medio y el pulso A'B' que es el pulso "AB" ya refractado, es decir cuando se transmitió completamente al medio 2. También se muestra la superficie que separa los dos medios y los rayos incidente y refractado.

El ángulo BAB' es igual al ángulo \hat{i} , por tener sus lados perpendiculares entre sí. El ángulo AB'A' es igual al ángulo \hat{r} por la misma propiedad.

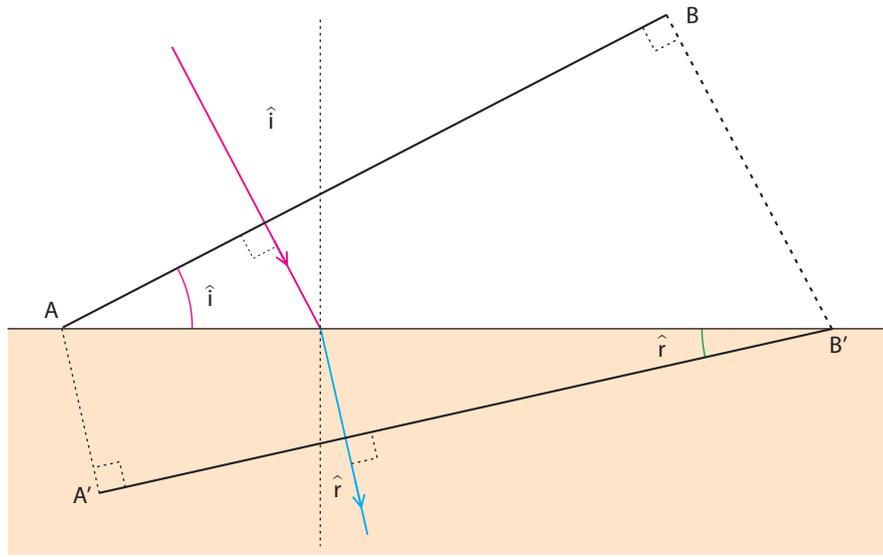


Fig. 8. Relación entre ángulo de incidencia y ángulo de refracción. El pulso A'B' es el pulso AB luego de producida la refracción.

Analizando el triángulo ABB': $\text{sen } \hat{i} = \frac{BB'}{AB'}$

Analizando el triángulo AB'A': $\text{sen } \hat{r} = \frac{AA'}{AB'}$

Si planteamos el cociente entre $\text{sen } \hat{i}$ y $\text{sen } \hat{r}$:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{BB'/AB'}{AA'/AB'} = \frac{BB'}{AA'}$$

Como $v_1 = \frac{\Delta x_1}{\Delta t} = \frac{BB'}{\Delta t}$ entonces $BB' = v_1 \times \Delta t$

Como $v_2 = \frac{\Delta x_2}{\Delta t} = \frac{AA'}{\Delta t}$ entonces $AA' = v_2 \times \Delta t$

Δt es el mismo, por lo que podemos simplificarlo

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{v_1 \times \Delta t}{v_2 \times \Delta t} \Rightarrow \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$$

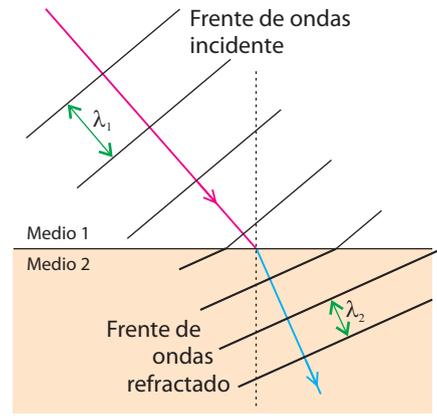


Fig. 7. Cambio de longitud de onda de un frente de ondas al cambiar de medio.

\hat{i} es el ángulo de incidencia
 \hat{r} es el ángulo de refracción

Como el cociente entre los valores de las velocidades de propagación en los medios 1 y 2 es una constante, obtenemos:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \text{constante}$$

Resumiendo, cuando una onda se refracta al pasar de un medio a otro, los ángulos de incidencia y refracción cumplen que el cociente de sus respectivos senos es una constante.

¿Será la luz un fenómeno ondulatorio?

Aquí ya es evidente que la reflexión y la refracción de las ondas presentan una gran similitud con la reflexión y la refracción de la luz. Incluso la última relación encontrada tiene una enorme semejanza con la Ley de Snell.

Ejemplo

En una cubeta de ondas, un frente de ondas plano se propaga por el medio 1 e incide sobre la superficie de separación con otro medio 2, de menor profundidad, formando un ángulo de 30° con respecto a la normal.

Las velocidades de propagación en los medios son las siguientes: $v_1 = 0,40 \frac{m}{s}$ y $v_2 = 0,20 \frac{m}{s}$. Las líneas con las que representamos las crestas del frente de ondas incidente están separadas 2,0 cm.

a) ¿Cuál es el ángulo de incidencia \hat{i} ?

En el dibujo adjunto visualizamos con claridad el ángulo de incidencia. Recuerda que es el formado entre el rayo incidente y la normal. En el enunciado del ejemplo ya se proporciona dicho valor sin mencionar que es el ángulo de incidencia.

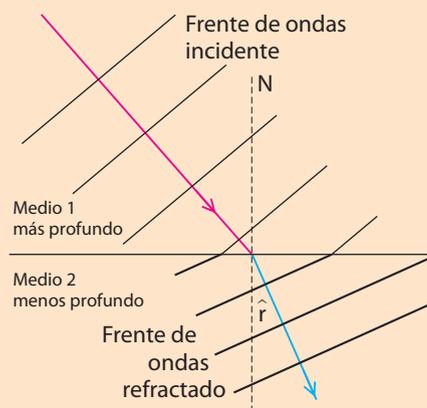
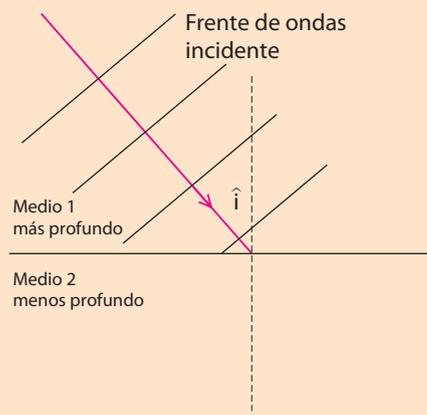
$$\hat{i} = 30^\circ$$

b) Determina cuál es el ángulo de refracción \hat{r} .

El ángulo de refracción es el determinado por el rayo refractado y la normal. Lo calculamos con la siguiente relación:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \text{sen } \hat{r} = \frac{v_2 \times \text{sen } \hat{i}}{v_1} = \frac{0,20 \frac{m}{s} \times \text{sen}30^\circ}{0,40 \frac{m}{s}} \Rightarrow \hat{r} = \text{sen}^{-1}0,25$$

$$\hat{r} = 15^\circ$$



c) Calcula la longitud de onda del tren de ondas refractado.

El valor de la longitud de onda del tren de ondas incidente se proporciona en la letra, no es necesario realizar ningún cálculo. Hay que tener claro conceptualmente que la distancia de separación entre las crestas es la longitud de onda " λ_1 ", en este caso mide 2,0 cm. $\lambda_1 = 2,0$ cm. Ahora buscaremos una relación entre las velocidades de propagación y las longitudes de onda. Para ello partiremos de

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} \text{ Recuerda que } v_1 = \lambda_1 \times f \text{ y } v_2 = \lambda_2 \times f$$

por lo tanto $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{\lambda_1 \times f}{\lambda_2 \times f}$ la frecuencia no cambia en la refracción,

se cancela. Entonces $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ y como $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$ sustituyendo

los senos de los ángulos por las velocidades nos queda $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$.

De esta forma encontramos la relación entre las velocidades de propagación y las longitudes de ondas de ambos medios:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{\lambda_1 \times v_2}{v_1} = \frac{2,0\text{cm} \times 0,20 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,40 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,0\text{cm}$$

Observa que está expresado en cm que no es la unidad de longitud del Sistema Internacional. Si en la letra del problema si hubiera solicitado que se exprese en unidades del SI, entonces tenemos que expresarlo en metros.

$$\lambda_2 = 0,010\text{m}$$

d) Especifica cuál es la frecuencia del tren de ondas refractado.

Aquí tenemos que recordar que la frecuencia no cambia en la refracción, no depende del medio. La frecuencia está determinada por el agente externo, el foco que produce las perturbaciones.

$f_1 = f_2$ como $v = \lambda \times f$

$$f = \frac{v}{\lambda} \Rightarrow f_1 = \frac{0,40 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,020\text{m}} = 20\text{Hz}$$

$$f_1 = 20\text{Hz}$$

Si calculamos la frecuencia de la onda en el medio 2, obtenemos el mismo resultado.

$$f_2 = \frac{0,20 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,010\text{m}} = 20\text{Hz}$$

$$f_2 = 20\text{Hz}$$

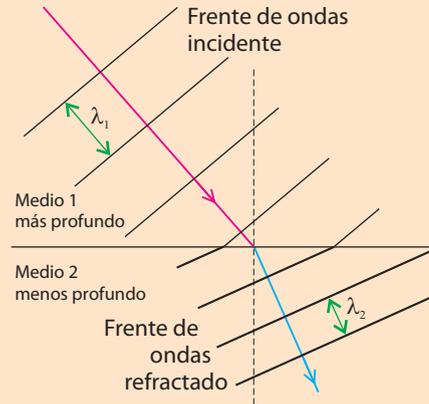


Fig. 9. Cambio de longitud de onda de un frente de ondas al cambiar de medio.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Ecuación que relaciona las velocidades de propagación de ambos medios y las longitudes de ondas respectivas.

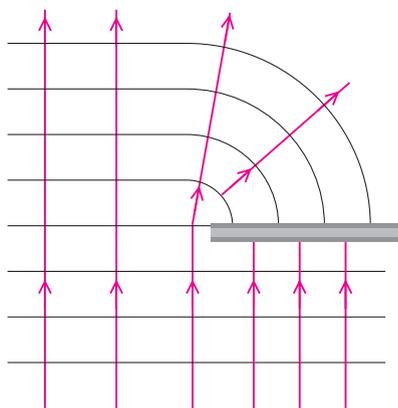


Fig.10. Difracción de un frente de ondas planas al llegar a una barrera. Observamos el cambio de dirección del frente de ondas, al rodear la barrera.

Difracción de una onda

La difracción es otro fenómeno físico característico de las ondas. Es la propiedad de las ondas de poder rodear un obstáculo que se interpone parcialmente en su propagación.

En la figura 10 se observa un onda plana que llega hasta una barrera que se interpone parcialmente a su propagación. La porción del frente de ondas próximo al borde de la barrera, cambia la dirección de su propagación, de tal manera que la rodea. En esa zona deja de ser un frente de ondas plano por ser uno curvo.

Veamos ahora la situación en la que una onda plana incide en dos barreras, dispuestas de tal manera que dejan entre ellas un hueco. (Fig 11 y 12). En este caso la difracción es más fácilmente observable. El frente de ondas luego de pasar por el orificio tiende a ser circular, llegando a todos los puntos de la superficie del agua. La abertura pequeña se comporta como un foco puntual generador de ondas circulares.

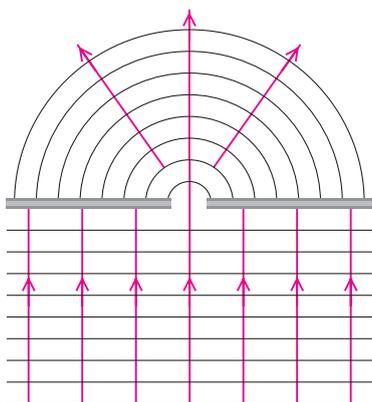


Fig.11. Difracción de un frente de ondas planas por un orificio pequeño.

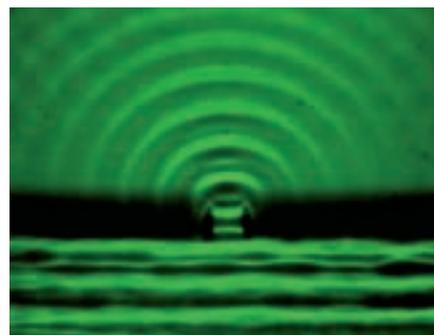


Fig.12. Difracción en la cubeta de ondas.

La difracción de una onda por un orificio es más notoria si el ancho de la abertura y la longitud de onda tienen valores cercanos. Si el ancho de la abertura es mucho mayor que λ , la difracción es poco apreciable (fig 13 a), su dirección de propagación prácticamente no se altera al pasar por el hueco. Si vamos disminuyendo el ancho de la abertura, manteniendo constante la longitud de onda, la difracción es mucho más notoria. (Fig. 13b y 13 c)

El cambio de dirección debido a la difracción no depende separadamente de la longitud de onda y del ancho de la ranura sino de la relación entre ellos.

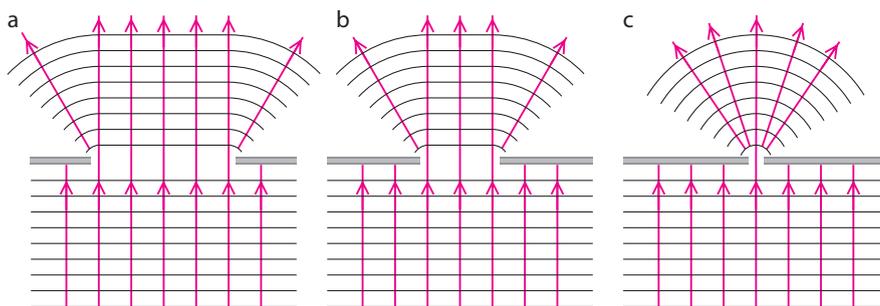


Fig.13. La difracción se hace más notoria a medida que el ancho de la abertura se va acercando al valor de la longitud de onda λ .

Para el caso en que la longitud de onda es mucho mayor que el ancho de la abertura, la onda se refleja completamente en el obstáculo, por lo tanto no se difracta (fig 14).

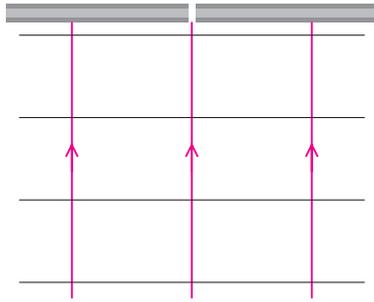


Fig.14. Al llegar a un orificio de ancho mucho menor que λ el frente de ondas no se difracta.



Fig.15. La longitud de onda de las microondas es mucho mayor que el diámetro de los orificios o ranuras de la protección que tienen las puertas. De esa forma las microondas no atraviesan la puerta.

Las ondas de sonido se difractan al ser obstaculizadas parcialmente, lo que facilita percibirlos aún detrás de una barrera sólida (fig 16)

¿Se difracta la luz al atravesar un orificio pequeño? Para obtener una respuesta a esta pregunta tendrás que esperar hasta el capítulo N° 9.

Interferencia

Vimos anteriormente que si golpeamos periódicamente con un objeto pequeño la superficie de una cubeta con agua, obtenemos un frente de ondas circular. ¿Qué sucederá si golpeamos la superficie del agua simultáneamente con dos cuerpos puntuales? Tendremos dos focos que generan ondas que se superponen al propagarse por la cubeta.(fig 17).

Supondremos que los focos puntuales emiten ondas con iguales características: misma forma, amplitud y frecuencia. Aplicando la ecuación $v_p = \lambda \times f$, como la velocidad de propagación es la misma, (es el mismo medio) podemos deducir que la longitud de onda " λ " de las dos ondas emitidas es la misma.

Vamos a considerar que desde los focos se emiten ondas **en fase**. Esto significa que en todo momento los emisores tendrán la misma posición y velocidad. Cuando uno genere una cresta o un valle el otro hará lo mismo. Otra denominación de esta forma de generar ondas es decir que las fuentes emiten en forma **coherente**.

Emitir ondas en forma coherente significa que desde los focos se emiten ondas en fase. Los emisores tienen en todo momento la misma posición y velocidad.

Las ondas emitidas por los dos focos se propagan simultáneamente en el agua en la cubeta. Cada punto de la superficie del agua es afectado por las dos ondas. Se cumple el principio de superposición, o sea que la perturbación resultante en cualquier punto de la cubeta es la suma de los desplazamientos provocados por cada onda en ese punto.

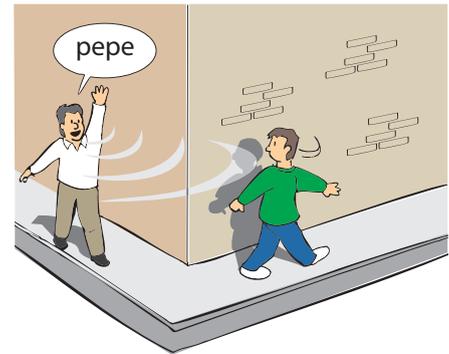


Fig.16. Las ondas sonoras rodean la barrera, permitiendo ser percibidas por otra persona detrás del muro.



Fig.17. Dos focos puntuales generando ondas circulares en la cubeta.

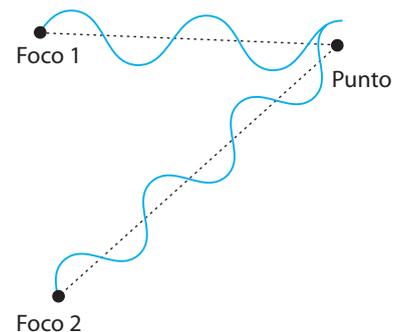


Fig.18. Interferencia constructiva en un punto al superponerse dos crestas.

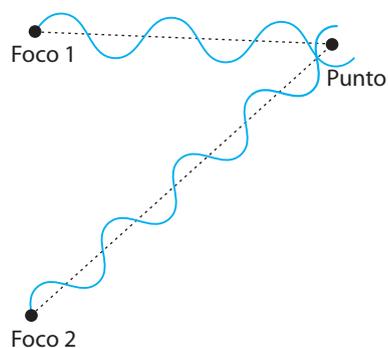


Fig.19. Interferencia destructiva.

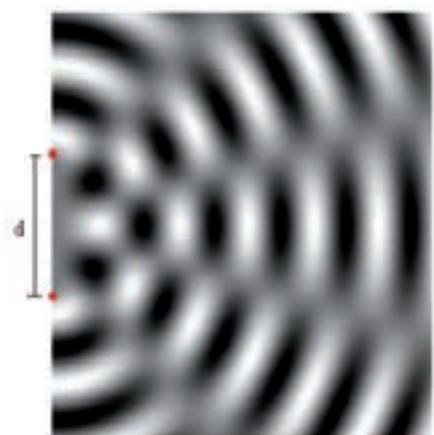


Fig.20. Líneas nodales en la cubeta.

Al igual que cuando estudiamos interferencia en una cuerda, las ondas pueden interferir de forma constructiva o destructiva. En el plano de la superficie del agua, habrá puntos que son alcanzados simultáneamente por dos crestas o dos valles, provenientes de cada uno de los focos. Se produce en este caso interferencia constructiva, es decir, la amplitud resultante será mayor que la de cada una de las ondas emitidas (fig 18).

También existirán puntos donde se produzca interferencia destructiva, o sea que la amplitud resultante sea menor que la de las ondas emitidas desde los focos (Fig 19). Si un punto es alcanzado simultáneamente por una cresta y un valle de igual forma y amplitud, se producirá una interferencia totalmente destructiva. Su amplitud de oscilación será nula, por lo tanto el punto permanece en reposo. A estos puntos se les denomina **nodos**. Si unimos estos puntos con una línea, quedan formadas las **líneas nodales** (fig 20).

Llamamos **línea nodal** a la línea formada por puntos donde se produce en todo momento una interferencia destructiva. Estos puntos siempre permanecen en reposo.

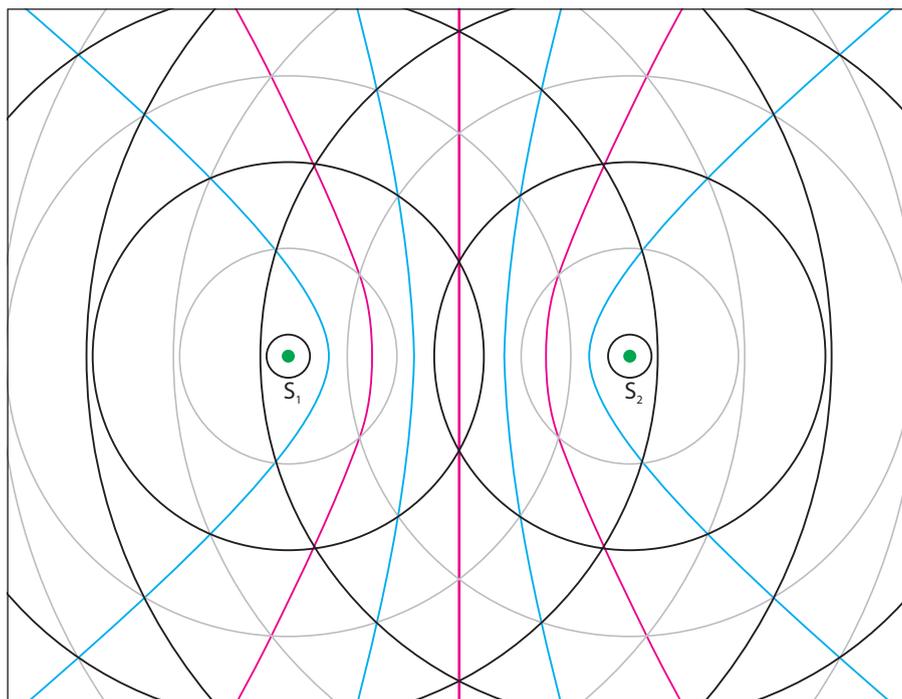


Fig.21.

La figura 21 muestra en negro las crestas y en gris los valles correspondientes a las ondas emitidas por los focos S_1 y S_2 . Los nodos se forman al intersectarse círculos grises con negros, o sea cuando se anulan una cresta con un valle. Las líneas nodales aparecen en azul.

Entre las líneas nodales también aparecen otras líneas de color rojo, donde la amplitud resultante es el doble que la de las ondas emitidas desde los focos. En los puntos pertenecientes a estas líneas siempre se intersectan círculos del mismo color, valle con valle (gris-gris) o cresta con cresta (negro-negro). Cada uno de estos puntos se denomina **antinodo**, y las líneas, **antinodales**. En la figura aparecen en rojo.

Situación interesante

Si los focos son parlantes que emiten en forma coherente sonidos estables, de una frecuencia única (el tono del teléfono es un sonido de este tipo, $f=440\text{Hz}$), la interferencia entre los sonidos emitidos por los parlantes es apreciable. Si nos ubicamos en un punto correspondiente a una línea antinodal, percibiremos un sonido intenso, resultado de la interferencia constructiva de ambas ondas. Si nos ubicamos en una línea nodal, en condiciones ideales no percibiremos sonido. A partir de dos emisores de sonido obtenemos zonas de silencio.

Para poder apreciar la interferencia totalmente destructiva en el sonido, debemos trabajar con dos parlantes idénticos emitiendo coherentemente el mismo sonido estable de una frecuencia sola. Los parlantes deben estar separados una distancia mayor que λ . El experimento debe realizarse en un espacio muy amplio para minimizar la influencia de la reflexión en las paredes.

¿Puede apreciarse interferencia en la luz?
¿Podremos obtener oscuridad a partir de dos focos de luz?

Principio de Huygens

Alrededor de 1660 el físico Huygens usando modelos geométricos elaborados sobre papel construyó un método para explicar la propagación de las ondas, que luego verificó experimentalmente. Con él elaboró **una nueva visión de la propagación de las ondas** que ayuda a entender mejor una variedad de propiedades de las ondas, tales como la difracción, la Ley de Snell de la refracción, etc.

Este método permite construir la forma que tendrá un frente de ondas, a partir de la forma que tenía un instante antes.

Por ejemplo, cuando generamos una perturbación en algún lugar de la cubeta, esta se repite un tiempo después en todos los puntos de ella. Dicho de otra forma, cada punto de la cubeta repite un tiempo después lo que se generó en el foco. Cada punto puede considerarse entonces como un foco desde donde se vuelven a generar ondas. Por lo tanto cada punto de un frente de onda que avanza es el centro de una nueva perturbación y la fuente de un nuevo tren de ondas.

Huygens postuló en su principio: **cada punto al que llega una onda se convierte, a su vez, en centro emisor de ondas.**

El principio supone que cada punto del frente de ondas primario se comporta como una fuente de ondas secundarias, que produce ondas circulares. Éstas tienen la misma frecuencia y se propagan en todas las direcciones, con la misma velocidad que la onda primaria en cada uno de dichos puntos.



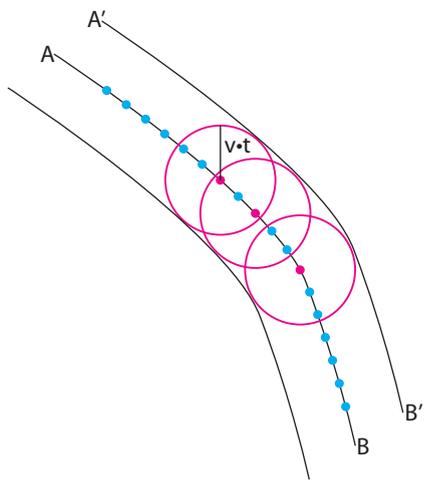


Fig.23. Frente de ondas AB que avanza con una velocidad "v". Luego de un tiempo "t" tendrá la forma A'B'

Para entender mejor el principio analicemos la siguiente situación. Supongamos que conocemos la forma del frente de ondas inicial AB. (Fig. 23). Nuestro objetivo es determinar la forma del frente de ondas A'B' luego de transcurrido un tiempo t, en el que el frente de ondas estuvo avanzando.

¿Cómo dibujamos el frente de ondas A'B' luego de transcurrido el tiempo t?

Sobre el frente de ondas conocido, AB dibujamos varias fuentes de ondas secundarias señaladas por puntos de color rojo y azul. Trazamos una circunferencia de radio "r" centrada en cada una de las fuentes (en color rojo). Dicho radio lo podemos escribir en función de la velocidad y el tiempo de la siguiente forma $r = v \times t$, donde "v" es la velocidad de propagación del frente de ondas. La envolvente de todas las circunferencias es el nuevo frente de ondas luego de transcurrido el tiempo "t".

El radio de las circunferencias será el mismo si el medio es **homogéneo e isótropo**, es decir, tiene las mismas propiedades en todos los puntos y en todas las direcciones.

En resumen: la onda que avanza se puede entender como la suma de todas las ondas secundarias generadas por cada punto del medio ya alcanzado por la perturbación. Las ondas resultantes se convierten en un frente de ondas que avanza en la misma dirección que el que la generó. Cada nuevo frente de ondas se convierte a su vez en un conjunto de focos emisor de un nuevo frente de ondas.

Para finalizar es importante destacar que este principio es válido para cualquier tipo de ondas.

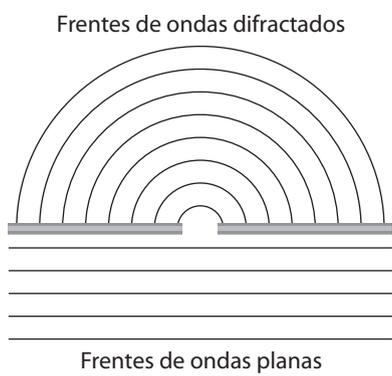


Fig.24. Frente de ondas plano que incide sobre una barrera con un orificio y se difracta.

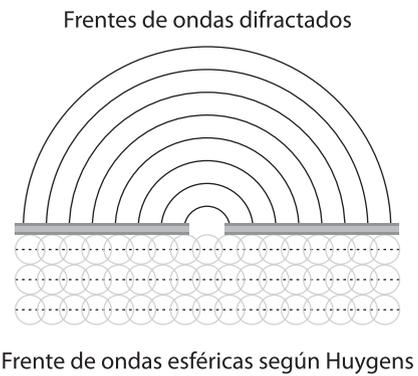
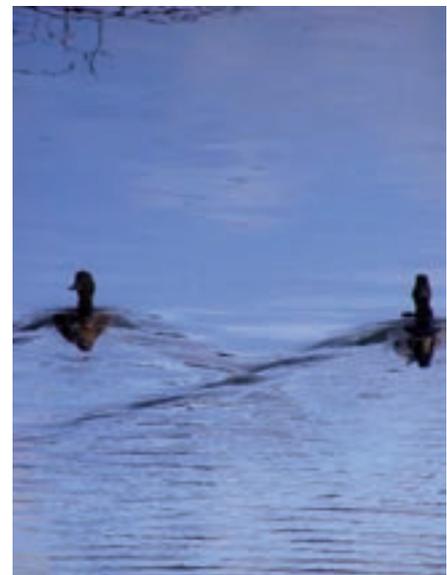


Fig.25. El mismo fenómeno de difracción de la fig. anterior explicado a través del principio de Huygens.

PREGUNTAS

- 1) ¿Cómo se les denomina a las ondas que se propagan en una sola dirección?
- 2) ¿Cómo se les denomina a las ondas que se propagan en dos direcciones?
- 3) ¿A qué se le denomina frente de ondas?
- 4) ¿Qué es una cubeta de ondas y cuál es su utilidad?
- 5) ¿Qué fenómeno físico se produce cuando la luz atraviesa el agua de la cubeta de ondas?
- 6) ¿De qué depende la velocidad de propagación de una onda bidimensional?
- 7) Define: amplitud, frecuencia y período de una onda bidimensional
- 8) ¿Qué determina la frecuencia de las ondas bidimensionales?
- 9) Explica qué ocurre con la frecuencia, velocidad de propagación y longitud de onda, cuando una onda bidimensional se refleja.
- 10) ¿Cómo podemos hacer para que se refracte una onda en dos dimensiones en una cubeta?
- 11) ¿Qué ocurre con la velocidad de propagación de la onda al refractarse en la cubeta?
- 12) ¿Qué ocurre con la frecuencia de una onda cuando se refracta?
- 13) ¿Qué ocurre con la longitud de onda de una onda que se refracta?
- 14) ¿Qué relación hay entre las velocidades de propagación de las ondas incidente y refractada en una onda bidimensional?
- 15) ¿Qué relación hay entre los ángulos de incidencia y refracción en una onda bidimensional?
- 16) ¿En qué consiste el fenómeno físico de la difracción?
- 17) ¿Qué condiciones deben cumplirse para que la difracción sea notoria?
- 18) Describe algunos fenómenos cotidianos en los que se aprecie la difracción de una onda.
- 19) ¿En qué consiste el fenómeno físico de interferencia de ondas?
- 20) ¿Cuándo dos focos emiten ondas de forma coherente?
- 21) ¿Qué es una línea nodal?
- 22) ¿Qué es una línea antinodal?
- 23) ¿Qué condiciones deben cumplirse para poder apreciar la interferencia de ondas sonoras?
- 24) Explica el principio de Huygens.



PROBLEMAS

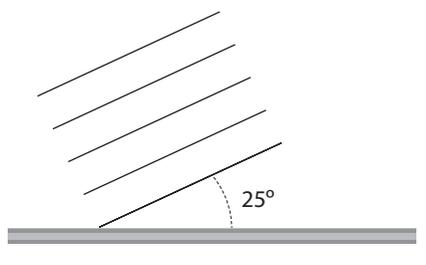


Fig. 26. Problema 1.

- 1) Un frente de ondas planas viaja hacia una barrera fija como se observa en la figura 26.
 - a) ¿Qué representan las líneas rectas?
 - b) Representa en el dibujo donde se encontrarían los valles de la onda en ese instante.
 - c) Determina el ángulo de incidencia.
 - d) Representa el frente de ondas reflejado.
 - e) ¿Cómo será la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de propagación de la onda reflejada, con respecto a la onda incidente?

- 2) La figura 27 muestra una onda que se refracta al pasar del medio 1 al medio 2. Se detallan los frentes de onda y los rayos incidente y refractados.

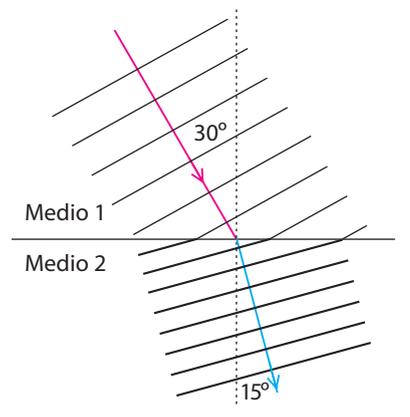


Fig. 27. Problema 2.

- a) ¿En qué medio tiene mayor frecuencia?
 - b) ¿En qué medio tiene mayor longitud de onda?
 - c) Compara las velocidades de propagación de la onda incidente y refractada.
 - d) Si la onda incidiera con un ángulo de 60° , ¿qué valor tendría el ángulo refractado?

- 3) La onda incidente del problema anterior tiene una velocidad de propagación de $0,60 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y una frecuencia de 6,0 Hz. Determina:
 - a) La velocidad de propagación de la onda refractada.
 - b) La longitud de onda de las ondas incidente y refractada.

- 4) La figura 28 representa una onda que pasa de un medio a otro.

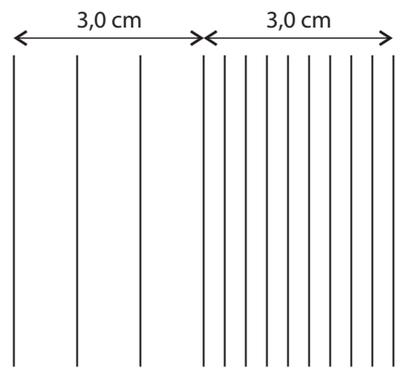


Fig. 28. Problema 4.

- a) ¿Cómo te das cuenta que la onda cambia de medio?
 - b) ¿Existe refracción?, ¿por qué no se observa cambio de dirección?
 - c) ¿Cuánto vale la longitud de onda en cada caso?
 - d) Si la frecuencia con que se generan los pulsos es de 10Hz, ¿cuánto vale la velocidad de propagación en cada medio?

5) Un frente de ondas planas avanza hasta llegar a un barrera que obstaculiza parcialmente su camino. (Fig. 29)

- a) Si no existiera difracción, ¿el punto P oscilaría en algún momento? ¿Por qué?
- b) En un dibujo representa el camino de la onda al difractarse por el obstáculo.

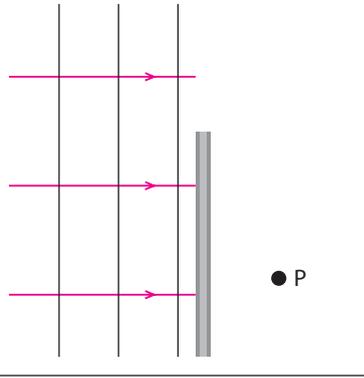


Fig. 29. Problema 5.

6) Un frente de ondas planas llega hasta una abertura. (Fig. 30)

- a) Dibuja el frente de ondas luego que atraviesa la abertura.
- b) ¿En qué cambia tu respuesta si la abertura disminuye a la tercera parte? Justifica.

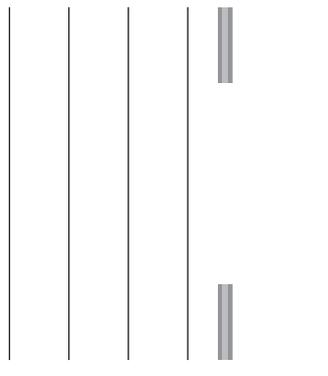


Fig. 30. Problema 6.

- 7) a) ¿Por qué casi no se observa difracción en la onda plana que llega a la abertura de la figura 31?
- b) ¿Cómo debería cambiar la frecuencia con que se generan los pulsos para que se observe mejor la difracción?

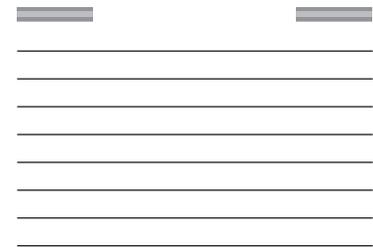


Fig. 31. Problema 7.

- 8) Un frente de ondas circulares llega a una ranura. (Fig. 32)
- a) Dibuja cómo se difracta la onda al pasar por la ranura.
- b) ¿Se puede explicar la forma de la onda difractada aplicando el principio de Huygens?

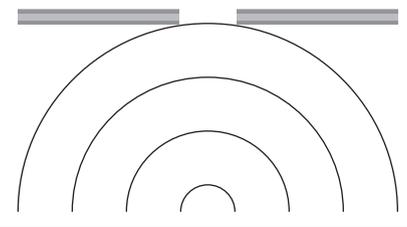


Fig. 32. Problema 8.

9) Un frente de onda llega a una barrera con dos aberturas. (Fig. 33)

- a) Dibuja el frente de ondas luego que se difracta por cada abertura.
- b) ¿Se produce interferencia entre estos dos frentes de ondas difractados?
- c) Explica por qué se observan líneas donde no existe perturbación aparente. ¿Cómo se llaman estas líneas?
- d) Dibuja las líneas que se mencionan en la parte c.

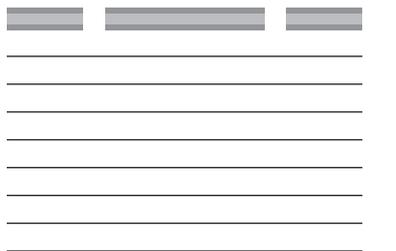
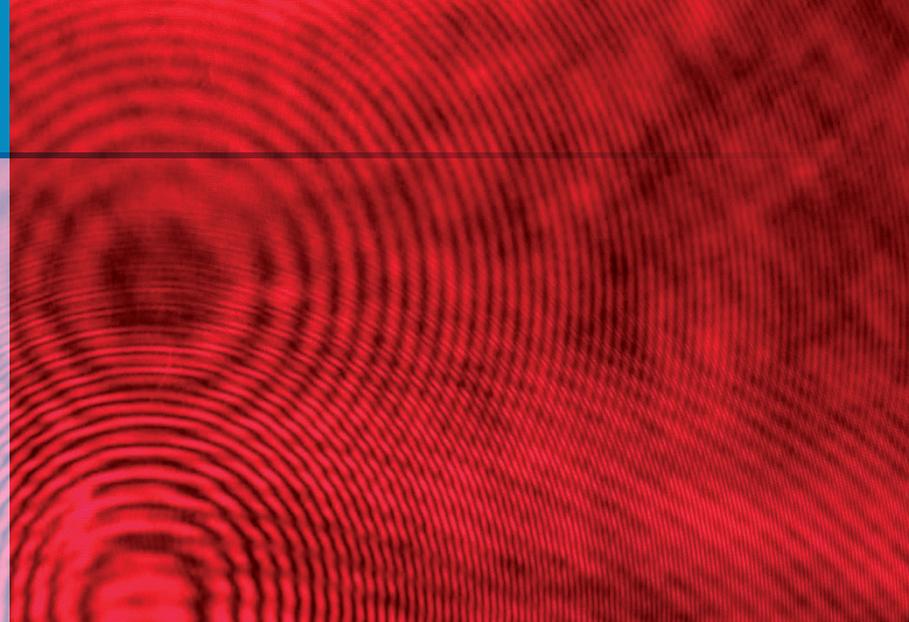


Fig. 33. Problema 9.

Difracción e interferencia de la luz



En el capítulo 1 mencionamos dos corrientes de pensamiento que intentaban explicar las propiedades de la luz: el modelo corpuscular y el modelo ondulatorio. Hagamos un resumen de las propiedades de la luz y veamos si estos modelos pueden explicarlos satisfactoriamente.

Reflexión



Fig. 1a. Reflexión de un haz de luz en un espejo plano.

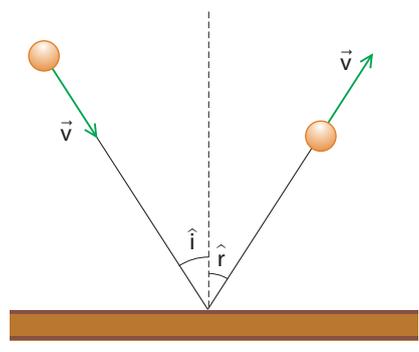


Fig. 1b. "Reflexión" de una pelotita al chocar con un obstáculo plano

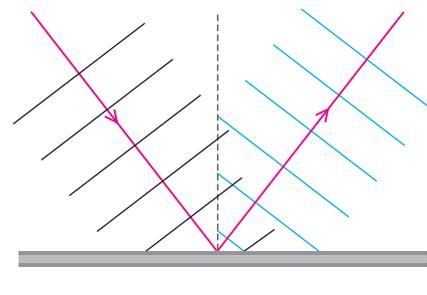


Fig. 1c Reflexión de un frente de ondas plano en un obstáculo plano

La reflexión de la luz y sus leyes pueden ser explicadas satisfactoriamente por los dos modelos (Fig 1a, 1b, 1c). Ondas y partículas se reflejan de forma tal que el ángulo de incidencia es igual al reflejado.

Refracción

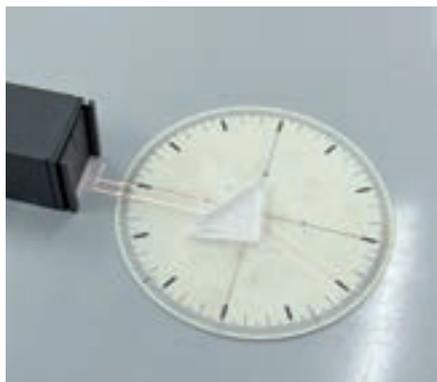


Fig. 2a. Cambio de dirección de un haz de luz al cambiar de medio.

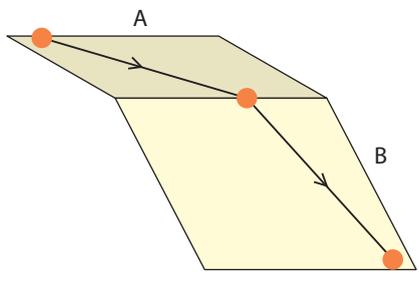


Fig. 2b. Cambio en la dirección del movimiento de una pelotita al cambiar de medio. Al aumentar su velocidad se acerca a la normal.

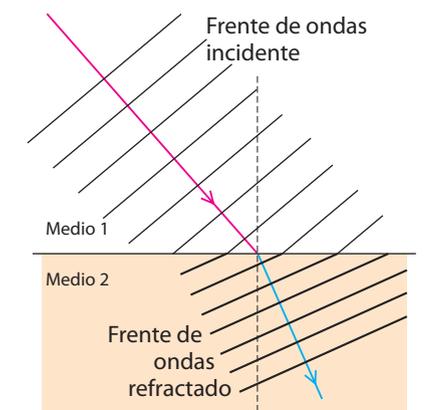


Fig. 2c Cambio en la dirección de propagación de un frente de ondas plano al cambiar de medio. Al disminuir la velocidad se acerca a la normal

Si bien ambos modelos explican la desviación de la dirección de propagación al cambiar de medio y cambiar la velocidad, el modelo corpuscular prevé que la dirección de propagación debe acercarse a la normal si la velocidad de propagación aumenta. Experimentalmente se demostró que ocurre lo contrario. Por ejemplo, la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire, y un rayo de luz que se propaga del agua al aire se aleja de la normal (Fig 2a, 2b, 2c).

Según esta evidencia experimental el modelo ondulatorio explica mejor que el corpuscular el fenómeno de la refracción de la luz.

Difracción

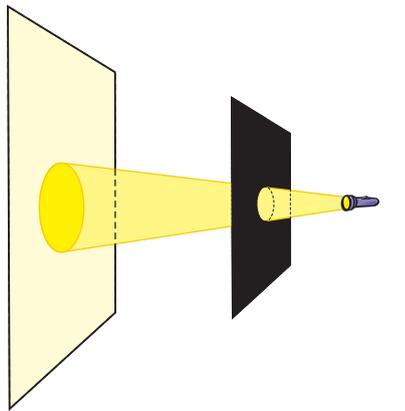


Fig. 3a. Al pasar por un orificio pequeño el haz de luz no se desvía.

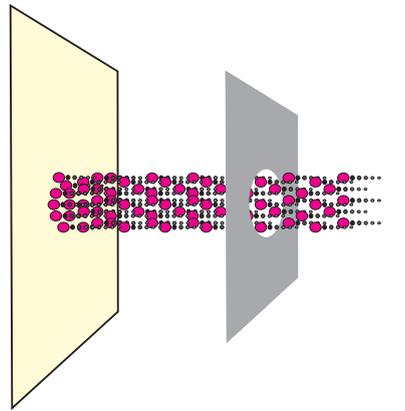


Fig. 3b. Al pasar por un orificio pequeño, el chorro de esferitas no se desvía.

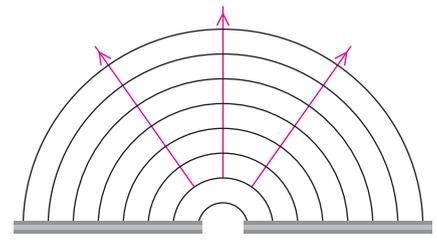


Fig. 3c. Al pasar por un orificio pequeño, el frente de ondas se desvía, propagándose en todas direcciones.

Se encuentran grandes similitudes entre lo que ocurre con un haz de luz al pasar por un orificio y lo que sucede con un chorro de partículas al pasar por una abertura (Fig 3a, 3b y 3c). Esto nos haría descartar el modelo ondulatorio. Pero ¿y si la luz es una onda de λ tan pequeño que su difracción no es fácilmente apreciable? Para que la difracción sea notoria, la longitud de onda y el tamaño de la abertura deben ser similares. Si hacemos que un haz de luz atraviese un orificio circular, en una pantalla se obtendrá una mancha de luz de tamaño semejante al del orificio (fig 3a). ¿Qué sucede si disminuimos el tamaño del orificio? Como muestran las figuras 4a, 4b y 4c (las figuras no están a escala), el diámetro de la zona luminosa aumenta. Esta evidencia experimental abre la posibilidad que la luz sea una onda de λ extremadamente pequeña.

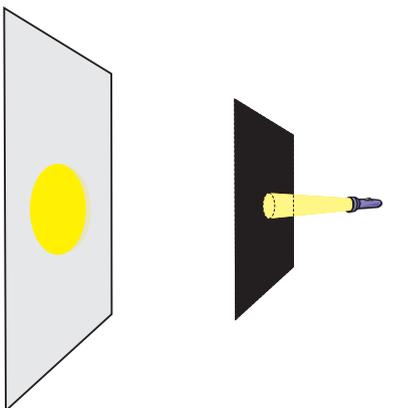


Fig. 4a. Al disminuir el tamaño del orificio, el diámetro de la zona luminosa aumenta.

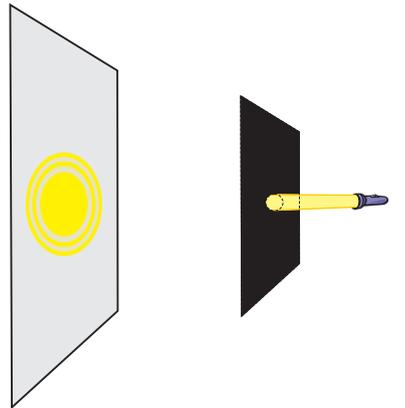


Fig. 4b Si disminuimos aún más el orificio, la difracción es más notoria. Se aprecian anillos oscuros y brillantes.

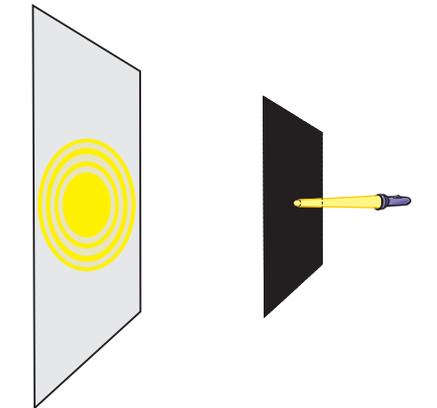


Fig. 4c. La difracción de la luz es muy notoria si el diámetro del orificio es menor que 0,1mm.

Fig. 5. Patrón de difracción obtenido en un laboratorio. Se utilizó un láser de Helio-Neón y el diámetro de la abertura fue de 0,1 mm.

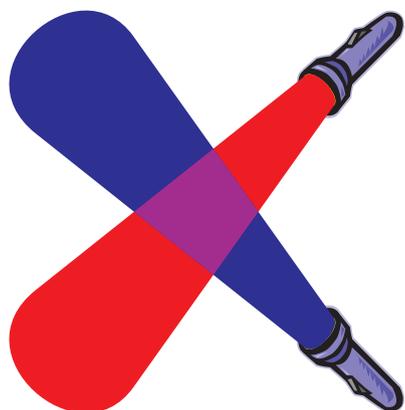
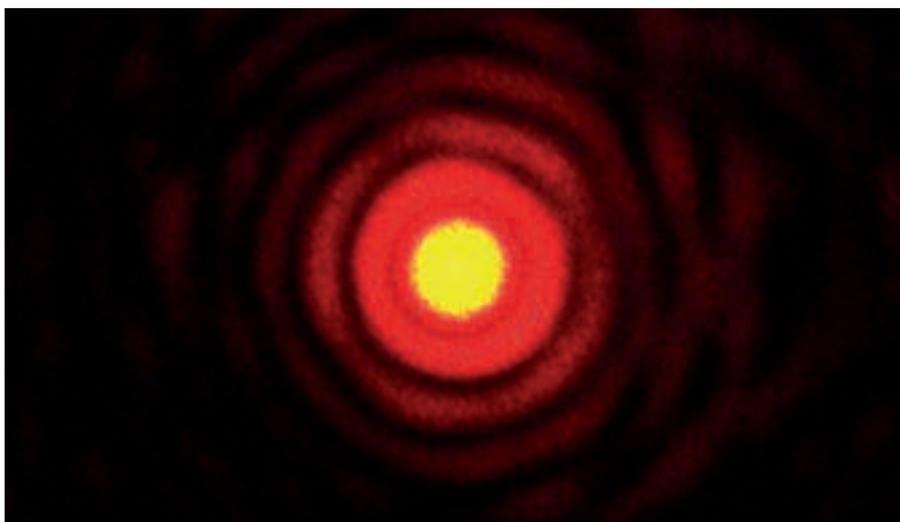


Fig. 6a. Dos haces de luz que se superponen, continúan cada uno con sus características iniciales.

Interferencia. Experimento de Young.

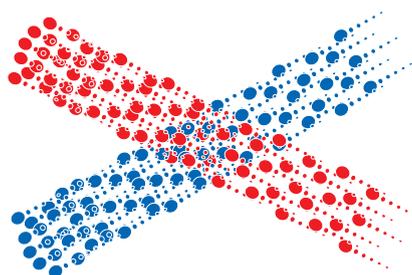


Fig. 6b. Dos chorros de partículas pequeñísimas se superponen y luego continúan con sus características iniciales.



Fig. 6c. Interferencia de ondas en la cubeta. Se observan claramente las líneas nodales (interferencia destructiva)

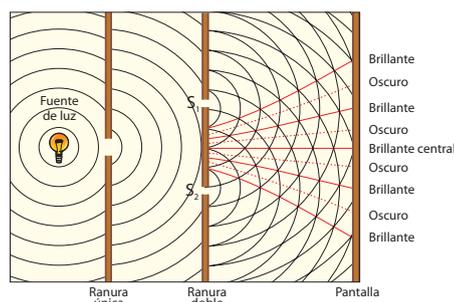


Fig. 7. Experimento de Young. La luz pasa por la primera rendija y se difracta, pasando por S_1 y S_2 que se comportan como focos coherentes.

Los defensores de la teoría ondulatoria encontraban en la interferencia de ondas un gran obstáculo. Dos haces luminosos que se superponen continúan su camino sin alteraciones igual que dos chorros de partículas pequeñísimas, que se cruzan sin chocar (fig 6a y 6b). Al superponerse ondas se aprecian zonas de interferencia destructiva, líneas nodales cuyos puntos no se ven afectados por las perturbaciones (fig. 6c). Si la luz fuera un fenómeno ondulatorio, debería apreciarse esta interferencia destructiva, es decir que a partir de dos focos luminosos, deberíamos obtener zonas de oscuridad. En el siglo XVIII esto no parecía posible. Si colocamos dos lámparas cercanas emitiendo luz simultáneamente, no esperamos encontrar zonas de sombra. Recordemos las condiciones necesarias para obtener interferencia de sonido: dos focos que emiten **en fase** ondas idénticas. Las dos lámparas pueden ser idénticas, pero la emisión de luz se da en forma aleatoria por los átomos del filamento, por lo que difícilmente las lámparas emitan en fase.

En 1801 (5 años antes de las invasiones inglesas a nuestro territorio), Thomas Young, un médico inglés, logró obtener dos focos luminosos en fase con un ingenioso dispositivo (fig 7). Hizo pasar luz solar por un orificio pequeño, que cumplía la función de foco puntual. La luz proveniente de este foco incidía en dos orificios pequeños. Como la luz en cada orificio

provenía de un foco puntual, cualquier cambio de la luz en un orificio se repetía en el otro, por lo tanto se comportaban como dos focos que emitían en fase.

En su experimento, Young obtuvo a partir de dos focos de luz zonas oscuras (fig 9). Estas zonas oscuras corresponden a regiones donde se produce interferencia destructiva. La imagen presenta grandes similitudes con lo que puedes observar en una burbuja de jabón o en una mancha de aceite en el pavimento (fig 8). También en estos casos se produce interferencia de luz.

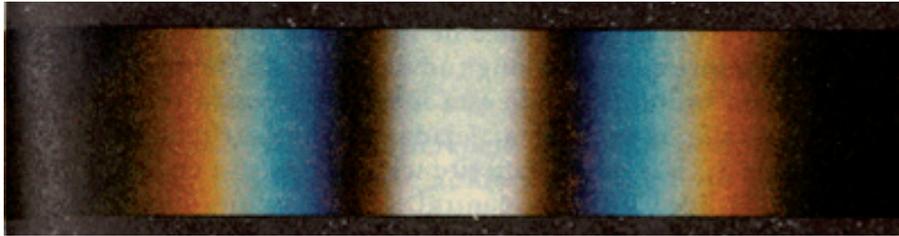


Fig. 9. Patrón de interferencia de luz blanca. Las franjas de distintos colores aparecen a distintas distancias del centro del patrón.

Repetiendo el experimento, pero agregando un filtro a la luz solar para que la luz incidente sea de un solo color, podemos obtener patrones de interferencia para luz monocromática (fig 10). En ellos se observa que la separación entre franjas luminosas y oscuras es diferente para cada color.

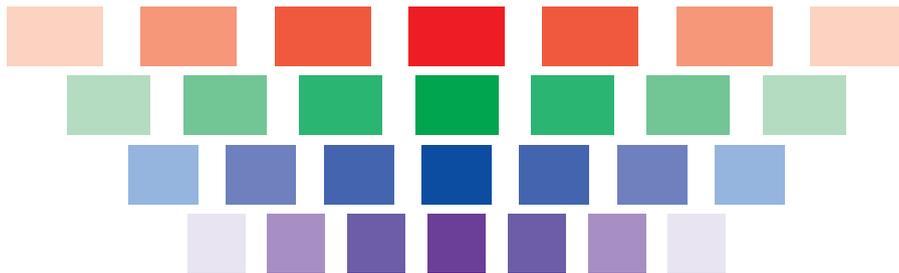


Fig. 10. Patrones de interferencia para luz roja, azul, verde y violeta. Se observa que la separación entre zonas oscuras es mayor para el color rojo y menor para el violeta.

Hoy podemos realizar fácilmente este experimento haciendo incidir un haz de luz laser (fig 11) en una rendija doble muy estrecha. Como se trata de luz monocromática y coherente, el foco laser se comporta como el primer orificio del experimento de Young.

Estos experimentos sobre interferencia luminosa, fortalecieron la concepción ondulatoria de la luz.

Determinación de la longitud de onda a partir del patrón de interferencia

La evidencia experimental parece verificar la teoría ondulatoria. Si la luz es una onda, ¿cual es su longitud de onda? ¿y su frecuencia? Realizando el experimento de Young con luz monocromática coherente podemos determinar la longitud de onda de la luz incidente.



Fig. 8a. Interferencia de luz en burbujas de jabón.

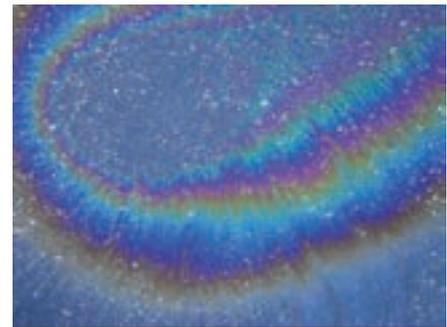


Fig. 8b. Mancha de aceite.

LASER: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación.

Construido por primera vez en 1960 y basado en ideas de Einstein, el laser nos permite obtener un haz de luz monocromático y coherente. Sus aplicaciones hoy en día son muy numerosas: CD, DVD, tecnología médica, comunicaciones.

Luz policromática



Luz monocromática



Luz monocromática coherente



Fig. 11. Características de la luz laser.

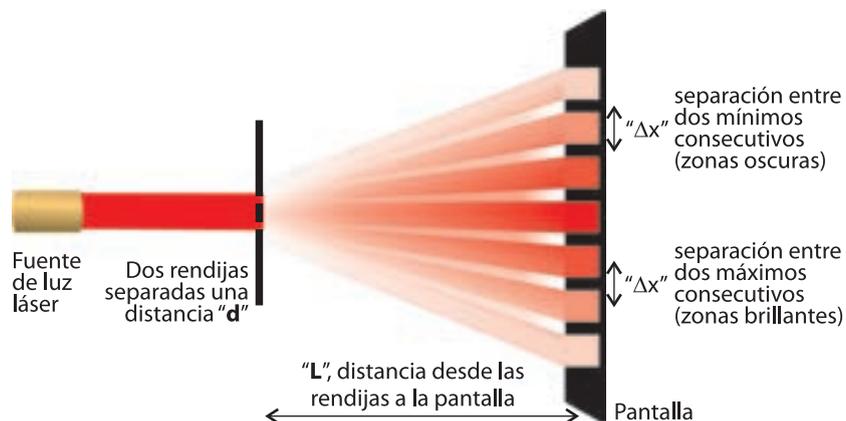


Fig. 12. Recreación del experimento de Young con láser. Las franjas oscuras (llamadas mínimos) en la pantalla están igualmente espaciadas, lo mismo que las franjas brillantes (llamadas máximos).

Si hacemos pasar luz monocromática coherente por dos rendijas separadas una distancia " d " y colocamos una pantalla a una distancia " L " de las rendijas, podemos apreciar en ella zonas brillantes y oscuras (fig 12), correspondientes al patrón de interferencia de la luz incidente. Si " L " es mucho mayor que " d ", se observa que la separación entre dos mínimos consecutivos (zonas oscuras) es siempre la misma, y coincide además con la separación entre dos máximos consecutivos (zonas brillantes). La denominaremos " Δx " y cumple las siguientes relaciones.

- " Δx " es directamente proporcional a " L "
- " Δx " es directamente proporcional a " λ "
- " Δx " es inversamente proporcional a " d "

Podemos resumir estas relaciones en la siguiente ecuación:

$$\Delta x = \frac{L \times \lambda}{d}$$

Por lo tanto si conocemos " Δx ", " L " y " d " podemos determinar " λ " de la luz incidente.

$$\lambda = \frac{\Delta x \times d}{L}$$

Ejemplo 1

Un haz de luz laser rojo incide por dos rendijas finas separadas 0,30mm. En la pantalla se aprecian zonas oscuras separadas 4,2 mm entre si. La distancia de la pantalla a las rendijas es de 2,00m.

a) Determina λ de la luz incidente

De la ecuación $\Delta x = \frac{L \times \lambda}{d}$ despejamos λ $\lambda = \frac{\Delta x \times d}{L}$

Expresando todas las magnitudes en el Sistema Internacional y sustituyendo

$$\lambda = \frac{0,0042\text{m} \times 0,00030\text{m}}{2,00\text{m}} \quad \lambda = 6,3 \times 10^{-7}\text{m}$$

b) Determina la frecuencia de la luz incidente.

$$v = \lambda \times f, \text{ por lo tanto } f = \frac{v}{\lambda}.$$

Recordando que la luz se propaga en el aire con $v = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$ y

$$\text{sustituyendo } f = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{6,3 \times 10^{-7}\text{m}} \quad f = 4,8 \times 10^{14}\text{Hz}$$

c) Si hacemos incidir en las rendijas luz monocromática coherente de $\lambda = 5,0 \times 10^{-7}\text{m}$. ¿Cuál es el valor de la separación entre dos mínimos consecutivos?

La separación entre dos mínimos consecutivos es Δx . Utilizando la

$$\text{ecuación } \Delta x = \frac{L \times \lambda}{d}$$

y sustituyendo $\Delta x = \frac{2,00\text{m} \times 5,0 \times 10^{-7}\text{m}}{0,00030\text{m}} \quad \Delta x = 0,0033\text{m}$

Color, longitud de onda y frecuencia

Si realizamos el experimento de Young para luz monocromática de distintos colores manteniendo "L" y "d" constante, obtenemos patrones de interferencia con diferentes Δx para cada color (fig 10). Como $\Delta x = \frac{L \times \lambda}{d}$ podemos deducir que a cada color le corresponde una longitud de onda diferente (fig 13).

Los valores de la tabla corresponden a luz que se propaga en el aire, medio en el cual fue realizado el experimento. Si un haz de luz roja pasa del aire al vidrio, su color no cambia. Vimos en el capítulo 8 que la longitud de onda sí cambia cuando una onda cambia de medio. La magnitud que no varía en ese caso es la frecuencia. Podemos calcular la frecuencia correspondiente a cada color de luz utilizando $f = \frac{c}{\lambda}$.

Esta frecuencia es característica de cada color y su valor no se altera al cambiar de medio (fig 14).

En resumen

El modelo ondulatorio explica satisfactoriamente la reflexión, refracción, difracción e interferencia de la luz. De acuerdo a la evidencia experimental, ésta se comporta como una onda de longitud de onda muy pequeña (10^{-7}m) y frecuencia muy grande (10^{14}Hz), que se propaga en el aire con $v = 3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. A cada color le corresponde una frecuencia diferente.

Color	λ (x 10^{-7}m)
rojo	6,1 - 7,0
naranja	5,9 - 6,1
amarillo	5,7 - 5,9
verde	5,0 - 5,7
azul	4,5 - 5,0
violeta	4,0 - 4,5

Fig. 13. Tabla de colores y longitudes de onda. El rojo presenta mayor λ .

Color	f (x 10^{14}Hz)
rojo	4,3 - 4,9
naranja	4,9 - 5,1
amarillo	5,1 - 5,3
verde	5,3 - 6,0
azul	6,0 - 6,7
violeta	6,7 - 7,5

Fig. 14. Tabla de colores y frecuencias. El violeta presenta la mayor frecuencia.

PREGUNTAS

- 1) ¿El modelo corpuscular de la luz explica satisfactoriamente la reflexión? Explica.
- 2) ¿El modelo ondulatorio de la luz explica satisfactoriamente la reflexión? Explica.
- 3) ¿El modelo corpuscular explica satisfactoriamente la refracción de la luz? Explica.
- 4) ¿El modelo ondulatorio explica satisfactoriamente la refracción de la luz? Explica.
- 5) ¿Qué condiciones deben cumplirse para poder apreciar la difracción de la luz?
- 6) ¿Por qué no podemos apreciar interferencia de luz con dos linternas?
- 7) Describe el experimento de Young.
- 8) ¿Qué es la luz láser?
- 9) Nombra cuatro aplicaciones del láser.
- 10) ¿Qué observamos en una pantalla si hacemos pasar luz láser por una rendija doble muy fina?
- 11) ¿Cómo varía el patrón de interferencia luminosa si aumentamos "L", distancia de las rendijas a la pantalla?
- 12) ¿Cómo varía el patrón de interferencia luminosa si aumentamos "d", separación entre las rendijas?
- 13) ¿Qué diferencia existe entre los patrones de interferencia de la luz roja y la luz violeta?
- 14) ¿A qué color de luz corresponde una longitud de onda de $\lambda = 4,3 \times 10^7 \text{m}$?
- 15) ¿A qué color de luz corresponde una frecuencia de $f = 7,0 \times 10^{14} \text{Hz}$?



Láser indicando la posición del meridiano 0. Greenwich, Reino Unido.

PROBLEMAS

- Un laser de Helio-Neón emite luz de $\lambda = 632,8\text{nm}$. (Fig. 15)
 - ¿De qué color es la luz emitida?
 - Expresa su longitud de onda en metros.
 - Determina su frecuencia.
- Repite el problema anterior para $\lambda_1 = 405\text{nm}$, $\lambda_2 = 473\text{nm}$ y $\lambda_3 = 593\text{nm}$.
- Determina la longitud de onda de un haz de luz de $f = 5,0 \times 10^{14}\text{Hz}$. ¿A qué color corresponde?
- Realizando el experimento de Young con luz monocromática se obtienen franjas oscuras separadas $2,0\text{cm}$. Determina la nueva separación entre las franjas oscuras en los siguientes casos:
 - Aumentamos al doble la separación entre las rendijas.
 - Disminuimos a la mitad la separación entre las rendijas.
 - Aumentamos al doble la distancia de las rendijas a la pantalla.
 - Disminuimos a la mitad la distancia de las rendijas a la pantalla.
- Determina la separación entre mínimos para el patrón de interferencia obtenido en las siguientes condiciones.
 $L = 5,50\text{m}$ $d = 0,25\text{mm}$ $\lambda = 6,33 \times 10^{-7}\text{m}$



Fig. 15. Problema 1.

- Un laser de Helio-Neón de $\lambda = 6,328 \times 10^{-7}\text{m}$ incide en dos rendijas muy finas. En una pantalla ubicada a $4,20\text{m}$ de las rendijas se obtiene el patrón que muestra la figura 16. Determina la separación entre las rendijas.

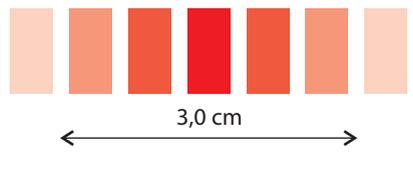


Fig. 16. Problema 6.

- Un laser verde de $\lambda = 5,32 \times 10^{-7}\text{m}$ incide en dos rendijas muy finas separadas $0,15\text{mm}$. En una pantalla se obtiene el patrón de interferencia que muestra la figura 17. Determina la distancia entre las rendijas y la pantalla.

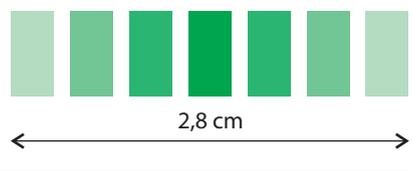


Fig. 17. Problema 7.

- Un puntero laser azul incide en dos rendijas finas separadas $0,20\text{mm}$. En una pantalla situada a $6,35\text{m}$ de las rendijas se obtiene el siguiente patrón de interferencia. (Fig. 18). Determina la longitud de onda del laser.

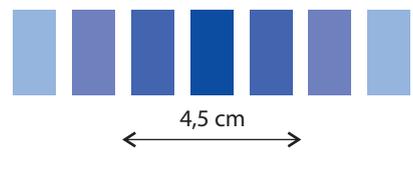


Fig. 18. Problema 8.



Electrostática



Fig. 1. Tales de Mileto (639 ó 624 - 547/6 a.C.) fue el iniciador de la indagación racional sobre el universo. Fue uno de los más grandes astrónomos y matemáticos de su época, a tal punto que era una lectura obligatoria para cualquier matemático en la Edad Media. Se destacó por su sabiduría práctica, su notable capacidad política y por la gran cantidad de conocimientos que poseía. Sus estudios abarcaron profusamente el área de la Geometría, Álgebra Lineal, cuerpos en el espacio y algunas ramas de la Física, tales como la Estática, Dinámica y Óptica. Tuvo como discípulo y protegido a Pitágoras. Una de las frases célebres que se le atribuye es "Conócete a ti mismo".



Fig. 2. Trozo de ámbar, que es resina de pino fosilizada.

Introducción

En esta unidad estudiaremos los fenómenos eléctricos y magnéticos (electromagnetismo) desde sus comienzos en la antigüedad, hasta finales del siglo XIX.

Comenzaremos con el concepto de carga eléctrica y sus propiedades. En todas las situaciones que analizaremos en este capítulo, las cargas eléctricas permanecerán en reposo. Por este motivo a la rama de la Física que estudia estos fenómenos, se le denomina electrostática.

Electrostática es la rama de la Física que estudia los fenómenos eléctricos producidos por distribuciones de cargas en reposo.

Posteriormente desarrollaremos el concepto de campo eléctrico.

Los primeros descubrimientos relacionados con los fenómenos eléctricos tuvieron lugar en Grecia alrededor del año 600 a.C.

Tales de Mileto, (fig. 1) uno de los más destacados sabios griegos, observó que al frotar con una piel de animal un trozo de ámbar (fig.2), era capaz de atraer objetos livianos como plumas o pequeñas astillas de madera.

Recién alrededor del año 1600 se realizaron experimentos sistemáticos sobre este tipo de interacciones, destacándose los trabajos de William Gilbert (fig. 3) quien fue el primero en utilizar el término "**electricidad**", que proviene de "**elektron**" que significa ámbar en griego.

Entre otras cosas, Gilbert observó que la propiedad de atraer pequeños objetos luego de frotarse no era exclusiva del ámbar y que otras sustancias podían electrizarse de la misma forma. Posteriormente a las investigaciones de Gilbert, el francés Charles Dufay en 1733 describe que existen dos tipos de "electricidad", a las que posteriormente Benjamín Franklin denominaría "**electricidad positiva**" y "**electricidad negativa**".

Lo que estos científicos llamaban “electricidad positiva y negativa”, es lo que hoy denominamos “carga positiva y carga negativa”.

Estos científicos además de estudiar las interacciones entre objetos electrizados (cargados) supusieron la existencia de un “fluido eléctrico” que pasaba de un objeto a otro cuando se electrizaban (cargaban).

Actualmente se ha demostrado que efectivamente hay algo que se transfiere cuando un cuerpo se carga, pero no es un fluido continuo, sino pequeñísimas partículas cargadas eléctricamente.

Carga eléctrica

¿Dónde se encuentran las cargas eléctricas?

Se encuentran en toda la materia, formando parte de sus átomos.

El átomo es la menor porción de materia que conserva las propiedades del elemento químico.

A lo largo de la historia se han propuesto gran cantidad de modelos atómicos y si bien los actuales son complejos. (Fig. 4) Para nuestro estudio usaremos un modelo simplificado en el que distinguiremos dos zonas: una central llamada núcleo y otra que lo rodea denominada orbital atómico. (fig. 5)

Se sabe también que los átomos están formados por partículas subatómicas. En este curso nos interesa destacar tres de ellas:

Protón : Tiene carga positiva y se encuentra en el núcleo.

Neutrón: No tiene carga eléctrica y se encuentra en el núcleo.

Electrón: Tiene carga negativa y se encuentra en el orbital atómico.

Orbital atómico: es la región del espacio del átomo en la cual existe mayor probabilidad de encontrar a los electrones.

Para profundizar sobre las partículas subatómicas lee la figura 6.



Fig. 5. Representación del átomo mediante orbitales. En ellos existe un 90-99% de probabilidad de encontrar al electrón.



Fig. 3. William Gilbert, médico inglés, nació en Colchester, Essex el 24 de mayo de 1544 y falleció en Londres el 10 de diciembre de 1603.

Realizó innumerables experimentos de electrostática y magnetismo. Definió el término de fuerza eléctrica como el fenómeno de atracción que se producía al frotar ciertas sustancias. A través de sus experiencias clasificó los materiales en conductores y aislantes e ideó el primer electroscopio. Descubrió la imantación por influencia, y observó que la imantación del hierro se pierde cuando se calienta al rojo. Estudió la inclinación de una aguja magnética concluyendo que la Tierra se comporta como un gran imán.

Principio de incertidumbre.

Para poder estudiar las propiedades de un átomo y de sus partículas constituyentes, es necesario iluminarlo; es decir hacer incidir luz sobre él. Esto trae un cambio en su contenido energético y en su posición. En otras palabras: el estudio del átomo lleva un error necesario que nos impide hablar con certeza de la posición o contenido energético del mismo. Esto imposibilita presentar un átomo como se ha hecho hasta el momento, puesto que se puede describir un espacio donde es muy probable encontrar un electrón, pero no se puede excluir la posibilidad de que se encuentre en otro lugar.

Según el principio de incertidumbre no se puede conocer con exactitud la posición del electrón ni su contenido energético. Esto obliga a usar un nuevo término “probabilidad”, para la descripción del átomo.

Fig. 4.

Los Quarks

Hace 30 años se creía que los protones y los neutrones eran partículas elementales, pero experimentos en los que colisionaban protones con protones o con electrones a alta velocidad indicaron que en realidad estaban formados por partículas más pequeñas. Estas partículas fueron llamadas quarks por el físico de Caltech, Murray Gell-Mann, que ganó el premio Nobel en 1969 por su trabajo sobre dichas partículas.

Existe un cierto número de variedades diferentes de quarks. Se cree que hay como mínimo seis sabores (sabores), que llamamos up (arriba), down (abajo), strange (extraño), charmed (encanto), bottom (fondo) y top (cima). Cada sabor puede tener uno de los tres posibles "colores", rojo, verde y azul. (Debe aclararse que estos términos son únicamente etiquetas, los quarks son mucho más pequeños que la longitud de onda de la luz visible y por lo tanto, no poseen ningún color).

Un protón o un neutrón están constituidos por tres quarks, uno de cada color. Un protón contiene dos quarks up y un quark down; un neutrón contiene dos down y un up.

Fig. 6.

Consideraciones importantes sobre los átomos:

- El número de protones es característico de cada elemento químico

El número de protones correspondiente a cada elemento, se denomina número atómico y lo puedes obtener en una tabla periódica.

- El número de electrones es el mismo que el de protones.
- La carga de un electrón y un protón tiene el mismo valor absoluto pero diferente signo $\Rightarrow q_{\text{protón}} = -q_{\text{electrón}}$
- La carga total de un átomo es nula.

Si un átomo tiene igual número de protones que electrones y como las cargas de estas partículas son opuestas, su carga neta es cero.

En este capítulo veremos diferentes mecanismos por los cuales es posible modificar el número de electrones de un átomo. En el caso de los protones no ocurre lo mismo, no podemos modificar su número mediante procedimientos sencillos.

- Un átomo que perdió electrones, tiene carga neta positiva y recibe el nombre de catión.
- Un átomo que ganó electrones, tiene carga neta negativa y recibe el nombre de anión.

Catión: átomo cargado positivamente.
Anión: átomo cargado negativamente.

Podemos concluir que:

Un cuerpo está cargado si el número de electrones es distinto al de protones.

- Si tiene más electrones que protones se encuentra cargado negativamente.
- Si tiene menos electrones que protones se encuentra cargado positivamente.

Propiedades de la carga eléctrica

Cuantización

Una magnitud está cuantizada cuando sus valores no son continuos y solo puede tomar valores determinados. Al ser la carga del electrón la mínima cantidad de carga que podemos encontrar en la naturaleza, un cuerpo

puede tener un electrón de más o de menos, dos, cinco o varios millones, pero nunca tendrá por ejemplo 2,5 electrones de carga .

La carga eléctrica de un electrón es la mínima cantidad de carga existente en forma estable en la naturaleza y la carga de un objeto siempre es múltiplo de la carga del electrón.

Conservación

En general decimos que una magnitud se conserva si en determinadas condiciones su valor permanece constante. Magnitudes como la masa y la energía, que has estudiado en cursos anteriores, cumplen esta propiedad.

Si analizamos el experimento de Tales de frotar un trozo de ámbar con la piel de animal, sabemos que el ámbar aumenta el número de electrones y se carga negativamente. Estos electrones no se crearon en dicho proceso, sino que se trasladaron desde la piel, que al perder electrones quedó cargada positivamente. En todo el proceso la carga eléctrica total permaneció constante.

Principio de conservación de la carga eléctrica:

La carga total no se crea ni se destruye.

Unidades

El valor de la carga eléctrica de un cuerpo se simboliza con la letra "q". Su unidad en el Sistema Internacional, se denomina Coulomb (Fig. 7), su símbolo es "C" y equivale a la carga de $6,25 \times 10^{18}$ electrones.

En 1909 Robert Andrews Millikan (Estadounidense 1868-1953) ideó un aparato bastante sencillo para la determinación de la carga del electrón. Su valor expresado en Coulomb es el siguiente:

$$q_{\text{electrón}} = -1,6 \times 10^{-19} \text{C}$$

$$1\text{C} = 6,25 \times 10^{18} \times |q_{\text{electrón}}|$$

En 1923 Millikan obtuvo el premio Nobel de Física por su trabajo en determinar el valor de la carga del electrón.

El Coulomb es una unidad de carga bastante grande por lo que es común el uso de prefijos para escribir submúltiplos de un Coulomb. Por ejemplo un micro Coulomb se indica $1\mu\text{C}$ y equivale a $1 \times 10^{-6}\text{C}$.



Fig.7. Charles Augustin de Coulomb

Nació en Francia el 14 de junio de 1736 y falleció el 23 de agosto de 1806. Físico e ingeniero militar. Se recuerda por haber descrito de manera matemática la ley de interacción entre cargas eléctricas. En su honor la unidad de carga eléctrica en el sistema internacional lleva el nombre de Coulomb.

Compartió el primer premio de la Academia de Ciencias de París por su artículo sobre las brújulas magnéticas y recibió también el primer premio por su trabajo clásico acerca de la fricción, un estudio que no fue superado durante 150 años.

Durante los siguientes 25 años, presentó 25 artículos a la Academia sobre electricidad, magnetismo, torsión y aplicaciones de la balanza de torsión, así como varios cientos de informes sobre ingeniería y proyectos civiles.

La mayor aportación de Coulomb a la ciencia fue en el campo de la electrostática y el magnetismo. En 1777 inventó la balanza de torsión con la cual, midió con exactitud la fuerza entre las cargas eléctricas. Con este invento, Coulomb pudo establecer el principio, conocido ahora como **Ley de Coulomb** que veremos más adelante.

prefijo	nombre	valor
p	pico	10^{-12}
n	nano	10^{-9}
μ	micro	10^{-6}
m	mili	10^{-3}

Ejemplo 1

Al frotar una regla con un trozo de tela, se transfieren a la regla $2,0 \times 10^4$ electrones.

a) ¿Cuál es la carga de la regla expresada en Coulomb?

La carga de cada electrón es $-1,6 \times 10^{-19} \text{C}$, multiplicando este valor por $2,0 \times 10^4$, obtenemos la carga total de la regla:

$$q_{\text{regla}} = 2,0 \times 10^4 \times (-1,6 \times 10^{-19} \text{C}) \Rightarrow q_{\text{regla}} = -3,2 \times 10^{-15} \text{C}$$

b) ¿La tela quedó cargada?

Sí, los electrones que recibió la regla fueron cedidos por la tela y como sabemos que la carga se conserva, la tela quedará cargada positivamente y el valor de la carga es

$$q_{\text{tela}} = 3,2 \times 10^{-15} \text{C}$$



Fig. 8. Etapa 1.

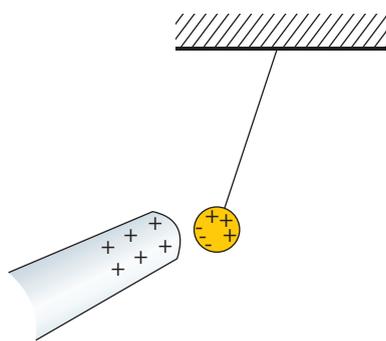


Fig. 9. Etapa 2. Al reordenarse las cargas, la varilla y la bolita se atraen.

Ejemplo 2

Analiza las interacciones y transferencias de carga eléctrica en cada una de las etapas del siguiente experimento:

Etapa 1: Un alumno toma una varilla de vidrio inicialmente descargada y la frota con un trozo de tela (fig. 8).

Al frotar los cuerpos se produce el pasaje de electrones del vidrio a la tela. La varilla perdió electrones y quedó cargada positivamente y la tela que los recibió quedó cargada negativamente.

¿Por qué se produce el traspaso de electrones y cómo sabemos qué cuerpo los cede y cuál los acepta?

El frotar dos cuerpos hace que los átomos que los forman se aproximan lo suficiente como para que algunos electrones puedan pasar de uno a otro. Hacia qué cuerpo se producirá la transferencia depende de factores que tiene que ver con la estructura atómica del material.

Si frotamos un material cuyos electrones están más fuertemente ligados a sus núcleos que el otro, este último cede electrones porque su atracción es más débil.

Etapa 2: Luego el alumno acerca la varilla a una pequeña bolita de corcho, inicialmente neutra y suspendida por un hilo, observando que la bolita es atraída hacia la varilla.

La atracción se produce porque al acercar la varilla cargada positivamente, dentro de la bolita se reordenan las cargas de forma que los electrones se desplazan a la zona más cercana a la varilla (fig. 9).

Etapa 3: Momentos después de ponerse en contacto la varilla con la bolita, esta es repelida por la varilla.

Cuando se ponen en contacto la varilla cargada positivamente, con la zona de la bolita que tiene exceso de cargas negativas, se produce el pasaje de electrones desde la bolita a la varilla (fig. 10).

La bolita queda cargada positivamente por la pérdida de electrones y se repele con la varilla que también está cargada positivamente.

En síntesis:

Un cuerpo está cargado si el número de electrones es distinto al de protones.

- En la etapa 1 se produce lo que se llama "carga por fricción"
- En la etapa 2 se produce lo que se llama "inducción electrostática" y "polarización" de cargas dentro de la bolita.
- En la etapa 3 se produce lo que se llama "carga por contacto"

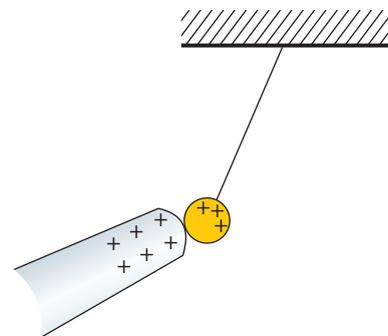


Fig. 10. Etapa 3. Al tocarse la varilla y la bolita se cargan con igual signo.

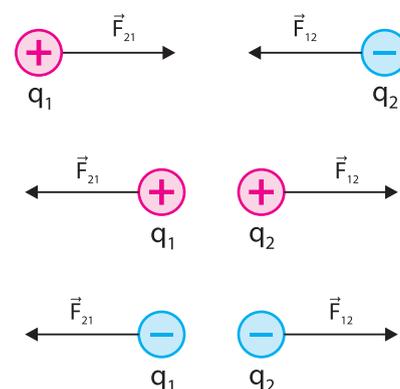


Fig. 11. Atracción y repulsión entre cargas.

Ley de Coulomb

En el ejemplo 2 pudimos observar que cuando acercamos dos objetos cargados estos interactúan ejerciéndose fuerzas de origen eléctrico.

Si las cargas eléctricas son de igual signo, las fuerzas eléctricas son de repulsión. Por el contrario si las cargas eléctricas son de signo opuesto, las fuerzas eléctricas son de atracción. (fig. 11).

A partir de estudios experimentales, Coulomb determinó que el módulo de las fuerzas eléctricas entre dos cargas puntuales (Fig. 12) depende principalmente de dos factores: los valores de las cargas y la distancia entre ellas.

a) La fuerza eléctrica en función del producto de las cargas eléctricas

Dos cargas de valor "q" interactúan con una fuerza eléctrica de módulo "F". Otras dos cargas de valores "2q" y "3q" ubicadas una a igual distancia, se ejercerán fuerzas de módulo "6F" (fig 13a).

Observa que una carga aumentó 2 veces su valor y la otra 3 veces, lo que determinó que la fuerza aumentara 6 veces, que surge del producto 2x3.

Denominamos "carga puntual" a un cuerpo cargado cuyo tamaño es mucho menor que el de los objetos de su entorno.

En general cuándo hablemos de "cargas eléctricas" nos estaremos refiriendo a "partículas puntuales cargadas"

Fig. 12.

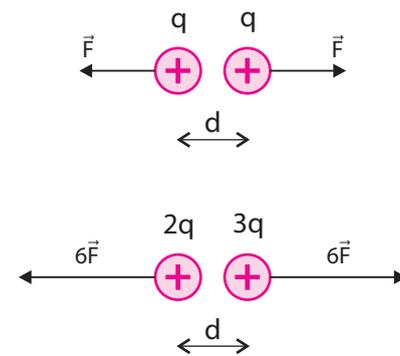


Fig. 13a. La fuerza eléctrica es directamente proporcional al producto de la cargas "q1" y "q2".

La fuerza eléctrica es directamente proporcional al producto de las cargas eléctricas.

$$F \propto q_1 \times q_2$$

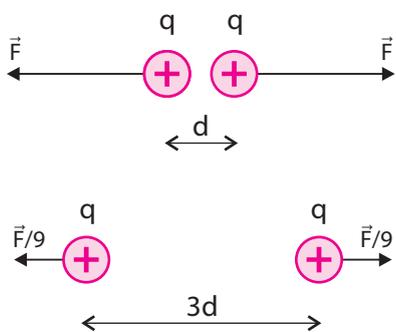


Fig. 13b. La fuerza eléctrica es inversamente proporcional a la distancia “d” ente las cargas elevada al cuadrado

b) La fuerza eléctrica en función de la distancia entre las cargas.

Dos cargas separadas una distancia “d” interactúan con una fuerza eléctrica de módulo “F”. Si las mismas cargas se separan hasta una distancia “3d”, la fuerza de interacción disminuirá 9 veces (fig 13b).

Observa que si la distancia aumenta 3 veces la fuerza disminuye 9 veces, que surge de elevar al cuadrado el número 3.

La fuerza eléctrica es inversamente proporcional a la distancia entre las cargas elevada al cuadrado. $F \propto \frac{1}{d^2}$

Teniendo en cuenta ambas relaciones simultáneamente, deducimos que la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

$$\left. \begin{aligned} F &\propto q_1 \times q_2 \\ F &\propto \frac{1}{d^2} \end{aligned} \right\} \boxed{F \propto \frac{q_1 \times q_2}{d^2}}$$

Llegamos a expresar la relación que encontró Coulomb, entre la fuerza eléctrica, las carga eléctricas y la distancia que las separa.

Enunciado de la Ley de Coulomb

Dos cargas puntuales “ q_1 ” y “ q_2 ” separadas una distancia “d” se atraen o se repelen con una fuerza eléctrica cuyo módulo se calcula:

$$|\vec{F}| = \frac{K \times |q_1| \times |q_2|}{d^2}$$

Consideraciones importantes:

- Las fuerzas que actúan sobre q_1 y q_2 forman un par de fuerzas de acción y reacción (Tercera Ley de Newton). Por lo tanto tienen siempre igual módulo, igual dirección y sentidos opuestos (fig 14).
- Las unidades en el Sistema Internacional de las magnitudes involucradas en esta ecuación son las siguientes:

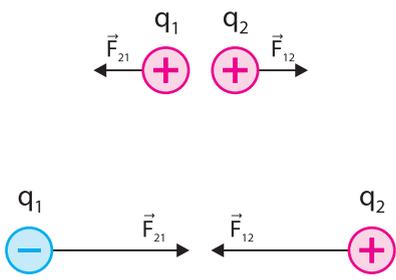


Fig. 14. Las fuerzas eléctricas sobre las cargas tienen igual módulo, y dirección pero sentidos opuestos, sin importar los valores y signos de las cargas de acuerdo con la 3ª Ley de Newton.

$$[F] = \text{N (Newton)}$$

$$[q] = \text{C (Coulomb)}$$

$$[d] = \text{m (Metro)}$$

$$[K] = \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

▪ “K” es una constante, se le denomina constante de Coulomb. Si las cargas se encuentran en el vacío y se utilizan unidades del S.I., su valor es

$$K = 9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

▪ Para calcular el módulo de la fuerza no se toman en cuenta los signos de las cargas y se utilizan solamente sus valores absolutos.

Recuerda que el módulo de una fuerza es siempre positivo.

Ejemplo 3

La carga eléctrica de la partícula de la izquierda (fig. 15) es $q_1 = 2,0\mu\text{C}$ ($2,0 \times 10^{-6}\text{C}$) y al encontrarse a 30cm de q_2 experimenta una fuerza eléctrica cuyo módulo es 0,60N.

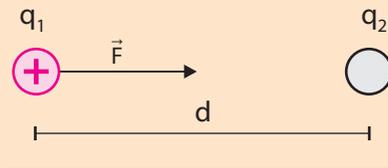


Fig. 15. Ejemplo 5

a) ¿Cuál es el signo de q_2 ?

El signo de q_2 debe ser negativo, porque en la figura 15 vemos que atrae a q_1 cuyo signo es positivo. Las cargas de distinto signo se ejercen fuerzas de atracción.

b) ¿Cuál es el valor de q_2 ?

Calculamos q_2 despejando de la ecuación de la Ley de Coulomb:

$$|\vec{F}| = \frac{K \times |q_1| \times |q_2|}{d^2} \Rightarrow |q_2| = \frac{|\vec{F}| \times d^2}{K \times |q_1|} = \frac{0,60\text{N} \times 0,30^2\text{m}^2}{9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \times 2,0 \times 10^{-6}\text{C}}$$

$$\Rightarrow |q_2| = 3,0 \times 10^{-6}\text{C}$$

Como sabemos que q_2 es negativa, el resultado es $q_2 = -3,0 \times 10^{-6}\text{C}$

c) ¿Cuál será el módulo de la fuerza eléctrica si la distancia se reduce a la mitad?

Como la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, es de esperar que al disminuir la distancia a la mitad la fuerza aumente 4 veces (2^2) y su nuevo valor sea: $F = 4 \times 0,60\text{N} \Rightarrow F = 2,4\text{N}$

Verifiquemos nuestro razonamiento utilizando la ecuación de la Ley de Coulomb:

$$|\vec{F}| = \frac{K \times |q_1| \times |q_2|}{d^2} = \frac{9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \times 2,0 \times 10^{-6}\text{C} \times 3,0 \times 10^{-6}\text{C}}{0,15^2\text{m}^2} = 2,4\text{N}$$

$$F = 2,4\text{N}$$

Ejemplo 4

Dada la distribución de cargas puntuales de la figura 16, determina la fuerza neta sobre q_2 . Los valores de las cargas son los siguientes:
 $q_1 = 4,0\mu\text{C}$; $q_2 = 1,0\mu\text{C}$; $q_3 = -3,0\mu\text{C}$.

Sobre q_2 actúan dos fuerzas eléctricas, una en su interacción con q_1 que llamaremos \vec{F}_{12} y la que le ejerce q_3 indicada como \vec{F}_{32} .

Para determinar la fuerza neta, debemos calcular cada una por separado, representarlas y luego hallar la resultante sumando vectorialmente ambas fuerzas. (Fig. 17)

Calculamos las fuerzas aplicando la ecuación de la Ley de Coulomb:

$$|\vec{F}_{12}| = \frac{K \times |q_1| \times |q_2|}{d_{12}^2} = \frac{9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \times 4,0 \times 10^{-6} \text{C} \times 1,0 \times 10^{-6} \text{C}}{0,30^2 \text{m}^2}$$

$$|\vec{F}_{12}| = 0,40 \text{N}$$

$$|\vec{F}_{32}| = \frac{K \times |q_3| \times |q_2|}{d_{32}^2} = \frac{9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \times 3,0 \times 10^{-6} \text{C} \times 1,0 \times 10^{-6} \text{C}}{0,30^2 \text{m}^2}$$

$$|\vec{F}_{32}| = 0,30 \text{N}$$

En la figura 18 hemos representado a escala ambas fuerzas, teniendo en cuenta que las cargas q_1 y q_2 se repelen por ser de igual signo mientras que q_2 y q_3 se atraen por tener signos opuestos.

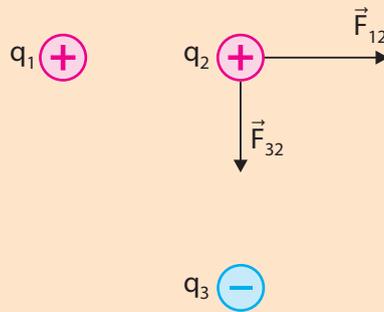


Fig. 18. Representación de \vec{F}_{12} y \vec{F}_{32}

Para determinar la fuerza neta de dos fuerzas en diferentes direcciones utilizaremos el método del paralelogramo (fig. 19)

La longitud del vector resultante es 5,0cm que según nuestra escala (1cm = 0,10N) corresponde a una fuerza $|\vec{F}_{\text{Neta}}| = 0,50 \text{N}$

También es posible calcular analíticamente el módulo de la fuerza neta utilizando el Teorema de Pitágoras. En la figura 20 vemos que los vectores \vec{F}_{12} , \vec{F}_{32} y \vec{F}_{Neta} forman un triángulo rectángulo en el que \vec{F}_{12} y \vec{F}_{32} son los catetos y \vec{F}_{Neta} es la hipotenusa.

Recordando que la hipotenusa se calcula $\text{Hip} = \sqrt{\text{cat}^2 + \text{cat}^2}$:

$$|\vec{F}_{\text{Neta}}| = \sqrt{|\vec{F}_{12}|^2 + |\vec{F}_{32}|^2} = \sqrt{0,40^2 \text{N}^2 + 0,30^2 \text{N}^2} \Rightarrow |\vec{F}_{\text{Neta}}| = 0,50 \text{N}$$

Para que quede completamente definido el vector, nos falta especificar su dirección. Para ello podemos hacerlo también por dos procedimientos. **Método gráfico**, midiendo directamente el ángulo α con semicírculo. **Método analítico**, calculando su valor:

$$\text{tg} \alpha = \frac{\text{cat.op}}{\text{cat.ady}} = \frac{F_{32}}{F_{12}} = \frac{0,30 \text{N}}{0,40 \text{N}} = 0,75 \quad \alpha = \text{tg}^{-1} 0,75 = 37^\circ \quad \alpha = 37^\circ$$

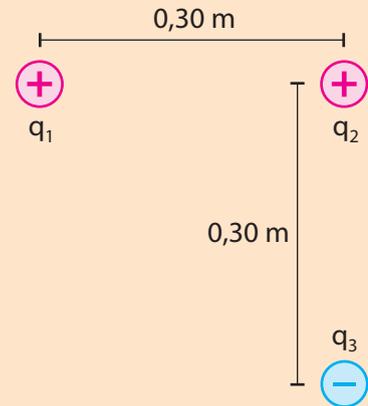


Fig. 16. Ejemplo 4

Recomendamos repasar los diferentes métodos para sumar fuerzas tratados en el curso de tercer año.

Fig. 17.

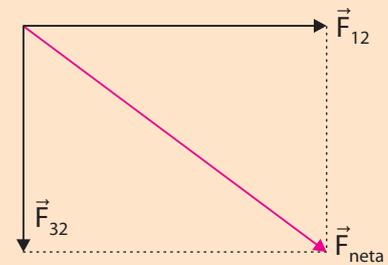


Fig. 19. Escala 1cm = 0,10N

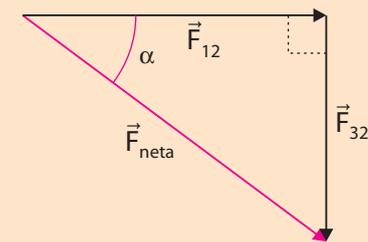


Fig. 20. Los vectores fuerza forman un triángulo rectángulo.

En lugar de α , podríamos haber calculado el ángulo complementario β .
 $\beta = 90^\circ - \alpha \quad \beta = 53^\circ$
 Especificando uno de los dos ángulos es suficiente.

Campo Eléctrico

Consideremos una carga "Q" fija en una determinada posición y algunos puntos (a, b y c) del espacio que la rodean (fig. 21).

Si en cualquiera de esos puntos colocáramos otra carga "q" positiva que llamaremos "carga de prueba", sobre ella actuaría una fuerza eléctrica ejercida por la carga "Q" (fig. 22). Esto nos muestra que el espacio que rodea a "Q" se ha visto modificado por su presencia.

Para describir este hecho decimos que "Q" genera un campo eléctrico a su alrededor y dicho campo ejerce una fuerza eléctrica sobre "q".

En un punto del espacio existe un Campo Eléctrico si al colocar una carga en dicho punto, actúa sobre ella una fuerza de origen eléctrico.

El concepto de campo es mucho más amplio y puede aplicarse a otras magnitudes físicas. Por ejemplo un campo de temperaturas o presiones. En dichos campos a cada punto del espacio le corresponderá un valor de temperatura o presión respectivamente.

Los campos pueden clasificarse en campos escalares y vectoriales

Campo Escalar: a cada punto del espacio se le asigna un valor numérico con su correspondiente unidad de medida. Por ejemplo un campo de temperatura (fig 23).

Campo Vectorial: a cada punto del espacio se le asigna un vector, por lo que además de un valor numérico (módulo del vector) debe especificarse su dirección y sentido. Por ejemplo un campo eléctrico o un campo magnético.

Vector Campo Eléctrico

El campo eléctrico es una magnitud vectorial lo que implica que para definirlo es necesario conocer su módulo, dirección y sentido en cada punto.

El vector campo eléctrico " \vec{E} " creado por una carga Q, tendrá las siguientes características:

- dirección y sentido igual que la fuerza " \vec{F} " que este campo aplicaría a una carga puntual $q > 0$ ubicada en dicho punto.
- $|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{q}$ módulo (fig. 24)

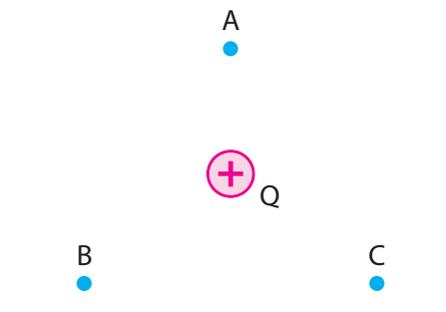


Fig. 21.

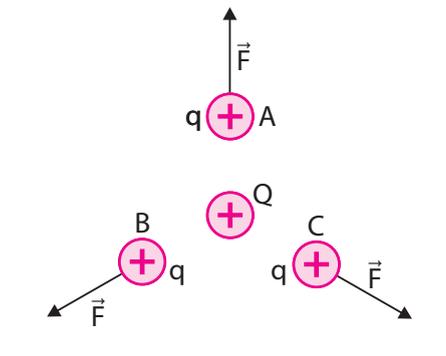


Fig. 22. La carga "Q" ejerce fuerza sobre "q".

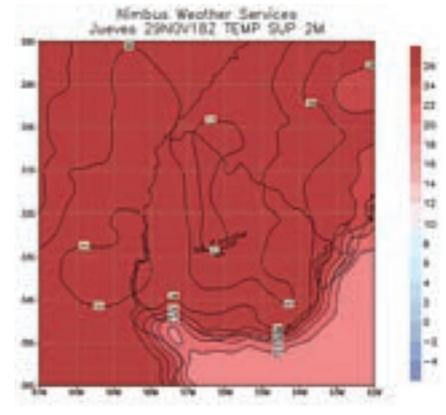


Fig. 23. Campo escalar de temperaturas

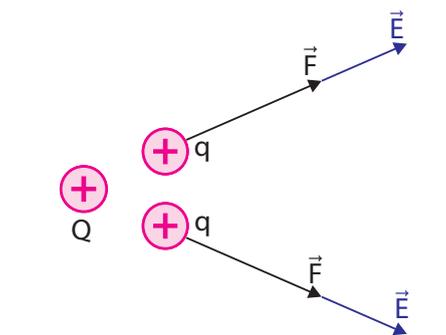


Fig. 24. La carga Q produce campo eléctrico en todos los puntos que la rodean.

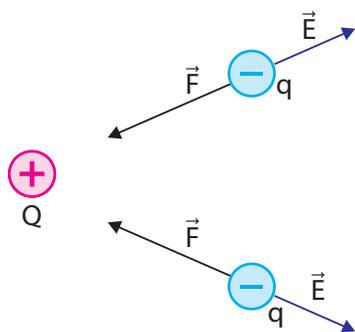


Fig. 25. Si "q" es negativa \vec{E} y \vec{F} tienen sentidos opuestos.

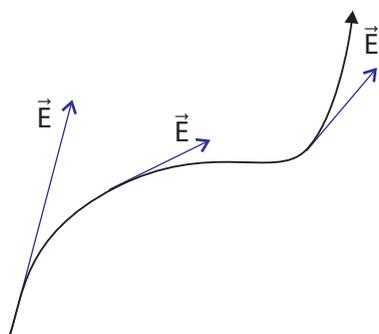


Fig. 26. El vector campo Eléctrico \vec{E} es tangente a la línea de campo en cualquier punto.

Consideraciones importantes:

- El campo eléctrico no depende de la carga de prueba "q", sino de las cargas "Q" que lo producen.
- Si la carga de prueba "q" fuera negativa, el sentido del campo eléctrico y de la fuerza eléctrica serían opuestos (fig. 25).
- La unidad de campo eléctrico en el Sistema Internacional es $\frac{N}{C}$.

Líneas de campo eléctrico

Las líneas de campo eléctrico, también llamadas líneas de fuerza, son curvas imaginarias que se utilizan para visualizar algunas características del campo eléctrico en una zona del espacio.

Estas líneas se dibujan de forma que el vector campo eléctrico sea tangente a dicha línea en cualquiera de sus puntos. (fig. 26)

A partir de las líneas de campo podemos conocer la dirección y sentido del campo eléctrico en cualquier punto, no así su módulo. Pero sí sabemos que en las zonas donde las líneas están más juntas el campo eléctrico es más intenso.

En las siguientes figuras vemos trazadas las líneas de campo para diferentes distribuciones de carga.

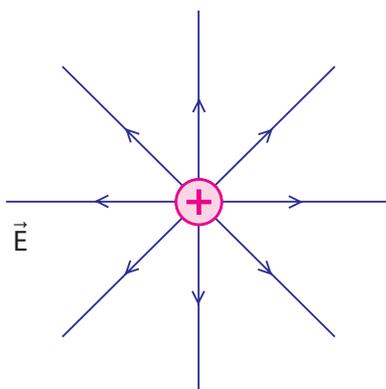


Fig. 27a. Líneas de campo correspondientes a una carga puntual positiva.

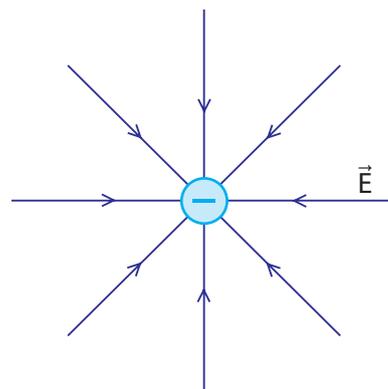


Fig. 27b. Líneas de campo correspondientes a una carga puntual negativa.

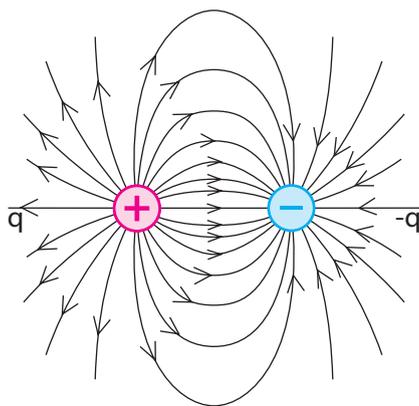


Fig. 27c. Las líneas "salen" de la carga positiva y "llegan" a la negativa.

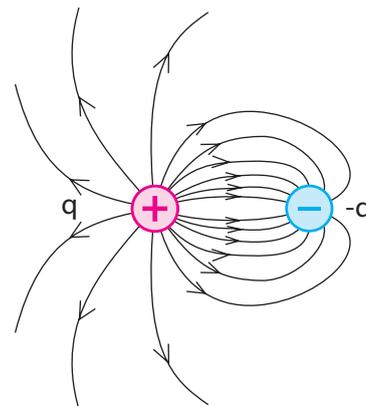


Fig. 27d. En las zonas donde el campo es mayor, las líneas están más juntas.

Campo eléctrico creado por una carga puntual

En las figuras 27 a y b hemos visto que se representan las líneas de campo eléctrico alrededor de una carga puntual. En ambos casos las direcciones de las líneas son radiales con centro en la carga, siendo el sentido “desde la carga” en la carga positiva y “hacia la carga” en la negativa.

El módulo del campo eléctrico producido por una carga puntual “Q” a una distancia “d” de ella es: $|\vec{E}| = \frac{K \times |Q|}{d^2}$

Puedes probar deducir esta ecuación a partir de la Ley de Coulomb

$$|\vec{F}| = \frac{K \times |Q_1| \times |q_2|}{d^2} \text{ y la definición de campo eléctrico } |\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{q}$$

Aclaración: a partir de ahora utilizaremos “q” para referirnos a todas las cargas eléctricas.

Ejemplo 5

a) Determina el campo eléctrico creado por la carga $q = -3,0 \times 10^{-8} \text{ C}$ en el punto “P” (fig. 28)

El módulo del campo eléctrico se calcula:

$$|\vec{E}| = \frac{K \times |q|}{d^2} = \frac{9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \times 3,0 \times 10^{-8} \text{ C}}{0,10^2 \text{ m}^2} \Rightarrow |\vec{E}| = 2,7 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Como el campo eléctrico es una magnitud vectorial para determinarlo completamente además de su módulo debemos indicar su dirección y sentido. Al ser “q” una carga negativa el vector campo eléctrico “apunta” hacia la carga (fig. 29).

b) Determina la fuerza eléctrica que se ejercerá sobre un electrón ($q = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) al colocarlo en el punto “P”.

En el punto “P” hay campo eléctrico creado por la carga “q”, por lo tanto al colocar un electrón en dicho punto, sobre él actuará un fuerza eléctrica.

La relación entre estas magnitudes es $|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{q}$ y despejando obtenemos:

$$|\vec{F}| = q \times |\vec{E}| \Rightarrow |\vec{F}| = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2,7 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}} \Rightarrow |\vec{F}| = 4,3 \times 10^{-15} \text{ N}$$

Como la carga del electrón es negativa, la fuerza eléctrica tiene sentido opuesto al del campo eléctrico y la vemos representada en la figura 30.

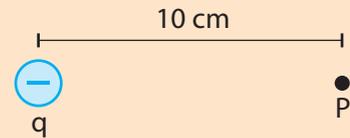


Fig. 28. Ejemplo 5.

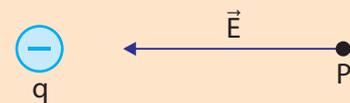


Fig. 29.

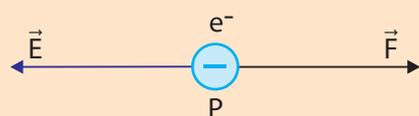


Fig. 30.

Ejemplo 6

En la distribución de cargas de la figura 31, la cargas eléctricas tienen los siguientes valores $q_1 = q_2 = -4,0\text{nC}$ y la distancia $d = 12\text{cm}$.

a) Determina el campo eléctrico resultante en el punto "P".

Como en punto "P" se superponen los campos eléctricos creados por q_1 y q_2 , comenzaremos por calcular y representar ambos campos.

$$|\vec{E}_1| = \frac{K \times |q_1|}{d^2} = \frac{9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \times 4,0 \times 10^{-9} \text{C}}{0,12^2 \text{m}^2} \Rightarrow |\vec{E}_1| = 2,5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$|\vec{E}_2| = \frac{K \times |q_2|}{d^2} = \frac{9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \times 4,0 \times 10^{-9} \text{C}}{0,12^2 \text{m}^2} \Rightarrow |\vec{E}_2| = 2,5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Los módulos de los campos eléctricos son iguales, debido a que las cargas y las distancias desde ellas al punto "P" también son iguales.

Como las cargas son negativas, el sentido de ambos vectores campo eléctrico es hacia las cargas y para determinar el campo resultante utilizamos la regla del paralelogramo (fig. 32).

El vector campo eléctrico resultante tiene una longitud de 3,5cm que según la escala elegida corresponde a $|\vec{E}_p| = 3,5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$

También es posible calcular el campo eléctrico resultante en el punto "P" utilizando el Teorema de Pitágoras, obteniéndose igual resultado.

Recuerda, que para definir completamente el vector \vec{E}_p , debemos especificar su dirección. Observa que el triángulo formado es un rectángulo isósceles, por lo que $\beta = \alpha = 45^\circ$

b) Determina el valor que debe tener una carga q_3 ubicada en "J" para que el campo eléctrico en "P" sea nulo, sabiendo que la distancia "JP" es 0,17m.

Al colocar una carga en el punto "J" creará un campo eléctrico \vec{E}_3 en el punto "P" y para que el campo resultante sea nulo se debe cumplir que la suma de los tres vectores sea cero.

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = \vec{0} \Rightarrow \vec{E}_3 = -(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)$$

Esto significa que \vec{E}_3 debe ser un vector opuesto al resultante de \vec{E}_1 y \vec{E}_2 por lo que tendrá igual módulo y dirección que la suma vectorial.

$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 (3,5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}})$ y sentido opuesto (fig. 33).

Despejando q_3 de $|\vec{E}_3| = \frac{K \times |q_3|}{d_3^2}$ obtenemos $|q_3| = \frac{|\vec{E}_3| \times d_3^2}{K}$

$$|q_3| = \frac{|\vec{E}_3| \times d_3^2}{K} = \frac{3,5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}} \times 0,17^2 \text{m}^2}{9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}} \Rightarrow |q_3| = 1,1 \times 10^{-8} \text{C}$$

Finalmente si observamos el sentido del campo eléctrico \vec{E}_3 en la figura 33, concluimos que el signo de q_3 es positivo.

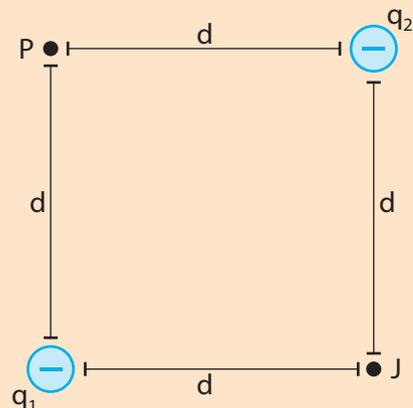


Fig. 31. Ejemplo 6

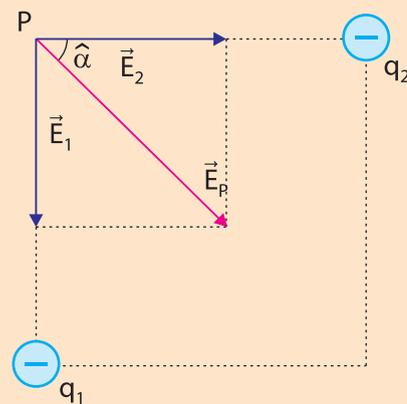


Fig. 32. Escala 1cm - $1,0 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$

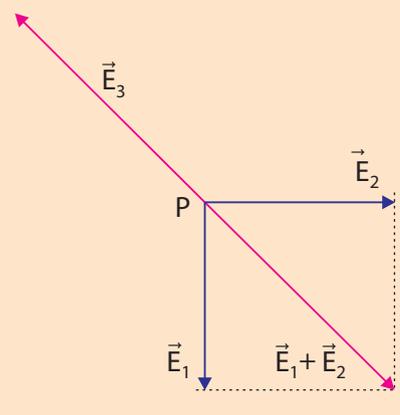


Fig. 33. \vec{E}_3 es opuesto a $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$

PREGUNTAS

- 1) ¿Qué tipos de cargas eléctricas existen en la naturaleza?
- 2) ¿Qué tipo de carga eléctrica tiene un protón?
- 3) ¿Qué tipo de carga eléctrica tiene un electrón?
- 4) Indica para cada par de partículas cargadas de la figura 34 si se atraen o se repelen.
- 5) Clasifica las siguientes afirmaciones en verdadero o falso:
 - a) Un cuerpo neutro al perder electrones queda cargado negativamente
 - b) Un cuerpo neutro al ganar electrones queda cargado positivamente
 - c) Al frotar dos cuerpos pueden intercambiar protones.
 - d) Si frotamos dos cuerpos de igual material no se cargan eléctricamente.
- 6) ¿Cuál es la unidad de la carga eléctrica en el Sistema Internacional de Unidades?
- 7) ¿Cuál es la carga eléctrica de un electrón expresada en Coulomb?
- 8) ¿Cuál es la carga eléctrica de un protón expresada en Coulomb?
- 9) ¿Qué significa que la carga eléctrica es una magnitud cuantizada?
- 10) ¿Por qué un cuerpo no puede tener una carga neta de $4,0 \times 10^{-19} \text{C}$?
- 11) ¿Qué significa que la carga eléctrica se conserva? Describe un ejemplo en el que se manifieste dicha propiedad.
- 12) Una varilla de vidrio inicialmente neutra, se carga positivamente luego de frotarla con un trozo de tela:
 - a) ¿Se creó carga eléctrica en el proceso?
 - b) ¿El trozo de lana también se carga? En caso afirmativo indica el signo de la carga y compara su valor respecto a la carga de la varilla.
- 13)
 - a) Explica por qué si acercamos una regla cargada positivamente a una pequeña esfera descargada (fig. 35), esta es atraída por la regla.
 - b) ¿Cambia tu respuesta si la regla tuviera carga negativa?
 - c) Explica que sucedería si se tocara la bolita con la regla.
- 14) Enuncia la Ley de Coulomb, escribe su ecuación e indica las unidades del Sistema Internacional de todas las magnitudes involucradas.
- 15) Demuestra que las unidades de la constante "K" en el Sistema Internacional de Unidades es $\frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$

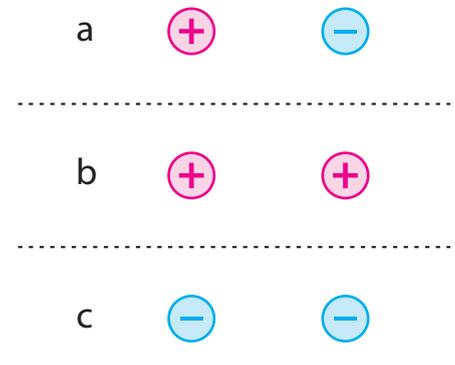


Fig. 34. Pregunta 4

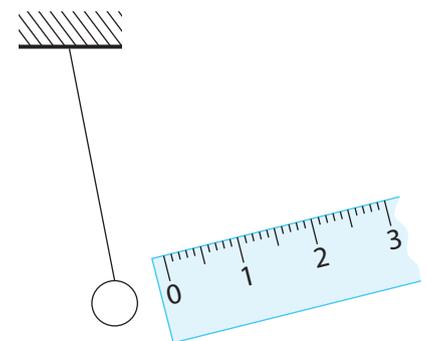


Fig. 35. Pregunta 13

- 16) Dos cargas q_1 y q_2 interactúan ejerciéndose fuerzas de módulo 0,40N cuando están separadas una distancia "d". ¿Cuál será el módulo de la fuerza eléctrica en los siguientes casos?
- Se aumenta el valor de q_1 al doble
 - Se aumentan los valores de q_1 y q_2 al triple
 - Se colocan a una distancia "2d" sin modificar las cargas
 - Se aumentan ambas cargas al doble y las cargas se colocan a la mitad de distancia.
- 17) Explica qué es un campo escalar y qué es un campo vectorial dando un ejemplo de cada uno.
- 18) ¿En qué unidad se expresa el campo eléctrico en el Sistema Internacional de Unidades?
- 19) Representa las líneas de campo eléctrico correspondientes a las distribuciones de carga de la figura 36 a, b y c.



Fig. 36a. Pregunta 19.



Fig. 36b. Pregunta 19.



Fig. 36c. Pregunta 19.



Fig. 37. Pregunta 21.

- 20) ¿Por qué las líneas de campo eléctrico nunca se intersecan?
- 21) a) En la figura 37 representa (sin escala) el vector campo eléctrico creado por "q" en los puntos A, B y C.
- b) ¿Cuál es la ecuación que permite calcular el módulo del campo eléctrico creado por una carga puntual a cierta distancia de ella?
- c) Ordena de menor a mayor los módulos del campo eléctrico existente en los puntos A, B y C.

PROBLEMAS

- A una pequeña esfera eléctricamente neutra se le quitan $2,0 \times 10^{12}$ electrones que son transferidos a una segunda esfera inicialmente descargada.

 - ¿Cuál es la carga (valor y signo) de cada esfera luego de transferir los electrones?
 - Si la distancia entre las esferas es 20cm. ¿Cuál es el módulo de la fuerza eléctrica que actúa sobre cada esfera?
- Determina y representa en un esquema las fuerzas eléctricas que se ejercen dos cargas $q_1 = 2,0 \times 10^{-8}\text{C}$ y $q_2 = -3,0 \times 10^{-8}\text{C}$ si la distancia entre ellas es 6,0cm.
- Determina y representa en un esquema las fuerzas eléctricas que se ejercen dos cargas $q_1 = 3,0 \mu\text{C}$ y $q_2 = 4,0 \mu\text{C}$ si la distancia entre ellas es 400mm.
- El módulo de la fuerza de interacción eléctrica entre dos cargas es 0,45N. Si una de las cargas es $q_1 = -4,0\mu\text{C}$ y la distancia entre ellas es 40cm ¿cuál es el valor y signo de la carga q_2 ? (fig. 38)
- ¿A qué distancia se deben colocar dos cargas cuyos valores son $q_1=6,0\mu\text{C}$ y $q_2 = 4,0\mu\text{C}$ para que se ejerzan fuerzas eléctricas cuyo módulo sea 5,4N?
- Dos cargas iguales al estar separadas 10cm se realizan fuerzas eléctricas de modulo $8,1 \times 10^{-6}$ N. ¿Cuál es el valor de cada carga?
- Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre la carga q_2 en la distribución de cargas de la figura 39. Datos: $d = 10\text{cm}$, $q_1 = 2,0 \mu\text{C}$, $q_2 = 3,0 \mu\text{C}$, $q_3 = -4,0 \mu\text{C}$.
- Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre las cargas q_1 y q_3 utilizando los mismos datos del problema 7.
- Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre la carga q_2 en la distribución de cargas de la figura 40. Datos: $d = 10\text{cm}$, $q_1 = 2,0 \mu\text{C}$, $q_2 = 3,0 \mu\text{C}$, $q_3 = -4,0 \mu\text{C}$.
- Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre las cargas q_1 y q_3 utilizando los mismos datos del problema 9.
- Considerando la distribución de cargas de la figura 41, determina el valor de q_2 para que la fuerza neta sobre " q_3 " sea nula.
 - En estas condiciones ¿ q_1 estará en equilibrio?

Datos: $d_1 = 10\text{cm}$, $d_2 = 20\text{cm}$, $q_1 = -3,0 \mu\text{C}$, $q_3 = 1,0 \mu\text{C}$.
- Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre la carga q_4 en la distribución de cargas de la figura 42. Datos: $d = 10\text{cm}$, $q_1 = -2,0 \mu\text{C}$, $q_2 = 2,0 \mu\text{C}$, $q_3 = 4,0 \mu\text{C}$, $q_4 = 1,0 \mu\text{C}$

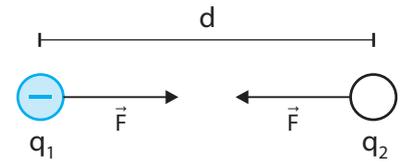


Fig. 38. Problema 4.

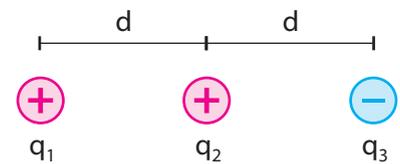


Fig. 39. Problema 7 y 8.

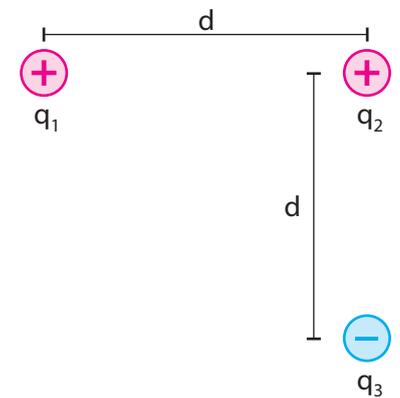


Fig. 40. Problema 9 y 10.

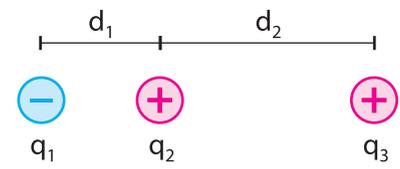


Fig. 41. Problema 11.

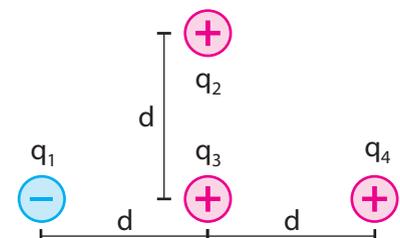


Fig. 42. Problema 12.

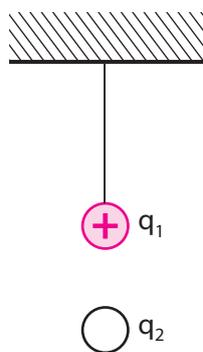


Fig. 43. Problema 13.

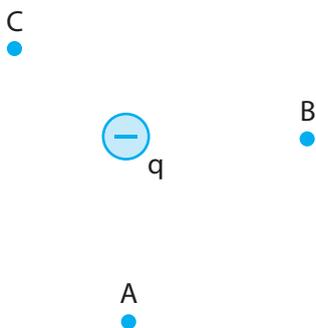


Fig. 44. Problema 14.

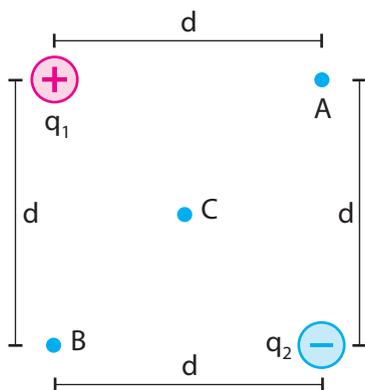


Fig. 47. El punto "C" es el centro del cuadrado.

- 13) La partícula de carga $q_1 = 2,0 \mu\text{C}$ está sostenida de un hilo aislante (fig. 43) y la partícula q_2 se encuentra suspendida en equilibrio 3,0cm por debajo de q_1 . Si las masas de las partículas son $m_1 = 4,0 \times 10^{-6}\text{Kg}$ y $m_2 = 2,0 \times 10^{-6}\text{Kg}$, determina cuántos electrones en exceso tiene la partícula 2 y la tensión del hilo.
- 14) Calcula y representa el campo eléctrico creado por $q = 3,0 \times 10^{-12}\text{C}$ en los puntos A, B y C (fig. 44). $d_C = d_B = 3,0\text{cm}$, $d_A = 2,0\text{cm}$
- 15) a) ¿Cuál es el valor una carga que genera a 10cm de ella un campo eléctrico de módulo $8,0 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{C}}$?
b) Con los datos que dispone. ¿Es posible conocer el signo de la carga?
- 16) ¿A qué distancia de una carga $q = 5,0 \mu\text{C}$ el campo eléctrico generado por ella es $5,0 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$?
- 17) En la distribución de cargas de la figura 45 cuyos datos son:
 $d = 10\text{cm}$, $q_1 = 3,0 \text{ nC}$, $q_2 = -3,0 \text{ nC}$.
a) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "A"
b) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "B"
c) ¿Existirá algún punto dónde el campo eléctrico resultante sea nulo?

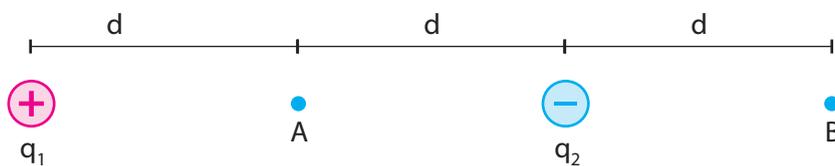


Fig. 45.

- 18) Teniendo en cuenta los datos de la figura 46, determina el valor de q_3 para que el campo eléctrico resultante en el punto "A" sea nulo. Datos: $d = 10\text{cm}$, $q_1 = 4,0 \text{ nC}$, $q_2 = 8,0 \text{ nC}$.

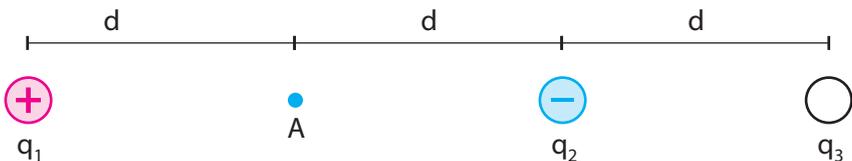


Fig. 46.

- 19) En la distribución de cargas de la figura 47 cuyos datos son:
 $d = 10\text{cm}$, $q_1 = 3,0 \text{ nC}$, $q_2 = -3,0 \text{ nC}$.
a) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "A"
b) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "B"
c) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "C"

Corriente eléctrica



Corriente eléctrica

En el capítulo anterior estudiamos situaciones donde las cargas permanecían en reposo. Ahora analizaremos situaciones donde las cargas eléctricas están en movimiento.

Denominamos **corriente eléctrica** al desplazamiento de cargas eléctricas por un medio conductor.

Si en un medio conductor generamos un campo eléctrico, sobre cada carga perteneciente al medio actuará una fuerza eléctrica. Las cargas libres se pondrán en movimiento, ya que actúa sobre ellas una fuerza que las acelera. Esta fuerza tiene el mismo sentido del campo si la carga es positiva y sentido opuesto si la carga es negativa (fig 1).

Podemos generar un campo eléctrico en un medio vinculándolo con cables conductores a una pila o una batería. Este tipo de dispositivos se llaman generadores o fuentes de corriente y los estudiaremos con mayor detalle en el capítulo 15.

Analicemos dos situaciones:

En la figura 2a conectamos los extremos de un conductor metálico a una batería. Las cargas libres del conductor son electrones de los orbitales menos ligados al átomo. Como su carga es negativa, se moverán en sentido contrario al campo eléctrico.

En la segunda situación, sumergimos dos barras metálicas en una solución ácida o salina y las conectamos a una batería (fig 2b). Las cargas libres en la solución son iones positivos y negativos. Los positivos se moverán en el sentido del campo eléctrico y los negativos en sentido opuesto.

En ambos casos tenemos desplazamiento de cargas eléctricas. Solamente nos ocuparemos del estudio del movimiento de cargas (electrones) en conductores metálicos.

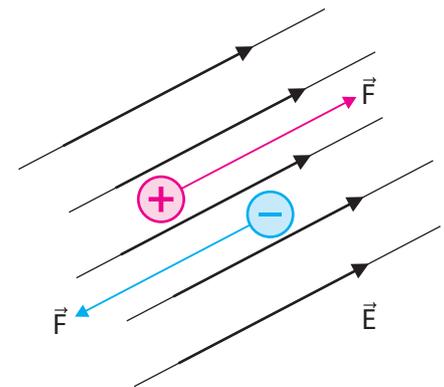


Fig. 1. La fuerza eléctrica sobre cargas positivas tiene el mismo sentido del campo eléctrico. La fuerza eléctrica sobre cargas negativas tiene sentido contrario al campo eléctrico.

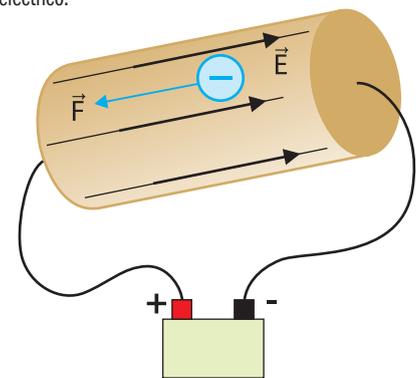


Fig. 2a.

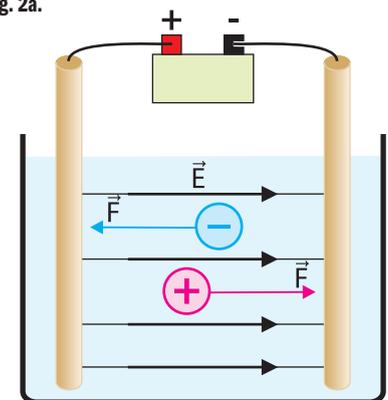


Fig. 2b. Los iones positivos se mueven en el sentido del campo eléctrico y los negativos en sentido contrario

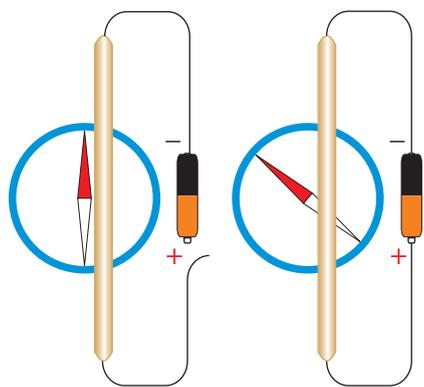


Fig. 3. Al establecerse una corriente eléctrica en el conductor, la aguja magnética de la brújula se desvía.



Fig. 4. Hans Christian Oersted (1777-1851) físico y químico danés. En 1820 descubrió la relación entre la electricidad y el magnetismo en un experimento muy sencillo, que llevó a cabo ante sus alumnos. Demostró que un hilo conductor de corriente podía mover la aguja de una brújula, sentando las bases del Electromagnetismo.

Efectos de una corriente eléctrica

Si miramos un cable, no podemos darnos cuenta si por él circula una corriente eléctrica o no, aunque no tenga la protección plástica correspondiente. Podemos detectar la circulación de corriente observando los efectos que ésta produce.

Efecto térmico o efecto Joule

Si observamos una lámpara encendida, sabemos que por ella circula corriente. Pero ¿qué observamos en realidad? Obviamente, no vemos las cargas eléctricas moviéndose por el filamento de la lámpara. Lo que apreciamos es uno de los efectos de la corriente eléctrica, el **efecto térmico o efecto Joule**. Toda corriente eléctrica aumenta la energía interna del conductor por el que circula. Esto ocurre por el aumento de velocidad de los electrones y por el aumento de la frecuencia de los choques de las cargas libres cuando se desplazan por la red cristalina del material conductor. Por lo tanto aumenta su temperatura y generalmente cede energía al ambiente en forma de calor. Si la temperatura del conductor aumenta lo suficiente se torna incandescente y emite luz, como el filamento de la lámpara o el rulo de una estufa a cuarzo.

Efecto magnético o efecto Oersted

Si colocamos una brújula cerca de un conductor conectado a una batería, su aguja se desvía (fig 3). Esto ocurre porque toda corriente eléctrica genera a su alrededor un campo magnético. A esta propiedad se la denomina **efecto magnético o efecto Oersted** (fig 4). Motores, timbres y muchos otros aparatos funcionan basados en este efecto, que en el capítulo 18 estudiaremos con mayor profundidad.

Efecto químico

Cuando una corriente eléctrica circula por un conductor puede producir cambios químicos. Un ejemplo importante del **efecto químico** es la electrólisis. Es el fenómeno en el cuál por medio de una corriente eléctrica podemos descomponer sustancias en los elementos que la forman. Se aplica en cromados, niquelados y joyería (baños de oro y plata).

Circuito Eléctrico

Para establecer una corriente eléctrica debemos tener un circuito eléctrico cerrado (fig 5). El mismo está formado por tres componentes básicos: generador, receptor y cables conductores.

El **generador** es el dispositivo que transforma algún tipo de energía en energía potencial eléctrica. Ejemplos de generadores: pilas, baterías, alternadores, dínamos.

El **receptor** transforma la energía potencial eléctrica en otro tipo de energía, dependiendo de su utilidad práctica. Ejemplos de receptores: resistores, lámparas, estufas, motores, equipos de audio, y un sin fin de electrodomésticos y aparatos que funcionan eléctricamente.

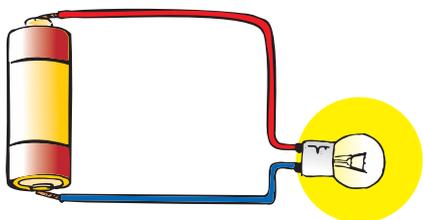


Fig. 5. Circuito eléctrico.

Los **cables conductores** son generalmente alambres metálicos recubiertos de una protección plástica. Unen los elementos ya mencionados, proporcionando a las cargas un camino casi sin oposición.

Algunos elementos presentan polaridad, es decir tienen un terminal de conexión positivo y otro negativo, como una pila. Para cumplir su función deben conectarse al circuito respetando su polaridad. Otros elementos como las lámparas o resistores no tienen polaridad.

Para representar en forma simplificada los elementos de un circuito eléctrico, se utilizan los siguientes símbolos (fig 6).

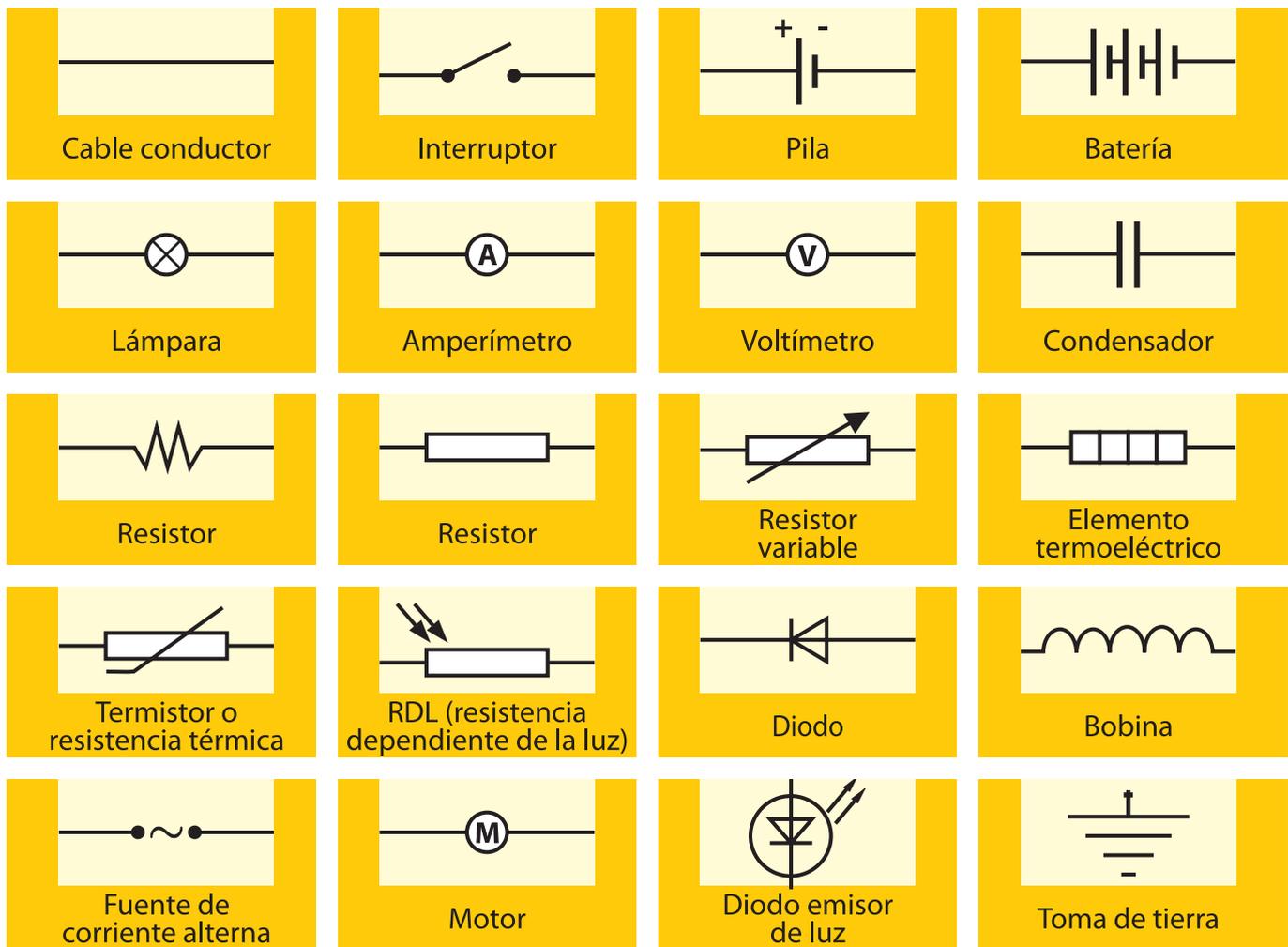


Fig. 6. Símbolos que utilizaremos para los elementos de circuitos eléctricos.

Sentido de la corriente eléctrica

Cuando la comunidad científica comenzó a interesarse por los fenómenos eléctricos ya estaban bastante avanzados los estudios relacionados con la hidrodinámica. Uno de los primeros problemas a resolver cuando las ciudades fueron creciendo, fue cómo distribuir el agua corriente y cómo drenar las aguas residuales y fluviales hacia afuera de la ciudad o a un río cercano. También estuvieron de moda en el siglo XVI los jardines con fuentes y atracciones con agua. Esto favoreció la interpretación de los fenómenos eléctricos basándose en los hidráulicos. A esta forma de explicar

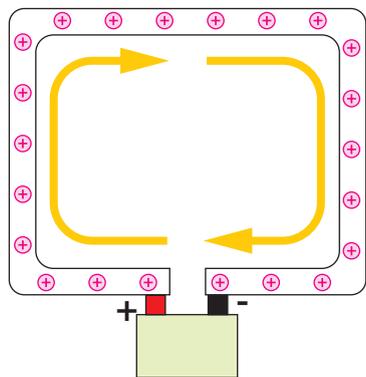


Fig. 7. Sentido convencional de la corriente. Las cargas positivas se mueven de positivo a negativo

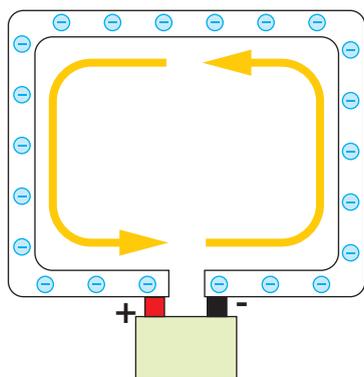


Fig. 8. Sentido real de la corriente. Las cargas negativas se mueven de negativo a positivo

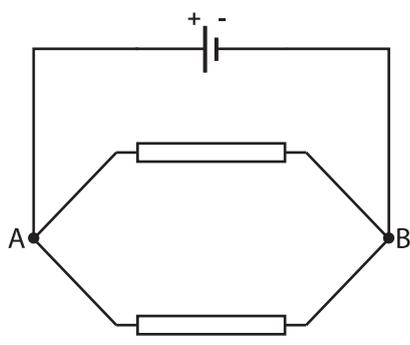


Fig. 9a. Los dos receptores en paralelo están conectados a los puntos "A" y "B"

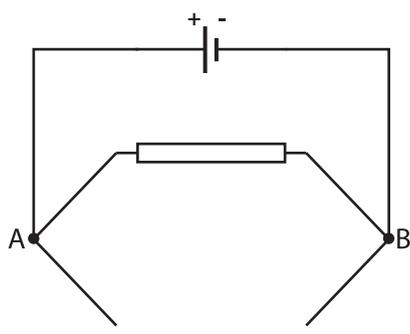


Fig. 9b. Si se desconecta un receptor, el circuito se cierra por el otro

qué sucede al establecerse una corriente eléctrica se la denomina **modelo hidráulico de la corriente eléctrica**. De éste modelo heredamos denominaciones que se utilizan aún hoy, basadas en conceptos hidrodinámicos: corriente de agua, corriente eléctrica; fuente de agua, fuente de corriente eléctrica; flujo de agua, flujo de corriente.

El agua siempre se mueve espontáneamente de un tanque a mayor altura a uno más bajo, desde donde tiene mayor energía potencial gravitatoria a donde tiene menor. Análogamente al comportamiento del agua, se supuso que las cargas se movían desde el borne de potencial eléctrico más alto, el positivo, al de menor potencial eléctrico, el negativo. Recordemos que los científicos que estudiaban los fenómenos eléctricos no conocían aún la naturaleza de las cargas.

Denominamos **sentido convencional de la corriente** al que considera que cargas positivas se mueven desde el terminal positivo al negativo del generador (fig 7).

Denominamos **sentido real de la corriente eléctrica** al que considera que cargas negativas se mueven desde el terminal negativo al positivo del generador (fig 8).

En los metales tenemos un flujo de electrones que se mueven desde el borne negativo al positivo de la fuente eléctrica.

Corriente continua y alterna

Si el sentido de la corriente eléctrica permanece constante a medida que pasa el tiempo, la corriente es **continua**. Es el tipo de corriente que circula por el filamento de una lámpara de una linterna que funciona con pilas.

Si la corriente cambia de sentido periódicamente, la corriente es **alterna**. Por la instalación eléctrica domiciliaria circula una corriente de este tipo, que cambia de sentido 100 veces en un segundo. La red eléctrica de UTE nos proporciona corriente alterna con una frecuencia de 50Hz, es decir con un período de 0,020s.

Receptores conectados en serie y en paralelo.

En un circuito eléctrico podemos combinar varios receptores y/o fuentes. Analizaremos circuitos formado por dos receptores y un generador.

Los receptores pueden conectarse de dos formas distintas: en paralelo y en serie.

Dos receptores están **conectados en paralelo**, si están conectados a los mismos puntos del circuito, en el ejemplo de la figura 9a los puntos "A" y "B". A estos puntos se les denomina **nudos**. Si desconectamos uno de los receptores, el otro receptor cierra el circuito, por lo que puede seguir circulando corriente por él (fig 9b). Si los receptores fueran lámparas, al desconectar una la otra continúa encendida.

Dos receptores están **conectados en serie** si están conectados uno a continuación del otro (fig 9c). Los elementos tienen un solo punto en común, que no está conectado a un tercer elemento. Si desconectamos uno de ellos, abrimos el circuito y deja de circular corriente por el otro (fig 9d). Si se tratara de lámparas, al desconectar una se apaga la otra.

En la instalación eléctrica domiciliaria todos los elementos o electrodomésticos se conectan en paralelo. Eso nos permite hacer circular corriente solamente por el que necesitamos, independientemente de que los demás estén encendidos o no. (Imagínate el absurdo que sería que todos los aparatos deban funcionar a la vez). Las luces que adornan los árboles de navidad, es un ejemplo de receptores, en este caso lamparitas, conectadas en serie. Todas las lámparas están conectadas en serie. Una de ellas tiene un dispositivo, generalmente térmico, que funciona como interruptor. Al cortar el pasaje de la corriente, hace que todas se apaguen; cuando vuelve a dejar pasar corriente, todas las lámparas se encienden nuevamente.

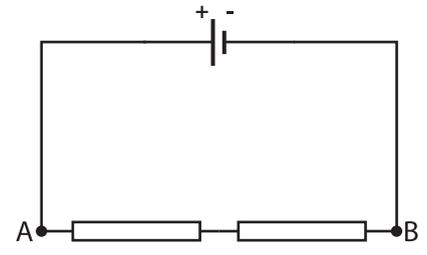


Fig. 9c. Los dos receptores en serie están conectados uno a continuación de otro, solo tienen en común un punto.

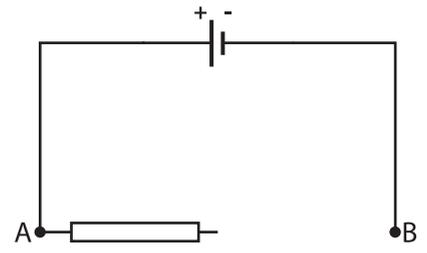


Fig. 9d. Si se desconecta un receptor, el circuito no se cierra, no circula corriente eléctrica.

Ejemplo 1

Un circuito de corriente continua está formado por un generador, tres lámparas y tres interruptores como muestra la figura 10.

a) Describe cómo se encuentran conectadas las lámparas.

La lámparas 1 y 2 están conectadas a los mismos puntos del circuito, por lo que están en paralelo. La lámpara 3 está conectada a continuación, por lo que está en serie con respecto a 1 y 2.

b) ¿Qué lámparas se encienden al cerrar el interruptor 3?

Al cerrar el interruptor 3 no se cierra un circuito, por lo que ninguna de las tres lámparas se enciende.

c) ¿Qué interruptores debo cerrar para que se encienda la lámpara 1?

Debemos cerrar el interruptor 1 para que el circuito se cierre por la lámpara 1, pero esto no es suficiente porque el circuito está abierto en el interruptor 3. Por lo tanto para que se encienda la lámpara 1 debemos cerrar los interruptores 1 y 3.

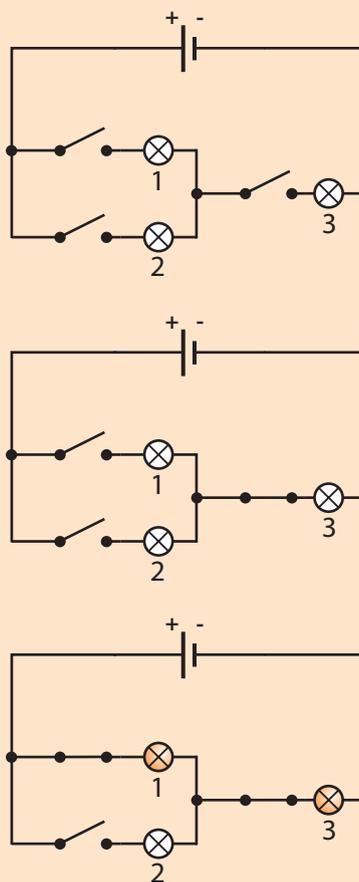


Fig. 10.

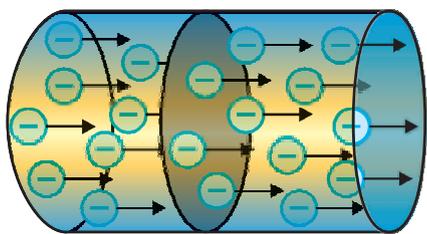


Fig. 11 . Las cargas en movimiento atraviesan la sección transversal del conductor.

Intensidad de corriente

Si por un conductor circula una corriente eléctrica, por una sección transversal del mismo pasa cierta cantidad de carga, ya que estas se están desplazando por el conductor (fig 11).

La intensidad de corriente es una magnitud física que vincula la carga eléctrica que pasa por un conductor con el tiempo que demora en pasar.

Se define como el cociente entre la cantidad de carga "q" que pasa por una sección transversal de un conductor y el tiempo que demora en pasar "Δt".

$$I = \frac{q}{\Delta t}$$

A partir de ésta definición podemos deducir que la intensidad de corriente será mayor si pasa una gran cantidad de carga en poco tiempo.

Unidades de intensidad.

En el Sistema Internacional de Unidades, la carga se mide en Coulomb y el tiempo en segundos.

$$[q] = C$$

$$[\Delta t] = s$$

$$[I] = \frac{C}{s} = A$$

La unidad de intensidad C / s se denomina Ampere, en honor al físico del mismo nombre (fig12).

También se pueden expresar la intensidad de corriente en otras unidades submúltiplos del Ampere.

$$1 \text{ mA (miliampere)} = 0,001A = 1 \times 10^{-3}A$$

$$1 \mu\text{A (microampere)} = 0,000001A = 1 \times 10^{-6} A$$



Fig. 12. André-Marie Ampère (1775 - 1836) matemático y físico francés, generalmente considerado como uno de los descubridores del electromagnetismo. En 1822 estableció los principios de la electrodinámica. En 1827 publicó su Teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos, donde expuso su famosa ley.

Ejemplo 2

Por la sección transversal de un conductor pasa una carga de 4,5mC en 10 minutos.

a) Calcula la intensidad de corriente que circula por el conductor.

De acuerdo a la definición de intensidad de corriente $I = \frac{q}{\Delta t}$

Expresando las magnitudes en el Sistema Internacional y sustituyendo

$$I = \frac{4,5 \times 10^{-3}C}{600s} \quad I = 0,0000075A, \text{ que podemos expresarlo}$$

$$I = 7,5 \times 10^{-6}A$$

o también

$$I = 7,5\mu A$$

b) ¿Cuántos electrones atraviesan una sección transversal del conductor en 45 segundos?

Despejando de la definición de intensidad de corriente, $q = I \times \Delta t$
Sustituyendo, $q = 7,5 \times 10^{-6} \text{A} \times 45\text{s} \Rightarrow q = 3,4 \times 10^{-4} \text{C}$

Recordando que $1\text{C} = 6,25 \times 10^{18} \times |q_e|$, podemos determinar la cantidad de electrones utilizando una regla de tres. $1\text{C} \text{ — } 6,25 \times 10^{18} \text{ electrones}$
 $3,4 \times 10^{-4} \text{C} \text{ — } n \text{ electrones}$

Entonces “n”, el número de electrones se puede determinar

$$n = \frac{3,4 \times 10^{-4} \text{C} \times 6,25 \times 10^{18} \text{e}^-}{1\text{C}} \Rightarrow n = 2,1 \times 10^{15} \text{ electrones}$$

Diferencia de potencial

En la figura observamos un conductor cuyos extremos están desconectados. Espontáneamente las cargas eléctricas no comienzan a circular por él, por lo tanto la intensidad de corriente por dicho conductor es nula. Esto lo comprobamos fácilmente porque no detectamos ninguno de los efectos que produce una corriente eléctrica (fig 13 a).

Ahora conectamos el conductor a un generador, formando parte de un circuito eléctrico. En estas condiciones sí podrá circular una corriente eléctrica por él (fig. 13 b).

Es muy claro que la fuente cumple un papel importante para que circule una corriente eléctrica.

¿Qué genera la fuente para que se establezca una corriente eléctrica por el conductor?

Para que las cargas circulen, la fuente realiza un trabajo sobre ellas. Cuando el generador les realiza este trabajo a las cargas, les cede energía. Las cargas transportan dicha energía a los diferentes receptores, donde es transformada en otro tipo de energía. Se cumple el principio de conservación de la energía:

El valor del trabajo realizado por el generador sobre las cargas eléctricas, es igual a la energía que los receptores transforman.

Las cargas eléctricas son los “vehículos” que transportan la energía desde el generador al receptor, a través de los conductores en un circuito eléctrico.

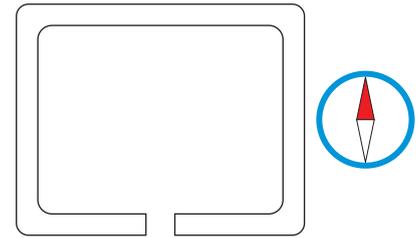


Fig. 13a. No se establece una corriente eléctrica en forma espontánea.

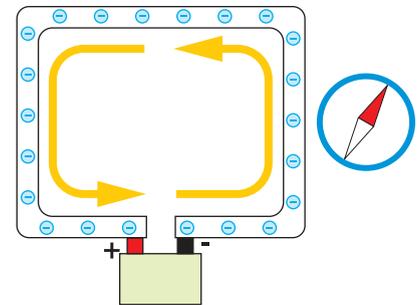


Fig. 13b. Al conectar los extremos del conductor a una fuente se establece una corriente eléctrica.

Utilizaremos los términos “**generador**” y “**fuentes**” indistintamente.



Fig. 14. Alessandro Volta (1745-1827), Físico e inventor italiano famoso por desarrollar la pila eléctrica, que permite obtener corriente continua durante un tiempo prolongado.

Utilizaremos la sigla **“ddp”** para referirnos a **“diferencia de potencial”**.

Definición de diferencia de potencial

La diferencia de potencial eléctrica entre dos puntos “A y B” de un circuito la representamos de la siguiente forma: V_{AB} .

Se define como el cociente entre el trabajo eléctrico que se le realiza a las cargas eléctricas entre los puntos “A y B” y la cantidad de carga eléctrica que circula entre dichos puntos.

$$V_{AB} = \frac{T_{AB}}{q}$$

Unidades de la diferencia de potencial

En el Sistema Internacional de Unidades, el trabajo se mide en Joule y la carga eléctrica se mide en Coloulomb. Por lo tanto la unidad de la diferencia de potencial es $\frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}}$. En honor al científico italiano Alessandro Volta (fig 14) a dicho cociente se le denomina Volt.

$$[T] = J$$

$$[q] = C$$

$$[V] = \frac{J}{C} = V$$

Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos

Supongamos que tenemos dos lámparas conectadas en serie (fig. 15). L_1 está conecta a los puntos “A” y “B” del circuito, mientras L_2 está conectada a “B” y “C”. Se cumple que la suma de las ddp entre los puntos “A” y “B” y la ddp entre los puntos “B” y “C” es igual a la ddp entre los puntos “A” y “C”.

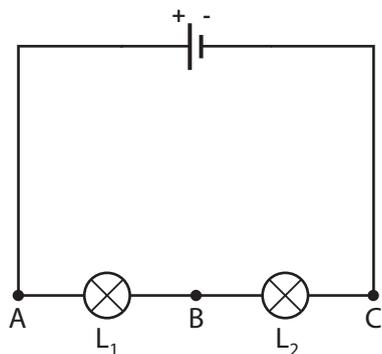


Fig. 15. En un circuito en serie $V_{AC} = V_{AB} + V_{BC}$

Esto es:

$$V_{AC} = V_{AB} + V_{BC}$$

Esta expresión, puede deducirse de una ley más general, la conservación de la energía. “ V_{AC} ” es la energía que aporta el generador por unidad de carga, mientras que los términos “ V_{AB} ” y “ V_{BC} ” representan la energía transformada por unidad de carga en cada receptor.

Si las lámparas estuvieran conectadas en paralelo, lo estarían a mismos puntos del circuito. Entre estos puntos sólo puede existir un único valor de ddp, por lo que podemos concluir que los elementos conectados en paralelo están conectados a la misma ddp.

Ley de los nudos

Consideremos un circuito con tres lámparas conectadas como muestra la figura 16. Llamemos I_1 , I_2 e I_3 a las intensidades por L_1 , L_2 y L_3 respectivamente. El punto “A” es un nudo, en él confluyen tres conductores.

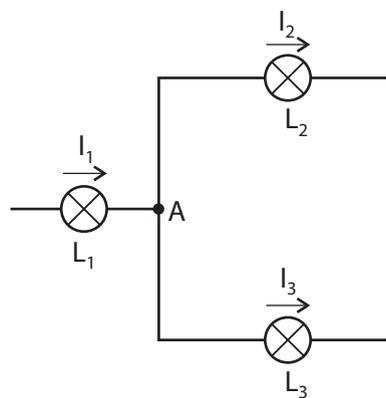


Fig. 16. En un nudo la intensidad que llega (I_1) es igual a la intensidad que sale ($I_2 + I_3$)

La **ley de los nudos** dice que la suma de las intensidades que llegan a un nudo es igual a la suma de las intensidades que salen del mismo, esto es:

En nuestro caso se cumple que:

$$\sum I_{\text{Llegan}} = \sum I_{\text{Salen}}$$

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Podemos observar que al punto "B", que también es un nudo, llegan I_2 e I_3 . Aplicando la misma ley, obtenemos que el por el cable que vincula el punto "B" con el generador, circula una corriente de valor igual a I_1 . A esta intensidad, que es la intensidad más grande que hay en el circuito, y es la que circula por el generador la llamamos **intensidad total**.

Esta ley se desprende de otra más general que es la conservación de la carga, ya estudiada en el capítulo anterior. Si en ningún punto del circuito se acumula carga eléctrica, la carga que llega a un punto es igual a la que sale. No se genera ni se destruye carga eléctrica. Apliquemos esto para el punto "A":

$$\sum q_{\text{llega}} = \sum q_{\text{sale}}$$

Al punto "A" llega carga eléctrica desde L_1 , y sale carga eléctrica para L_2 y L_3 , esto es:

$$q_1 = q_2 + q_3$$

De la definición de intensidad podemos despejar: $q = I \times \Delta t$, entonces para un mismo Δt , podemos escribir:

$$I_1 \times \Delta t = I_2 \times \Delta t + I_3 \times \Delta t$$

Como Δt es común en todos los términos lo podemos cancelar, por lo que podemos obtener, el resultado esperado:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Consideremos ahora un circuito en serie. No existen nudos donde llegue un conductor y salga más de uno, como el punto "A" del ejemplo anterior, o donde llegue más de un conductor y salga uno, como el punto "B". De esto podemos deducir que por los elementos conectados en serie, siempre circula la misma intensidad de corriente, como en el circuito de la figura 18.

$$I_1 = I_2 = I_3$$

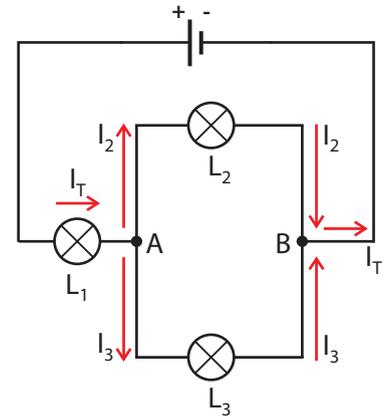


Fig. 17. Por L_1 y entre el punto B y el generador circula I_{TOTAL} , la mayor intensidad del circuito.

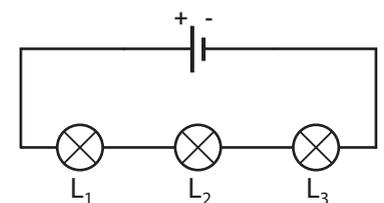


Fig. 18. Por los receptores conectados en serie circula la misma intensidad.

Los elementos de un circuito conectados en paralelo están a una misma diferencia de potencial.

Por los elementos de un circuito conectados en serie circula la misma intensidad de corriente.

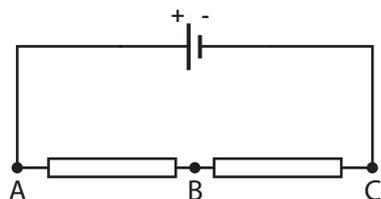


Fig. 19. Ejemplo 3

Ejemplo 3

Dos resistores están conectados en serie como muestra la figura 19. La ddp ente los bornes del generador es de 12,0V. La ddp ente los puntos "A" y "B" es de 4,5V.

a) Determina la ddp entre los puntos "B" y "C"
De acuerdo a la ley de las mallas, $V_{AC} = V_{AB} + V_{BC}$
por lo tanto $V_{AC} - V_{AB} = V_{BC}$
Sustituyendo, $12,0V - 4,5V = V_{BC} \Rightarrow V_{BC} = 7,5V$

b) ¿Por cuál resistor circula mayor intensidad de corriente?
Como están conectados en serie por los dos circula la misma intensidad.

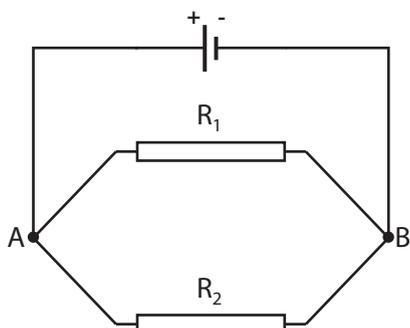


Fig. 20. Ejemplo 4

Ejemplo 4

Dos resistores están conectados en paralelo como muestra la figura 20. La intensidad por el resistor 1 es de 0,050A y la intensidad por la rama principal es de 0,120A.

a) Determina la intensidad que circula por el resistor 2.
De acuerdo a la ley de los nudos, $I_T = I_1 + I_2$ por lo tanto $I_T - I_1 = I_2$
Sustituyendo, $0,120A - 0,050A = I_2 \Rightarrow I_2 = 0,070A$

b) ¿Cuál de los dos resistores está conectado a una mayor ddp?
Como están conectados al mismo par de puntos están conectados en paralelo, y su ddp es igual.

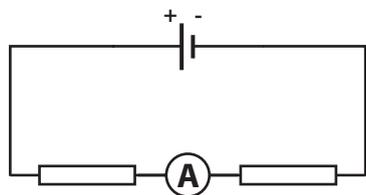


Fig. 21. El amperímetro se conecta en serie con los resistores del circuito. Por todo el circuito circula la misma intensidad.

Instrumentos de medida

El **amperímetro** es el instrumento que nos permite medir la intensidad de corriente en un punto del circuito. Se conecta en serie con los elementos del circuito (fig. 21). Recuerda que por componentes conectados en serie circula la misma intensidad de corriente eléctrica.

El **voltímetro** mide la ddp entre dos puntos del circuito. Se conecta en paralelo al elemento entre cuyos extremos queremos medir la ddp (fig 22). Los elementos conectados en paralelo, al estar conectados al mismo par de puntos están a igual diferencia de potencial.

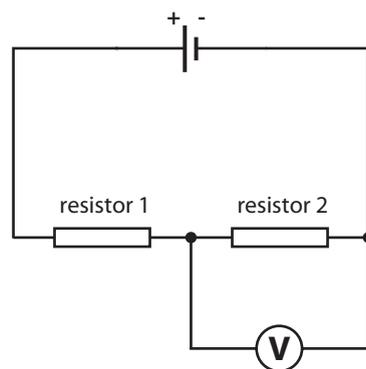


Fig. 22. El voltímetro se conecta en paralelo al resistor 2. Mide la ddp entre los extremos de este resistor.

Al conectar un amperímetro o un voltímetro en un circuito, por ellos circula corriente. Esto quiere decir que cuando conectamos instrumentos, estamos modificando el circuito del cual queremos obtener medidas. Un instrumento ideal es aquel que nos permite obtener medidas sin alterar las características del circuito a estudiar. Tales voltímetros o amperímetros no existen, pero siempre se trata que los instrumentos utilizados se acerquen al comportamiento ideal.

Un **multímetro** o **tester** es un instrumento (digital o de aguja) que puede cumplir la función de voltímetro, amperímetro y otros instrumentos de medida (fig. 23 a y b). Utilizando la llave selectora y conectado a las terminales apropiadas elegimos la función del instrumento y la escala en la cual expresa la medida.

PREGUNTAS

- 1) ¿Qué es una corriente eléctrica?
- 2) ¿Qué ocasiona el desplazamiento de cargas eléctricas en un conductor?
- 3) ¿Cuáles son los efectos de la corriente eléctrica?
- 4) Describe una aplicación de cada efecto de la corriente eléctrica.
- 5) ¿Cuáles son los componentes de un circuito eléctrico?
- 6) ¿Cuál es la función de cada uno de los componentes de un circuito?
- 7) ¿Cuál es el sentido real de la corriente eléctrica?
- 8) ¿Cuál es el sentido convencional de la corriente eléctrica?
- 9) ¿Qué diferencia existe entre la corriente eléctrica alterna y la continua?
- 10) ¿Cómo se conectan dos elementos en serie?
- 11) ¿Cómo se conectan dos elementos en paralelo?
- 12) Si conectamos dos lámparas en serie y se quema una de ellas, la otra ¿continúa encendida?
- 13) Si conectamos dos lámparas en paralelo y se quema una de ellas, la otra ¿continúa encendida?
- 14) Describe un ejemplo donde sea conveniente conectar a los elementos de un circuito en paralelo.
- 15) Describe un ejemplo donde sea conveniente conectar a los elementos de un circuito en serie.
- 16) ¿Cómo se define intensidad de corriente?
- 17) ¿Cuál es la unidad de intensidad de corriente en el Sistema Internacional?
- 18) ¿Cómo se define diferencia de potencial?
- 19) ¿Cuál es la unidad de diferencia de potencial en el Sistema Internacional?
- 20) ¿Cómo es la ddp de dos elementos conectados en paralelo?
- 21) Si tenemos dos elementos conectados en serie, ¿qué relación existe entre la ddp entre los extremos de cada receptor y la ddp del conjunto?
- 22) ¿Qué dice la ley de los nudos?
- 23) ¿Cómo es la intensidad de dos elementos conectados en serie?
- 24) ¿A qué llamamos intensidad total?
- 25) ¿Puede en algún caso la intensidad total ser menor que la de algunos de los componentes? ¿Puede ser igual?



Fig. 23a. Multímetro preparado para medir intensidad de corriente continua. El valor máximo que puede medir en esta posición de la llave selectora es de $2000\mu\text{A}$



Fig. 23b. Multímetro preparado para medir ddp de corriente continua. El valor máximo que puede medir en esta posición de la llave selectora es de 20V

- 26) ¿De qué ley es consecuencia la ley de los nudos? Explica dicha ley.
- 27) ¿Qué es un amperímetro? Explica como se conecta a un circuito para que funcione correctamente.
- 28) ¿Qué es un voltímetro? Explica como se conecta a un circuito para que funcione correctamente.
- 29) ¿Qué es un tester?
- 30) ¿A qué se considera un instrumento ideal?
- 31) ¿Existen dichos instrumentos?

PROBLEMAS

- 1) Por una sección transversal de un conductor circulan 30C de carga en un tiempo de 10 minutos. Calcula la intensidad por el conductor. Expresa el resultado en microampere y miliampere.
- 2) Por un conductor circula una intensidad de 500mA.
 - a) Determina la carga eléctrica que circula por una sección transversal del conductor en un tiempo de 30s.
 - b) ¿Cuántos electrones corresponden a la carga calculada en la parte a)?
- 3) Por un conductor circula una intensidad de corriente de $25\mu\text{A}$. ¿En cuánto tiempo circulará una carga eléctrica de 2,0C por una sección transversal del conductor?
- 4) Una batería realiza un trabajo de 180J. Por ella circula una carga de 6,0C. Calcula la ddp entre los bornes del generador.
- 5) Una pila genera una ddp entre sus extremos de 9,0V. Se lo conecta a un receptor y por este circula una corriente de 30mA.
 - a) Calcula cuánta carga circula por el receptor en 15minutos.
 - b) Calcula cuánta energía cede la pila al receptor en ese tiempo.
- 6) Se calienta agua con un calentador instantáneo durante un tiempo de 5,0 minutos, entregándole una energía de 250KJ. La intensidad por el calentador mientras está funcionando es de 3,8A. Calcula la ddp a la que está conectado el calentador.
- 7) Cuatro lámparas y cuatro interruptores se conectan a un generador como muestra la figura 24. Completa el cuadro.

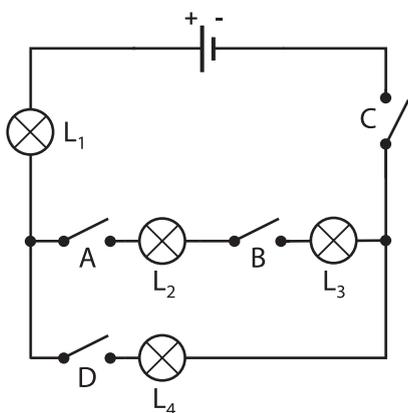


Fig. 24. Problema 7.

Para encender la lámparadebo cerrar los interruptores...	Al cerrarlos se encienden también las lámparas...
L1		
L2		
L3		
L4		

- 8) En cada uno de los circuitos de las figuras 25 y 26 hay conectados correctamente amperímetros y voltímetros. Indica de qué instrumento se trata en cada caso.

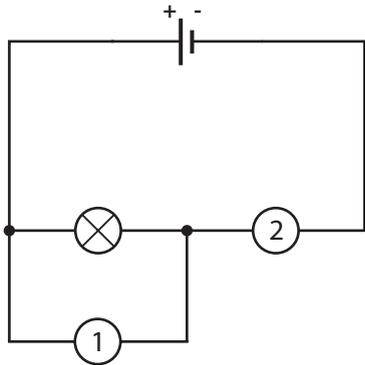


Fig. 25. Problema 8.

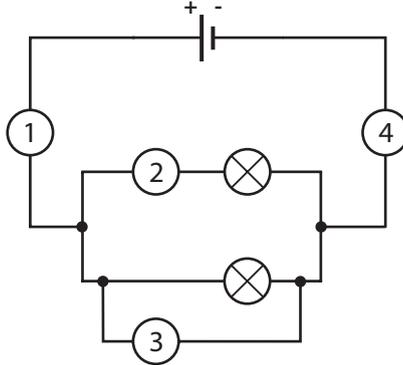


Fig. 26. Problema 8.

- 9) Dibuja cómo conectarías los instrumentos de medida en los siguientes casos (fig. 27):
- Un amperímetro A_1 que mida la intensidad que circula por L_1 .
 - Un amperímetro A_2 que mida la intensidad que circula por L_2 .
 - Un voltímetro V_1 que mida la ddp en los extremos de L_1 .
 - Un voltímetro V_2 que mida la ddp entre los extremos del generador.
- 10) ¿Cuál de los amperímetros del problema 9 indica mayor intensidad? Justifica.
- 11) ¿Cuál de los voltímetros del problema 9 marca mayor ddp? Justifica.
- 12) Cuatro resistores se conectan a un generador como muestra la figura 28. Indica si cada una de la siguientes afirmaciones es verdadera o falsa. Justifica
- La intensidad de corriente que pasa por R_1 es mayor que la intensidad de corriente que pasa por R_4 .
 - La intensidad de corriente que pasa por R_1 es mayor que la intensidad de corriente que pasa por R_2 .
 - La intensidad de corriente que pasa por R_3 es mayor que la intensidad de corriente que pasa por R_4 .
 - La ddp entre A y D es mayor que la ddp entre B y C.
 - La ddp entre los extremos de R_2 es igual a la ddp entre los extremos de R_3 .
- 13) En el circuito del problema anterior, sabemos que $I_1=0,40A$ y que $I_2=0,10A$. Determina I_3 e I_4 .
- 14) En el circuito anterior sabemos que la ddp ente los extremos de R_3 es 2,5V, que la ddp ente los extremos de R_4 es 4,5V y que la ddp entre A y D es de 9,0V. Determina la ddp entre los extremos de R_2 y de R_1 .

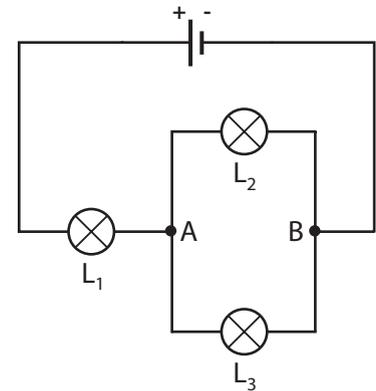


Fig. 27. Problemas 9 y 10.

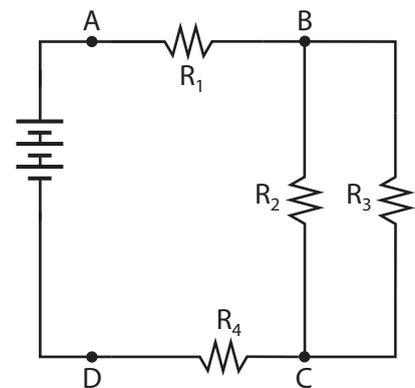


Fig. 28. Problemas 12,13 y 14.

Resistencia eléctrica



Fig.1. Batería.



Fig.2. Georg Simon Ohm
(1789 - 1854), físico alemán cuyo mayor aporte al estudio de la electricidad es la ley que lleva su nombre.

Para un diferencia de potencial constante, la intensidad que circula por un conductor es inversamente proporcional a su resistencia

Fig. 3.

Una batería genera entre sus bornes una ddp aproximadamente constante. (Fig.1) Si conectamos diferentes conductores a ésta, por cada uno de ellos circulará distinta intensidad. Esto nos hace pensar que cada conductor tiene un comportamiento diferente con respecto al pasaje de corriente por él.

Definimos resistencia eléctrica de un conductor al cociente entre la ddp a la que se lo conecta y la intensidad que circula por él.

$$R = \frac{V}{I}$$

Podemos interpretar el concepto de resistencia eléctrica como la dificultad que ofrece un conductor al pasaje de las cargas eléctricas a través de él.

Unidades de resistencia eléctrica

En el Sistema Internacional de Unidades, la ddp se mide en Volt y la intensidad en Ampere.

$$[V] = V$$

$$[I] = A$$

Entonces para la resistencia eléctrica:

$$[R] = \frac{V}{A} = \Omega$$

La unidad de resistencia eléctrica se denomina Ohm, en honor al científico alemán Georg Ohm. (fig. 2). Se simboliza con la letra griega omega mayúscula (Ω).

De la definición de resistencia podemos despejar la intensidad de corriente: $I = \frac{V}{R}$. De esta relación se desprende que, para una misma ddp,

cuanto mayor sea la resistencia eléctrica de un conductor, menor corriente circulará por él. (Fig. 3)

A escala atómica podemos interpretar el concepto de resistencia de la siguiente forma. Cuando se establece un campo eléctrico dentro de un conductor, sobre las cargas eléctricas actúa una fuerza, por lo tanto las cargas libres se ponen en movimiento. Estas cargas chocan con la red cristalina del conductor perdiendo energía cinética, que se transforma en energía interna y el conductor eleva su temperatura (efecto Joule). Cuantos más choques se produzcan, más resistencia tendrá el conductor. El material presentará mayor oposición al pasaje de las cargas, ofreciendo mayor resistencia.

Ejemplo 1

Un resistor, con una resistencia de $1,0\text{k}\Omega$ se conecta a una batería que genera una ddp de 12V . (Fig. 4)

a) Calcula la intensidad por el resistor.

$$\text{De } R = \frac{V}{I}, \text{ obtenemos } I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{12\text{V}}{1000\Omega}, \Rightarrow \boxed{I = 0,012\text{A}} \quad \text{o} \quad \boxed{I = 12\text{ mA}}$$

b) ¿Qué resistencia debe tener otro resistor para que, al conectarlo al mismo generador, circule por él una intensidad de 60mA ?

Como la ddp es la misma y la intensidad ahora es 5 veces mayor, la resistencia debe ser 5 veces menor. Por lo tanto el resistor debe tener una resistencia de 200Ω .

Verifiquemos este razonamiento aplicando la definición de resistencia:

$$60\text{mA} = 0,060\text{ A} \quad R = \frac{V}{I} \quad R = \frac{12\text{V}}{0,060\text{A}} \Rightarrow \boxed{R = 2,0 \times 10^2 \Omega}$$

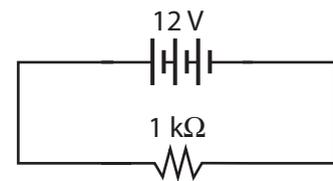


Fig.4. Ejemplo 1.

Ejemplo 2

Una lamparita, al estar encendida tiene una resistencia eléctrica de 24Ω cuando se conecta a una ddp de $6,0\text{V}$.

a) Calcula cuánta carga eléctrica pasa por una sección transversal del filamento de la lámpara si se mantiene encendida 15 minutos.

Primero calculamos la intensidad que circula por la lámpara:

$$I = \frac{V}{R} \quad I = \frac{6,0\text{V}}{24\Omega} \Rightarrow I = 0,25\text{ A}$$

$$q = I \times \Delta t \quad q = 0,25\text{A} \times 900\text{s} \Rightarrow \boxed{q = 2,3 \times 10^2\text{ C}}$$

b) ¿Cuántos electrones circulan por una sección transversal del filamento de la lámpara en los 15 minutos?

La carga eléctrica de un electrón es $-1,6 \times 10^{-19}\text{C}$. Para calcular la cantidad de electrones trabajaremos con el valor absoluto de su carga.

$$1e^- \text{ — } 1,6 \times 10^{-19}\text{C}$$

$$ne^- \text{ — } 2,3 \times 10^2\text{ C}$$

$$n = \frac{1e^- \times 2,3 \times 10^2\text{C}}{1,6 \times 10^{-19}\text{C}} \Rightarrow \boxed{n = 1,4 \times 10^{21} e^-}$$



Resistencia eléctrica de un conductor

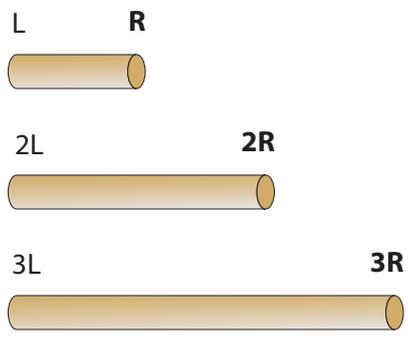


Fig. 5. La resistencia de un conductor es directamente proporcional a su longitud.

La resistencia eléctrica de un conductor depende de su geometría (de la forma que tiene) y del material del que está compuesto.

Si consideramos conductores del mismo material, la resistencia dependerá del largo del conductor y de su sección transversal. A estos parámetros lo denominaremos "L" y "S" respectivamente.

Manteniendo constante la sección transversal del conductor, si su longitud "L" aumenta al doble, su resistencia "R" también aumenta al doble. Si "L" aumenta al triple, "R" también. La resistencia de un conductor es directamente proporcional su longitud (fig. 5), esto es:

$$R \propto L$$

Si mantenemos constante la longitud del conductor y variamos su sección transversal "S", se observa que al aumentar "S" al doble, "R" disminuye a la mitad. Al aumentar "S" al triple, "R" se reduce a la tercera parte. La resistencia del conductor es inversamente proporcional a su sección transversal (fig 6), por lo tanto podemos escribir:

$$R \propto \frac{1}{S}$$

Uniendo estas dos últimas expresiones resulta:

$$R \propto \frac{L}{S}$$

Recordando que dos magnitudes directamente proporcionales se pueden igualar al multiplicarlas por una constante, podemos expresar:

$$R = \rho \times \frac{L}{S}$$

donde "ρ" (letra griega Rho) es una constante que depende del material del que está construido el conductor. Se la denomina resistividad, y es una propiedad característica. Cada material tiene un valor de "ρ" a determinada temperatura (fig. 7).

De la última ecuación, $\rho = \frac{R \times S}{L}$, podemos obtener las unidades de la resistividad,

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot m^2}{m} = \Omega \cdot m$$

La resistividad de un material se representa con la letra griega ρ y es una propiedad característica.

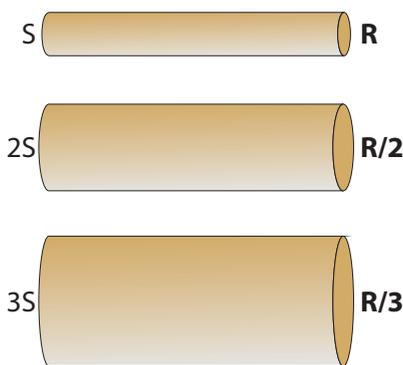


Fig. 6. La resistencia de un conductor es inversamente proporcional a su sección transversal.

Material	Resistividad "ρ" a 20°C (Ω.m)
Plata	1,6 x 10 ⁻⁸
Cobre	1,7 x 10 ⁻⁸
Aluminio	2,8 x 10 ⁻⁸
Tungsteno	5,5 x 10 ⁻⁸
Hierro	1,0 x 10 ⁻⁷
Plomo	2,2 x 10 ⁻⁷
Nicrom	1,0 x 10 ⁻⁶
Carbono	3,5 x 10 ⁻⁵
Vidrio	10 ¹⁰ - 10 ¹⁴
Ambar	5 x 10 ¹⁴
Cuarzo	7,5 x 10 ¹⁷

Fig. 7. Tabla de resistividades de distintos materiales a una temperatura de 20°C. Los metales son buenos conductores de la corriente y presentan los valores más bajos de resistividad.

Ejemplo 3

a) Se necesita construir un conductor de aluminio ($\rho = 2,8 \times 10^{-8} \Omega m$) de sección transversal $1,0 mm^2$ y resistencia eléctrica $2,0 \Omega$, ¿qué largo deberá tener?

De la ecuación $R = \rho \times \frac{L}{S}$ despejamos L, obtenemos $L = \frac{R \times S}{\rho}$

Convirtiendo a unidades S.I. y sustituyendo,

$$L = \frac{2,0 \Omega \times 1,0 \times 10^{-6} m^2}{2,8 \times 10^{-8} \Omega m} \Rightarrow L = 71 m$$

b) ¿Cuál sería la resistencia de otro conductor de las mismas dimensiones pero de cobre?

$$R = \rho \times \frac{L}{S} \quad R = 1,7 \times 10^{-8} \Omega m \times \frac{71 m}{1,0 \times 10^{-6} m^2} \Rightarrow R = 1,2 \Omega$$

c) ¿Cuál sería la resistencia de otro conductor de las mismas dimensiones pero de cuarzo?

$$R = \rho \times \frac{L}{S} \quad R = 7,5 \times 10^{17} \Omega m \times \frac{71 m}{1,0 \times 10^{-6} m^2} \Rightarrow R = 5,3 \times 10^{25} \Omega$$

Variación de la resistencia con la temperatura

La resistividad de un material, y por lo tanto su resistencia, depende de la temperatura. En casi todos los metales la resistividad aumenta con la temperatura.

Para intervalos bastante amplios, la resistividad depende de la temperatura en forma casi lineal (fig 8).

Si conocemos el valor de la resistividad (" ρ_0 ") para determinada temperatura (" T_0 "), la resistividad se puede expresar de la siguiente forma:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

donde α es una constante que se llama coeficiente de temperatura de la resistividad. (Fig. 9)

La unidad del coeficiente de temperatura de la resistividad es

$$[\alpha] = ^\circ C^{-1}$$

Si conocemos el coeficiente de temperatura " α " de cierto material, se puede usar la resistencia eléctrica como propiedad termométrica.

Si $R = \rho \times \frac{L}{S}$, podemos escribir $R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$, donde R_0 es la resistencia del conductor a la temperatura " T_0 ".

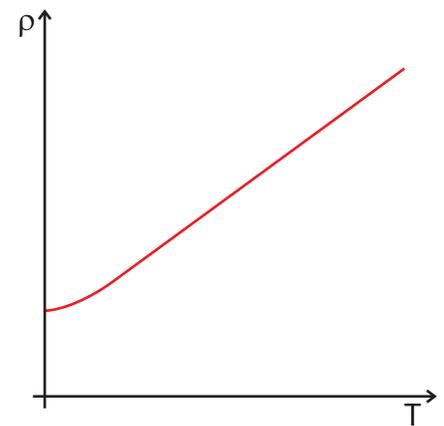


Fig. 8. Gráfica $\rho=f(T)$ para un metal.

Material	Coficiente de temperatura " α " a $20^\circ C$ ($^\circ C^{-1}$)
Plata	$3,8 \times 10^{-3}$
Cobre	$3,9 \times 10^{-3}$
Aluminio	$3,9 \times 10^{-3}$
Tungsteno	$4,5 \times 10^{-3}$
Hierro	$5,0 \times 10^{-3}$
Plomo	$4,3 \times 10^{-3}$
Nicrom	$0,4 \times 10^{-3}$
Carbono	$-0,5 \times 10^{-3}$

Fig. 9. Tabla de coeficientes de temperatura para la resistividad de diferentes materiales. El correspondiente al Carbono es negativo, lo que implica que su resistividad disminuye al aumentar la temperatura.

Ejemplo 4

Para medir la temperatura de un líquido, se sumerge en él un conductor de cobre ($\alpha = 3,9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), que a 20°C , tiene una resistencia de 120Ω .

Se mide la resistencia del conductor sumergido y es de 157Ω . Calcula la temperatura del líquido.

Despejando de $R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$, obtenemos $T - T_0 = \frac{R - R_0}{\alpha R_0}$

$$T - 20^\circ\text{C} = \frac{157\Omega - 120\Omega}{3,9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 120\Omega} \Rightarrow T = 99^\circ\text{C}$$

Ley de Ohm

La expresión $\frac{V}{I} = R$, con $R = \text{constante}$ es conocida como ley de Ohm. Esta no es una ley fundamental de la Física como las leyes de Newton, más bien describe el comportamiento experimental de ciertos materiales.

Fig. 10.

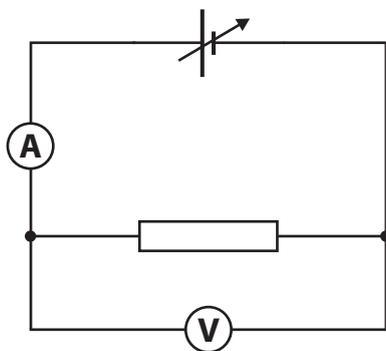


Fig. 11. Circuito para construir la curva característica de un resistor. Variando el cursor de la fuente variable obtenemos distintas ddp.

Conductores óhmicos y no óhmicos

Cuando se aplica una ddp entre los extremos de un conductor, por este circula una corriente eléctrica. Al variar la ddp, también cambia el valor de la intensidad.

Para algunos conductores, la intensidad que circula por ellos es directamente proporcional a la ddp entre sus extremos. Estos conductores se llaman óhmicos.

Entonces, si el conductor es óhmico

$$V \propto I$$

por lo tanto $\frac{V}{I} = \text{cte.}$

Anteriormente definimos al cociente $\frac{V}{I}$ como la resistencia del conductor (fig 10). Podemos concluir que la resistencia eléctrica de los conductores óhmicos es constante. No depende de la intensidad que circule por ellos o de la ddp entre sus extremos. Es importante aclarar que esta relación siempre se cumple para cierto intervalo de valores, no existe un conductor óhmico ideal.

Si el conductor es no óhmico, el cociente $\frac{V}{I} \neq \text{cte.}$ La ddp no es directamente proporcional a la intensidad, por lo que la resistencia de estos conductores no es constante. Depende de la intensidad que circule por ellos o de la ddp a la que estén conectados.

Para determinar si un conductor tiene un comportamiento óhmico en determinado rango de valores, debemos conectarlo a diferentes valores de ddp y medir la intensidad que circula por él (fig 11). Luego construimos su curva característica, que es la gráfica $V = f(I)$.

Si la curva característica del conductor es una línea recta que pasa por el origen, entonces, $V \propto I$, por lo que el conductor es óhmico.

Si la curva característica fuera otro tipo de curva, el conductor es no óhmico.

Ejemplo 5

Las siguientes gráficas corresponden a las curvas características de una lámpara (fig. 12), un resistor (fig. 13) y un diodo (fig. 14).

a) Indica si cada elemento es óhmico o no.

La única gráfica cuyos puntos están alineados en una recta que pasa por el origen es la correspondiente al resistor, por lo tanto es el único elemento óhmico.

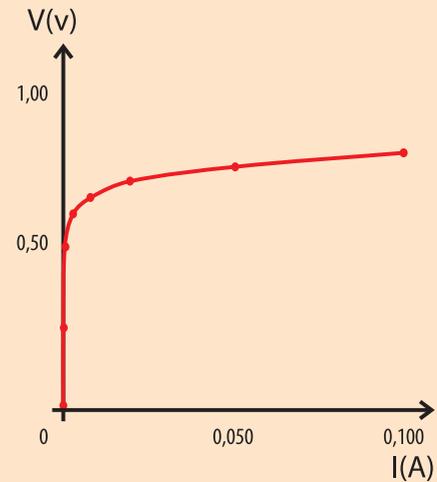
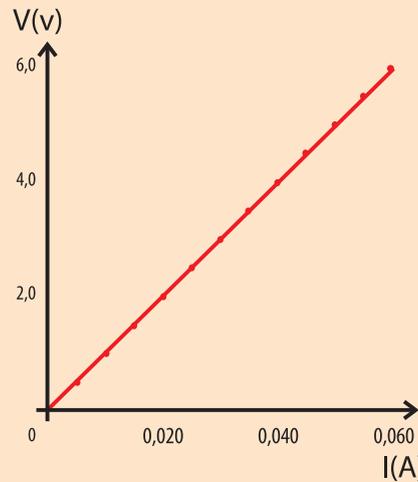
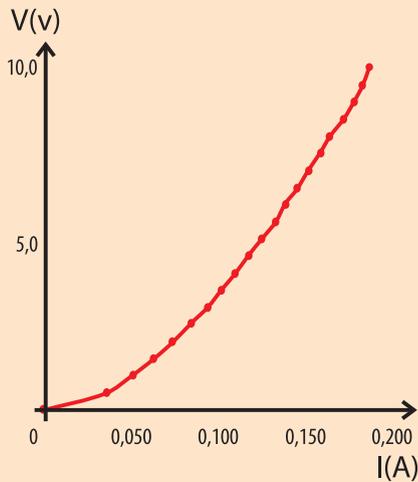


Fig. 12. Curva característica de una lámpara.

Fig. 13. Curva característica de un resistor.

Fig. 14. Curva característica de un diodo.

b) Determina la resistencia del elemento óhmico.

La resistencia del resistor es la constante de proporcionalidad entre V e I. Su valor está representado por la pendiente de la recta.

Para hallar la pendiente de una recta debemos elegir dos puntos de ella alejados entre sí.

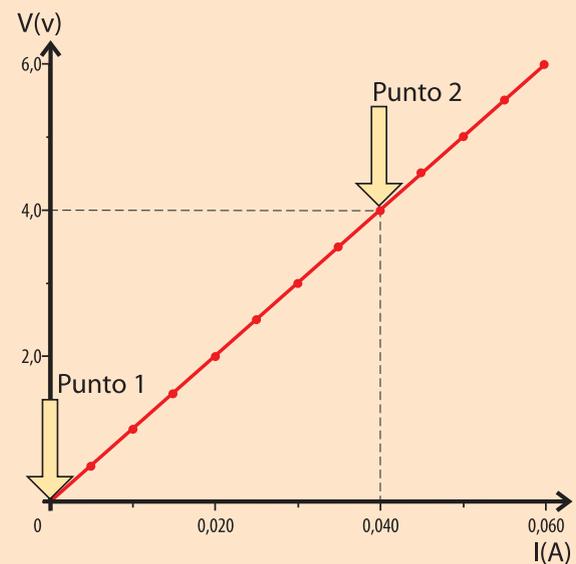
El punto "1" cuyas coordenadas son (0,0V; 0,000A) y el punto "2" cuyas coordenadas son (4,0V; 0,040A)

$$\text{pend} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad \text{pend} = \frac{4,0\text{V} - 0,0\text{V}}{0,040\text{A} - 0,000\text{A}}$$

$$\Rightarrow \text{pend} = 100\Omega$$

Por lo tanto, la resistencia del resistor

$$R = 1,0 \times 10^2\Omega$$



Resistores de carbono

En los circuitos eléctricos y electrónicos son muy utilizados resistores óhmicos de carbono (fig. 15). Los fabricantes imprimen en su cubierta bandas de colores que sirven para identificar el valor de su resistencia (fig 16).

Las dos primeras bandas de color forman un número compuesto por dos cifras, la tercer banda es el exponente y la cuarta es la tolerancia (porcentaje de confiabilidad del valor del resistor).

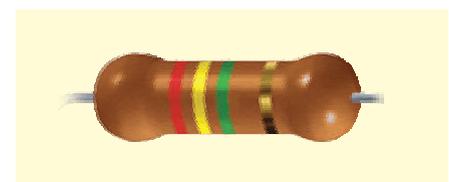


Fig. 15. Resistor de carbono.

Color	Cifra
Negro	0
Marrón	1
Rojo	2
Naranja	3
Amarillo	4
Verde	5
Azul	6
Violeta	7
Gris	8
Blanco	9
Dorado	±5%
Plateado	±10%
Sin color	±20%

Si la tercer banda es dorada el exponente es -1 . Si es plateada -2

Fig. 16. Código de colores para resistores de carbono.

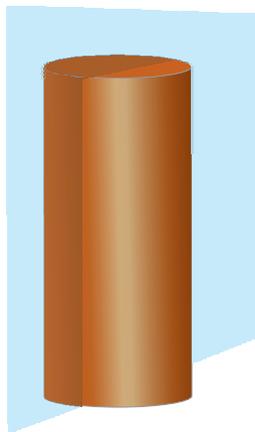


Fig. 17. Pregunta 7.

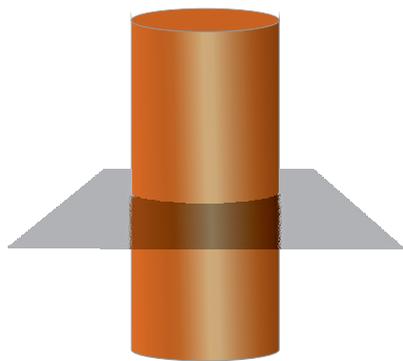


Fig. 18. Pregunta 8.

Ejemplo 6

Determina el valor de la resistencia del resistor de la figura 15. Identifiquemos colores y cifras en la tabla:

Rojo 2 Amarillo 4 Verde 5 Dorado 5%

Por lo tanto, la resistencia del resistor es

$R = 24 \times 10^5 \Omega$ con una tolerancia de 5%

Expresada en notación científica

$$R = 2,4 \times 10^6 \Omega \text{ con una tolerancia de } 5\%$$

PREGUNTAS

- 1) Define resistencia eléctrica.
- 2) ¿Cuál es la unidad de resistencia en el Sistema Internacional de Unidades?
- 3) Si conectamos diferentes conductores a una misma ddp, ¿qué relación existirá entre su resistencia y la intensidad que circula por ellos?
- 4) Dos conductores de la misma forma y dimensiones, ¿necesariamente tienen la misma resistencia eléctrica?
- 5) Define resistividad.
- 6) ¿Cuál es la unidad de resistividad en el S.I.?
- 7) Tenemos un conductor de cobre cilíndrico, de resistencia eléctrica "R". Lo cortamos por la mitad, en forma longitudinal, como muestra la figura 17. La resistencia de cada una de las mitades es:
 - a) R
 - b) 2R
 - c) R/2
 - d) R²
 - e) 1/R.
- 8) Tenemos un conductor de cobre cilíndrico, de resistencia eléctrica "R". Lo cortamos por la mitad, en forma transversal, como muestra la figura 18. La resistencia de cada una de las mitades es:
 - a) R
 - b) 2R
 - c) R/2
 - d) R²
 - e) 1/R.
- 9) Una persona tiene un sun para calentar agua, cuya resistencia eléctrica es de 60Ω . Se corta de tal manera que un trozo del "rulo" conductor tiene el doble de largo que el otro. ¿Qué resistencia eléctrica tendrá cada uno?
- 10) Los buenos conductores de la corriente eléctrica ¿tienen un valor grande o pequeño de resistividad? ¿Cómo será el valor de resistividad de los malos conductores?
- 11) El coeficiente de temperatura de resistividad puede ser negativo, ¿cómo varía la resistividad al aumentar la temperatura en ese caso?
- 12) ¿Qué es la curva característica de un conductor?
- 13) ¿Cómo podemos construir la curva característica de un elemento?
- 14) ¿Qué significa que un conductor es óhmico?
- 15) Si a un conductor se le triplica la ddp a la que está conectado y su intensidad se duplica, ¿será óhmico o no óhmico?
- 16) En el caso de la pregunta anterior, al aumentar la ddp, el valor de la resistencia ¿aumentó, disminuyó o permaneció constante?

PROBLEMAS

- 1) En el circuito de la figura 19, el amperímetro indica 50mA y el voltímetro 6,0V.
 - a) Determina el valor de la resistencia del resistor.
 - b) ¿Qué indicaría el amperímetro si el voltímetro marca 4,0V?
- 2) Una lámpara de $R = 14 \Omega$ se conecta a una ddp de 4,5V. Determina la intensidad de corriente que circula por ella.
- 3) Por un resistor de $R = 22 \text{ k}\Omega$ circula una intensidad de 15mA. Determina la ddp entre sus extremos.
- 4)
 - a) Determina la carga que atraviesa la sección transversal del filamento de una lámpara del problema 2 si está encendida durante 12 minutos.
 - b) Determina cuántos electrones circularon por el filamento de la lámpara en ese tiempo.
- 5) Determina la resistencia de un alambre de tungsteno de 100m de largo y $2,0 \text{ mm}^2$ de sección transversal.
- 6) En cierta instalación eléctrica se necesita un conductor de 50,0m de largo y $R = 4,0 \Omega$.
 - a) ¿Cuál debe ser su sección si se utiliza cobre?
 - b) ¿Y si se utiliza aluminio?
- 7) Un conductor cilíndrico de longitud "L", sección transversal "S" y radio "r" tiene una resistencia eléctrica de 120Ω . ¿Cuál será la resistencia eléctrica de otro conductor del mismo material y las siguientes características:
 - a) Longitud "2L" y sección "S".
 - b) Longitud "L" y sección "3S"
 - c) Longitud "L" y radio "r/2"
 - d) Longitud "3L" y sección "S/3"
 - e) Longitud "L/2" y sección "2S"
- 8) Un conductor de hierro cuya resistencia a 20°C es $15,0 \Omega$ se introduce en un líquido y su resistencia aumenta a $17,4 \Omega$. ¿Cuál es la temperatura del líquido?
- 9) Quiero construir una bobina cilíndrica (fig. 20) con alambre de cobre de $0,50 \text{ mm}^2$ de sección, con una resistencia de $6,0 \Omega$ a 20°C .
 - a) ¿Qué longitud de alambre de cobre necesito?
 - b) Si el radio del cilindro es de 2,0cm ¿cuántas vueltas de alambre va a tener la bobina?
 - c) Si lo sumerjo en agua y su resistencia aumenta a $6,8 \Omega$. ¿Cuál es la temperatura del agua?

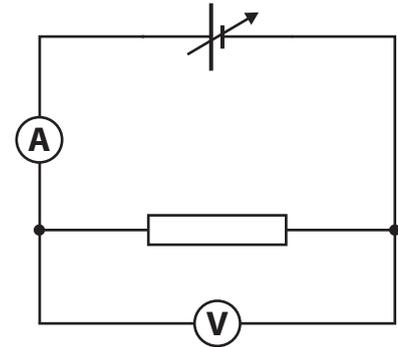


Fig. 19. Problema 1

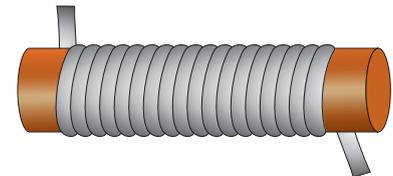
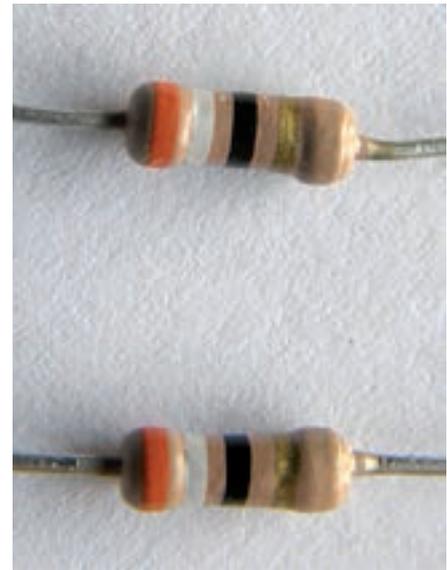


Fig. 20. Problema 9

- 10) Las siguientes tablas de valores corresponden al estudio de distintos elementos eléctricos.
- Construye la curva característica de cada uno.
 - Indica si cada uno de ellos es óhmico o no. Justifica.
 - Determina el valor de la resistencia para aquel elemento que haya resultado óhmico.

Tabla 1.

Intensidad (A)	Diferencia de potencial (V)
0,000	0,0
0,051	1,0
0,074	2,0
0,094	3,0
0,110	4,0
0,125	5,0
0,139	6,0
0,152	7,0
0,164	8,0
0,178	9,0
0,187	10,0

Tabla 2.

Intensidad (A)	Diferencia de potencial (V)
0,000	0,0
0,005	0,5
0,010	1,0
0,014	1,5
0,020	2,0
0,025	2,5
0,031	3,0
0,035	3,5
0,040	4,0
0,044	4,5
0,049	5,0

Tabla 3.

Intensidad (A)	Diferencia de potencial (V)
0,0000	0,00
0,0000	0,25
0,0004	0,50
0,0030	0,60
0,0082	0,65
0,0202	0,70
0,0524	0,75
0,1035	0,79

- 11) Utilizando el código de colores determina el valor de la resistencia de cada resistor de la figura 21 con su correspondiente tolerancia.

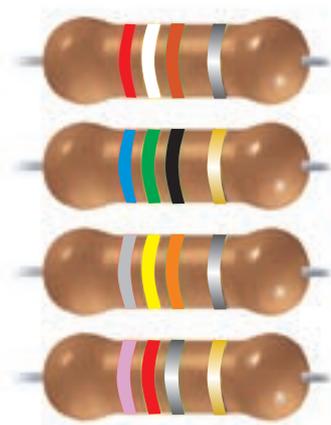


Fig. 21. Pregunta 11.

Color	Cifra
Negro	0
Marrón	1
Rojo	2
Naranja	3
Amarillo	4
Verde	5
Azul	6
Violeta	7
Gris	8
Blanco	9
Dorado	±5%
Plateado	±10%
Sin color	±20%

Si la tercer banda es dorada el exponente es -1. Si es plateada -2

Potencia eléctrica



Introducción

Los fenómenos eléctricos han sido muy trascendentes en el desarrollo de nuestra cultura. En ellos ocurren numerosas transformaciones de energía. Por ejemplo en una pila o batería se transforma energía química en energía potencial eléctrica. En una lámpara se transforma energía potencial eléctrica en energía luminosa.

Los distintos componentes de un circuito transforman esa energía, con diferente rapidez. La potencia eléctrica está relacionada con cuánta energía transforma un elemento y el tiempo que emplea. Su potencia será mayor cuanto mayor cantidad de energía transforma en menor tiempo.

Veamos un ejemplo sencillo, que consiste en un receptor conectado a un generador (fig 1). El generador realiza un trabajo sobre las cargas, para que estas circulen por el circuito. El receptor transforma la energía que transportan las cargas en otro tipo de energía. Por ejemplo en el caso de un motor en energía mecánica.

Entonces el trabajo eléctrico que realiza el generador es igual a la variación de energía en el receptor.

$$T = \Delta E$$

Definimos potencia al cociente entre la cantidad de energía que transforma un dispositivo y el tiempo que emplea:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

También se puede expresar $P = \frac{T}{\Delta t}$

Unidades de Potencia

Si a la energía la expresamos en Joule y al tiempo en segundo, la unidad de potencia será $\frac{J}{s}$, la que se denomina Watt, en honor al físico escocés de mismo nombre (fig 2).

$$[\Delta E] = [T] = J$$

$$[\Delta t] = s$$

$$[P] = \frac{J}{s} = W$$

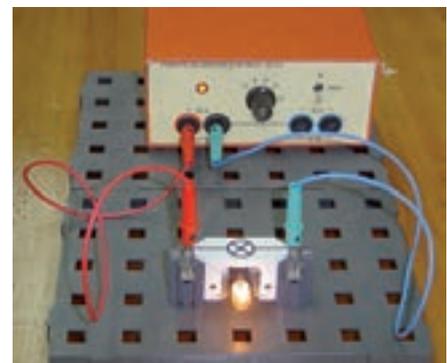


Fig. 1. Generador y receptor.



Fig. 2. James Watt (1736-1819). matemático e ingeniero escocés, principal impulsor de la máquina de vapor.

Es importante aclarar que la energía que recibe el receptor es igual en valor a la que aporta el generador. El trabajo eléctrico es únicamente la forma de transferirla, por lo tanto podemos expresar:

$$-\Delta E_{\text{en el generador}} = \Delta E_{\text{en el receptor}}$$

Todos los razonamientos planteados se basan en el principio de conservación de la energía.

Potencia disipada por un elemento eléctrico

Volvamos al ejemplo con el que comenzamos. Si en un determinado tiempo la fuente realiza sobre las cargas un trabajo, la potencia será:

$$P = \frac{T}{\Delta t}$$

De la definición de ddp podemos escribir: $T = q \times V$

Sustituyendo en la ecuación de potencia:

$$P = \frac{q \times V}{\Delta t}$$

Recordando la definición de intensidad: $I = \frac{q}{\Delta t}$, obtenemos:

$$P = V \times I$$

Si queremos calcular la potencia que disipa un componente eléctrico, debemos hacer el producto de la ddp a la que está conectado y la intensidad que circula por él.

Pongamos atención a la unidades:

$$[P] = V \times A = \frac{J}{C} \times \frac{C}{s} = \frac{J}{s} = W$$

entonces $V \times A$ es equivalente a $\frac{J}{s}$.

Otras unidades habituales de potencia

Otra unidad de potencia habitual en ciertos ámbitos como la mecánica automotriz es el caballo de fuerza, "HP"

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W}$$

Fig. 3.

Ejemplo 1

Un resistor de $2,5\Omega$ que se utiliza en un experimento para calentar agua, se conecta a una ddp de 24 V.

a) Calcula la intensidad que circula por él y su potencia.

$$I = \frac{V}{R} \quad I = \frac{24V}{2,5\Omega} \Rightarrow I = 9,6 \text{ A}$$

$$P = V \times I \quad P = 24V \times 9,6A \Rightarrow P = 230 \text{ W}$$

expresado correctamente $P = 2,3 \times 10^2 \text{ W}$

b) ¿En cuánto tiempo elevará la temperatura de 250g de agua desde 20°C hasta 50°C?

La transferencia de energía del resistor al agua es en forma de calor.

$$Q = c_e \times m \times \Delta T$$

recordemos que calor específico del agua es $4,18 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}}$

$$\Delta T = T_f - T_i, \Delta T = 50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta T = 30^\circ\text{C}$$

$$\Delta E = Q = 4,18 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} \times 250\text{g} \times 30^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta E = 31350\text{J}$$

$$\text{si } P = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \text{ despejando nos queda: } \Delta t = \frac{\Delta E}{P}$$

$$\Delta t = \frac{31350\text{J}}{230\text{W}} \quad \Delta t = 136\text{s} \Rightarrow \Delta t = 1,4 \times 10^2\text{s}$$

Otras formas de determinar la potencia eléctrica de un elemento de un circuito.

1. Supongamos que conocemos la resistencia eléctrica y la intensidad que circula por un elemento de un circuito.

Hemos visto anteriormente que la potencia de cualquier componente se puede calcular como $P = V \times I$

De la definición de resistencia eléctrica podemos despejar

$$V = R \times I$$

sustituyendo en la ecuación anterior: $P = R \times I \times I$, lo que nos queda

$$P = R \times I^2$$

2. Si ahora conocemos la ddp a la que está conectado un elemento y su resistencia eléctrica, podemos determinar su potencia de la siguiente forma:

Nuevamente partimos de la definición de resistencia eléctrica,

$$I = \frac{V}{R}$$

sustituyendo la intensidad en la ecuación $P = V \times I$, nos queda:

$$P = V \times \frac{V}{R} \text{ de donde finalmente:}$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Formas equivalentes de calcular la potencia:

$$P = V \times I = R \times I^2 = \frac{V^2}{R}$$

Para cualquier elemento de un circuito, con ddp constante

$$P \propto \frac{1}{R}$$

Para un conductor óhmico:

$$P \propto V^2$$

Esta última ecuación nos muestra un aspecto importante de la potencia. Si tenemos dos conductores, conectados a una misma ddp el que tenga mayor resistencia eléctrica disipará menor potencia. Si la ddp es constante, la potencia de un conductor es inversamente proporcional a su resistencia eléctrica.

También de esta ecuación podemos concluir que si aumentamos la ddp a la que está conectado un conductor, la potencia no aumentará en la misma proporción, sino que aumentará proporcionalmente al cuadrado de la ddp. Esto último es válido sólo si el conductor es óhmico.

Ejemplo 2

Un dispositivo eléctrico que tiene resistencia eléctrica de 18Ω y se comporta de forma óhmica, se conecta a una ddp de $9,0V$.

a) Calcula la potencia disipada por el dispositivo

$$P = \frac{V^2}{R} \quad P = \frac{(9,0V)^2}{18\Omega} \Rightarrow P = 4,5W$$

b) Calcula la energía que transforma el dispositivo si se lo mantiene funcionando 15 minutos (900s)

$$\Delta E = P \times \Delta t$$

$$\Delta E = 4,5W \times 900s \Rightarrow \Delta E = 4050J \Rightarrow \Delta E = 4,1 \times 10^3 J$$

c) ¿Cómo cambian tus respuestas anteriores si se duplica la ddp a la que se conecta al dispositivo?

$$P = \frac{V^2}{R} \quad P = \frac{(18V)^2}{18\Omega} \Rightarrow P = 18W$$

$$\Delta E = P \times \Delta t \quad \Delta E = 18W \times 900s \Rightarrow \Delta E = 16200J \quad \Delta E = 1,6 \times 10^4 J$$

Al duplicar la ddp, tanto la potencia como la energía se cuadruplican. Esto está en concordancia con lo ya expresado, que para conductores óhmicos $P \propto V^2$.

¿En qué unidades mide UTE la energía que nos suministra?

Revisemos un recibo de UTE. En él encontramos un detalle de la facturación (fig 4). En primer lugar aparece "carga por potencia contratada". La potencia contratada es la máxima potencia que puede disiparse en el hogar al conectar varios aparatos eléctricos simultáneamente. Si se excede dicha potencia, la llave limitadora salta, cortando el suministro. A continuación se detalla el consumo, expresado en "kWh" y su respectivo costo.

Veamos a que corresponde esta unidad.

1 kWh, lo podemos escribir como $1\text{ kW} \times 1\text{ h}$, o sea, multiplicamos un valor de potencia por otro de tiempo. El resultado es un valor de energía, recuerda que $\Delta E = P \times \Delta t$. Entonces el kWh es la unidad de energía que utiliza UTE para medir el consumo energético.

¿Por qué UTE no mide la energía en Joule? Razonemos lo siguiente: en un día de invierno encendemos una estufa eléctrica. Las más comunes tienen una potencia de 1400W. Si la mantenemos encendida 5,0h, esto es $1,8 \times 10^4\text{ s}$, entonces:

$$\Delta E = P \times \Delta t$$

$$\Delta E = 1400\text{ W} \times 1,8 \times 10^4\text{ s} = 25200000\text{ J}$$

$$\Delta E = 2,5 \times 10^7\text{ J}$$

Hagamos el mismo cálculo expresando ahora la energía en kWh,

En primer lugar escribamos la potencia en kW, recordando que

$$1000\text{ W} = 1\text{ kW}$$

$$1400\text{ W} = 1,400\text{ kW}$$

entonces $\Delta E = P \times \Delta t$

$$\Delta E = 1,400\text{ kW} \times 5,0\text{ h} = 7,0\text{ kWh}$$

Queda claro que es mucho más cómodo utilizar este último valor. Cabe destacar que hicimos el cálculo con un solo electrodoméstico.

Equivalencia entre Joule y kWh

$$1,0\text{ kWh} = 1,0\text{ kW} \times 1,0\text{ h} = 1000\text{ W} \times 3600\text{ s} = 3600000\text{ J}$$

Esto es $1,0\text{ kWh} = 3,6 \times 10^6\text{ J}$

Entonces podemos decir que el 1,0 kWh es la cantidad de energía que transforma un dispositivo con una potencia de 1,0 kW en un tiempo de 1,0h. Dicha cantidad de energía corresponde a $3,6 \times 10^6\text{ J}$.

Detalle de Facturación	
Concepto	Importe
CARGO POT. CONTRATADA	
6,6 kW X 1M X \$27	178,20
FACTURACION DE CONSUMO	
100kWh X \$1,930	193,00
297kWh X \$2,790	828,63
CARGO FIJO	79,90

Fig. 4. Detalle de la factura de UTE.

El ente estatal cobra diferenciado los kWh consumidos. Los primeros 100 kWh son más baratos, luego incrementa el costo en franjas. Esto pretende fomentar el ahorro energético. Por último aparece un "carga fijo" que es el costo de estar conectado a la red.

Si escribimos la potencia en kW y el tiempo en horas, la unidad de energía queda expresada en kWh.

$$1,0\text{ kWh} = 3,6 \times 10^6\text{ J}$$

Ejemplo 3

En una peluquería se utiliza un secador de pelo, con una potencia de 1200W, conectándolo a la red eléctrica de UTE.

a) Calcula la intensidad que circula por el secador cuando está funcionando.

$$P = V \times I, \text{ por lo tanto } I = \frac{P}{V} = \frac{1200\text{W}}{220\text{V}}, \Rightarrow I = 5,45 \text{ A}$$

b) Calcula la energía que transforma en 8,0h de funcionamiento.

$\Delta E = P \times \Delta t$, expresemos la potencia en kW, 1200W = 1,200kW,

$$\Delta E = 1,200\text{kW} \times 8,0\text{h} \Rightarrow \Delta E = 9,6\text{kWh}$$

c) Expresa el resultado anterior en unidades del S.I.

$$1,0 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$9,6 \text{ kWh} = 3,5 \times 10^7 \text{ J}$$

$$\Delta E = 3,5 \times 10^7 \text{ J}$$

d) Averigua el costo de cada kWh y calcula cuánto gasta la peluquería por día en utilizar el secador de pelo.



Fig. 5. Lámpara común y de bajo consumo.

Lámparas comunes versus lámparas de bajo consumo.

En el envase de una lámpara común se lee: "220V - 60W" (fig. 7).

Esto quiere decir que si la conectamos a 220V, disipará una potencia de 60W, transformará 60J de energía por segundo.

¿En qué otros tipos de energía se transforma la energía eléctrica? Más de tres cuartas partes de esos 60W se transforman en energía interna que se cede al ambiente en forma de calor. El resto se transforma en energía luminosa. Sólo aprovechamos menos de un cuarto de la energía que "consumimos" para la finalidad de la lámpara que es la iluminación.

En el envase de una lámpara de bajo consumo (fig. 6) se lee "220V - 11W con la misma luminosidad de una lámpara común de 60W". Estas lámparas son más **eficientes**. Permiten aprovechar un mayor porcentaje de la energía eléctrica que se "consume", ya que la mayor parte de los 11J por segundo (11W), se transforman en energía luminosa.



Fig. 7. Una lámpara común de 60W utiliza menos de la cuarta parte de la energía consumida en emitir luz.



Fig. 6. Una lámpara de bajo consumo de 11W da la misma luz que una común de 60W.

PREGUNTAS

- 1) Define potencia eléctrica.
- 2) ¿Cuál es la unidad de potencia en el Sistema Internacional de Unidades?
- 3) Se tienen dos lámparas una de 60W y otra de 100W. ¿Ambas pueden transformar la misma cantidad de energía? ¿Cuál es la diferencia entonces entre las lámparas?
- 4) Si conocemos la ddp a la que está conectado un elemento y la intensidad que circula por él, ¿cómo calculamos la potencia?
- 5) ¿Cómo se calcula la potencia disipada por un conductor a partir de su resistencia eléctrica y de la intensidad que circula por él?
- 6) Contesta lo mismo que en la pregunta anterior, pero suponiendo que los datos sean la ddp y la resistencia eléctrica.
- 7) Tenemos un conductor de resistencia eléctrica R , conectado a una batería. Si sustituimos al conductor por otro que tiene una resistencia $R/2$, ¿Cómo varía la potencia?
- 8) Un conductor óhmico se conecta a una ddp " V ", y luego se reduce a la mitad " $\frac{V}{2}$ ":
 - a) ¿Cómo varía la intensidad por el conductor?
 - b) ¿Cómo varía su potencia?
 - c) ¿Por qué para poder contestar las preguntas anteriores el conductor debe ser óhmico?
- 9) ¿Qué magnitud física se mide en kWh?
- 10) ¿El kWh es una unidad del Sistema Internacional de Unidades?
- 11) ¿Cuál es la equivalencia entre kWh y Joule?
- 12) ¿Por qué UTE mide la energía en kWh?
- 13) ¿Cuáles son las ventajas de las lámparas de bajo consumo con respecto a las lámparas comunes?



PROBLEMAS

- 1) En la cubierta de una lámpara se lee "75W". ¿En cuánto tiempo disipará una energía de 2,0kJ? ¿Cuánta energía transforma en cada minuto que está encendida?
- 2) Un televisor de potencia 80W está un día entero encendido y una estufa de potencia 1,2kW lo está media hora. ¿Cuál de los dos transforma más energía?
- 3) Un resistor de resistencia 20Ω se conecta a una fuente que crea una ddp de 24V.
 - a) ¿Cuál es su potencia?
 - b) ¿Cuánta energía entrega la fuente al resistor en 15 minutos?
- 4) Un electrodoméstico soporta que circule por él una intensidad máxima de 2,0 A, y tiene una potencia de 500W. ¿Se estropea si lo conectamos a la red eléctrica de UTE? ¿Funcionará correctamente si lo conectamos en un país donde la red local es de 110V?

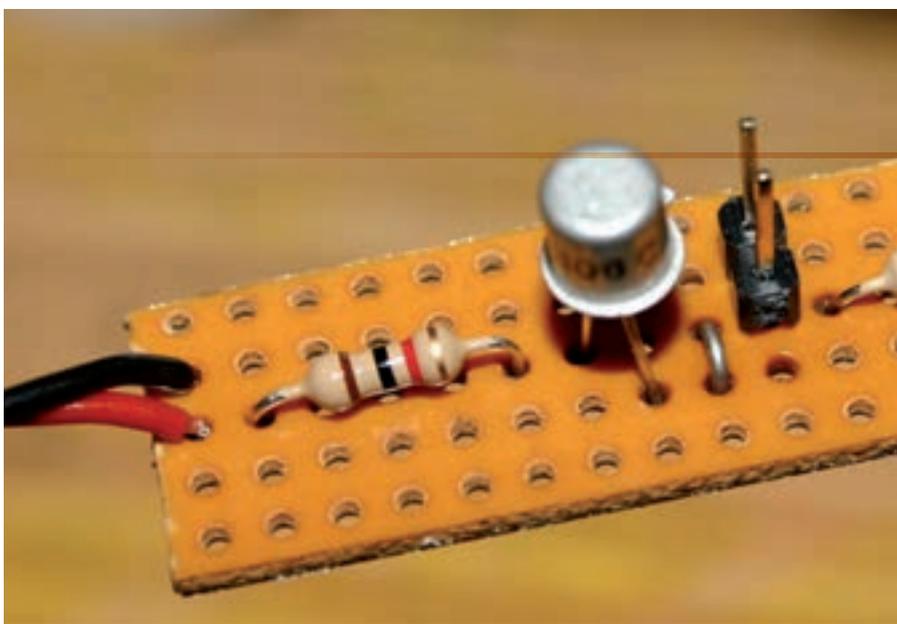


- 5) Un aparato eléctrico tiene una potencia de 600W y cuando funciona, circula por él una intensidad de 5,0A. Calcula la resistencia eléctrica del aparato.
- 6) Se desea tener un conductor que disipe una potencia de 180W, cuando por él circule una intensidad de corriente de 2.5 A. Calcula la resistencia del conductor.
- 7) Una calculadora funciona con dos pilas "AAA", y según el manual tiene una potencia de $4,0 \times 10^{-4}$ W. Si en un examen se la mantiene funcionando 2,0 horas, ¿qué carga eléctrica circula por la calculadora?
- 8) Un conductor, cuando se lo conecta a 3,0V disipa una potencia de 25W y si se lo conecta a 6,0V disipa 50W. ¿El conductor es óhmico?
- 9) Una lámpara con un comportamiento óhmico, disipa 60W conectada a una ddp de 220 V. ¿Qué potencia disipará si se conecta en una región de Brasil a una ddp de 110V?
- 10) Si compramos una lámpara en dicha región de Brasil con una potencia de 75 W y la traemos a Uruguay. ¿qué ocurrirá con ella al conectarla a la red de UTE?
- 11) En una fábrica se utiliza una máquina que conectada a 220V disipa una potencia de $5,0 \times 10^3$ W. Se la utiliza durante 8,0h, durante 20 días al mes.
 - a) Calcula la intensidad que circula por la máquina cuando está funcionando.
 - b) ¿Cuánta energía transforma la máquina por mes?
 - c) Averigua el costo de cada kWh y calcula el gasto mensual del funcionamiento de la máquina.



- 12) Un termofón de 40 L, emplea 10 minutos en calentar el agua desde los 20°C a los 70°C. Calcula:
 - a) la energía cedida al agua.
 - b) la resistencia eléctrica del termofón.
- 13) Un sun tiene una resistencia eléctrica de 32Ω y se lo utiliza para calentar 1,5L de agua que inicialmente está a 15°C. Se lo mantiene encendido 5,0 minutos.
 - a) Calcula la energía entregada al agua en ese tiempo.
 - b) Calcula la temperatura final del agua.
 - c) Si quiero que caliente el agua hasta los 60°C, en el mismo tiempo de 5,0 minutos, ¿cuál debe ser su resistencia eléctrica?
- 14) Un horno microondas transforma una energía de 0,60kWh. Si su potencia es de 900W, calcula:
 - a) cuánto tiempo está encendido.
 - b) la intensidad de corriente que circula por él cuando esta funcionando.

Circuitos eléctricos



Introducción

En este capítulo analizaremos circuitos sencillos formados por un generador y varios resistores, conectados en serie, en paralelo y en forma mixta. Aplicaremos lo estudiado en los capítulos anteriores, especialmente la ley de los nudos y la ley de las mallas. Para simplificar el análisis sólo trabajaremos con resistores óhmicos y generadores ideales, que mantienen una ddp constante, independiente de la potencia que desarrollen. En adelante identificaremos al resistor con el valor de su resistencia. Esto quiere decir que para referirnos a “...un resistor cuya resistencia eléctrica es 40Ω ...” escribiremos de forma abreviada “...una resistencia de 40Ω ...”. Recuerda que para resistores óhmicos el valor de su resistencia es constante.

Resistencia equivalente

La Fig 1 muestra cuatro resistencias conectadas a una fuente por los puntos “A” y “B”. Por cada una de ellas circulará cierta intensidad.

Definimos resistencia equivalente “ R_E ” a la resistencia que puede sustituir a un conjunto de resistencias, cumpliendo la siguiente condición: al conectarla a la misma ddp que el conjunto, no varía la intensidad total (fig 2).

En la figura también se representa la intensidad total, que es la intensidad que circula por el generador.

Si sustituimos a un conjunto de resistencias por la resistencia equivalente “ R_E ”, la intensidad total no se altera.

Al sustituir un conjunto de elementos por su “ R_E ”, no cambia la ddp a la que están conectados los demás componentes del circuito y tampoco se altera la intensidad que circula por cada uno de ellos. La potencia eléctrica de “ R_E ” será la suma de las potencia de todas las resistencias que sustituye.

De acuerdo a estas deducciones se debe cumplir que:

$$\frac{V_{AB}}{I_T} = R_E$$

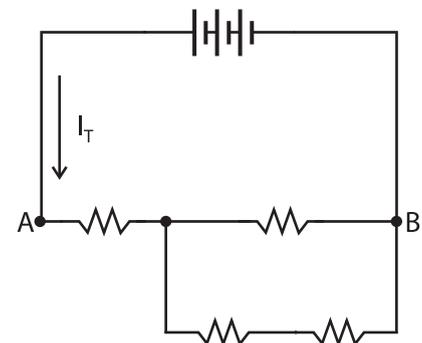


Fig. 1. Resistores conectados en forma mixta.

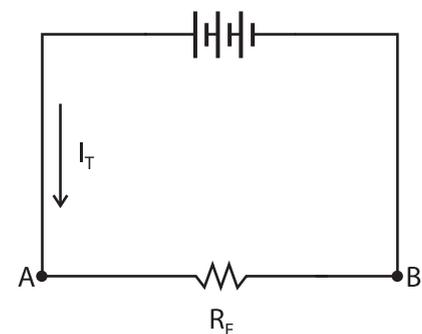


Fig. 2. Resistencia equivalente conectada entre A y B. La intensidad total sigue siendo la misma. La potencia disipada por R_E es la suma de las potencias disipadas por cada resistencia del conjunto sustituido.

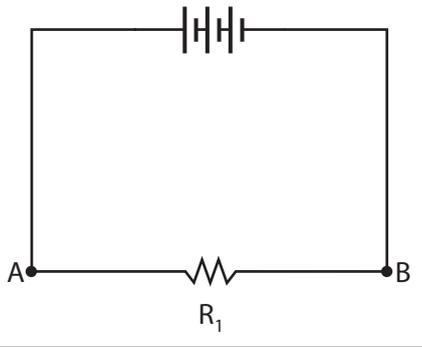


Fig. 3. Circuito sencillo con un generador y una resistencia.

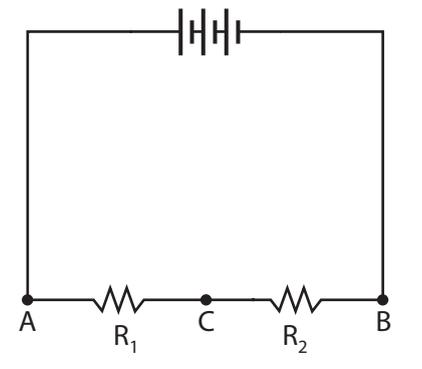


Fig. 4. R_1 y R_2 conectadas en serie.

Resistencia equivalente en serie

La resistencia equivalente de n resistencias conectadas en serie es la suma de las n resistencias conectadas.

$$R_E = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Fig. 5

Al agregar una resistencia en serie la potencia disipada por los resistores en su conjunto disminuye.

Fig. 6. Cambios en la potencia de un circuito al agregar una resistencia en serie.

La resistencia equivalente que sustituye a **todas** las resistencias del circuito se denomina también **resistencia total**.

Circuitos en serie

Si tenemos una resistencia " R_1 " conectada a un generador (fig 3) y sabemos a que ddp está conectada, podemos calcular la intensidad como:

$$I = \frac{V_{AB}}{R_1}$$

En el circuito anterior conectamos una resistencia " R_2 " en serie con " R_1 " (fig 4). Llamaremos " C " al punto común de conexión. La fuente sigue generando entre los puntos " A " y " B " la misma ddp, pero ninguna de las dos resistencias está conectada a los puntos " A " y " B ".

De acuerdo a la ley de las mallas podemos escribir:

$$V_{AC} + V_{CB} = V_{AB}$$

Por estar conectadas en serie, la intensidad por las resistencias será la misma, que es la intensidad total " I_T " por lo tanto:

$$R_1 \times I_T + R_2 \times I_T = V_{AB}$$

Sacando " I_T " de factor común $(R_1 + R_2) I_T = V_{AB}$

Despejando " I_T " obtenemos $I_T = \frac{V_{AB}}{R_1 + R_2}$.

Si comparamos este resultado con el obtenido cuando estaba sólo conectada R_1 , vemos que la intensidad que circula en este caso es menor, porque el divisor $(R_1 + R_2)$ es mayor que R_1 .

De $(R_1 + R_2) \times I_T = V_{AB}$

despejamos: $\frac{V_{AB}}{I_T} = (R_1 + R_2)$

Por lo tanto si $\frac{V_{AB}}{I_T} = R_E \Rightarrow R_1 + R_2 = R_E$

$R_E = R_1 + R_2$

La resistencia equivalente de resistencias conectadas en serie es igual a la suma de las resistencias que sustituye (fig 5).

Al agregar " R_2 " al circuito, la ddp entre " A " y " B " no cambia y la intensidad total es menor. Por lo tanto, como $P = V_{AB} \times I$ la potencia disipada por los dos resistores en serie es menor que la potencia que disipaba " R_1 " en el primer circuito. Esto está en concordancia con que a una misma ddp, al aumentar

la resistencia, la potencia disminuye, recordemos que $P = \frac{V^2}{R}$. (Fig 6)

Ejemplo 1

La fig 7 muestra dos circuitos. Uno formado por una fuente que genera entre los puntos "A" y "B" una ddp de 6,0V y una resistencia "R₁" de valor 15Ω (fig 7a). El otro circuito está formado por la misma fuente y "R₁", mas otra resistencia "R₂", de valor 25Ω (fig 7b).

a) Calcula la intensidad que circula por la resistencia "R₁" y la potencia que disipa en el circuito 1.

Para el circuito 1 tenemos:

$$I = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad I = \frac{6,0V}{15\Omega} \Rightarrow \boxed{I = 0,40 \text{ A}}$$

$$P_1 = R_1 \times I^2 \quad P = 15\Omega \times (0,40A)^2 \Rightarrow \boxed{P = 2,4 \text{ W}}$$

b) Calcula la intensidad que circula por "R₁" y por "R₂" y la potencia que disipan en el circuito 2.

De acuerdo a la ley de las mallas y recordando que por ambas resistencias circula la misma intensidad,

$$V_{AC} + V_{CB} = V_{AB} \quad R_1 \times I + R_2 \times I = V_{AB} \quad (R_1 + R_2) I = V_{AB}$$

$$I = \frac{V_{AB}}{R_1 + R_2} \quad I = \frac{6,0V}{15\Omega + 25\Omega} \Rightarrow \boxed{I = 0,15 \text{ A}}$$

Como era de esperar la intensidad en este caso es menor.

Para calcular la potencia disipada por las resistencias, sumemos la potencia disipada por cada una.

$$P_T = P_1 + P_2 \quad P_T = R_1 \times I^2 + R_2 \times I^2$$

$$P_T = 15\Omega \times (0,15A)^2 + 25\Omega \times (0,15A)^2 \Rightarrow \boxed{P_T = 0,90 \text{ W}}$$

Observemos que aunque tenemos dos resistencias la potencia es menor. Si calculamos la potencia con la resistencia equivalente deberíamos obtener el mismo resultado:

$$P_T = R_E \times I^2$$

$$R_E = 15\Omega + 25\Omega \quad R_E = 40\Omega,$$

$$\text{por lo que } P_T = 40\Omega \times (0,15A)^2 \Rightarrow \boxed{P_T = 0,90 \text{ W}}$$

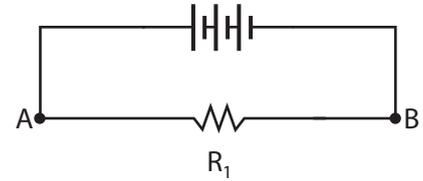


Fig. 7a. Ejemplo 1, circuito 1.

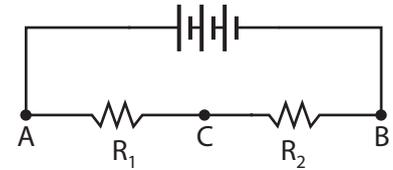


Fig. 7b. Ejemplo 1, circuito 2.

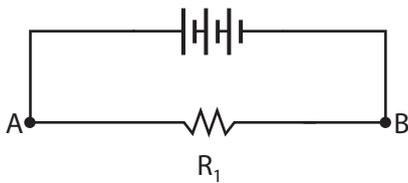


Fig. 8. Circuito sencillo con un generador y una resistencia.

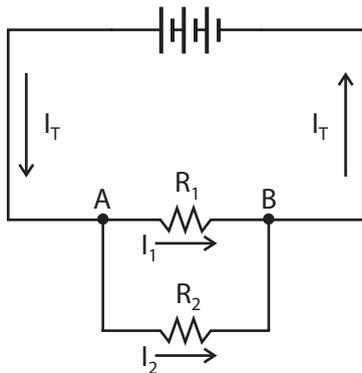


Fig. 9. Resistencias conectadas en paralelo. I_{total} es la suma de I_1 e I_2 .

Resistencia equivalente en paralelo

Si tenemos “n” resistencias conectadas en paralelo, se cumple que el inverso de la resistencia equivalente es la suma de los inversos de la resistencia de las “n” resistencias, esto es:

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Fig. 10.

Al agregar una resistencia en paralelo, la potencia disipada por los resistores en su conjunto aumenta.

Fig. 11. Cambios en la potencia de un circuito al agregar una resistencia en paralelo.

Circuitos en paralelo

Volvamos al circuito formado por un generador y una resistencia (fig 8). Recordemos que

$$I_T = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad \text{que se puede escribir } I_T = \frac{1}{R_1} \times V_{AB}$$

¿Qué ocurre si conectamos una resistencia “R2” en paralelo a “R1” (fig 9)?

Si llamamos “ I_1 ” a la intensidad por “R1”, e “ I_2 ” a la intensidad por “R2”, según la ley de los nudos tenemos:

$$I_T = I_1 + I_2, \text{ donde “}I_T\text{” es la intensidad total.}$$

$$\text{Como } I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} \Rightarrow I_T = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2}$$

Observemos que ambos resistores están conectados a los nudos “A” y “B”, que también están conectados al generador.

Sacando factor común V_{AB}
$$I_T = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \times V_{AB}$$



De acuerdo a la definición de R_E
$$I_T = \frac{1}{R_E} \times V_{AB}$$

por lo que podemos concluir que para resistencias conectadas en paralelo se cumple (fig 10):

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Al agregar “R2” en paralelo la intensidad por “R1” no cambia porque sigue conectada a la misma ddp, directamente a la fuente. Como $I_T = I_1 + I_2$, la intensidad total es mayor que cuando estaba conectada solamente “R1”. La potencia disipada por “R1” tampoco cambia, ya que $P_1 = V_{AB} \times I_1$. Como la potencia entregada por el generador es la suma de las potencias disipadas por “R1” y “R2”, ésta aumenta al conectar “R2” en paralelo a “R1” (fig 11). Como la resistencia equivalente en paralelo es menor que cualquiera de las resistencias del conjunto, la potencia disipada por la conexión en paralelo es mayor.

Esto está en concordancia con que a una misma ddp, al disminuir la resistencia, la potencia aumenta, recordemos que $P = \frac{V^2}{R}$. (Fig. 11)

Ejemplo 2

La fig. 12a muestra una resistencia $R_1=15\Omega$ (circuito 1) conectada a una fuente de alimentación que crea entre los puntos "A y B" una ddp de 6,0 V. Luego se le conecta en paralelo otra resistencia $R_2 = 30\Omega$. (fig. 12b, circuito 2)

Calcula en cada circuito la intensidad total y la potencia desarrollada por la fuente.

Para el circuito 1 obtenemos los mismos resultados que en el ejemplo 1.

$$I = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad I = \frac{6,0V}{15\Omega} \Rightarrow I = 0,40 \text{ A}$$

$$P_1 = R \times I^2 \quad P_1 = 15\Omega \times (0,40A)^2 \Rightarrow P_1 = 2,4 \text{ W}$$

Veamos ahora en el circuito 2.

$$I_T = I_1 + I_2 \quad I_T = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} \quad I_T = \frac{6,0V}{15\Omega} + \frac{6,0V}{30\Omega} \Rightarrow I_T = 0,60 \text{ A}$$

Vemos que la intensidad es mayor que en el circuito 1. La intensidad total cuando conectamos resistencias en paralelo aumenta. Es de esperar que suceda lo mismo con la potencia.

$$P_T = P_1 + P_2 \quad P_T = \frac{(V_{AB})^2}{R_1} + \frac{(V_{AB})^2}{R_2}$$

$$P_T = \frac{(6,0V)^2}{15\Omega} + \frac{(6,0V)^2}{30\Omega} \Rightarrow P_T = 3,6 \text{ W}$$

Para verificar los resultados anteriores también podemos trabajar con la R_E .

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \frac{1}{R_E} = \frac{1}{15\Omega} + \frac{1}{30\Omega} = \frac{2+1}{30\Omega} = \frac{3}{30\Omega}$$

$$\text{por lo que } \frac{R_E}{1} = \frac{30\Omega}{3} \Rightarrow R_E = 10\Omega$$

$$\text{Entonces } I_T = \frac{V_{AB}}{R_E} \quad I_T = \frac{6,0V}{10\Omega} \Rightarrow I_T = 0,60 \text{ A}$$

$$P_T = \frac{(V_{AB})^2}{R_E} \quad P_T = \frac{(6,0V)^2}{10\Omega} \Rightarrow P_T = 3,6 \text{ W}$$

Como era de esperar, obtenemos los mismos resultados.

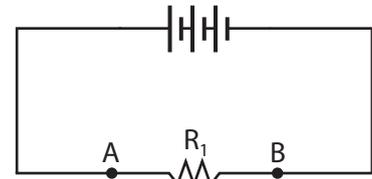


Fig. 12a. Ejemplo 2, circuito 1.

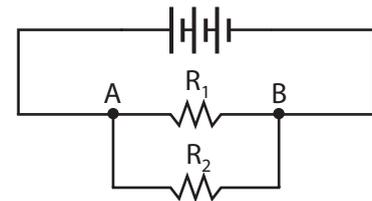


Fig. 12b. Ejemplo 2, circuito 2.

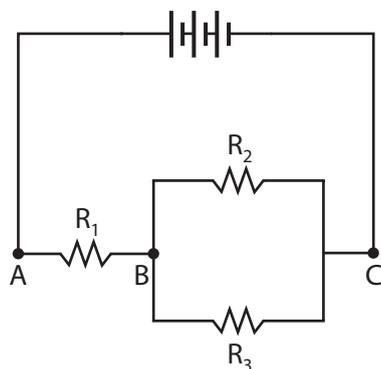
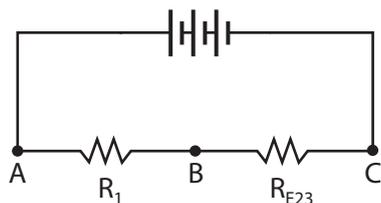


Fig. 13. Ejemplo 3.

Fig. 14. R_{E23} es la resistencia equivalente de R_2 y R_3 .

Observa que " R_3 " es el triple que " R_2 " por lo que la intensidad " I_3 " es la tercera parte de " I_2 "

Ejemplo 3

Analicemos ahora una conexión mixta, que consta de tres resistencias $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 40\Omega$, $R_3 = 120\Omega$, y un generador que crea entre los puntos "A" y "C" una ddp de 6,0V (fig 13)

a) Determina la intensidad total del circuito.

Ninguna de las resistencias está conectada a los puntos "A" y "C", cuya ddp es la que conocemos. Utilizaremos para resolver el ejemplo la resistencia equivalente.

Observemos que " R_2 " está conectada a " R_3 " en paralelo, y la combinación de ambas en serie con " R_1 ".

Calculemos la " R_E " de la conexión " R_2 " y " R_3 ", o sea R_{E23}

$$\frac{1}{R_{E23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \frac{1}{R_{E23}} = \frac{1}{40\Omega} + \frac{1}{120\Omega} = \frac{3+1}{120\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{E23}} = \frac{4}{120\Omega} \text{ por lo que } R_{E23} = \frac{120\Omega}{4} \Rightarrow R_{E23} = 30\Omega$$

Logramos transformar el circuito (fig 14) en uno ya estudiado en el ejemplo 1. " R_1 " y " R_{E23} " están en serie, por lo tanto por ellas circula la misma intensidad, que será además la intensidad total.

$$I_1 = I_T$$

$$\text{Entonces: } I_T = \frac{V_{AC}}{R_1 + R_{E23}} \quad I_T = \frac{6,0V}{20\Omega + 30\Omega} \Rightarrow I_T = 0,12 \text{ A}$$

b) Calcula la intensidad por cada resistencia.

Ya conocemos la intensidad " I_1 " que circula por " R_1 "

Para determinar las intensidades " I_2 " e " I_3 ", calcularemos primero la ddp " V_{BC} " a la que están conectadas " R_2 " y " R_3 " (conectadas en paralelo). Sabemos que por el conjunto " R_2 y R_3 " circula " I_T ". Por lo tanto, si sustituimos el conjunto por su resistencia equivalente " R_{E23} ", debe cumplirse que

$$V_{BC} = R_{E23} \times I_T \quad V_{BC} = 30\Omega \times 0,12A \Rightarrow V_{BC} = 3,6V$$

Por lo tanto podemos calcular la intensidad que circula por cada resistencia de las siguiente forma:

$$I_2 = \frac{V_{BC}}{R_2} \quad I_2 = \frac{3,6V}{40\Omega} \Rightarrow I_2 = 0,090 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{V_{BC}}{R_3} \quad I_3 = \frac{3,6V}{120\Omega} \Rightarrow I_3 = 0,030 \text{ A}$$

Podemos verificar el resultado aplicando la ley de los nudos,

$$I_T = I_2 + I_3 \quad I_T = 0,090 \text{ A} + 0,030 \text{ A} \Rightarrow I_T = 0,12 \text{ A}$$

c) Calcula la potencia disipada por cada resistencia.

$$P_1 = R_1 \times I_1^2 \quad P_1 = 20\Omega \times (0,12A)^2 \quad \Rightarrow \quad P_1 = 0,29 \text{ W}$$

$$P_2 = R_2 \times I_2^2 \quad P_2 = 40\Omega \times (0,090A)^2 \quad \Rightarrow \quad P_2 = 0,32 \text{ W}$$

$$P_3 = R_3 \times I_3^2 \quad P_3 = 120\Omega \times (0,030A)^2 \quad \Rightarrow \quad P_3 = 0,11 \text{ W}$$

d) Calcula la potencia total disipada por las resistencias.

La potencia total será

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_T = 0,29W + 0,32W + 0,11W, \quad \Rightarrow \quad P_T = 0,72 \text{ W}$$

Si calculamos la potencia con la resistencia total del circuito " R_{E123} " tendríamos que obtener el mismo resultado.

$$R_{E123} = R_1 + R_{E23}$$

$$R_{E123} = 20\Omega + 30\Omega \quad \Rightarrow \quad R_{E123} = 50\Omega$$

$$P_T = \frac{(V_{AC})^2}{R_{E123}} \quad P_T = \frac{(6,0V)^2}{50\Omega} \quad \Rightarrow \quad P_T = 0,72 \text{ W}$$

e) Calcula la potencia del generador.

$$P_{Gen} = V_{AC} \times I_T \quad \Rightarrow \quad P_{Gen} = 6,0V \times 0,12A \quad \Rightarrow \quad P_{Gen} = 0,72 \text{ W}$$

Podemos apreciar que la potencia que el generador aporta al circuito es la suma de las potencias disipadas en las resistencias.

Ejemplo 4

Las tres resistencias del ejemplo anterior se conectan al mismo generador, ahora de la forma que muestra la figura 15.

($R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 40\Omega$, $R_3 = 120\Omega$, $V_{AC} = 6,0V$).

a) Calcula la intensidad que circula por cada resistencia.

" R_1 " está conectada en serie a " R_2 "; y el conjunto de ambas está conectado en paralelo a " R_3 ". Podemos concluir que la intensidad por " R_1 " y " R_2 " es la misma. La ddp a la que está conectada " R_3 " y el conjunto de " R_1 " y " R_2 " es la misma.

La intensidad por " R_3 " la podemos calcular directamente,

$$I_3 = \frac{V_{AC}}{R_3} \quad I_3 = \frac{6,0V}{120\Omega} \quad \Rightarrow \quad I_3 = 0,050 \text{ A}$$

La intensidad por " R_1 " y " R_2 " la calculamos con la " R_{E12} ". Como están conectadas en serie :

$$R_{E12} = R_1 + R_2 \quad R_{E12} = 20\Omega + 40\Omega \quad \Rightarrow \quad R_{E12} = 60\Omega$$

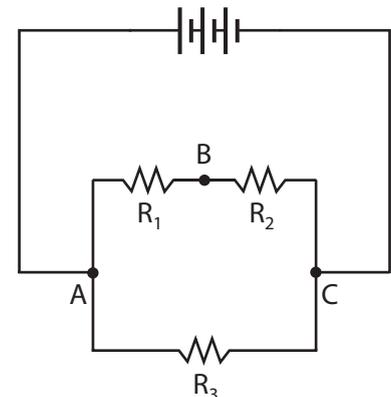


Fig. 15. ejemplo 4.

$$I_{12} = \frac{V_{AC}}{R_{E12}} \quad I_{12} = \frac{V_{AC}}{R_1 + R_2} \quad I_{12} = \frac{6,0V}{20\Omega + 40\Omega} \Rightarrow I_{12} = I_1 = I_2 = 0,10 \text{ A}$$

b) Calcula la intensidad total del circuito

$$I_T = I_{12} + I_3 \quad I_T = 0,050A + 0,10A \Rightarrow I_T = 0,15 \text{ A}$$

c) Calcula la potencia de cada resistencia.

$$P_1 = R_1 \times I_1^2 \quad P_1 = 20\Omega \times (0,10A)^2 \Rightarrow P_1 = 0,20 \text{ W}$$

$$P_2 = R_2 \times I_2^2 \quad P_2 = 40\Omega \times (0,10A)^2 \Rightarrow P_2 = 0,40 \text{ W}$$

$$P_3 = R_3 \times I_3^2 \quad P_3 = 120\Omega \times (0,050A)^2 \Rightarrow P_3 = 0,30 \text{ W}$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \quad P_T = 0,20W + 0,40W + 0,30W \Rightarrow P_T = 0,90 \text{ W}$$

Podemos verificar los resultados utilizando la "R_E",

$$R_{E12} = R_1 + R_2 \quad R_{E12} = 20\Omega + 40\Omega \Rightarrow R_{E12} = 60\Omega$$

$$\frac{1}{R_{E123}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{E12}} \quad \frac{1}{R_{E123}} = \frac{1}{120\Omega} + \frac{1}{60\Omega} = \frac{1+2}{120\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{E123}} = \frac{3}{120\Omega} \Rightarrow R_{E123} = 40\Omega$$

$$I_T = \frac{V_{AC}}{R_{E123}} \quad I_T = \frac{6,0V}{40\Omega} \Rightarrow I_T = 0,15 \text{ A}$$

$$P_T = \frac{(V_{AC})^2}{R_{E123}} \quad P_T = \frac{(6,0V)^2}{40\Omega} \Rightarrow P_T = 0,90 \text{ W}$$

PREGUNTAS

- 1) Define resistencia equivalente.
- 2) ¿Siempre la resistencia equivalente es la resistencia total del circuito?
- 3) Si tenemos tres resistencias conectadas en serie, ¿cómo se determina su resistencia equivalente?
- 4) Si a un conjunto de resistencias, le conectamos otra resistencia en serie, la resistencia equivalente ¿aumenta o disminuye?
- 5) Se conectan dos resistencias diferentes en serie. Responde en cada una de las siguientes afirmaciones cuál es verdadera y cuál es falsa:
 - a) Circula por ellas la misma intensidad de corriente.
 - b) Están conectadas a la misma ddp.
 - c) Disipan la misma potencia.
 - d) La resistencia equivalente es menor al valor de cada una de las resistencias.
- 6) Tenemos una resistencia "R" y queremos sustituirla por otras dos iguales conectadas en serie entre sí, ¿qué valor deben tener esas resistencias para que la intensidad total no se altere?



- 7) Si a una resistencia le conectamos otra en serie, la potencia entregada por el generador, ¿aumenta, disminuye o no varía?
- 8) Si tenemos tres resistencias conectadas en paralelo, ¿cómo se determina su resistencia equivalente?
- 9) Si a un conjunto de resistencias le conectamos otra resistencia en paralelo, la resistencia equivalente ¿aumenta o disminuye?
- 10) Si a una resistencia "R" la queremos sustituir por dos resistencias iguales conectadas en paralelo entre sí, ¿qué valor deben tener esas resistencias para que la intensidad total no se altere?
- 11) Si a una resistencia le conectamos otra en paralelo, la potencia entregada por el generador, ¿aumenta, disminuye o no varía?
- 12) Se tienen cuatro resistencia de valor "R". Indica por lo menos cuatro formas de conectarlas y el valor de la resistencia equivalente para cada caso.
- 13) Se conectan dos resistencias diferentes en paralelo. Responde en cada una de las siguientes afirmaciones cuál es verdadera y cuál es falsa:
 - a) Circula por ellas la misma intensidad de corriente.
 - b) Están conectadas a la misma ddp.
 - c) Disipan la misma potencia.
 - d) La resistencia equivalente es menor al valor de cada una de las resistencias.

PROBLEMAS

- 1) Dos resistencias $R_1 = 8,0\Omega$ y $R_2 = 12,0\Omega$ se conectan a un generador que establece entre los puntos "A" y "B" una ddp de 30V. (fig 16)
 - a) Determina la intensidad por cada resistencia.
 - b) Calcula la ddp entre los extremos de cada resistencia.
 - c) Calcula la potencia de cada resistencia.
 - d) Calcula la potencia total.
- 2) Las resistencias del problema anterior se conectan al mismo generador (la ddp entre "A" y "B" se mantiene constante) según la figura 17.
 - a) Determina la intensidad por cada resistencia.
 - b) Calcula la ddp entre los extremos de cada resistencia.
 - c) Calcula la potencia de cada resistencia.
 - d) Calcula la potencia total.
- 3) Tres resistores se conectan a un generador como muestra la figura 18. $R_1 = R_2 = 6,0\Omega$ y $R_3 = 9,0\Omega$. La intensidad total del circuito es de 3,0A.
 - a) Calcula la intensidad por cada resistencia.
 - b) Calcula la ddp que crea el generador entre sus terminales.
 - c) Calcula la potencia total del circuito.
- 4) En el circuito que se muestra en el dibujo (fig 19) las tres resistencias son iguales, cada una tiene un valor de 60Ω . La diferencia de potencial entre los puntos "A" y "B" es de 18V.
 - a) Calcula la potencia de cada resistencia.
 - b) Calcula la diferencia de potencial que crea el generador entre sus terminales V_{AC} .

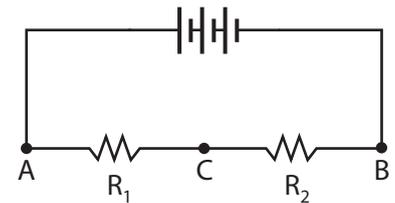


Fig. 16. Problema 1.

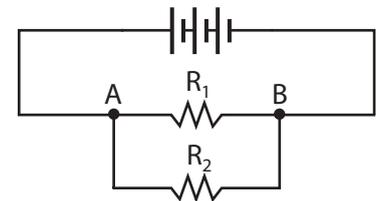


Fig. 17. Problema 2.

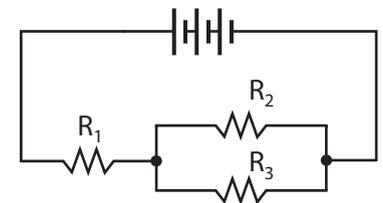


Fig. 18. Problema 3.

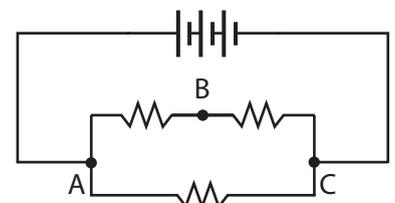


Fig. 19. Problema 4.

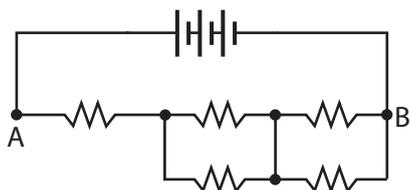


Fig. 20. Problema 5.

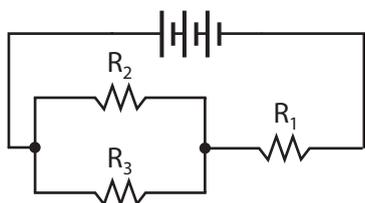


Fig. 21. Problema 6.

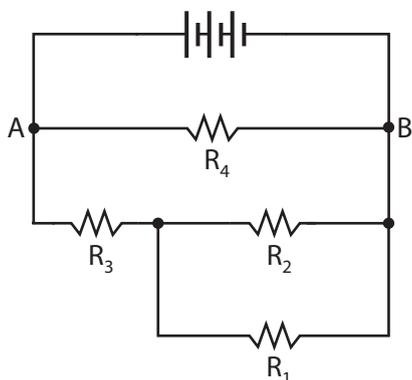


Fig. 22. Problema 7.

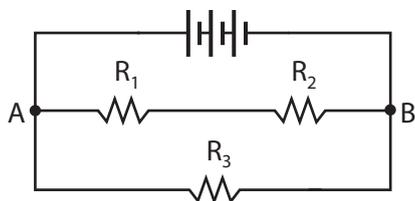


Fig. 23. Problema 8.

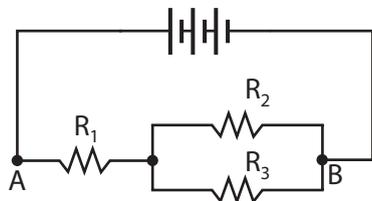


Fig. 24. Problema 9.

5) Se tienen conectadas a un generador todas las resistencias que se muestran en la figura 20. La intensidad total es de 420mA y la ddp entre los puntos "A" y "B" es de 8,0V. Determina la resistencia equivalente del circuito.

6) La potencia de la resistencia $R_1 = 9,0\Omega$ del circuito de la figura 21 es de 81W. La resistencias " R_2 " y " R_3 " son de $15,0\Omega$ y $7,0\Omega$ respectivamente.

- a) Determina la intensidad por cada resistencia.
- b) Calcula la ddp a la que está conectada cada resistencia.
- c) Calcula la potencia de cada resistencia

7) Cuatro resistencias se conectan a un generador que crea entre los puntos "A" y "B" una ddp de 25V (Fig. 22). $R_1 = 12\Omega$, $R_2 = R_3 = 6,0\Omega$, $R_4 = 8,0\Omega$. Determina la intensidad por cada resistencia y la intensidad total.

8) La resistencia R_3 de valor 36Ω del circuito de la fig 23 disipa una potencia de $1,44 \times 10^2$ W. La intensidad total por el circuito es de 5,0A. No se conocen los valores de " R_1 " y " R_2 " pero se saben que son iguales.

- a) Calcula la ddp entre los puntos "A" y "B".
- b) Calcula el valor de " R_1 " y " R_2 ".
- c) Determina la intensidad por cada resistencia.

9) Se tienen tres resistencias conectadas entre los puntos "A" y "B", entre los que existe una ddp de 80V. (fig 24). Se conocen solamente $R_2 = 10\Omega$ y $R_3 = 15\Omega$.

- a) ¿Cuánto debe valer " R_1 " para que la potencia total del circuito sea de 800W?
- b) Calcula la intensidad total.

10) Cuatro resistencias iguales de 180Ω se conectan a un batería de 48V según la fig 25. Verifica mediante cálculos si el circuito tiene más potencia con el interruptor abierto o cerrado.

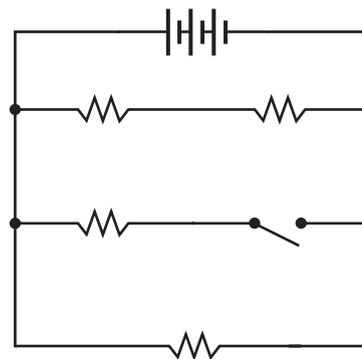


Fig. 25. Problema 10.

11) A un generador se conectan tres resistencias como muestra la fig 26. Cuando el interruptor está abierto la intensidad total es de 200mA. $R_1 = 120\Omega$ y $R_2 = 90\Omega$.

- a) ¿Cuánto vale R_3 si la intensidad total se cuadruplica cuando se cierra el interruptor?
- b) Determina y compara la potencia que disipa el circuito en cada caso.

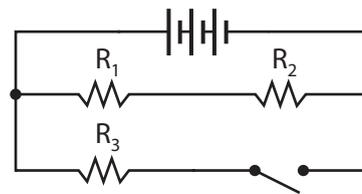


Fig. 26. Problema 11.

12) Tres resistencias de 20Ω se conectan a un generador. Dos de ellas se conectan en paralelo. El conjunto de éstas se conecta en serie a la otra resistencia. Si cada resistencia puede disipar una potencia máxima de 1,0W, determina la ddp máxima que puede tener el generador. Para ese caso determina la intensidad que circula por cada resistencia.

Generadores

Fuerza electro motriz (fem)

Por un circuito eléctrico de corriente continua las cargas (electrones) circulan por el interior del conductor desde el borne negativo al positivo del generador (fig 1), en el mismo sentido que la fuerza eléctrica. En este trayecto, las cargas ceden energía al ambiente en forma de luz, calor o energía mecánica, etc. dependiendo del tipo de receptor.

¿Qué ocurre dentro del generador?

Las cargas son “forzadas” a desplazarse en contra de la fuerza eléctrica. Para lograr esto, el generador realiza un trabajo sobre las cargas, les aporta la energía que luego cederán al ambiente.

Se define fuerza electro motriz de un generador (fem), al trabajo realizado por la fuente por unidad de carga. Se representa con la letra griega Épsilon “ ε ”.

$$\varepsilon = \frac{T}{q}$$

Cabe destacar que la energía que el generador aporta a las cargas proviene de la transformación de otro tipo de energía, dependiendo del tipo de fuente. Por ejemplo, en una pila, la transformación es de energía química a eléctrica; en un dínamo de energía mecánica a eléctrica.

Unidades de fem

La unidad de “ ε ” en el Sistema Internacional de Unidades es $\frac{J}{C}$, como ya habíamos visto se denomina Volt, por lo tanto $[\varepsilon] = V$ (fig 2)

Potencia de un generador

De acuerdo a la definición de potencia, $P = \frac{T}{\Delta t}$.

Si analizamos un generador, como $\varepsilon = \frac{T}{q}$, despejando $T = \varepsilon \times q$



Fig. 1. Distinto tipo de fuentes de corriente continua.

A pesar de denominarse “fuerza electro motriz”, la fem no es una fuerza, sino que tiene unidades de ddp.

Fig. 2.

Si sustituimos, $P_{GEN} = \frac{\epsilon \times q}{\Delta t}$. Como $I = \frac{q}{\Delta t}$, la expresión que nos permite calcular la potencia de un generador resulta:

$$P_{GEN} = \epsilon \times I$$

Resistencia interna

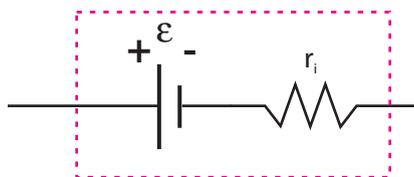


Fig. 3. Una fuente (línea punteada) puede considerarse como una fem y una resistencia interna conectadas en serie.

Como todos los conductores, el generador ofrece cierta oposición al pasaje de las cargas, tiene determinada resistencia que llamaremos "resistencia interna" y representaremos " r_i ". Para interpretar de forma más sencilla el funcionamiento de un generador podemos considerarlo formado por dos componentes conectados en serie (fig 3). Una fuente de fem que suministra energía a las cargas y una resistencia en serie que disipa parte de ésta energía, básicamente en forma de calor. De acuerdo al principio de conservación de la energía, el trabajo que realiza la fuente sobre las cargas (" T ") es la suma de la energía disipada en su interior (" ΔE_{INT} ") más la energía disipada en el resto del circuito (" ΔE_{EXT} ").

$$T = \Delta E_{INT} + \Delta E_{EXT}$$

Por lo tanto la potencia desarrollada por el generador es la suma de las potencias disipadas en su interior y en el resto del circuito.

$$P_{GEN} = P_{INT} + P_{EXT}$$

Si en el circuito circula cierta intensidad " I ", recordando que

$$P_{GEN} = \epsilon \times I \quad \text{y} \quad \text{que} \quad P = R \times I^2$$

$$\epsilon \times I = r_i \times I^2 + R_{EXT} \times I^2$$

Si cancelamos " I " en todos los términos (fig. 4)

$$\epsilon = r_i \times I + R_{EXT} \times I$$

Como $V = R \times I$, podemos escribir la igualdad anterior de la siguiente forma:

$$\epsilon = V_{INT} + V_{EXT}$$

donde V_{EXT} es la ddp entre los terminales del generador y V_{INT} es la ddp en su interior, debida a la resistencia interna.

Ecuación general de un circuito.

Anteriormente obtuvimos que $\epsilon = r_i \times I_T + R_{EXT} \times I_T$

Sacando la intensidad total de factor común:

$$\epsilon = (r_i + R_{EXT}) \times I_T$$

Que se puede escribir también

$$I_T = \frac{\epsilon}{r_i + R_{EXT}}$$

Esta es una ecuación general para analizar circuitos con una sola fuente.

La intensidad total del circuito es la misma que circula por el generador.

Fig. 4.

Curva característica de un generador

Como hemos visto, la curva característica de un componente eléctrico es el estudio gráfico de la relación entre V e I . En este caso estudiaremos la función $V = f(I)$ para un generador (fig 5).

La ddp en los extremos del generador será $V_{EXT} = R_{EXT} \times I_T$ entonces de la expresión $\varepsilon = r_i \times I_T + R_{EXT} \times I_T$

Podemos escribir: $\varepsilon = r_i \times I_T + V_{EXT}$

Despejando $V_{EXT} = -r_i \times I_T + \varepsilon$

Aquí podemos ver que la dependencia funcional de V con I es de primer grado, por lo tanto la curva de la gráfica $V = f(I)$ será una recta (fig 6). La pendiente de la gráfica con signo de menos representa la resistencia interna del generador. El punto de corte de la recta con el eje de las ordenadas (V) representa la fem del generador (fig. 7).

A medida que la intensidad aumenta, la ddp entre los extremos del generador disminuye. Crece el valor $r_i \times I_T$ que es el V_{INT} del generador, por lo que su curva característica será como muestra la figura 6.

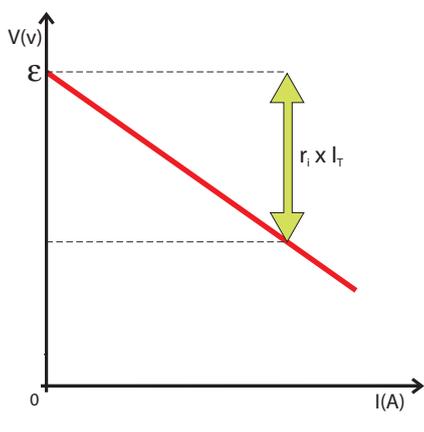


Fig. 6. La curva característica de un generador es una recta de pendiente negativa.

¿Que sucede cuando se “agota” una pila?

La fem de una pila común es 1,5 V, y se mantiene constante independientemente del tiempo de uso. Depende del tipo de reacción química que ocurra en su interior. La resistencia interna de una pila nueva es de algunas décimas de ohm, pero aumenta con el tiempo de uso. Si conectamos una lamparita a una pila “gastada” y medimos la ddp entre sus extremos, obtendremos un valor cercano a 1,0V, lo que nos indica que la pila es inservible. Esta diferencia ente la fem y la ddp entre los terminales de la pila se debe al aumento de su resistencia interna.

Ejemplo 1

La gráfica de la figura 10 muestra la curva característica de un generador.

a) Determina la fem del generador y su resistencia interna.

De la ecuación $V_{EXT} = -r_i \times I_T + \varepsilon$ vemos que si la intensidad es cero la ddp es igual a la fem, esto es

$$V_{EXT} = -r_i \times 0 + \varepsilon \Rightarrow V_{EXT} = \varepsilon$$

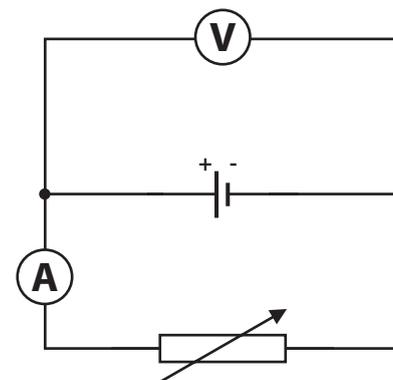


Fig. 5. Circuito para construir la curva característica de un generador.

Relación V-I para un generador

$V=f(I)$ es una función afín, donde “ $-r_i$ ” es la pendiente o coeficiente angular y “ ε ” es el valor de la ordenada en el origen.

Fig. 7.

Medida de la fem de un generador

La fem de un generador es la ddp entre sus bornes cuando la intensidad es cero. Podemos medirla conectando un voltímetro a sus terminales cuando no circula corriente por el circuito.

Fig. 8.

Otro valor característico de una pila o batería es su “Capacidad total” o “Capacidad nominal”, que se expresa en Ampere-hora.

Una batería de 50A.h es capaz de proporcionar una corriente estable de 1A durante 50 horas, o 2A durante 25 horas. La capacidad de una batería es una medida de la carga almacenada en ella. $1A.h = 3600C$

Fig. 9.

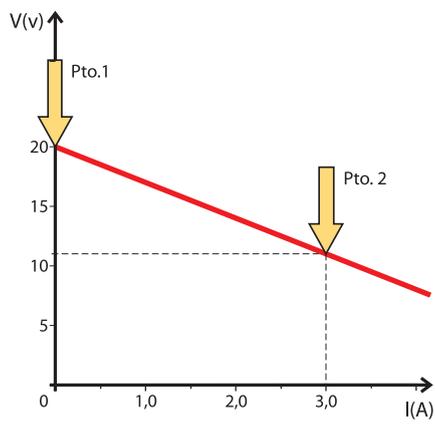


Fig. 10. Ejemplo 1.

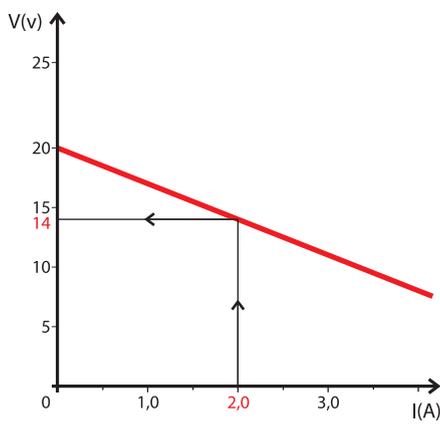


Fig. 11. Ejemplo 1.

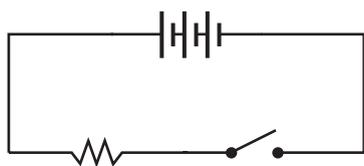


Fig. 12. Ejemplo 2.

Por lo tanto podemos ver en la gráfica qué valor de V correspondiente a $I = 0$ A, es el corte de la recta con el eje de las ordenadas.

$$\epsilon = 20 \text{ V}$$

La resistencia interna está representada por la pendiente de la recta, con signo opuesto.

Para calcularla tomamos dos puntos. Trabajaremos con el punto 1, de coordenadas (20V;0,0A) y el punto 2 de coordenadas (11V;3,0A)

$$\text{pend} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \Rightarrow \text{pend} = \frac{11\text{V} - 20\text{V}}{3,0\text{A} - 0,0\text{A}} \Rightarrow -3,0\Omega$$

La resistencia interna vale $r_i = -(-3,0\Omega) \Rightarrow r_i = 3,0\Omega$

b) Escribe la ecuación $V = f(I)$ del generador:

La ecuación genérica es $V_{\text{EXT}} = -r_i \times I_T + \epsilon$, sustituyendo por los valores correspondientes,

$$V_{\text{EXT}} = -3,0\Omega \times I_T + 20\text{V}$$

c) Calcula la ddp entre los extremos del generador cuando la intensidad es de 2,0A y verifícalo en la gráfica.

Sustituyendo $I_T=2,0\text{A}$ en la ecuación $V_{\text{EXT}} = -3,0\Omega \times I_T + 20\text{V}$,

obtenemos $V = -3,0\Omega \times 2,0\text{A} + 20\text{V} \Rightarrow V_{\text{EXT}} = 14 \text{ V}$

Interpolando en la gráfica verificamos el resultado (fig. 11).

Ejemplo 2

Un batería se conecta a un resistor de 500Ω (fig 12). Se mide la ddp en los extremos del generador cuando el interruptor está abierto y es de 14V. Cuando se cierra el interruptor la intensidad por el resistor es de 25mA. Determina la resistencia interna del generador.

Cuando el interruptor está abierto, la ddp en los extremos del generador es igual a la fem, por lo tanto;

$$\epsilon = V \Rightarrow \epsilon = 14 \text{ V}$$

de la ecuación $\epsilon = (r_i + R) \times I_T$ despejamos r_i

$$r_i = \frac{\epsilon}{I_T} - R$$

$$25\text{mA} = 0,025 \text{ A} \quad r_i = \frac{14\text{V}}{0,025\text{A}} - 500\Omega \Rightarrow r_i = 60 \Omega$$

Ejemplo 3

Un generador que tiene una fem $\varepsilon = 15\text{V}$ y una resistencia interna $r_i = 2,50\Omega$ se conecta a un resistor cuya resistencia eléctrica es $R=10\Omega$

a) Calcula la intensidad por el conductor.

$$\varepsilon = (r_i + R) \times I_T \Rightarrow 15\text{V} = (2,50\Omega + 10\Omega) \times I_T$$

$$I_T = \frac{15\text{V}}{2,50\Omega + 10\Omega} \Rightarrow I_T = 1,2\text{ A}$$

b) Calcula la ddp entre los extremos del resistor.

El resistor está conectado al generador, por lo tanto es la ddp entre los extremos del generador.

$$V_{\text{EXT}} = -r_i \times I_T + \varepsilon \Rightarrow V_{\text{EXT}} = -2,50\Omega \times 1,2\text{A} + 15\text{V} \Rightarrow V_{\text{EXT}} = 12\text{ V}$$

c) Calcula la potencia del generador y la potencia del resistor.

La potencia del generador la calculamos

$$P_{\text{GEN}} = \varepsilon \times I \quad P_{\text{GEN}} = 15\text{V} \times 1,2\text{ A} \Rightarrow P_{\text{GEN}} = 18\text{ W}$$

La potencia del resistor la calculamos

$$P = V \times I \quad P = 12\text{V} \times 1,2\text{ A} \Rightarrow P_{\text{EXT}} = 14\text{ W}$$

d) ¿Por qué hay una variación en la potencia de 4,0W?

Recuerda: $P_{\text{GEN}} = P_{\text{INT}} + P_{\text{EXT}}$

$$P_{\text{INT}} = r_i \times I_T^2 \quad P_{\text{INT}} = 2,50\Omega \times 1,2^2\text{ A}^2 \quad P_{\text{INT}} = 4,0\text{ W}$$

Generadores ideales

Definimos “generador ideal” como aquel donde no se disipa energía en forma de calor en su interior. Para que esto suceda su resistencia interna tiene que ser cero. Por lo tanto la ddp entre sus bornes es constante, no dependiendo de la intensidad que circule por él (fig 13).

En la práctica podemos considerar “ideal” a un generador real en el que la diferencia entre la fem y la ddp entre sus terminales es pequeña.

Recordando que $V_{\text{EXT}} = -r_i \times I_T + \varepsilon$

la diferencia entre la fem y la ddp entre las terminales del generador se puede expresar $\varepsilon - V_{\text{EXT}} = r_i \times I_T$

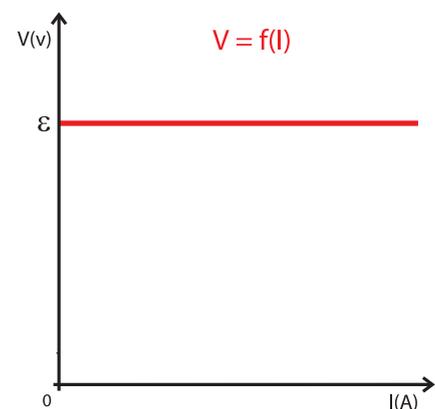


Fig. 13. Curva característica de un generador ideal. Para cualquier valor de intensidad, la ddp en los extremos del generador es la misma.

Por lo tanto, para que un generador real tenga un comportamiento eléctrico cercano a uno ideal, el producto " $r_i \times I_T$ " debe ser lo más pequeño posible. Esto se logra utilizando generadores de baja resistencia interna y/o trabajando con circuitos por los que circule poca intensidad.

PREGUNTAS

- 1) ¿Qué función cumple un generador?
- 2) Define fem de un generador.
- 3) "Fem" es una sigla, ¿qué significa?
- 4) Indica el sentido del movimiento de la cargas eléctricas por el exterior e interior del generador.
- 5) ¿Cómo se calcula la potencia de un generador?
- 6) ¿Qué es la resistencia interna de un generador?
- 7) ¿A qué llamamos ddp interna?
- 8) ¿Cómo se puede determinar la fem de un generador a partir de su curva característica?
- 9) ¿Cómo se puede determinar la resistencia interna de un generador a partir de su curva característica?
- 10) ¿En qué caso la ddp en los extremos de un generador es igual al valor de su fem?
- 11) ¿Puede la ddp entre los extremos de un generador ser mayor que su fem?
- 12) Si a un generador real le conectamos dos conductores, uno de mayor resistencia que el otro, ¿en qué caso la ddp entre sus extremos será mayor?
- 13) ¿Qué características debe tener un generador para considerarlo ideal?
- 14) Esquematiza la curva característica de un generador ideal.
- 15) ¿Por qué al darle arranque a un auto con las luces encendidas, éstas disminuyen su luminosidad?

PROBLEMAS

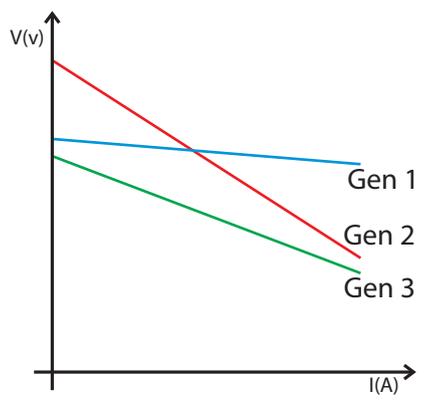


Fig. 14. Problema 2.

- 1) Una pila de 1,5V tiene una resistencia interna de $0,20\Omega$. Se le conecta un conductor de $R = 4,8\Omega$.
 - a) Calcula la intensidad por el conductor.
 - b) Calcula la ddp entre los extremos del conductor.
- 2) La figura 14 muestra curvas características de diferentes generadores, graficadas en el mismo par de ejes. Indica y justifica cuál generador:
 - a) Tiene mayor fem.
 - b) Tiene menor fem.
 - c) Tiene mayor resistencia interna.
 - d) Tiene menor resistencia interna.

- 3) A un generador de $\varepsilon = 8,0V$ y $r_i = 3,0\Omega$ se conecta una resistencia de 15Ω .
 - a) Calcula la intensidad por la resistencia y la ddp entre sus extremos.
 - b) Resuelve lo mismo que en el caso anterior pero suponiendo que el generador es ideal.
- 4) A una batería de $\varepsilon = 12V$ y $r_i = 4,0\Omega$ se conectan dos resistencias en serie, $R_1 = 18\Omega$ y $R_2 = 9,0\Omega$.
 - a) Calcula la intensidad total en el circuito.
 - b) Calcula la intensidad por cada resistencia.
 - c) Calcula la ddp entre los extremos de cada resistencia.
- 5) Resuelve lo mismo que en el problema anterior pero suponiendo que las resistencias están conectadas en paralelo.
- 6) Un generador crea entre sus terminales una ddp de $24V$ cuando circula por el circuito una intensidad de $4,0A$. Internamente disipa una potencia de $48W$. Calcula:
 - a) Su resistencia interna.
 - b) Su fem.
 - c) La potencia que disipa el circuito.
 - d) La potencia del generador.
- 7) La figura 15 muestra una tabla de datos obtenidos para construir la curva característica de un generador.
 - a) Construye la curva característica del generador.
 - b) ¿Es un generador ideal o real? Justifica.
 - c) Determina la fem del generador.
 - d) Calcula la resistencia interna del generador.
 - e) Calcula la potencia del generador cuando la intensidad que circula por él es de $5,0A$.
- 8) Tres resistores de 20Ω se conectan a un generador de $\varepsilon = 12V$ y resistencia interna $r_i = 5,0\Omega$ según la figura 16. Calcula:
 - a) La intensidad por cada resistor.
 - b) La potencia de cada resistor.
 - c) La potencia del generador.
- 9) Resuelve lo mismo que en el problema anterior pero suponiendo que el mismo generador y las mismas resistencias se conectan según la figura 17.

V (V)	I (A)
14,0	0,0
12,8	1,0
11,0	2,5
10,2	3,2
9,2	4,0
7,4	5,5
6,8	6,0

Fig. 15. Problema 7.

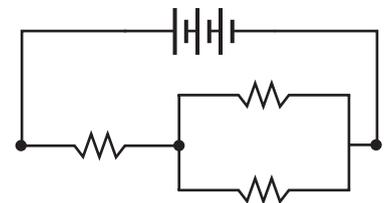


Fig. 16. Problema 8.

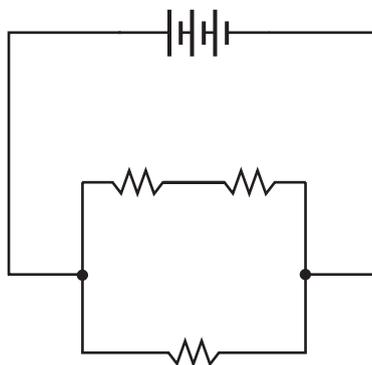
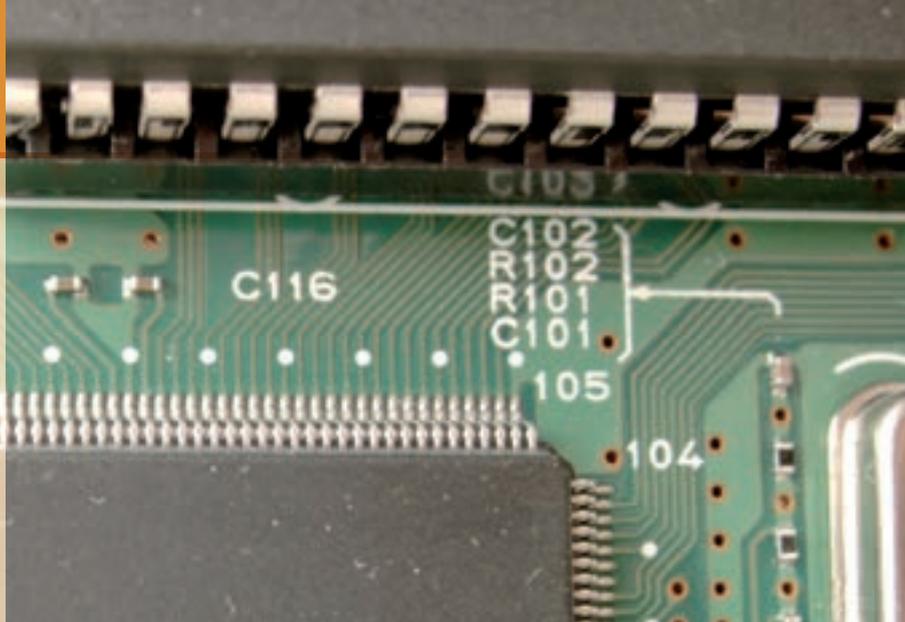


Fig. 17. Problema 9.

Circuitos lógicos



Introducción

El lenguaje que usamos en forma cotidiana está constituido por sentencias y proposiciones que se relacionan entre sí de formas diversas. Otro tipo de lenguaje es el matemático, que la ciencia ha adoptado para sintetizar y universalizar sus conclusiones.

Para ello se emplea la lógica matemática, que puede considerarse como la forma de construir un razonamiento a partir de proposiciones que sólo pueden ser verdaderas o falsas. La lógica matemática estudia las diversas formas en que es posible asociar proposiciones simples para obtener proposiciones compuestas. Los intentos para alcanzar estos propósitos se remontan a la época de Aristóteles. Su forma actual es fruto del trabajo de Leibniz en el siglo XVIII, que empleó el álgebra como modelo de lenguaje aplicable al estudio de relaciones de orden lógico. A mediados del siglo XIX, el matemático irlandés George Boole (fig. 1) desarrolló un tipo de álgebra para analizar proposiciones lógicas según su categoría de verdadero y falso.



Fig. 1. George Boole, (1815-1864). Matemático y filósofo irlandés, creador del álgebra de Boole, base de los lenguajes de programación computacionales.

Su importancia en la actualidad radica en que la electrónica digital está construida utilizando modelos que siguen leyes análogas al álgebra de Boole (fig. 2).

Álgebra de las proposiciones o álgebra de Boole.

Una proposición es una frase de la que podemos afirmar que es falsa o verdadera, nunca ambas cosas a la vez. Con las proposiciones pueden realizarse operaciones como la conjunción (y), la disyunción (o) y la negación (no). Se simbolizan \wedge , \vee y \neg respectivamente.

De estas operaciones obtenemos las proposiciones compuestas. Para saber si estas son verdaderas o falsas se emplean tablas de verdad. En dichas tablas se asigna a cada uno de los componentes de una proposición los valores posibles que puede adoptar (verdadero-falso, alto-bajo, 0-1) y se obtiene de este modo el valor correspondiente de todas las combinaciones posibles.

Veamos un ejemplo:

proposición p : me gusta Pink Floyd

proposición q : me gusta Buitres.

$p \wedge q$: me gusta Pink Floyd y Buitres.

$p \wedge q$ solo será verdadera si p y q lo son, para todos los demás casos será falsa. Esto lo podemos expresar en la siguiente tabla.

p	q	$p \wedge q$
V	V	V
V	F	F
F	F	F
F	V	F

Fig. 2.

Electrónica analógica y digital

La electrónica se puede dividir en dos grandes ramas: la electrónica analógica o lineal y la electrónica digital o no lineal. (Algunos autores citan una tercer categoría que es la electrónica mixta, que está formada por ambas). La diferencia entre ellas es el tipo de señal que manejan. La señal usualmente es una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito.

Si la señal es analógica la ddp puede tomar cualquier valor entre cero y el valor que tomemos como amplitud. Los valores posibles son continuos.

La señal es digital cuando los valores que puede tomar la ddp son discretos. Los valores se dan a "saltos", por ejemplo pueden valer 0,0V y 9,0V, pero no 2,3V.

Veamos esto con un ejemplo: imaginemos que nuestro circuito es una batería de 9,0V, una lámpara y un interruptor (fig 3a). Los posibles valores de ddp entre los extremos de la lámpara son solamente dos: "0,0V" si el interruptor está abierto y "9,0V" si el interruptor está cerrado. En este caso la señal es digital o discreta.

En la fig 3b tenemos una lámpara conectada a un resistor variable conectado como potenciómetro (de forma similar a cuando estudiamos la curva característica de la lámpara). En este caso la ddp puede tener cualquier valor entre 0,0V y 9,0V dependiendo de la posición del cursor del resistor variable. En este caso la señal es continua o analógica.

Circuitos lógicos

Un circuito lógico es aquel que proporciona a su salida una señal que depende de la señal aplicada en su entrada.

Tomemos nuevamente como ejemplo el circuito formado por la lámpara, el interruptor y la batería. Consideramos como entrada al interruptor y salida a la lámpara. El estado de la lámpara (encendida o apagada) depende del interruptor. Si el interruptor está abierto la lámpara está apagada; si el interruptor está cerrado la lámpara está encendida (Fig 4a y 4b). En términos generales, para un estado del interruptor (abierto o cerrado), puede existir un único estado de la lámpara (encendida o apagada).

Es característico de un dispositivo lógico electrónico que la señal sean valores de ddp. Los sistemas digitales en la actualidad trabajan sólo con dos valores discretos. Por esto se los denomina sistemas binarios.

En los circuitos lógicos, tanto la señal de las entradas como la señal de la salida pueden tener dos estados posibles. Se los denomina de diferentes formas: alto-bajo, verdadero-falso, 0-1. Los valores de ddp para los estados alto y bajo son arbitrarios. Los más comunes son los que le asignan valor "1" (alto) cuando el voltaje está entre 2,4V y 5,0V, siendo el valor característico 3,5V y valor "0" (bajo) cuando el voltaje está entre 0,0V y 0,4V, donde 0,2V es el valor característico.

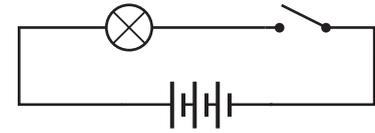


Fig. 3a. Circuito formado por lámpara, interruptor y batería. La ddp en los extremos de la lámpara sólo puede ser 0V o 9V.

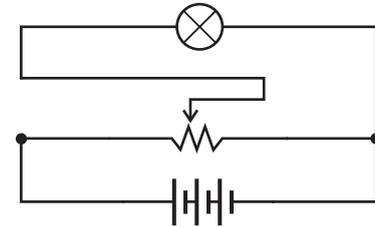


Fig. 3b. Circuito formado por lámpara, resistor variable y batería. La ddp en los extremos de la lámpara puede ser cualquier valor entre 0V y 9V.

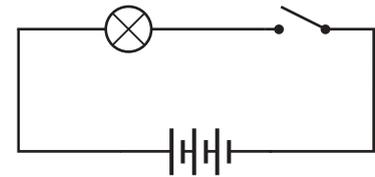


Fig. 4a. Si el interruptor está abierto, el único posible estado de la lámpara es apagada.

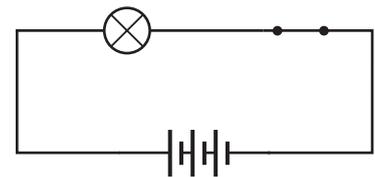


Fig. 4b. Si el interruptor está cerrado el único estado posible es encendido.

Otros estados pueden ser:

- válvula abierta o cerrada, si es un sistema hidráulico.
- abierto o cerrado, si es un interruptor de corriente,
- funcionando o parado, si es un motor,
- en corte o saturado, si es un transistor,
- encendida o apagada, si es una lámpara,
- existe o no existe, si es un campo magnético o eléctrico.
- cargado o descargado, si es un capacitor

Compuertas lógicas

Denominaremos compuertas lógicas a los circuitos que pueden realizar operaciones lógicas.

Producen una señal de salida lógica "1" o "0" dependiendo de la señal lógica "1" o "0" que adopten las entradas. A las compuertas les daremos el nombre de la operación que realicen. Estudiaremos las compuertas AND (y), OR (o) y NOT (no).

Desarrollaremos en forma sencilla las características de cada compuerta citada y veremos para cada una un símil con interruptores, lámpara y generador. En la mayoría de los casos, los dispositivos reales son circuitos integrados, que en su interior tienen muchos componentes, como transistores y diodos. Estudiaremos el comportamiento de cada compuerta lógica como si fuera una "caja negra", con terminales que salen hacia el exterior, que reconoceremos como entradas y salida. No nos plantaremos su análisis a partir de las propiedades de cada uno de sus componentes. La característica más importante que diferencia una compuerta lógica de otra, es la relación que vincula la señal que obtenemos en la salida con las señales en las entradas.

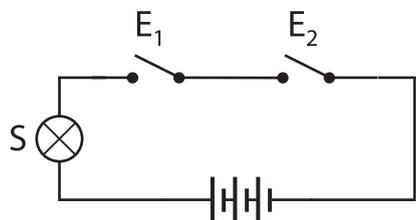


Fig. 5a. Circuito con lámparas e interruptores, La lámpara solo enciende si los interruptores 1 y 2 están cerrados. Se comporta de forma similar a una compuerta and.

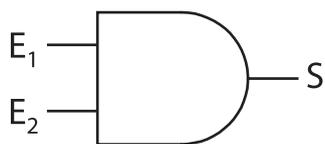


Fig. 5b. Símbolo de la compuerta AND.

¿Cómo saber cuántas combinaciones diferentes en las entradas son posibles?

Cada entrada tiene dos posibles valores, y si tenemos "n" entradas, las posibilidades serán:
 Cantidad de combinaciones = 2^n
 (si tenemos dos entradas, $2^2=4$, existirán cuatro posibilidades distintas).

Fig. 6.

E1	E2	S
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fig. 7. Tabla de verdad para la compuerta lógica AND. La salida es "1" sólo si ambas entradas son "1".

Compuerta AND (y)

En la figura 5a se muestra un circuito formado por dos interruptores en serie, un generador y una lámpara. Consideraremos a los interruptores como las entradas y a la lámpara como la salida.

Si un interruptor esta cerrado, esta en el valor "1" (alto) y si está abierto en el valor "0" (bajo).

Para la lámpara consideramos valor "1"(alto) si está encendida y valor "0"(bajo) si está apagada.

Es claro que para que la lámpara encienda, es decir, en estado "1", los dos interruptores deben estar en valor "1". Para los demás casos la lámpara permanecerá apagada, en valor "0".

La lámpara se enciende si el interruptor 1 está cerrado **y** el interruptor 2 está cerrado.

La compuerta AND tiene sólo una señal alta "1" en la salida si las entradas E1 y E2 tienen señal alta "1". En la figura 5b se muestra el símbolo de la compuerta lógica AND.

Representemos lo dicho anteriormente con una tabla de verdad (fig. 7).

Ejemplo 1

Pensemos en un ascensor, para entrar a él hay que abrir dos puertas, una que se encuentra en cada piso, y otra que está en el ascensor. Por seguridad, el motor del ascensor se pondrá en marcha solamente cuando las dos puertas estén cerradas y alguien pulse el botón en uno de los pisos.

Si tenemos un sensor en cada puerta y otro en conexión con los botones, el motor se pondrá en marcha sólo cuando las tres señales de entrada sean altas. (El sistema real no es tan sencillo, también el botón elegido, tendría que bloquear a los demás al pulsarlo y contener la información del piso donde está situado). El dispositivo lógico que gobierne el funcionamiento del motor puede ser una compuerta AND con tres entradas (cada una conectada a una de las puertas y al botón)

En la figura 8 se muestra un esquema del dispositivo:

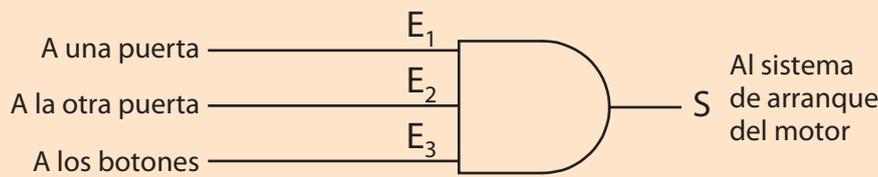


Fig. 8. Ejemplo 1

En la figura 9 se muestra la tabla de verdad con 8 posibilidades diferentes ($2^3 = 8$). Vemos que la salida sólo será alta, (el motor funciona), cuando todas las señales sean altas, o sea cuando las dos puertas estén cerradas y el botón oprimido.

E1	E2	E3	S
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Fig. 9. Tabla de verdad de una compuerta lógica AND de tres entradas.

Compuerta lógica OR (o)

Ahora analicemos el circuito formado por dos interruptores en paralelo, una lámpara y un generador (fig. 10). De acuerdo a la conexión de los interruptores, si uno cualquiera o ambos están cerrados (estado alto, "1"), la lámpara encenderá, (estado alto, "1"). Sólo si los dos interruptores están abiertos (estado bajo, "0"), la lámpara permanecerá apagada (estado bajo, "0").

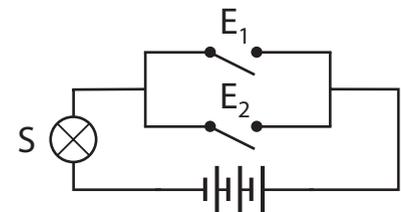


Fig.10. Circuito formado por interruptores en paralelo, con lámpara y generador. Si uno de los interruptores está cerrado o lo están los dos la lámpara encenderá.

La lámpara se enciende si el interruptor 1 está cerrado **y/o** el interruptor 2 está cerrado.

De forma similar se comporta una compuerta OR (fig. 11).

La señal de la salida será alta si en una de las entradas o en las dos entradas la señal es alta.

La tabla de verdad de esta compuerta es la que se muestra en la figura 12.

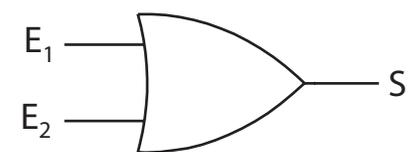


Fig.11. Símbolo de la compuerta lógica OR.

E1	E2	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Fig. 12. Tabla de verdad de una compuerta lógica OR. La salida es "1" si una de las entradas es "1" o las dos entradas son "1".

E1	E2	E3	S
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Fig.14. Tabla de verdad de una compuerta lógica OR de tres entradas. Alcanza con que una de las entradas sea "1" para que la señal de salida sea "1".

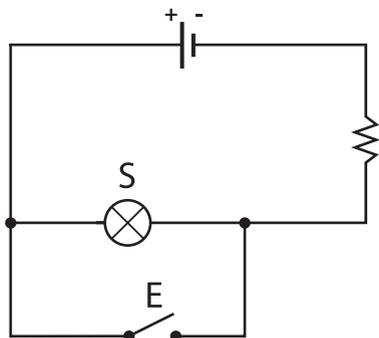


Fig. 15. La lámpara se enciende si el interruptor está abierto y se apaga al cerrarlo.

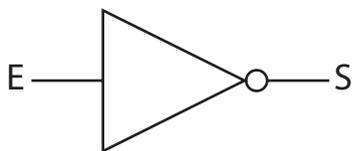


Fig. 16. Símbolo de una compuerta NOT.

E	S
0	1
1	0

Fig. 17. Tabla de verdad de una compuerta NOT.

Ejemplo 2.

Si tenemos alarma en una casa, esta debe estar conectada a diferentes puntos de ingreso, como la puerta de entrada, la puerta trasera y una puerta en la azotea (pensemos sólo en estas tres). En cada uno de estos lugares podríamos instalar un sensor, de tal manera que genere una señal alta cuando se abre o se intenta forzar una de las puertas. Con que uno de los sensores se ponga en alto, deberíamos obtener una señal alta de salida, que podría ser una chicharra que suena. Es absurdo que suene la alarma sólo si se fuerzan las tres puertas a la vez, pero si esto ocurre también debería activarse.

El circuito lógico que nos sirve en esta situación es una compuerta lógica OR. En la figura 13 se aprecia un esquema del dispositivo y en la figura 14 la tabla de verdad correspondiente.

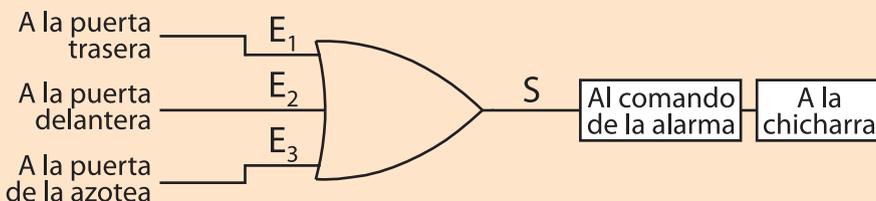


Fig.13. Cada uno de los sensores se conecta a una de las entradas de la compuerta OR. Si uno o más de ellos tiene un estado alto (una de las entradas de la casa se abre), la salida conectada a la alarma recibe una señal alta que activa el sonido en la chicharra.

Compuerta NOT (no)

La compuerta NOT tiene una única entrada. Se caracteriza por que se obtiene en la salida una señal que es la negada de la señal de entrada. Por lo tanto si la entrada recibe una señal alta ("1"), la señal de salida será baja ("0"). Si por el contrario, la entrada está en un valor alto ("1"), la salida será baja ("0"). El circuito de la figura 15 se comporta de las misma forma. Si el interruptor está abierto (bajo, "0") la corriente circula por la lámpara y esta se enciende (alto, "1"). Si el interruptor está cerrado (alto, "1"), la corriente circula por él y es prácticamente nula por la lámpara, que permanece apagada (bajo, "0")

La lámpara se enciende si el interruptor **NO** está cerrado.

La tabla de verdad de esta compuerta es la que se muestra en la figura 17.

Ejemplo 3.

Un sistema de luces de emergencia, funciona de tal forma que cuando se corta el suministro de energía de UTE, se activa y enciende las luces necesarias para mantener la seguridad del lugar. Seguramente en tu liceo existen estos dispositivos. Funcionan con una fuente alternativa, que generalmente es una batería de 12V. La entrada está conectada a algún sensor que recibe una señal alta de la red de UTE. Cuando esta se corta, el sensor pasa a un valor bajo. Si está conectado a una compuerta NOT, la señal de salida será alta, y encenderá las luces de emergencia. La figura 18 muestra un esquema de esta situación.

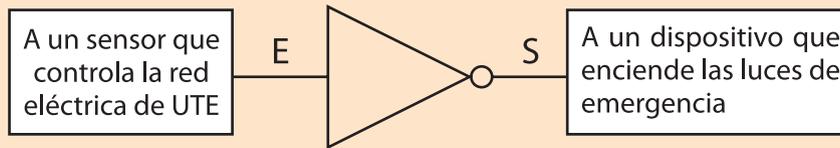


Fig.18. Si el sensor de entrada detecta un corte en la red de UTE (estado bajo), se activa el dispositivo que enciende las luces de emergencia (estado alto).

PREGUNTAS

- 1) Indica y justifica si las siguientes proposiciones son lógicas o no.
 - a) Hoy es lunes.
 - b) Quizás mañana vaya a tu cumpleaños.
 - c) Hola, ¿cómo se encuentran?
 - d) El número 6 es primo.
- 2) ¿Cuáles fueron los aportes de Boole al álgebra y que importancia tienen en el área de la electrónica?
- 3) ¿Cómo se pueden clasificar las distintas ramas de la electrónica?
- 4) ¿Qué significa que en electrónica digital se trabaje con señales discretas?
- 5) ¿Qué es un circuito lógico?
- 6) En el capítulo se menciona el circuito de la figura 18 como ejemplo de un circuito lógico elemental. Si dejamos la lámpara encendida mucho tiempo y las pilas se van "agotando", ¿sigue siendo válido el ejemplo?
- 7) Una calculadora es un dispositivo electrónico digital ¿Cuáles son sus terminales de entrada? ¿Cuál es su salida?
- 8) ¿Qué son los sistemas binarios?
- 9) ¿A qué denominamos compuertas lógicas?

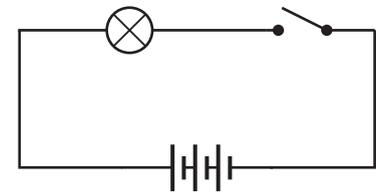


Fig.18. Pregunta 6.

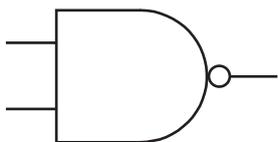


Fig.19a. Problema 4. Símbolo de una compuerta NAND.

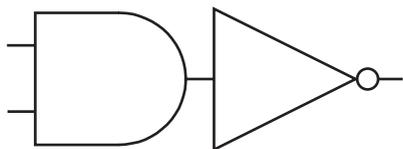


Fig.19b. Problema 4. El equivalente a la compuerta NAND son una compuerta AND y una conectada NOT a la salida de la AND.

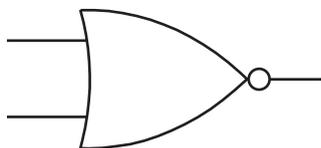


Fig.20a. Problema 5. Símbolo de una compuerta NOR.

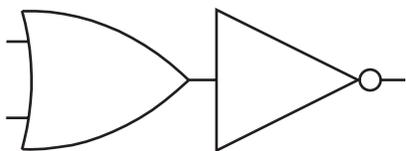


Fig.20b. Problema 5. El equivalente a la compuerta NOR son una compuerta OR y una conectada NOT a la salida de la OR.

- 10) ¿Qué significa que abordaremos el estudio de las características de una compuerta lógica como una caja negra?
- 11) ¿Cuáles son los posibles estados de las entradas y la salida de una compuerta lógica?
- 12) Si una compuerta lógica tiene 4 entradas, ¿cuántas combinaciones posibles diferentes pueden existir en las entradas?
- 13) ¿Qué es una tabla de verdad? ¿Qué tipo de información proporciona?
- 14) ¿Qué características tiene una compuerta lógica AND?
- 15) ¿Qué características tiene una compuerta lógica OR?
- 16) ¿Qué características tiene una compuerta lógica NOT?
- 17) Representa con un dibujo el símbolo de cada compuerta lógica.
- 18) Explica con lámparas, interruptores y generadores el comportamiento de las compuertas lógicas AND, OR y NOT.
- 19) Investiga qué aparatos funcionan utilizando compuertas lógicas o dispositivos digitales.

PROBLEMAS

- 1) Se tienen dos tanques donde se guarda agua para refrigeración de una fábrica, por lo que es muy importante que ninguno de ellos se vacíe. Se coloca un sensor en cada tanque que da una señal alta cuando el nivel del agua desciende más de una altura límite. ¿Qué tipo de compuerta lógica podemos usar para obtener una señal alta cuando exista el riesgo de que alguno de los tanques se vacíe?
- 2) Una montaña rusa tiene carros con 6 asientos. En cada cinturón se coloca un sensor capaz de dar una señal alta cuando está asegurado. ¿Qué dispositivo lógico se podrá usar para que el carro pueda ser largado solamente si todos los cinturones están seguros? (el carro sólo se usa cuando se completan todos los asientos)
- 3) Un sensor térmico da una señal alta cuando la temperatura de un sistema de refrigeración es menor a -18°C . Si queremos que se encienda una luz cuando la temperatura supera los -18°C , ¿qué compuerta lógica podemos emplear?
- 4) Una compuerta lógica NAND es una compuerta lógica que niega la señal de la salida de una compuerta AND. (fig 19a y 19b.)
 - a) Construye la tabla de verdad de dicha compuerta.
 - b) Piensa en una posible aplicación de esta compuerta lógica.
- 5) Una compuerta lógica NOR es una compuerta lógica OR que tiene negada la señal de su salida.(fig 20a y 20b.)
 - a) Construye la tabla de verdad de dicha compuerta.
 - b) Piensa en una posible aplicación de esta compuerta lógica.

6) Construye las tablas de verdad de las combinaciones de compuertas lógicas que se muestran en la figura 21 a, b, c y d.

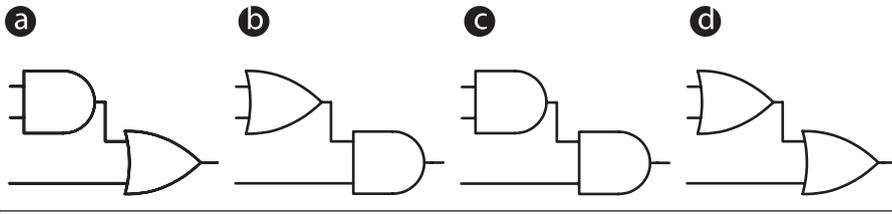


Fig.21. Problema 6

7) Otra compuerta lógica (que no planteamos en el capítulo) es la XOR. Esta compuerta da una señal alta si tiene las entradas en un mismo estado (todas bajas, o todas altas). Su símbolo es el que se muestra en la figura 22.

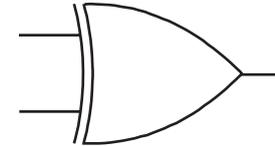


Fig.22. Problema 7. Compuerta lógica XOR.

- a) Construye su tabla de verdad.
- b) Piensa en una posible aplicación de esta compuerta lógica.

8) Verifica mediante tablas de verdad las siguientes afirmaciones (Fig. 23):

- a) Una compuerta NOR es equivalente a una compuerta AND con sus entradas negadas.
- b) Una compuerta NAND es equivalente a una compuerta OR con sus entradas negadas.
- c) Una compuerta OR es equivalente a una compuerta NAND con sus entradas negadas.
- d) Una compuerta AND es equivalente a una compuerta NOR con sus entradas negadas.

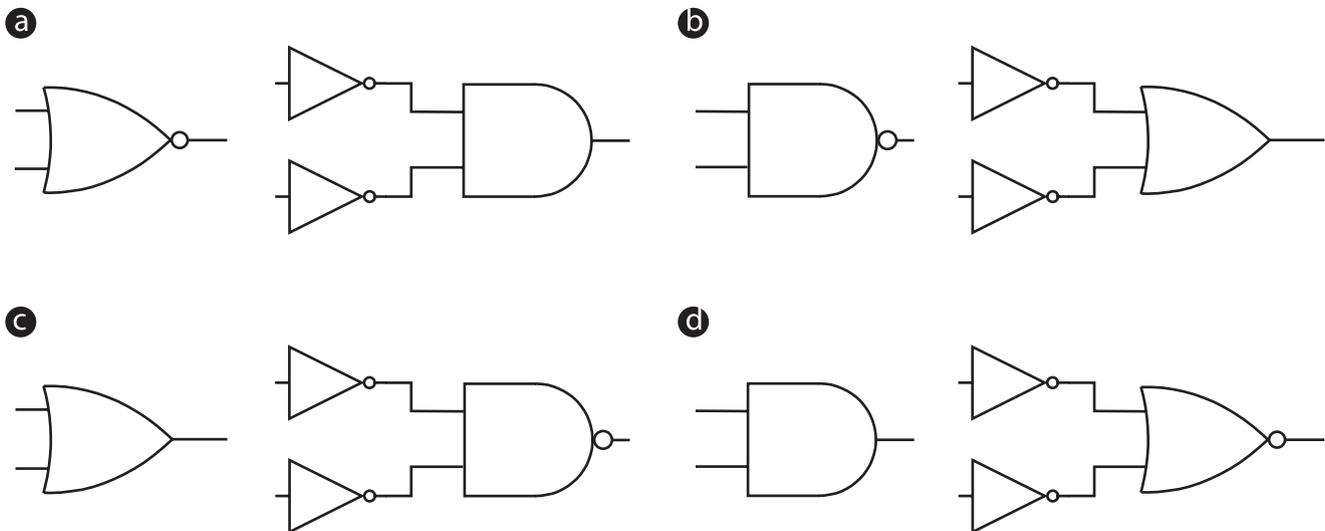


Fig.23. Problema 8

Campo magnético



Fig.1. La magnetita es un óxido de hierro con propiedades magnéticas naturales.

El uso de la "piedra magnética" como brújula se adjudica a los chinos. Se dice que ellos utilizaban una especie de brújula en el siglo XII a.C., pero hasta el final del siglo XII d. C. no se tiene una clara referencia a una brújula marítima.

Fig.2.



Fig.3. William Gilbert (1544-1603), Estudió en Cambridge y, después de viajar por el continente europeo, ejerció como médico en la corte de la reina Isabel I. Fue uno de los fundadores de la ciencia del magnetismo. Su *Magnete Magnetisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physiologia Nova*, (conocido como *De Magnete*), fue publicado en 1600 y puede considerarse como uno de los trabajos claves de la revolución científica.

Introducción

El magnetismo es uno de los pilares que sostienen la compleja estructura de la ciencia y la tecnología modernas. Es una de las teorías que explican el funcionamiento de muchos de los aparatos e instrumentos de uso cotidiano: brújulas, grabadoras, televisores y, en general, la tecnología de la información magnética. La electricidad y el magnetismo son aspectos diferentes de un mismo fenómeno, pero la relación entre ambos no se comenzó a investigar en forma sistemática hasta el siglo XIX.

La curiosidad y los estudios sobre el magnetismo se remontan a la antigüedad clásica. Tales de Mileto, hacia el siglo VI a. C., habla ya del imán en forma detallada y Sócrates plantea que la magnetita (Fig. 1), no sólo atrae anillos de hierro sino que les imparte un poder similar para atraer otros anillos y formar cadenas. Este fenómeno es el que ahora conocemos como magnetización por inducción. No menor fue el interés de los chinos por el magnetismo, que los llevó a la invención de la brújula. (Fig. 2)

El camino de la moderna teoría del magnetismo está marcado por los siguientes grandes científicos: William Gilbert, René Descartes, Charles Coulomb, Michael Faraday y James Clerk Maxwell.

Lo que podríamos llamar la etapa precientífica del magnetismo culmina con la aparición de la importante figura de William Gilbert. Fue de los primeros "filósofos naturales" que hizo hincapié en el método experimental y que lo utilizó para ahondar en el conocimiento del magnetismo. En su obra "*De Magnete*" registró (entre otras cosas) que la atracción se concentra en los extremos de la magnetita. Además detalla cómo se pueden hacer imanes por medio de tres métodos: tocando objetos imantados; por deformación plástica; y fabricando barras de hierro, calentándolas y dejándolas enfriar. De hecho, estos métodos fueron los que se usaron hasta 1820.

Gilbert era un gran científico experimental, poco afecto a la especulación. (Fig. 3) Sin embargo, en el sexto y último libro de "*De Magnete*" presenta sus teorías y trata de encuadrar el magnetismo en el sistema de Copérnico. Uno de sus éxitos fue deducir las propiedades de atracción de polos opuestos. El otro, que la Tierra se comporta como si tuviera un imán en su interior.

René Descartes (1596-1659), gran filósofo y matemático francés, no toma muy en cuenta los experimentos pero introduce de lleno el racionalismo en la ciencia. La primera teoría del magnetismo se presenta en su obra "Principia". En ella considera que la existencia de imanes permanentes deriva del magnetismo terrestre.

Descartes adopta a las matemáticas como el lenguaje de la ciencia, marcando el fin de la influencia metafísica en la descripción del universo.

Galileo ya lo había dicho en 1590: **"La filosofía está escrita en un gran libro siempre abierto ante nuestros ojos, pero uno no puede entenderlo sin entender su lenguaje y conocer los caracteres en que está escrito, esto es, el lenguaje matemático."**

Este nuevo punto de vista estimula a que los científicos cuantifiquen sus observaciones. Como ejemplo de ello, el monje Marsenne, un amigo de Descartes, realizó mediciones a partir de las observaciones de Gilbert.

Charles Coulomb (1736-1806), realizó experimentos cruciales con la balanza de torsión para probar la ley de interacción entre cargas y modificó la teoría de los fluidos que reinaba hasta ese entonces.

La fuerza eléctrica, la magnética y la gravitatoria se distinguen de las fuerzas de contacto, (fricción o un simple empujón), en el hecho que actúan aún cuando los cuerpos no se toquen. De esta manera se introduce la noción de acción a distancia. En la concepción actual se utiliza el concepto de "campo" para su descripción.

La unión del magnetismo y la electricidad

Desde mucho tiempo atrás se notaba que la brújula de un barco cambiaba de dirección cuando los rayos en una tormenta caían cerca de este. Sin embargo, fue a principios del siglo XIX cuando se empezó a investigar la influencia de la electricidad sobre una aguja magnética.

Estos experimentos fueron estimulados por la invención de la pila voltaica alrededor de 1800. No fue sino hasta 1820, cuando el físico Hans Christian Oersted notó que la aguja magnética se movía cuando pasaba corriente por un alambre paralelo a la misma. Esto resultó ser sorprendente, pues nunca se había esperado una fuerza transversal.

André Marie Ampère (Fig. 4) sugirió que el magnetismo era originado por corrientes eléctricas internas y que éstas fluían perpendicularmente al eje del imán.

Michael Faraday (Fig. 5), uno de los grandes genios de la física, en 1813, a los 23 años fue contratado en la Royal Institution. Su gran paciencia y habilidad experimental, lo llevó a una vida de descubrimientos casi sin paralelo en la historia de la ciencia. En 1831 descubrió la inducción electromagnética. Su capacidad de visualizar las líneas de fuerza le permitió elaborar un modelo sencillo con el que explicó las interacciones magnéticas.



Fig.4. André-Marie Ampère. Matemático y físico. Nació en París el 20 de enero de 1775 y falleció en Marsella, 10 de junio de 1836. En 1814 fue elegido miembro de la Academia de Ciencias de Francia, y en 1819, profesor de Filosofía en la Facultad de Letras de París. En 1822 estableció los principios de la electrodinámica. En 1827 publicó su Teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos, donde expuso la famosa ley que hoy lleva su nombre.



Fig.5. Michael Faraday. Físico y químico Inglés. Nació en Londres el 22 de septiembre de 1791 y falleció el 25 de agosto de 1867. Estudió de forma determinante el electromagnetismo y la electroquímica. Logró demostrar la relación existente entre los fenómenos magnéticos y los eléctricos, fundamento de transformadores, motores y generadores (entre otros).



Fig.6. James Clerk Maxwell Físico escocés. Nació en Edimburgo el 13 de junio de 1831 y falleció en Cambridge el 5 de noviembre de 1879. Conocido principalmente por haber desarrollado un conjunto de ecuaciones que expresan las leyes básicas de la electricidad y magnetismo. Maxwell fue una de las mentes matemáticas más brillantes de su tiempo. Realizó contribuciones fundamentales en la comprensión de la naturaleza. Fue un científico clásico del siglo XIX cuya influencia fue esencial en la física del siglo XX. Albert Einstein en 1931 con motivo de la conmemoración del centenario de su nacimiento describió el trabajo de Maxwell como: "el más profundo y provechoso que la física ha experimentado desde los tiempos de Newton".

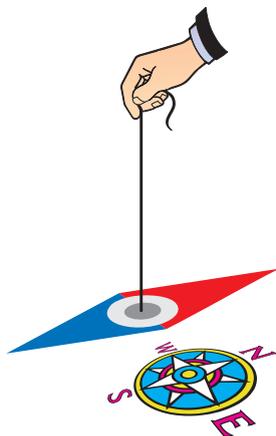


Fig.7. La aguja imantada se alineará de tal forma que su polo norte "apunte" hacia el polo geográfico norte.

El genio culminante de la física del siglo XIX, James Clerk Maxwell, (Fig. 6) tradujo estas ideas a un lenguaje matemático preciso. En su monumental tratado publicado en 1873 incluyó las ideas de Faraday, sus propias ecuaciones y todo lo hasta entonces conocido en la materia. Maxwell resumió en cuatro leyes las investigaciones hechas por sus predecesores y que han servido como base a todo el desarrollo científico y tecnológico en este campo.

Las soluciones de las ecuaciones de Maxwell mostraron que una onda electromagnética se propaga a la velocidad de la luz. Heinrich Hertz, en 1888, comprobó que las ondas de luz eran este tipo de ondas, lo que significó un avance gigantesco en la concepción del universo. Esto lo discutiremos en detalle en la próxima unidad.

Imanes

Todos alguna vez jugamos con un imán y un objeto de hierro, experimentando la "misteriosa" propiedad que posee éste, de mover el objeto de hierro sin tocarlo.

La presencia de un imán cambia las propiedades del medio que lo rodea, "crea algo en su entorno".

En la figura 7 vemos una aguja imantada colgando de un hilo, de tal forma que puede girar libremente en posición horizontal. Al dejarla libre, ésta tiende a orientarse con el campo magnético terrestre local. Si no hay estructuras de hierro ni rocas magnéticas próximas, la aguja se orienta aproximadamente en la dirección Norte-Sur geográfica. Al extremo que apunta hacia el Polo Norte geográfico, se le denomina polo norte magnético, y al otro, polo sur magnético.

La brújula (Fig. 8) es una aguja imantada que gira y se orienta de acuerdo al campo magnético de donde se encuentra. La Tierra se comporta como si tuviese un imán con los polos aproximadamente a lo largo del eje de rotación, con el "polo Sur magnético", "S" cercano al "polo Norte geográfico" y el "polo Norte magnético", "N" cercano al "polo Sur geográfico"

El sentido de giro de la brújula, para orientarse con el campo magnético terrestre, es el que corresponde al recorrido más corto, girando el menor ángulo. (Fig. 9)

Si acercamos dos brújulas con sus polos magnéticos identificados, observamos que polos de diferente nombre tienden a atraerse y polos de igual nombre tienden a repelerse.

Esto último nos permitirá identificar los polos de cualquier imán. Aquél polo que atrae al sur de la brújula será el polo norte del imán y con igual razonamiento, el polo del imán que atrae al polo norte de la brújula será el polo sur.

Recién en el siglo pasado se empezó a entender el origen microscópico del magnetismo y a poder decir algo sobre esta "misteriosa piedra" que



Fig.8. Brújula. Se orienta siguiendo al campo magnético que le rodea.

Una brújula al orientarse, gira realizando el menor recorrido. Como otros procesos naturales, los magnéticos también evolucionan con el mínimo trabajo y hacia una configuración de menor energía.

Fig.9.

despertó el espíritu investigador de nuestros antepasados. El imán natural o magnetita es un material ferromagnético de las llamadas "ferritas" u "óxidos ferromagnéticos", Fe_3O_4 que son materiales con muchas aplicaciones industriales.

Además de obtener imanes artificialmente como describió William Gilbert, otra forma es frotando un cuerpo de hierro dulce siempre en un mismo sentido, durante un tiempo. Si el objeto es de acero, los efectos magnéticos que adquiere serán mucho más duraderos. Más adelante explicaremos otra forma de imantar un objeto de hierro mediante una corriente eléctrica.

Características de los imanes

- 1) Un imán **atrae** ciertos materiales, por ejemplo piezas de hierro. Las fuerzas magnéticas atractivas se ejercen a distancia, sin contacto, en vacío o a través de materiales no magnéticos, como cobre, aluminio, plomo, vidrio, ladrillo, madera, plástico y aire.
- 2) Un imán tiene regiones denominadas "**polos magnéticos**", donde la fuerza de atracción que ejerce sobre piezas de hierro es considerablemente mayor. **Hay solo dos tipos de polos magnéticos**. Denominados "**polo norte magnético**", "**N**", y "**polo sur magnético**", "**S**". Los polos nunca pueden aislarse, un imán puede ser multipolar, tener más de un polo norte "N", o más de un polo sur "S", pero no puede tener solo un polo norte "N", sin un polo sur "S"; ni solamente un polo sur "S" sin polo norte "N". (Fig. 10)

Si el imán es una barra con los polos en los extremos (barra magnetizada longitudinalmente), al partirla por la mitad para intentar separar el polo norte "N" del polo sur "S", se obtienen dos imanes de menor longitud, cada uno con sus polos norte "N" y sur "S" en los extremos. Podemos repetir, y volver a cortar uno de los trozos, y los resultados son idénticos. No importa cuantas veces lo intentemos, siempre tendremos un imán con dos polos. Se han llevado a cabo muchas investigaciones para encontrar el denominado monopolo, esto es un imán que tiene un solo polo, pero esto no se ha podido lograr.

- 3) Entre dos imanes cualesquiera, no sólo hay fuerzas atractivas, sino también fuerzas repulsivas. Si se acerca un imán a otro, se observa que los **polos del mismo tipo "N" y "N", o "S" y "S", se repelen**. Mientras que **polos diferentes "N" y "S", se atraen**. Esto se cumple aunque los imanes sean de diferente material, forma y tamaño. (Fig. 11)
- 4) Si acercamos piezas de hierro a un imán, sobre éstas se **inducen** polos magnéticos en el mismo sentido que los polos del imán. Estas piezas pueden conservar durante un tiempo algo de la magnetización inducida, como si fuesen imanes. Se los denomina **imanes temporales**.
- 5) Un imán puede perder su capacidad de atracción y repulsión magnética si se calienta y/o golpea. Cuando no tiene ningún polo magnético, se dice que está **desmagnetizado**.

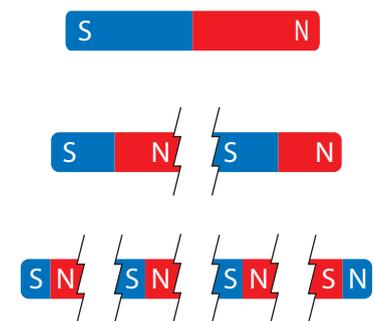


Fig.10. Los polos nunca pueden aislarse

Podemos cortar, y volver a cortar uno de los trozos, y los resultados son idénticos, siempre tendremos un imán con más de un polo.

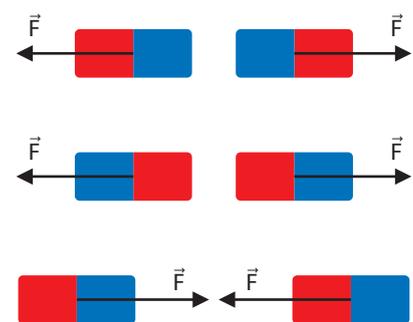


Fig.11. Dependiendo de qué polos se enfrenten, los imanes se ejercen fuerzas de atracción o de repulsión.

Campo Magnético

Anteriormente vimos que la presencia del imán cambia las propiedades del medio, crea algo en su entorno:

Un imán genera a su alrededor un Campo Magnético. Este es un campo vectorial, lo que significa que a cada punto alrededor del imán, le corresponde un vector campo magnético.

Para profundizar

A nivel microscópico y atómico, el magnetismo en la materia se estudia con los **momentos magnéticos microscópicos** presentes en ciertas moléculas, y con los **momentos magnéticos intrínsecos "spin"** en partículas atómicas como los electrones orbitales y los protones en el núcleo atómico.

Fig.12.

Para estudiar la interacción magnética entre objetos, los imanes, piezas de hierro, etc., se define la magnitud vectorial denominada "**campo magnético**". (Fig. 12)

Dicho campo puede ser representado con líneas de "**campo magnético**", que pueden visualizarse indirectamente si en las cercanías de un imán esparcimos limaduras de hierro. (Fig. 13 a) Éstas cuando caen no se ubican al azar, se colocan formando líneas que van desde un polo a otro del imán.

Otra forma de explorar un campo magnético generado por un imán es utilizando una brújula. (Fig. 13 b). Ésta siempre se orienta en la dirección del campo magnético. Si vamos registrando las direcciones de la brújula en diferentes lugares, y luego intentamos unir las con líneas, obtenemos que éstas tienen una forma similar a las líneas obtenidas con las limaduras de hierro.

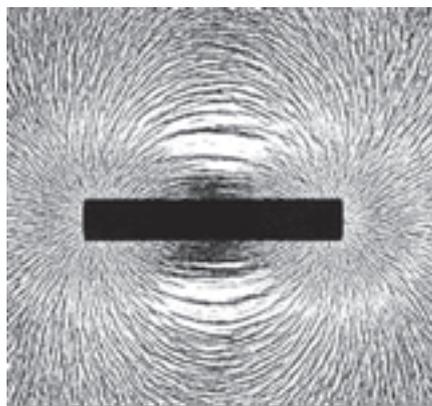


Fig.13a. Las limaduras se agrupan formando líneas curvas que salen y llegan a los polos magnéticos.

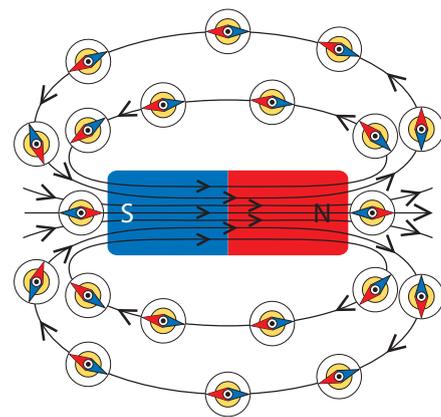


Fig.13b. La brújula se orienta tangencialmente a las líneas de campo magnético.

El sentido de las líneas de campo es desde el polo sur "S" al polo norte "N" de la brújula, por lo tanto alrededor del imán las líneas de campo son desde el polo norte "N" al polo sur "S".

Las líneas de campo son cerradas y se continúan dentro del imán. En su interior van desde el polo sur "S" al polo norte "N".

Las líneas de campo magnético también denominadas líneas de inducción magnética son cerradas. Por fuera del imán van desde el polo norte "N", al polo sur "S" y por dentro van desde el polo sur "S" al polo norte "N". (Fig. 14)

El campo magnético se simboliza con la letra \vec{B} . Su unidad en el S.I. es el Tesla. $[B] = T$ (se define en el cap. 19)

Características del vector campo magnético \vec{B}

Dirección: el vector campo magnético en un punto, es tangente a la línea de campo que pasa por dicho punto. (Fig. 15)

Sentido: es el mismo de las líneas de campo.

Módulo: es proporcional a la densidad de líneas de campo (número de líneas por unidad de área). Cuánto más apretadas estén las líneas mayor será el módulo del campo magnético, por ejemplo como sucede en las cercanías de los polos.

Un caso particular es donde las líneas de campo son paralelas y están distribuidas uniformemente. En este caso el vector campo magnético es uniforme, es decir, en todos los puntos tiene el mismo módulo, la misma dirección e igual sentido.

Si observamos la figura 16, donde se representa al campo magnético generado por un imán en herradura, vemos que en una zona entre los polos existe un campo de estas características.

Propiedades del campo magnético.

- Una propiedad de las líneas de campo magnético es que no se cortan. En cada punto del espacio el vector campo magnético es único, por lo tanto no pueden haber en un punto dos líneas de campo con diferentes direcciones.
- El campo magnético generado por los imanes es en teoría de alcance infinito. En la práctica, lo consideraremos hasta donde lo podamos detectar, por ejemplo, hasta donde pueda interactuar con una brújula. Por supuesto que dependerá de los instrumentos que utilicemos para explorar, pero la mayoría de los imanes tienen una influencia de corto alcance.
- Una pieza de hierro se magnetiza temporalmente al estar bajo el campo magnético que produce otro imán (próximo o en contacto). Si una pieza de hierro alargada (como una barra, tornillo o perno de hierro) se coloca a lo largo de la dirección Norte-Sur geográfica, un golpe hace que se magnetice (débil pero perceptiblemente) con los polos en el sentido del campo magnético terrestre.

Ley de Gauss del Magnetismo

La propiedad de no poder aislar un polo magnético, es equivalente a que las líneas de campo magnético sean cerradas, es decir, todas las líneas externas al imán que salen del polo "N", llegan al polo sur "S", se continúan dentro de él desde el polo sur "S" hacia el norte "N". Esto se conoce como Ley de Gauss del Magnetismo.

Fig.14.

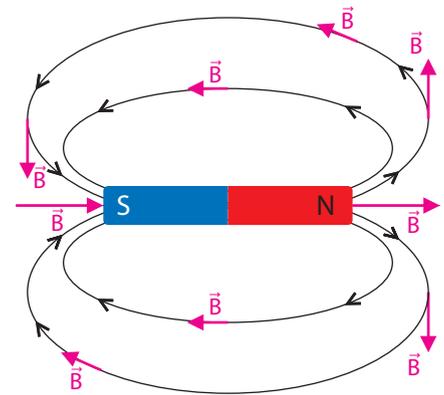


Fig.15. El vector campo magnético \vec{B} es siempre tangente a las líneas de campo.

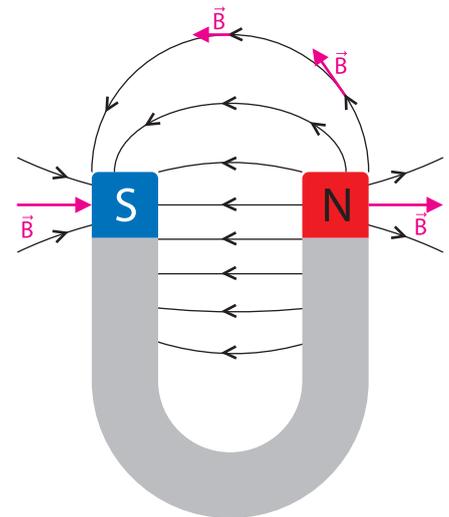


Fig.16. Imán en herradura. El vector campo magnético \vec{B} , es uniforme en la zona interna próxima a los polos.

¿Cuáles son los materiales más utilizados?

Los materiales para imanes más difundidos son los **alnico** y las ferritas. Los primeros son metálicos y se llaman así porque en su composición llevan los elementos aluminio, níquel y cobalto. Se fabrican por fusión de un 8 % de aluminio, un 14 % de níquel, un 24 % de cobalto, un 51 % de hierro y un 3 % de cobre. En cambio las ferritas son cerámicos.

El comportamiento magnético de la magnetita (Fe₃O₄) y otros cerámicos, se denomina "ferromagnetismo".

Fig.17.

- Un imán desmagnetizado si no está a temperatura muy elevada, puede volver a magnetizarse, si se le aplica un campo magnético intenso (dependiendo de cada material).(Fig. 17)

En general, los imanes para aplicaciones específicas son anisótropos (tienen propiedades distintas en distintas direcciones), ya que no se magnetizan igual ni con la misma facilidad en todas las direcciones.

Superposición de campos magnéticos

Si tenemos más de un imán, cada uno de ellos generará un campo magnético en un punto cualquiera. El campo magnético resultante en dicho punto es la suma de los campos que genera cada uno de los imanes, independiente uno del otro. Recalamos que el campo magnético es una magnitud vectorial, por lo tanto la suma de los campos para obtener el campo magnético resultante es vectorial.

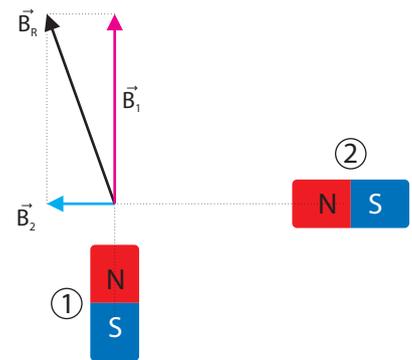


Fig.18. Principio de superposición.

Principio de Superposición: El campo magnético resultante en un punto donde se superponen más de un campo magnético, se obtiene sumando vectorialmente todos los campos:

$$\vec{B}_R = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

Ejemplo 1.

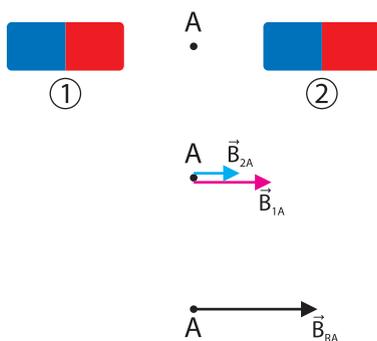


Fig.19. Ejemplo 1.

Se tienen dos imanes rectos ubicados según muestra la figura 19. El imán 1 genera en el punto "A" un campo magnético de módulo 0,20T y el imán 2 genera en dicho punto un campo magnético de módulo 0,15T. Con color rojo se señaló el polo norte de cada imán

Determina el campo magnético resultante en el punto "A".

En primer lugar representamos los campos \vec{B}_{1A} y \vec{B}_{2A} Para determinar el campo magnético resultante en el punto "A" realizamos la suma vectorial.

$$\vec{B}_{RA} = \vec{B}_{1A} + \vec{B}_{2A}$$

Los vectores \vec{B}_{1A} y \vec{B}_{2A} son horizontales y hacia la derecha por lo tanto \vec{B}_{RA} tendrá esa dirección y sentido. El módulo será la suma de los módulos de \vec{B}_{1A} y \vec{B}_{2A}

$$B_{RA} = B_{1A} + B_{2A} \Rightarrow B_{RA} = 0,20T + 0,15T \Rightarrow$$

$$B_{RA} = 0,35T$$

Ejemplo 2

Resolveremos lo mismo que en el ejemplo 1 pero suponiendo que los imanes se ubican según muestra la figura 20.

En primer lugar representamos los campos \vec{B}_{1A} y \vec{B}_{2A}

Para determinar el campo magnético resultante en el punto "A" realizamos la suma vectorial.

$$\vec{B}_{RA} = \vec{B}_{1A} + \vec{B}_{2A}$$

Como los vectores tienen igual dirección y sentido opuesto, \vec{B}_{RA} tendrá la misma dirección y el sentido del vector de mayor módulo.

Su módulo será la resta de los módulos de \vec{B}_{1A} y \vec{B}_{2A}

$$B_{RA} = B_{1A} - B_{2A} \Rightarrow B_{RA} = 0,20T - 0,15T$$

$$\Rightarrow B_{RA} = 0,05T \text{ Horizontal y hacia la derecha}$$

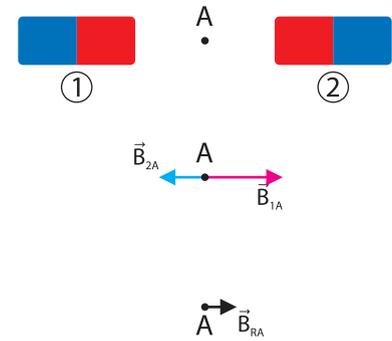


Fig.20. Ejemplo 2.

Ejemplo 3

Ahora consideraremos la misma situación del ejemplo 1 pero con los imanes ubicadas como indica la figura 21.

Nuevamente representamos los vectores \vec{B}_{1A} y \vec{B}_{2A} y luego los sumamos vectorialmente. En este caso los vectores no tienen la misma dirección.

Por lo tanto tendremos que representarlos a escala y luego sumarlos utilizando el método del paralelogramo.

Escala: 0,10T--2,0cm. Por lo tanto 0,20T--4,0cm y 0,15T--3,0cm

Midiendo obtenemos que la diagonal que representa \vec{B}_{RA} es de 5,0cm.

Con la escala determinamos que el módulo de $B_{RA} = 0,25T$

Para determinar su dirección, medimos el ángulo formado entre \vec{B}_{RA} y \vec{B}_{1A} , que es $\alpha = 37^\circ$

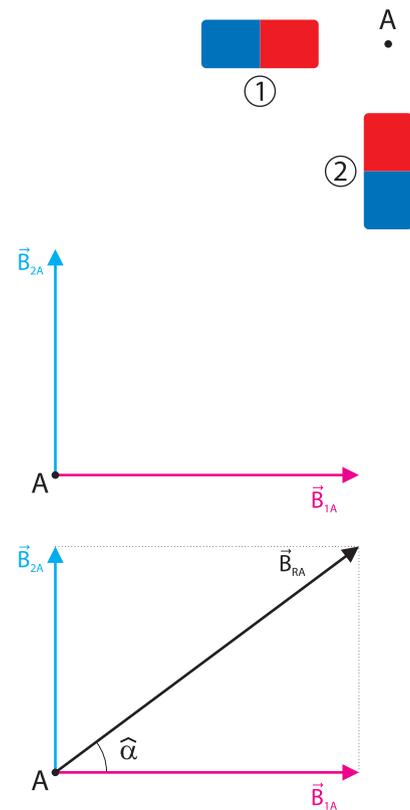


Fig.21. Ejemplo 3.

Campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre es conocido desde hace muchos años, fue Gauss el primero en describirlo. (Fig. 22). Publicó la obra "Intensitas vis magnetical terrestris ad memsuram absolutam revocata" en 1832. Como resultado de sus estudios concluyó que más del 97% de la fuerza magnética que se observa en la superficie de la Tierra se origina en su interior. Un campo magnético puede ser producido por un imán permanente o por corrientes eléctricas, y alguna de esas dos causas debe ser la responsable.



Fig.22. Johann Carl Friedrich Gauss

Alemán, nació el 30 de abril de 1777 y falleció el 23 de febrero de 1855. Fue un matemático, astrónomo y físico de una gigantesca genialidad. Considerado “el príncipe de las matemáticas” y “el matemático más grande desde la antigüedad”. Gauss ha tenido una influencia notable en muchos campos de la matemática y de la física.

El núcleo de la Tierra parece estar compuesto principalmente de hierro y níquel, que son materiales ferromagnéticos a temperaturas ordinarias. Sin embargo, la temperatura del núcleo terrestre es muy elevada para que estos materiales mantengan sus propiedades magnéticas. No puede suponerse, por lo tanto, que dentro de la Tierra hay un imán permanente. La explicación del magnetismo terrestre tendría que estar relacionada, por tanto, con las corrientes eléctricas que se generan en su núcleo. (Recuerda el efecto magnético de la corriente eléctrica y que cargas eléctricas en movimiento, producen una corriente eléctrica)

En todo lugar, si no existen otros imanes en las cercanías, la brújula se orienta con el campo magnético terrestre, con lo que podríamos conocer su dirección y sentido en ese punto. Repitiendo el procedimiento en muchos lugares, podríamos obtener las líneas de campo terrestre (en forma similar a como exploramos el imán recto). Estas líneas se cortan en las cercanías de los polos geográficos, aproximadamente a unos 800km de distancia, por lo que los polos geográficos y magnéticos no coinciden. Para cada zona del planeta la orientación de la brújula no coincidirá con la dirección norte-sur geográfica. El ángulo que existe entre estas dos direcciones se llama “**declinación magnética δ** ”.

La declinación magnética “ δ ” es el ángulo formado entre la meridiana geográfica (o norte geográfico) y la meridiana magnética (o sur magnético). Cuando ese ángulo se presenta al oeste del norte geográfico, se habla de “declinación oeste” y en el caso opuesto se habla de “declinación este”. (Fig. 23)

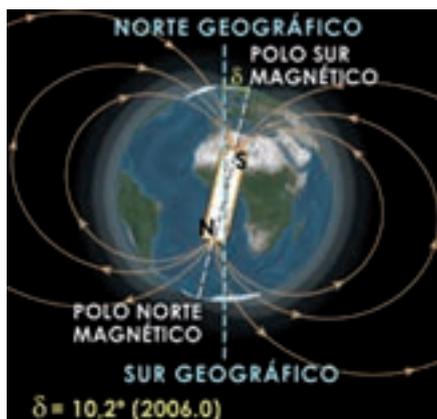


Fig.23. Declinación Magnética δ .

Es la diferencia angular δ entre el “polo norte geográfico” y el polo sur magnético.

Te sugerimos la visita a la siguiente página:

http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2003/29dec_magneticfield.htm

Fig.24.

En las proximidades del “polo geográfico norte” se encuentra un “polo magnético sur”, por esto el “polo norte de la brújula” se orienta aproximadamente hacia el “polo norte geográfico”. Esa diferencia angular entre la dirección norte-sur geográfico y la dirección del campo magnético es la declinación magnética.

La declinación magnética es cambiante en el tiempo, las variaciones que sufre se llevan cabo muy lentamente. (Fig. 24).

En estudios geológicos se ha demostrado que cada intervalos de algunos millones de años se invierte la dirección del campo magnético terrestre. Como los polos magnéticos son distintos para cada fecha y varían históricamente, tenemos múltiples “sures o nortes” magnéticos en función de la fecha de medición elegida. Por eso es muy importante que cuando hablamos de declinación magnética o de mapas magnéticos (fig. 25) conozcamos muy bien la fecha de referencia de las mediciones. Esta variación se

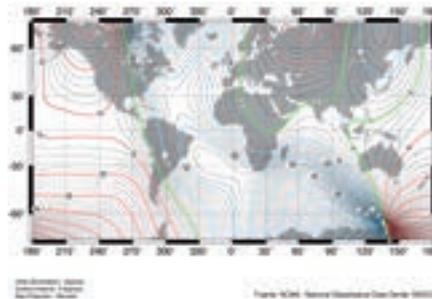


Fig.25. Carta magnética según el modelo WMM (World Magnetic Model) 2000-2005 desarrollado por el U.S. Geological Survey y el British Geological Survey. En el mapeo de declinaciones magnéticas se puede apreciar que la línea celeste que pasa por Uruguay corresponde a 10° y está hacia el oeste del polo norte geográfico.

mide en una tasa anual, que establece en qué magnitud angular la declinación variará y en qué sentido será el giro (hacia el este o el oeste). (Fig. 26)

Muchas de las brújulas disponen de un sistema de corrección que permite ajustar fácilmente el ángulo de declinación magnética del lugar donde nos encontremos para obtener mayor fiabilidad en las mediciones.

¿Qué es la inclinación magnética?

La dirección del campo magnético de la tierra varía en función de la latitud y afecta a la inclinación de la aguja de la brújula. Si la aguja puede girar también, en un plano vertical, esta no se orientará horizontalmente, excepto en el ecuador. El extremo de la aguja que indica el norte se inclina hacia abajo cuanto más cerca estamos del norte magnético, mientras que si estamos cerca del polo Sur, ésta se eleva. Por lo que la inclinación será de 90° en los polos magnéticos e irá disminuyendo hasta cero en el ecuador.

Este efecto, llamado inclinación magnética, puede provocar que en una brújula, la aguja roce la base y no pueda girar libremente. Algunas de las brújulas están equipadas con un sistema que evita este efecto negativo.

Utilidad del campo magnético terrestre

La zona de influencia del campo magnético terrestre, llamada magnetósfera, (fig. 28) cumple un papel fundamental de protección de nuestro planeta del viento solar.

Las explosiones en el Sol provocan el viento solar, que son emanaciones de plasma con una velocidad de 300 a $400 \frac{\text{Km}}{\text{s}}$ en condiciones normales y puede llegar a $800 \frac{\text{Km}}{\text{s}}$ en una tormenta solar.

El plasma, es gas de hidrógeno casi perfectamente ionizado (electrificado), puede cargar eléctricamente la

Algo interesante

En la página web que proporcionamos a continuación, puedes obtener el valor de la declinación magnética para la ciudad que tu quieras. Tienes que especificar sus coordenadas y la fecha. Se implementa el modelo matemático IGRF-10 de la IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy).

http://www.gabrielortiz.com/calculadora_declinacion/entrada.asp

Para Montevideo que sus coordenadas son $34^\circ 53' 1''$ S $56^\circ 10' 55''$ O, la información que nos proporcionó fue la siguiente:

“El valor estimado para la declinación magnética en la posición latitud $34^\circ 53' 1''$ Sur, longitud $56^\circ 10' 55''$ Oeste y para la fecha 15-12-2007 es: $9^\circ 5'$ Oeste con una tasa estimada de variación anual de $0^\circ 8'$ hacia el Oeste”.

Fig.26.

Fuentes de campo magnético

Superficie estrella de neutrones	$\approx 10^8$ T
Interior de mancha solar	$\approx 10^{-1}$ T
Imán recto (cerca de los polos)	$\approx 10^{-2}$ T
Televisor color (cerca de él)	$\approx 10^{-4}$ T
Superficie de la Tierra	$\approx 10^{-5}$ T
Ondas de Radio	$\approx 10^{-9}$ T

Observación:

El campo magnético generado por imanes es mucho mayor que el campo magnético terrestre.

Por lo tanto en la cercanía de un imán es despreciable el campo magnético terrestre.

Fig.27. Valores de campo magnético generado por diferentes fuentes.

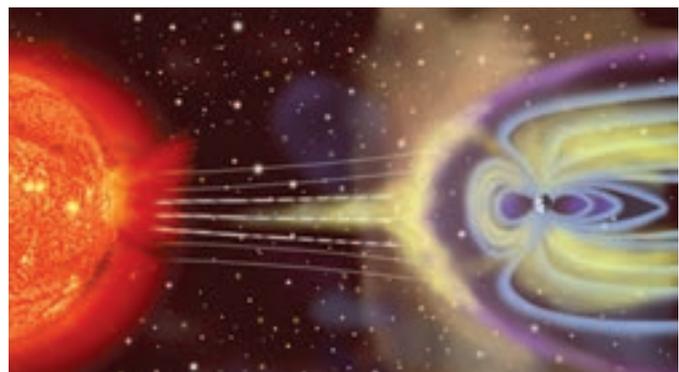


Fig.28. Representación de la Magnetosfera. La estructura en forma de cola en el plasma se forma a medida que algo del gas se vierte hacia el Sol.

Aplicaciones en Medicina y en Odontología

Muchos equipos e instrumentos tienen imanes permanentes en motores, cierres de puertas y deflectores de haces. También hay aplicaciones en sondas con imanes de hasta 1 mm de largo x 0.5 mm de diámetro, guiados a través de venas y arterias mediante electroimanes exteriores al paciente. Algunos son usados para verificar la posición de dispositivos intrauterinos. Los imanes permanentes se han utilizado además en la extracción de objetos metálicos magnéticos del estómago y esófago.

En **Veterinaria** se utilizan imanes de alnico recubiertos con teflón, de unos 8 cm de largo y poco más de 1 cm de diámetro, para que concentren las piezas metálicas de hierro que puedan entrar en los estómagos de las vacas, y así evitar que lleguen a otros órganos.

Fig.29.

magnetósfera, generando tormentas magnéticas, que afectan los satélites, las comunicaciones y los sistemas de transmisión de electricidad.

Aplicaciones de los imanes

Los imanes, además de servir para hacer juegos, adornos y fijar mensajes en las puertas de las heladeras, tienen innumerables e importantísimas aplicaciones según qué aspecto de sus propiedades se aplique. A continuación detallamos clasificación y sus aplicaciones.

- 1) **Atractores.** Se utilizan para: sujetar piezas, mover mecanismos; eliminar o separar impurezas en alimentos, guiar sondas médicas y agitar-mezclar líquidos.
- 2) **Vibradores.** En parlantes; emisores ultrasónicos de ecógrafos y sonares; aparatos de limpieza por ultrasonido.
- 3) **Indicadores.** En agujas de las brújulas; el imán de los detectores de metales; las bobinas de los galvanómetros e instrumentos analógicos.
- 4) **Rotores.** La aplicación más común es en los motores eléctricos.
- 5) **Generadores y contadores.** En generadores de electricidad hidroeléctricos y eólicos; micrófonos de audio y sensores ultrasónicos de ecógrafos y sonares; tacómetros para automóviles; sensores y contadores en líneas de producción.
- 6) **Registadores.** En dispositivos de grabación de discos duros, cassettes de audio, cintas VHS de video, cassettes de cámaras de video, etc.
- 7) **Inductores.** Su utilización es para magnetizar y desmagnetizar herramientas.
- 8) **Deflectores.** En hornos microondas y espectrómetros.

PREGUNTAS

- 1) ¿En qué se diferencia un imán natural de un imán artificial?
- 2) ¿De qué manera se puede imantar un trozo de hierro?
- 3) ¿Cómo se denominan los polos de un imán?
- 4) ¿Cuántos tipos de polos magnéticos hay?
- 5) ¿Existen imanes que tengan un solo polo? Si divido a un imán recto por la mitad ¿qué obtengo?
- 6) Un niño está jugando con dos imanes. Acerca polos de igual nombre y luego de distinto nombre. Explica qué ocurre en ambas interacciones.
- 7) La interacción entre imanes, ¿es de contacto o a distancia? Justifica.
- 8) ¿Cuándo decimos que un objeto está desmagnetizado?
- 9) ¿Cómo se puede desimantar un imán?
- 10) ¿En qué se puede diferenciar un imán permanente de uno que no lo sea? ¿Cómo se puede distinguir uno de otro?
- 11) Si tenemos tres barras de hierro y sólo una está imantada. ¿Cómo hacemos para reconocerla?
- 12) Si tenemos tres barras de hierro y sabemos que dos son imanes y la otra no. ¿Cómo hacemos para reconocer cuál no está imantada?
- 13) ¿Qué genera un imán a su alrededor? Explica sus características.

- 14) ¿Cómo se puede explorar el campo magnético que genera un imán?
- 15) ¿De qué polo salen las líneas de campo magnético en un imán recto y hacia dónde se dirigen?
- 16) ¿Cómo se determina el sentido de las líneas de campo con una brújula?
- 17) En el interior de un imán recto, ¿hay líneas de campo magnético? Explica.
- 18) ¿Es posible que una línea de campo salga de un polo magnético y no llegue a otro?
- 19) A partir de un dibujo donde se representan líneas de campo generado por un imán, ¿cómo reconocerías donde se encuentran los polos del imán? ¿Podrías justificar con el mismo dibujo por qué en las cercanías de los polos el campo es más intenso?
- 20) ¿Dos líneas de campo magnético de un imán se pueden cruzar?
- 21) ¿El campo magnético es un campo vectorial o escalar? Justifica.
- 22) ¿Con qué símbolo se representa el campo magnético?
- 23) En una región del espacio se conocen las líneas de campo magnético. ¿Cómo se representa el vector \vec{B} en un punto de dicha región? ¿De qué depende su módulo?
- 24) ¿Qué significa que un campo magnético es uniforme? Nombra un ejemplo.
- 25) ¿En qué situaciones se utiliza el Principio de Superposición? ¿Qué significa que el campo magnético cumple con él?
- 26) Describe lo mejor posible las características del campo magnético terrestre.
- 27) ¿Qué polo magnético de la tierra se encuentra próximo al polo norte geográfico?
- 28) ¿Existe algún desfase entre los polos magnéticos de la tierra y los polos geográficos? Explica.
- 29) ¿Qué es la inclinación magnética?
- 30) ¿Qué función importante cumple la magnetósfera en la protección de nuestro planeta?

PROBLEMAS

- 1) La figura 30 muestra un imán recto.
 - a) Dibuja las líneas de campo magnético generado por el imán (que algunas de las líneas pasen por los puntos representados)
 - b) Representa el vector campo magnético en los puntos "A, B, C, D y E".
 - c) Ordena de mayor a menor el módulo del campo magnético en los puntos "B, D y E".
- 2) Si el imán recto del problema 1 invierte su polaridad, ¿cuáles de las respuestas cambiarían? Explica.
- 3) La figura 31 muestra líneas de campo magnético en una región del espacio.
 - a) Representa el vector campo magnético en los puntos "A, B, C y D".
 - b) Ordena de menor a mayor el módulo del campo magnético en dichos puntos. Justifica.

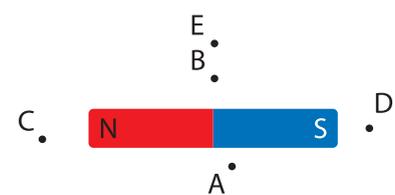


Fig.30. Problema 1.

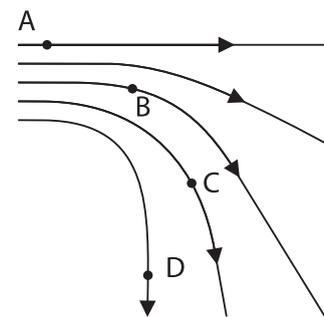


Fig.31. Problema 3.

- 4) En el problema anterior indica como se orientaría una brújula en los puntos señalados.
- 5) La figura 32 muestra un imán recto y una brújula orientada según el campo magnético generado por el imán.
 - a) Indica y justifica cuál es cada polo del imán.
 - b) Dibuja cómo se orientará la brújula cuando se la enfrente al otro polo del imán.
- 6) Un imán de la recto se divide en dos partes como muestra la figura 33.
 - a) Representa las líneas de campo generado por los dos trozos del imán.
 - b) Representa los vectores campo magnético en los puntos "A, B, C y D".
 - c) Indica como se orientaría una brújula si se la coloca en los puntos mencionados.
- 7) Resuelve lo mismo que en el problema 6, pero suponiendo que el imán se corta como muestra la figura 34.
- 8) En la figura 35 se muestra un imán en herradura y varios puntos. Se sabe que las líneas de campo magnético salen del polo de la izquierda.
 - a) Indica y justifica cuál es cada polo.
 - b) Representa las líneas de campo generado por el imán.
 - c) Indica como se orientaría una brújula en dichos puntos.
 - d) Representa los vectores campo magnético en los puntos.
 - e) ¿En alguna zona el campo magnético es uniforme? Justifica.
- 9) En el punto "A" la brújula se orienta con el campo magnético terrestre (el módulo del campo magnético terrestre es $B_T = 2,0 \times 10^{-5} \text{T}$) (Fig. 36) Cuando acercamos un imán como indica la figura b, la brújula cambia su dirección. Sabiendo que el módulo del campo generado por el imán es el doble que B_T :
 - a) Representa a escala el campo magnético terrestre y el campo generado por el imán en el punto A.
 - b) Determina el ángulo de desviación de la brújula.
 - c) Determina el módulo del campo magnético resultante en el punto "A".
- 10) Dos imanes generan en el punto P un campo magnético de módulo $6,0 \times 10^{-2} \text{T}$ cada uno. Los imanes están ubicados según muestra la figura 37.
 - a) Representa a escala el campo magnético que genera cada imán en el punto P.
 - b) Determina el campo magnético resultante en el punto P.
 - c) Resuelve las partes a y b suponiendo que ahora uno de los imanes cambia su polaridad.



Fig.32. Problema 5.

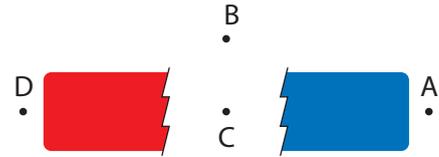


Fig.33. Problema 6.

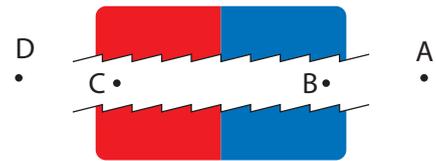


Fig.34. Problema 7.

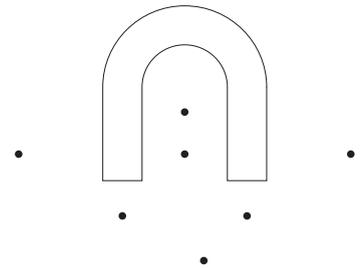


Fig.35. Problema 8.



Fig.36a. Problema 9.



Fig.36b. Problema 9.

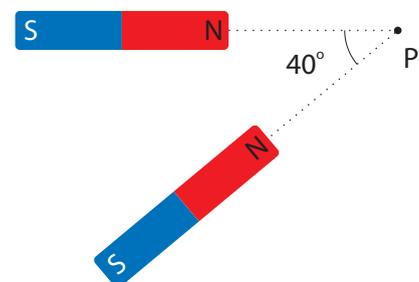


Fig.37. Problema 10.

Campo magnético generado por corrientes

Introducción

Durante mucho tiempo se estudiaron por separado los fenómenos eléctricos y magnéticos. En 1820 Hans Christian Oersted descubrió que toda corriente eléctrica genera un campo magnético en su entorno.

Sus experimentos consistían en colocar brújulas cerca de conductores. Al circular corriente por estos, la brújula, inicialmente orientada con el campo magnético terrestre, cambiaba de dirección. De ésta forma se detectaba el campo magnético generado por la corriente eléctrica del conductor (fig. 1).

Los primeros estudios experimentales de fenómenos eléctricos utilizaban como fuentes máquinas electrostáticas, capaces de generar elevadas diferencias de potencial, pero corrientes eléctricas reducidas y por un tiempo muy breve. A principios de 1800 se crearon fuentes de corriente continuas, que permitían mantener una intensidad importante durante un tiempo tal que facilitaba el estudio. Un ejemplo de esas nuevas fuentes de corriente fue la pila de Volta. El desarrollo de estos generadores impulsó la investigación de las corrientes eléctricas y los efectos que ella producía, como el efecto magnético.

Oersted, Ampere, Lorentz, Laplace, Hertz, Faraday y otros, estudiaron en principio de forma casi exclusivamente experimental, una rama de la física que estaba naciendo y que creció rápidamente: **el electromagnetismo**. En 1831 (año siguiente a la Jura de la Constitución Uruguaya) nace James Clerk Maxwell (fig 2), quien sintetizó los aportes de muchos científicos en cuatro leyes fundamentales para el electromagnetismo.

El campo magnético que genera una corriente eléctrica en un punto determinado, depende del valor de la intensidad, de la distancia del conductor a ese punto y de la disposición del conductor.

A continuación estudiaremos el campo magnético generado por algunos tipos de conductores.

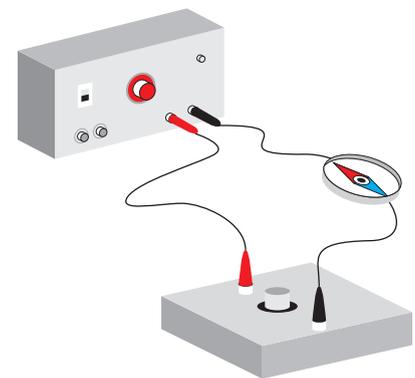


Fig.1. Experimento de Oersted. Al cerrar el circuito la aguja magnética se desvía de su dirección original.

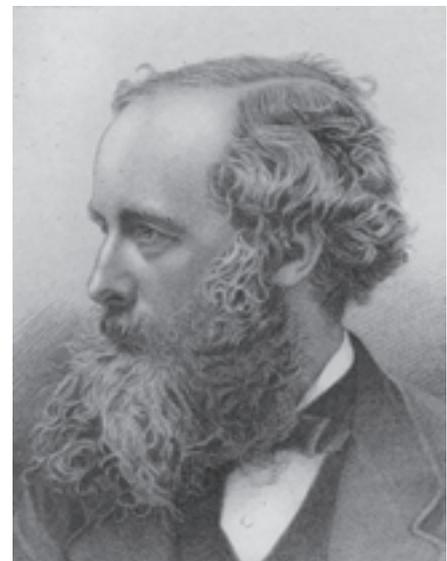


Fig.2. James Clerk Maxwell (1831-1879)

Científico británico que realizó importantes trabajos en el área termodinámica, pero su gran aporte a la Física son las cuatro leyes fundamentales del electromagnetismo. Según Albert Einstein, Maxwell fue el físico más importante después de Newton.

Campo magnético generado por corrientes

Introducción

Durante mucho tiempo se estudiaron por separado los fenómenos eléctricos y magnéticos. En 1820 Hans Christian Oersted descubrió que toda corriente eléctrica genera un campo magnético en su entorno.

Sus experimentos consistían en colocar brújulas cerca de conductores. Al circular corriente por estos, la brújula, inicialmente orientada con el campo magnético terrestre, cambiaba de dirección. De ésta forma se detectaba el campo magnético generado por la corriente eléctrica del conductor (fig. 1).

Los primeros estudios experimentales de fenómenos eléctricos utilizaban como fuentes máquinas electrostáticas, capaces de generar elevadas diferencias de potencial, pero corrientes eléctricas reducidas y por un tiempo muy breve. A principios de 1800 se crearon fuentes de corriente continuas, que permitían mantener una intensidad importante durante un tiempo tal que facilitaba el estudio. Un ejemplo de esas nuevas fuentes de corriente fue la pila de Volta. El desarrollo de estos generadores impulsó la investigación de las corrientes eléctricas y los efectos que ella producía, como el efecto magnético.

Oersted, Ampere, Lorentz, Laplace, Hertz, Faraday y otros, estudiaron en principio de forma casi exclusivamente experimental, una rama de la física que estaba naciendo y que creció rápidamente: **el electromagnetismo**. En 1831 (año siguiente a la Jura de la Constitución Uruguaya) nace James Clerk Maxwell (fig 2), quien sintetizó los aportes de muchos científicos en cuatro leyes fundamentales para el electromagnetismo.

El campo magnético que genera una corriente eléctrica en un punto determinado, depende del valor de la intensidad, de la distancia del conductor a ese punto y de la disposición del conductor.

A continuación estudiaremos el campo magnético generado por algunos tipos de conductores.

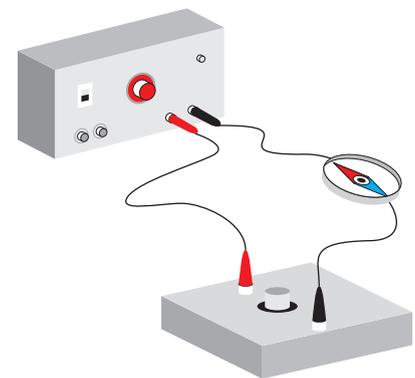


Fig.1. Experimento de Oersted. Al cerrar el circuito la aguja magnética se desvía de su dirección original.



Fig.2. James Clerk Maxwell (1831-1879)

Científico británico que realizó importantes trabajos en el área termodinámica, pero su gran aporte a la Física son las cuatro leyes fundamentales del electromagnetismo. Según Albert Einstein, Maxwell fue el físico más importante después de Newton.

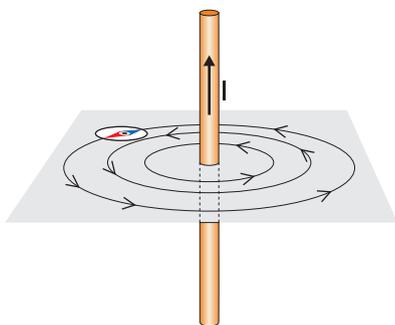


Fig.3. Al circular corriente por el conductor recto las brújulas se orientan tangencialmente a una circunferencia concéntrica con el conductor.

Campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor recto.

Supongamos un conductor recto y largo, que atraviesa perpendicularmente un plano horizontal, (fig. 3). Si colocamos brújulas a su alrededor, en un principio se orientan en la dirección del campo magnético terrestre. Luego, al circular corriente por el conductor, se orientan todas en forma tangente a una circunferencia concéntrica al conductor. Podemos concluir que las líneas de campo generado por el conductor son circunferencias concéntricas a éste.

Si invertimos el sentido de la corriente, las brújulas se orientan en la misma dirección pero con sentido opuesto.

El sentido de las líneas de campo depende del sentido de la intensidad por el conductor. Para determinar el sentido de las líneas de campo utilizaremos la regla de la mano derecha.

Regla de la mano derecha: si alineamos el dedo pulgar de nuestra mano derecha con el sentido de la intensidad por el conductor, los otros cuatro dedos arrollados determinan el sentido de las líneas de campo. (Fig. 4)

En esta sección representaremos direcciones perpendiculares al plano del dibujo, donde el sentido podrá ser entrante o saliente.

Utilizaremos los siguientes símbolos:

⊙ (punto) sentido saliente

⊗ (cruz) sentido entrante

Fig. 5. Convención de símbolos para representar sentidos cuando la dirección es perpendicular al plano de la hoja.

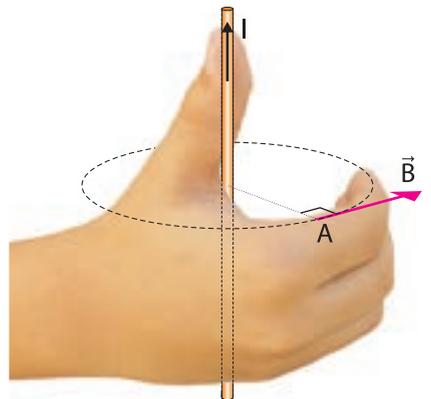


Fig.4. Aplicación de la regla de la mano derecha. El dedo pulgar de la mano derecha alineado con el sentido de la intensidad por el conductor, los otros cuatro dedos arrollados determinan el sentido del vector campo magnético \vec{B} .

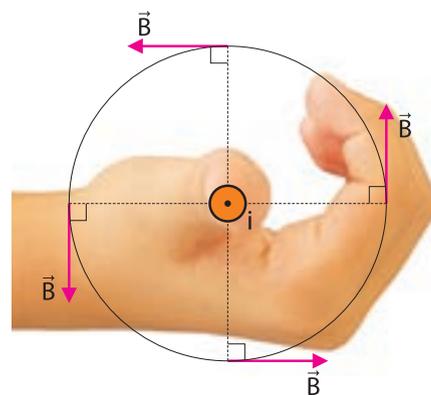


Fig.6. Conductor visto desde arriba con una corriente saliente. Los vectores \vec{B} son perpendiculares al radio.

En la figura 6 se muestra al conductor visto desde arriba.

- Las líneas de campo aparecen representadas como círculos concéntricos.
- El vector campo magnético tiene dirección tangente a las líneas de campo, por lo tanto tendrá dirección perpendicular al radio que contiene al punto de aplicación del vector \vec{B} . Su sentido se determina aplicando la regla de la mano derecha.

La figura 7 muestra al conductor de frente.

- Las líneas de campo magnético son entrantes de un lado del conductor y salientes del otro.
- El vector \vec{B} tiene dirección perpendicular al plano de la hoja.
- Su sentido es entrante o saliente, dependiendo del sentido de la corriente. Lo determinamos con la regla de la mano derecha.

Módulo del vector \vec{B}

Para determinar completamente el vector \vec{B} debemos calcular además su módulo B. (Fig. 8).

- Este es inversamente proporcional a la distancia "d" del conductor al punto. Al representar el campo magnético generado por una corriente en un conductor utilizando líneas de campo, se aprecia que están más separadas entre sí al alejarnos del conductor.

$$B \propto \frac{1}{d}$$

- Además, el módulo del campo magnético generado por una corriente que circula en un conductor recto es directamente proporcional a dicha intensidad.

$$B \propto I$$

Por lo tanto, para una corriente en un conductor recto: $B \propto \frac{I}{d}$ (Fig. 9)

Para pasar a una igualdad debemos multiplicar por una constante, por lo tanto nos queda.

$$B = k \times \frac{I}{d}$$

Las unidades de las magnitudes en el Sistema Internacional de Unidades son las siguientes:

- [I] = A, Ampere.
- [d] = m, metro.
- [B] = T, Tesla.

"k" es una constante que depende del medio. En el vacío vale:

$$k = \frac{\mu_0}{2\pi}$$

" μ_0 " es otra constante, que se llama permeabilidad magnética en el vacío. Para el aire tiene casi el mismo valor que para el vacío.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$$

Por lo tanto el valor de "k" para el aire y el vacío es

$$k = 2,0 \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$$

Si el medio que rodea al conductor no es aire o vacío, en lugar de " μ_0 " utilizaremos " μ " que es la permeabilidad magnética de ese medio.

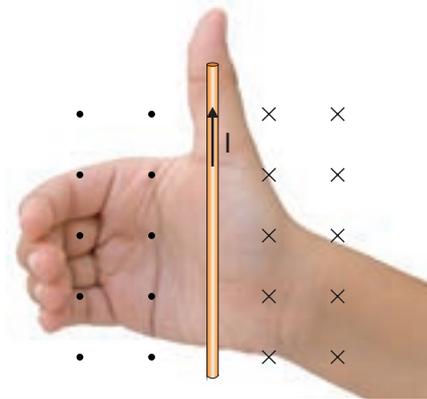


Fig.7. Según la regla de la mano derecha, a la derecha del conductor \vec{B} es entrante y a la izquierda \vec{B} es saliente.

Al módulo del vector \vec{B} lo simbolizaremos $|\vec{B}|$ o simplemente B

Fig.8.

Si aumentamos al doble la distancia "d" del punto al conductor manteniendo constante la intensidad "I", el módulo del campo magnético generado en el punto disminuirá a la mitad.

Si aumentamos al doble la intensidad "I" que circula por un conductor recto, el módulo del campo magnético generado en un punto situado a una distancia "d" fija aumentará al doble.

Fig.9.

El campo magnético resultante en un punto "P", cercano a "n" conductores rectos es la suma vectorial de los campos magnéticos creados por cada conductor en el punto.

$$\vec{B}_{R_p} = \vec{B}_{1_p} + \vec{B}_{2_p} + \vec{B}_{3_p} + \dots + \vec{B}_{n_p}$$

\vec{B}_{R_p} es el vector campo magnético resultante en el punto P.

Fig.10.

Ejemplo 1

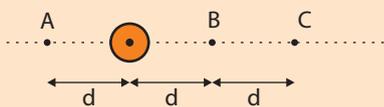


Fig.11. Ejemplo 1.

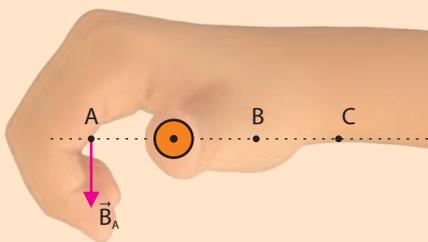


Fig.12. Ejemplo 1.

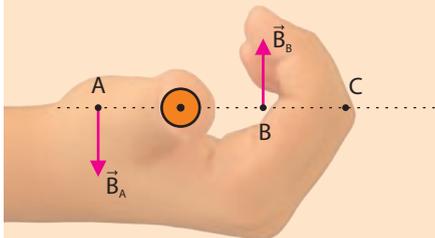


Fig.13. Ejemplo 1.

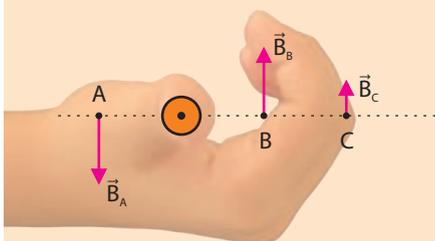


Fig.14. Ejemplo 1.

La figura 11 muestra un conductor recto que se encuentra perpendicular al plano de la hoja y por él circula una intensidad 3,0A con sentido saliente. Calcula el módulo y representa el vector campo magnético en los puntos "A", "B" y "C". $d = 10\text{cm}$.

Primero determinemos el campo magnético generado por la corriente que circula por el conductor en el punto "A".

$$B_A = \frac{k \times I}{d} \quad B_A = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \times 3,0\text{A}}{0,10\text{m}} \Rightarrow B_A = 6,0 \times 10^{-6} \text{T}$$

Para determinar la dirección y el sentido utilizamos la regla de la mano derecha. (Fig.12)

Ahora determinemos el campo magnético en el punto "B".

$B_B = \frac{k \times I}{d}$, como la intensidad es la misma y en este ejemplo la distancia del conductor al punto "A" es la misma que al punto "B",

$$B_A = B_B = 6,0 \times 10^{-6} \text{T}$$

Aplicando la regla de la mano derecha obtenemos la dirección y el sentido (Fig.13)

Por último determinemos el campo magnético en el punto "C".

$B_C = \frac{k \times I}{d}$ como la distancia del conductor al punto "C" es el doble al punto "B", el módulo del campo magnético debe ser la mitad, por lo que $B_C = 3,0 \times 10^{-6} \text{T}$

Podemos también verificarlo con el cálculo,

$$B_C = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \times 3,0\text{A}}{0,20\text{m}} \Rightarrow B_C = 3,0 \times 10^{-6} \text{T}$$

Para representarlo nuevamente aplicamos la regla de la mano derecha. (Fig. 14)

Ejemplo 2.

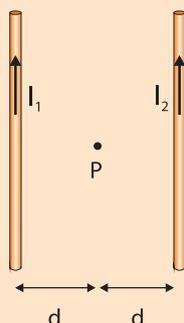


Fig.15. Ejemplo 2.

Dos conductores rectos se encuentran ubicados según muestra la figura 15. Por ellos circulan intensidades $I_1 = 12,0 \text{ A}$ e $I_2 = 5,0 \text{ A}$. $d = 20\text{cm}$.

a) Determina el campo magnético resultante en el punto P (\vec{B}_{RP}).

Para determinar el campo magnético resultante en el punto P (\vec{B}_{RP}), tenemos que calcular y representar el campo magnético generado por cada una de las corrientes que circulan por los conductores rectos en el punto P y luego sumarlos vectorialmente.

$$B_{1P} = \frac{k \times I_1}{d_{1P}} \quad B_{1P} = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \times 12,0A}{0,20m} \Rightarrow B_{1P} = 1,2 \times 10^{-5} T$$

$$B_{2P} = \frac{k \times I_2}{d_{2P}} \quad B_{2P} = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \times 5,0A}{0,20m} \Rightarrow B_{2P} = 5,0 \times 10^{-6} T$$

Aplicando la regla de la mano derecha representamos ambos campos magnéticos (fig 16).

Como los vectores \vec{B}_{1P} y \vec{B}_{2P} tienen igual dirección y sentido opuesto, el resultante de ambos será otro vector de igual dirección. Tendrá el mismo sentido que el de mayor módulo, en este caso \vec{B}_{1P} . Su módulo será la resta de B_{1P} y B_{2P}

$$B_{RP} = B_{1P} - B_{2P}$$

$$B_{RP} = 1,2 \times 10^{-5} T - 5,0 \times 10^{-6} T \Rightarrow B_{RP} = 7,0 \times 10^{-6} T$$

b) Determina el campo magnético resultante en el punto "Q". (Fig. 17a)

Procedemos igual que en la parte "a". Calculamos y representamos el campo magnético generado por cada corriente en el punto "Q" y luego determinamos \vec{B}_{RQ} en forma vectorial.

$$B_{1Q} = \frac{k \times I_1}{d_{1Q}} \quad B_{1Q} = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \times 12,0A}{0,60m} \Rightarrow B_{1Q} = 4,0 \times 10^{-6} T$$

Como la distancia del conductor "1" a Q es el triple de la distancia del conductor "1" a P, el módulo del campo magnético B_{1Q} es la tercera parte de B_{1P}

$$B_{2Q} = \frac{k \times I_2}{d_{2Q}} \quad B_{2Q} = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \times 5,0A}{0,20m} \Rightarrow B_{2Q} = 5,0 \times 10^{-6} T$$

Como el punto "P" y "Q" equidistan del conductor 2 el módulo del campo generado por la corriente "2" en dichos puntos es el mismo.

Aplicando la regla de la mano derecha podemos representar la dirección y el sentido de \vec{B}_{1Q} y \vec{B}_{2Q} (Fig. 17b)

Como los vectores \vec{B}_{1Q} y \vec{B}_{2Q} tienen igual dirección y sentido, \vec{B}_{RQ} tendrá la misma dirección y sentido, y su módulo la suma de los módulos.

$$B_{RQ} = B_{1Q} + B_{2Q} \quad B_{RQ} = 4,0 \times 10^{-6} T + 5,0 \times 10^{-6} T \Rightarrow$$

$$B_{RQ} = 9,0 \times 10^{-6} T$$

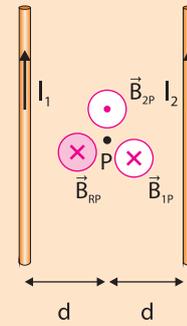


Fig.16. Ejemplo 2.

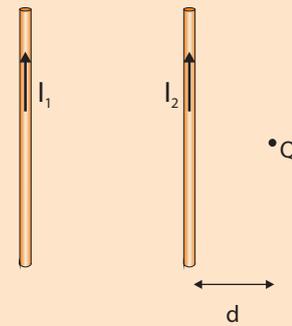


Fig.17a. Ejemplo 2.

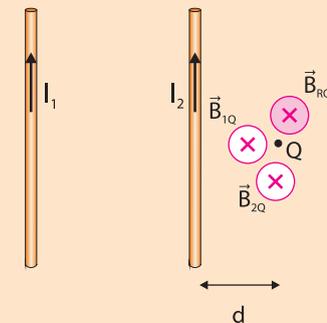


Fig.17b. Ejemplo 2.

Ejemplo 3

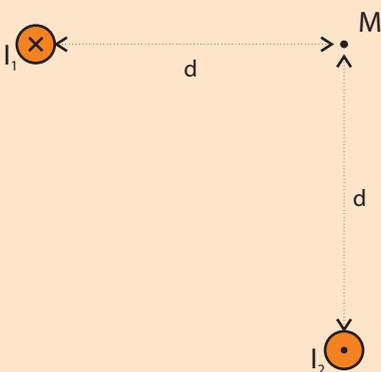


Fig.18. Ejemplo 3.

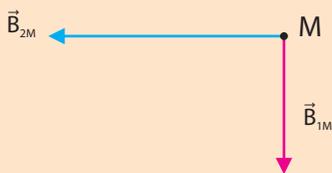


Fig.19. Ejemplo 3.

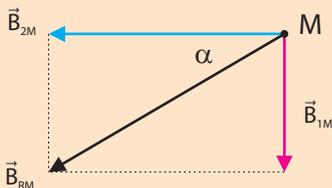


Fig.20. Ejemplo 3.

Dos conductores rectos están ubicados como muestra la figura 18. $I_1 = 5,0A$, $I_2 = 8,0A$, $d = 5,0cm$. Determina el campo magnético resultante en el punto "M".

En primer lugar determinaremos módulo, dirección y sentido del campo magnético creado por la corriente del conductor 1 en el punto "M".

$$B_{1M} = \frac{k \times I_1}{d} \Rightarrow B_{1M} = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \times 5,0A}{0,050m} \Rightarrow B_{1M} = 2,0 \times 10^{-5} T$$

De acuerdo a la regla de la mano derecha, \vec{B}_{1M} es vertical y hacia abajo. Repetimos el planteo para el campo magnético generado por la corriente del conductor 2 en el punto "M"

$$B_{2M} = \frac{k \times I_2}{d} \Rightarrow B_{2M} = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{Tm}{A} \times 8,0A}{0,050m} \Rightarrow B_{2M} = 3,2 \times 10^{-5} T$$

De acuerdo a la regla de la mano derecha, \vec{B}_{2M} es horizontal y hacia la izquierda.

Representemos ambos vectores utilizando la siguiente escala: $1cm = 1,0 \times 10^{-5} T$ (fig. 19).

Utilizando el método del paralelogramo determinamos \vec{B}_{RM} (fig. 20)

La longitud del vector \vec{B}_{RM} es 3,8cm, por lo que $B_{RM} = 3,8 \times 10^{-5} T$. Midiendo el ángulo, $\alpha = 32^\circ$

También podemos determinar analíticamente el módulo de \vec{B}_{RM} , utilizando el Teorema de Pitágoras y su dirección con trigonometría:

$$B_{RM} = \sqrt{B_{1M}^2 + B_{2M}^2} \Rightarrow B_{RM} = \sqrt{(2,0 \times 10^{-5} T)^2 + (3,2 \times 10^{-5} T)^2}$$

$$\Rightarrow B_{RM} = 3,8 \times 10^{-5} T$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{B_{1M}}{B_{2M}} \right) \Rightarrow \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{2,0 \times 10^{-5} T}{3,2 \times 10^{-5} T} \right) \Rightarrow \alpha = 32^\circ$$

Campo magnético generado por una corriente en una espira circular.

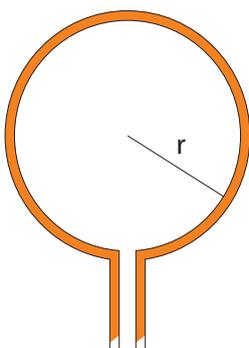


Fig.21. Espira circular de radio "r".

Una espira circular es un conductor en forma de circunferencia (fig. 21). El módulo del campo magnético en el centro de la espira es directamente proporcional a la intensidad "I" que circula por ella e inversamente proporcional al radio de la espira, esto es:

$$B \propto \frac{I}{r}$$

En este caso la constante de proporcionalidad es $\frac{\mu_0}{2}$, por lo que:

$$B = \frac{\mu_0 \times I}{2r}$$

La dirección del campo magnético es perpendicular al plano que contiene a la espira y el sentido está determinado por la regla de la mano derecha aplicada para espiras.

Esta regla dice:

Si colocamos los dedos de la mano derecha (menos el pulgar) arrollados en el sentido de la corriente, el pulgar extendido nos indicará el sentido del campo magnético en el centro de la espira (Fig 22).

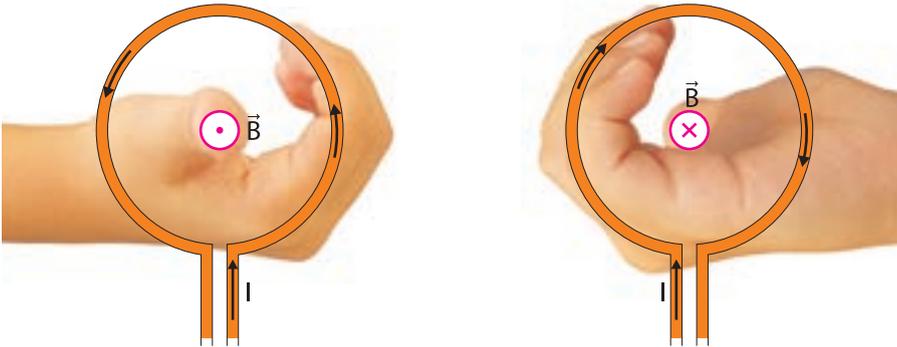


Fig.22. Si la intensidad circula en sentido antihorario, el campo magnético en el centro de la espira es saliente. Si la intensidad circula en sentido horario, el campo magnético en el centro de la espira es entrante.

En la figura 23 vemos una espira de perfil y las líneas que representan el campo magnético que genera la corriente por ella. Las líneas de campo parecen salir de la cara izquierda y entrar por la derecha. Por lo tanto la cara izquierda se comporta como un polo norte de un imán y la derecha como un polo sur.

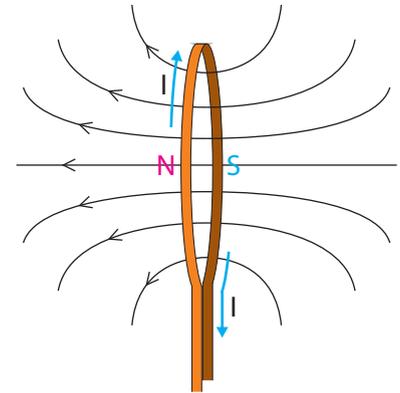


Fig.23. La cara izquierda de la espira se comporta como el polo norte de un imán.

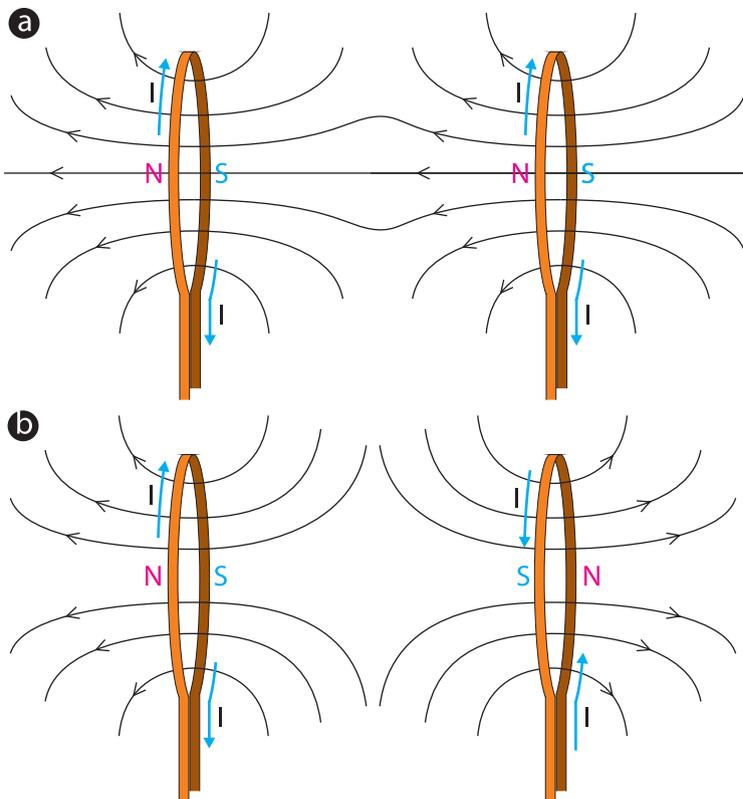


Fig.24. a) La figura muestra como interaccionan dos espiras, de forma similar a como lo hacen dos imanes. Si las caras enfrentadas se comportan como polos de distinto nombre, se atraen b) Si las caras enfrentadas se comportan como polos del mismo nombre, se repelen.

Ejemplo 4

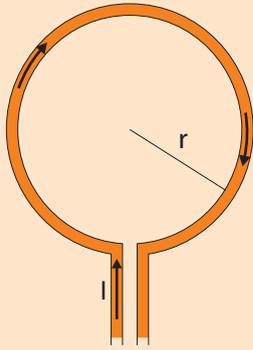


Fig.25. Ejemplo 4.

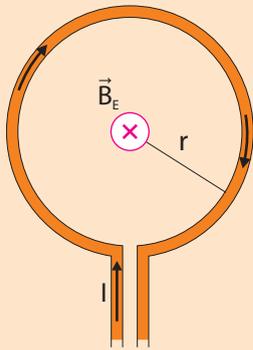


Fig.26. Ejemplo 4.

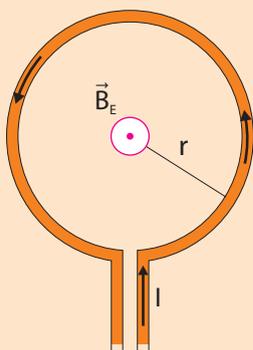


Fig.27. Ejemplo 4.

Por una espira circular de 5,0cm de radio circula una intensidad de 5,0A en sentido horario como muestra la figura 25.

a) Calcula y representa el campo magnético en el centro de la espira.

En primer lugar calcularemos su módulo.

$$B_E = \frac{\mu_0 \times I}{2r} \Rightarrow B_E = \frac{4\pi \times 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} \times 5,0 A}{2 \times 0,050m} \Rightarrow B_E = 6,3 \times 10^{-5} T$$

Utilizando la regla de la mano derecha determinamos dirección y sentido del campo magnético en el centro de la espira.

Al ser entrante, lo representamos \otimes (fig. 26)

b) Indica cómo varía el campo magnético en el centro de la espira si:

I) Aumenta la intensidad al doble.

Como el módulo del campo magnético en el centro de la espira es directamente proporcional a la intensidad que circula por ella, al aumentar "I" al doble también lo hace "B_E".

Como el sentido de la intensidad no cambia, tampoco cambia el sentido del campo magnético.

Por lo tanto $B_E = 2 \times 6,3 \times 10^{-5} T \Rightarrow B_E = 1,3 \times 10^{-4} T$, entrante \otimes

II) Aumenta el radio cuatro veces.

Como el módulo del campo magnético en el centro de la espira es inversamente proporcional al radio, al aumentar "r" cuatro veces, "B_E" se reduce a la cuarta parte. Nuevamente el sentido del campo no varía.

Por lo tanto $B_E = \frac{6,3 \times 10^{-5} T}{4} \Rightarrow B_E = 1,6 \times 10^{-5} T$, entrante \otimes

III) Se invierte el sentido de la corriente.

Al no cambiar el radio de la espira ni el valor de la intensidad que circula por ella, el módulo del campo magnético en su centro tampoco cambia.

Al invertirse el sentido de la corriente, utilizando nuevamente la regla de la mano derecha podemos apreciar que el campo magnético es saliente.(fig. 27)

$B_E = 6,3 \times 10^{-5} T$, saliente \odot

Campo magnético generado por una corriente en un solenoide.

Un solenoide, también llamado bobina, es un conductor enrollado muchas veces, generalmente de forma circular o cuadrada, por lo que se comporta de forma similar a muchas espiras juntas (Fig 28).

Si conectamos los extremos del solenoide a un generador, por este circulará corriente y generará un campo magnético. Las líneas que representan el campo magnético que genera, se aprecian en la figura 29.

Exceptuando las cercanías de los extremos del solenoide, se observa que las líneas de campo en su interior son paralelas y equidistantes. Por lo tanto el campo magnético en esta zona del interior del solenoide se puede considerar uniforme.

En el exterior del solenoide, las líneas de campo salen de uno de los extremos y regresan por el otro, de forma muy similar a un imán recto. El extremo por donde salen las líneas se comporta como el polo norte de un imán y el otro extremo se comporta como un polo sur. Dentro del solenoide las líneas de campo van de sur a norte.

Para determinar el sentido de las líneas de campo en el interior del solenoide usamos la siguiente regla:

Se arrollan los dedos de la mano derecha, exceptuando el pulgar, en el sentido de la corriente. El dedo pulgar extendido nos indica el sentido del campo magnético en el interior del solenoide. Como el polo norte es por el cual salen las líneas de campo, el dedo pulgar indica el polo norte de la bobina (Fig. 30).

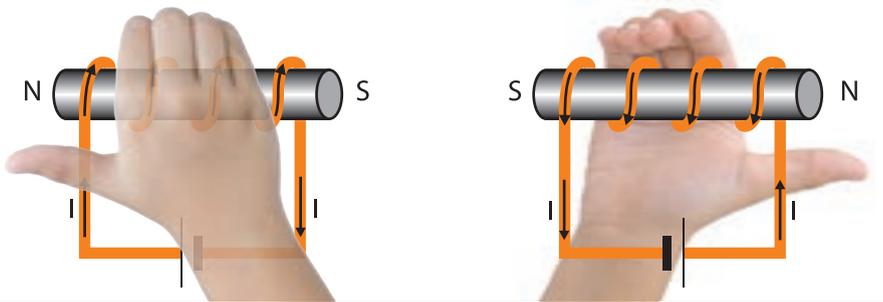


Fig.30. Aplicación de la regla de la mano derecha a solenoides.

Módulo de \vec{B}_s

El módulo " B_s " del campo magnético en el interior del solenoide depende de la intensidad " I ", que circula por él, del largo " L " del solenoide y del número de espiras " N ". No depende del radio de las espiras. Esto es válido si $r \ll L$.

El módulo " B_s " es directamente proporcional a la intensidad " I ", al número de vueltas " N " e inversamente proporcional al largo del conductor " L ".

$$B_s \propto \frac{N \times I}{L}$$



Fig.28. Solenoides o bobinas.

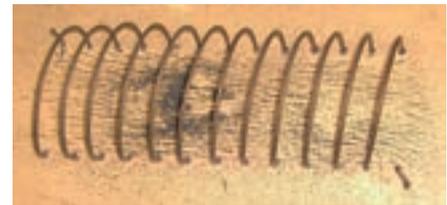


Fig.29. Líneas de campo magnético generado por una corriente en un solenoide. Se aprecia la similitud con las líneas de campo magnético de un imán recto.

por lo tanto $B_s = \mu_o \times \frac{N}{L} \times I$

Como ya hemos visto, $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$

Para simplificar la ecuación, definimos "n" como el cociente entre el número de vueltas "N" y el largo del solenoide "L", esto es:

$$n = \frac{N}{L}$$

"n" es el número de espiras por unidad de longitud. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades es: $[n] = \frac{1}{m}$

(N es un número que indica la cantidad de espiras, por lo tanto no tiene unidades).

Entonces

$$B_s = \mu_o \times n \times I$$

En todas las situaciones que analicemos en forma cuantitativa (problemas, ejemplos) el medio que rodea a los conductores es aire o vacío.

Electroimanes

Si introducimos un núcleo de hierro a un solenoide y lo conectamos a un generador, tenemos un electroimán (Fig. 32). La permeabilidad magnética del hierro " μ_{Fe} " es mucho mayor que " μ_o ", por lo que el campo magnético en el interior de la bobina aumenta considerablemente. Podemos encontrar electroimanes formando parte de timbres, relés, dispositivos eléctricos de apertura o cerradura de puertas, grúas para sujetar y trasladar objetos ferromagnéticos, etc. (Fig. 33).

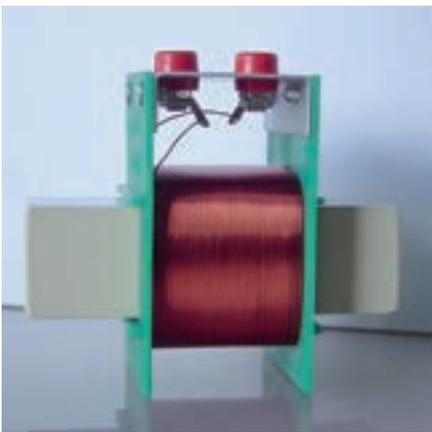


Fig.32. Bobina con núcleo de hierro



Fig.33. Aplicaciones de electroimanes.

PREGUNTAS

- 1) ¿Una corriente eléctrica puede generar un campo magnético?
- 2) ¿De qué dependen las características del campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor?
- 3) ¿Cómo son las líneas de campo que representan el campo magnético generado por una corriente en un conductor recto?
- 4) ¿Cómo varía el módulo del campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor recto en función de la intensidad que circula por él?
- 5) ¿Cómo varía el módulo del campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor recto a medida que aumenta la distancia a este?
- 6) ¿Cómo se calcula el módulo del campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor recto?
- 7) ¿Con qué regla se determina la dirección y el sentido del campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor recto? Explica dicha regla.
- 8) Por un conductor recto circula una intensidad "I" y en un punto alejado del conductor una distancia "d" el campo tiene un módulo $2,0 \times 10^{-4}$ T. Determina el módulo del campo magnético creado por la corriente "I" en el conductor recto:
 - a) a una distancia "3d" del conductor y manteniendo "I" constante.
 - b) a una distancia "d" aumentando 5 veces "I".
 - c) en un punto alejado del conductor "4d" y aumentando "I" al doble.
 - d) en un punto alejado del conductor " $\frac{3d}{2}$ " y manteniendo "I" constante.
 - e) en un punto que se encuentra a una distancia " $\frac{d}{2}$ " y aumentando "I" al doble.
 - f) a una distancia "d" si la intensidad tiene un valor "I" pero cambia de sentido.
- 9) El campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor recto en un punto, tiene un módulo de $2,5 \times 10^{-3}$ T, con dirección vertical y sentido hacia arriba. Indica las características del campo en dicho punto si la intensidad por el conductor se invierte.
- 10) ¿Cómo se determina el campo magnético resultante en un punto cercano a varios conductores rectos por los que circula corriente eléctrica?
- 11) Dibuja un par de espiras enfrentadas y asígnales sentido a las intensidades que circulan por ellas para que se atraigan.
- 12) Dibuja un par de espiras enfrentadas y asígnales sentido a las intensidades que circulan por ellas para que se repelan.

- 13) ¿De qué depende el módulo del campo magnético en el centro de una espira circular?
- 14) ¿Cómo determinamos la dirección y sentido del campo magnético en el centro de una espira circular?
- 15) Tenemos una espira circular de radio "R" por la que circula una intensidad "I". En su centro genera un campo magnético de módulo $5,0 \times 10^{-5} \text{ T}$. Determina dicho módulo del campo magnético si:
 - a) aumenta la intensidad al triple.
 - b) aumenta el radio al doble.
 - c) disminuye el radio a la mitad y se duplica la intensidad.
 - d) aumenta el radio tres veces y disminuye la intensidad a la tercera parte.
 - e) se invierte el sentido de la intensidad, se aumenta al doble la intensidad y el radio de la espira.
- 16) ¿Qué es un solenoide o bobina?
- 17) ¿Por qué decimos que en el interior de un solenoide el campo magnético generado por este es uniforme? ¿También es uniforme en los bordes del solenoide?
- 18) ¿De qué depende el módulo del campo magnético generado en el interior de un solenoide?
- 19) ¿Por qué el campo magnético generado por una corriente eléctrica en un solenoide tiene características similares a las de un imán recto?
- 20) ¿Cómo determinamos la dirección y sentido del campo magnético en el interior de una bobina?
- 21) Por dos bobinas circula la misma intensidad. Una tiene un largo de 0,20m y 1000 vueltas y la otra 0,05m de largo y 200 vueltas, ¿cuál genera campo magnético de mayor módulo en su interior?
- 22) Tenemos dos bobinas de igual forma y por las que circula la misma intensidad. En una de ellas se introduce un núcleo de hierro, ¿En qué se diferencian los campos magnéticos en el interior de las bobinas? Explica.
- 23) Describe tres aplicaciones de electroimanes.

PROBLEMAS

- 1) Por un conductor recto, ubicado en forma horizontal circula una corriente hacia la izquierda de 5,0A, como indica la figura 34. Calcula y representa el campo magnético generado por la corriente en el conductor en los puntos "A", "B" y "C". $d = 2,5\text{cm}$
- 2) Contesta lo mismo que en el problema anterior, pero suponiendo que la intensidad por el conductor aumenta al doble e invierte su sentido.
- 3) Un conductor se encuentra ubicado perpendicular al plano de la hoja. Por él circula una intensidad de 8,0A en sentido entrante como indica la figura 35. Calcula y representa el campo magnético que genera la corriente por el conductor en los puntos "A", "B", "C" y "D". Todos los puntos están ubicados a 40cm del conductor.
- 4) Contesta lo mismo que en el problema anterior pero suponiendo que la intensidad cambia su sentido y se reduce a la cuarta parte.
- 5) Dos conductores, por los cuales circulan corrientes $I_1 = 6,0\text{A}$ e $I_2 = 2,0\text{A}$, se ubican según muestran las figuras 36a, 36b y 36c. Para cada caso determina el campo magnético resultante en los puntos "A" y "B". $d = 4,0\text{cm}$

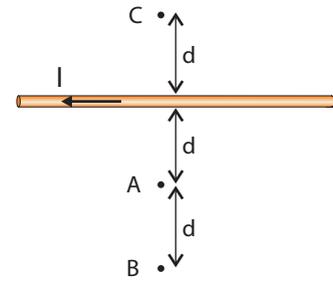


Fig.34. Problema 1.

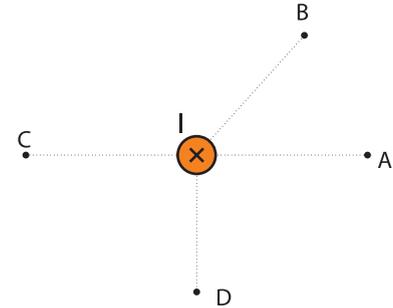


Fig.35. Problema 3.

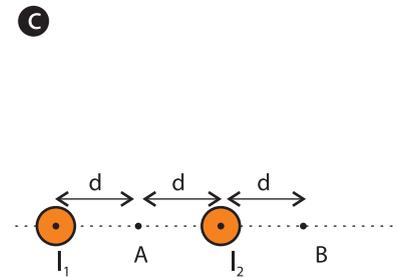
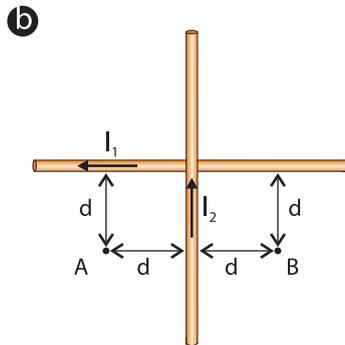
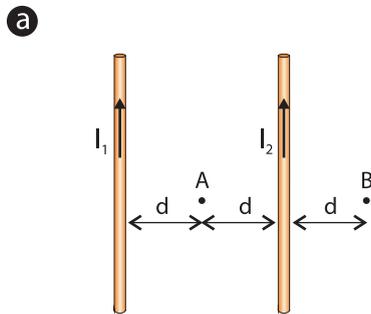


Fig.36. Problema 5.

- 6) Determina en los siguientes casos el campo magnético resultante en el punto "M" (Fig. 37 a, b y c). $I_1 = 6,0\text{A}$ $I_2 = 8,0\text{A}$ $d = 3,0\text{cm}$

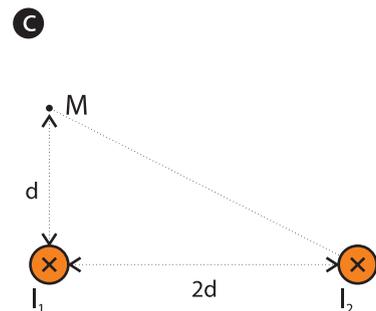
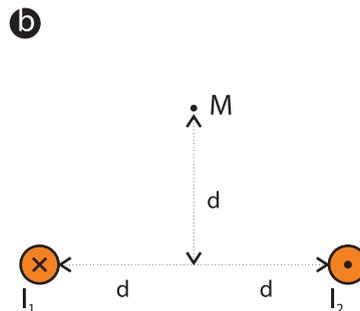
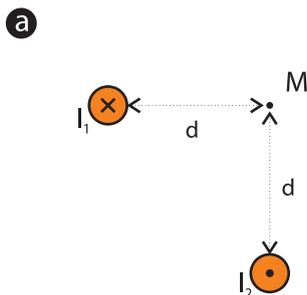


Fig.37. Problema 6.

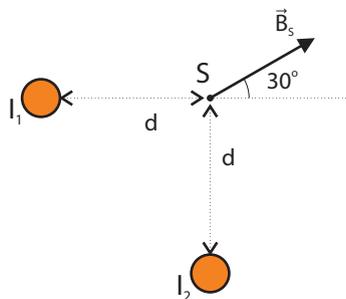


Fig.39. Problema 8.

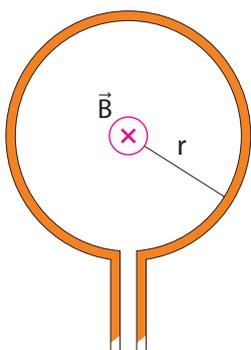


Fig.40. Problema 10.

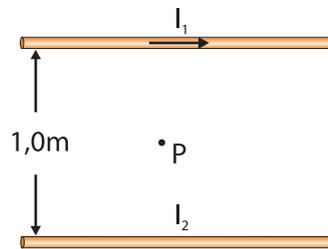


Fig.38. Problema 7.

- 7) Por el conductor "1" de la figura 38 circula una corriente de 3,0A. Por el conductor "2" circula una corriente de valor y sentido desconocido.
 - a) Determina la intensidad por el conductor "2" para que el campo magnético resultante en un punto "P" (equidistante de los conductores) sea nulo.
 - b) Determina la intensidad por el conductor "2" para que el campo magnético en el punto "P" sea entrante y tenga un módulo de $4,0 \times 10^{-7} \text{T}$.
 - c) Determina la intensidad por el conductor "2" para que el campo magnético en el punto "P" sea saliente y tenga un módulo de $2,5 \times 10^{-7} \text{T}$.
- 8) En la figura 39 se representa el campo magnético resultante en el punto "S", de módulo $4,8 \times 10^{-5} \text{T}$. $d = 4,5 \text{cm}$
 - a) Determina valor y sentido de la intensidad por el conductor 1.
 - b) Determina valor y sentido de la intensidad por el conductor 2.
- 9) Calcula y representa el campo magnético en el centro de una espira circular de $r = 4,2 \text{cm}$ y por la que circula una intensidad $I = 12,5 \text{A}$, en sentido horario.
- 10) Determina valor y sentido de la intensidad que debe circular por la espira (Fig.40) para que el campo magnético en su centro sea entrante y de módulo $3,8 \times 10^{-5} \text{T}$. $r = 6,0 \text{cm}$.
- 11) Indica si los solenoides que se muestran en cada figura se atraen o se repelen (Fig. 41 a, b, c y d)

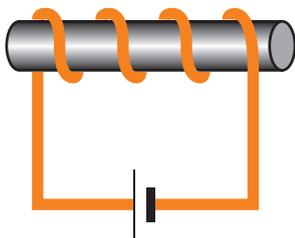


Fig.41a. Problema 11.

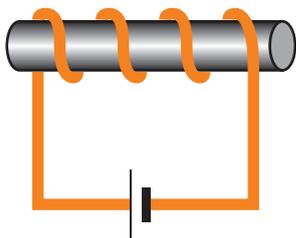


Fig.41b. Problema 11.

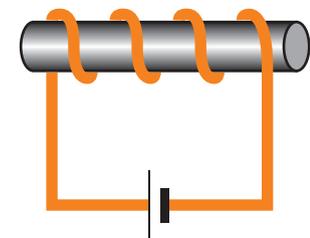
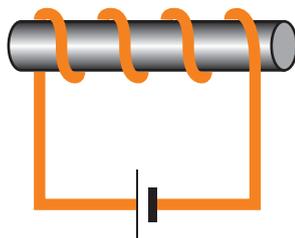


Fig.41c. Problema 11.

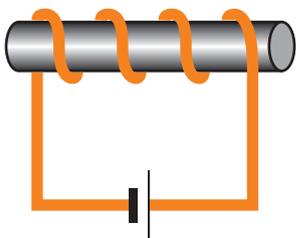


Fig.41d. Problema 11.

- 12) La figura 42 muestra un solenoide formado por 5000 espiras circulares. Su longitud es de 20cm y el radio de su sección transversal es 4,0cm. Por él circula una intensidad de 4,7A.

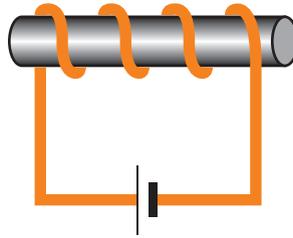


Fig.42. Problema 12.

- a) Calcula y representa el campo magnético en su interior.
- b) Indica cómo varía el campo magnético en el interior del solenoide si:
- Aumenta la intensidad al triple.
 - Aumenta su longitud al doble.
 - Disminuye la cantidad de espiras a la mitad.
 - Disminuye el radio a la tercera parte.
 - Cambia el sentido de la intensidad.
- 13) ¿En qué cambia el campo magnético generado por el solenoide del problema anterior, si introducimos en él un núcleo de hierro?

- 14) El campo magnético en el interior del solenoide de la figura 43 es de $3,8 \times 10^{-4}\text{T}$, horizontal a la izquierda. Determina valor y sentido de la intensidad sabiendo que el solenoide está formado por 800 espiras y tiene un largo de 12,5cm.

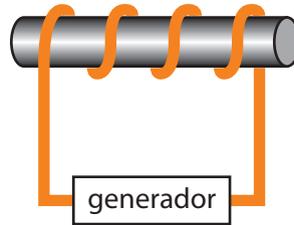


Fig.43. Problema 14.

- 15) Calcula el módulo del campo magnético creado por una corriente eléctrica en cada una de las siguientes situaciones:
- En un punto situado a 4,0cm de un conductor recto cuya intensidad es 10A.
 - En el centro de una espira circular de 4,0cm de radio, por la que circula una intensidad de 10A.
 - En el interior de un solenoide cilíndrico de 10cm de largo, formado por 1000 espiras de 4,0cm de radio y por el que circula una intensidad de 10A.
- 16) Determina la relación entre los módulos de los campos magnéticos obtenidos en la parte "c" y "a" del problema anterior.

Fuerza magnética



Introducción

Hemos visto que cargas eléctricas en movimiento (corriente eléctrica) afectan a un brújula, (experimento de Oersted) es decir, le realizan una fuerza de forma muy similar a como lo hace un imán. Las interacciones entre imanes, tienen el mismo origen que entre un imán y una corriente eléctrica.

Podemos esperar entonces, que los campos generados por los imanes, ejerzan fuerzas sobre las cargas que están en movimiento o sobre las corrientes eléctricas. Ese campo magnético que interactúa con las cargas en movimiento puede ser generado tanto por un imán como por otra corriente.

Fuerza magnética sobre una carga eléctrica en movimiento

Para estudiar esta fuerza, que denominaremos Fuerza Magnética " \vec{F}_M " analizaremos el movimiento de partículas cargadas eléctricamente dentro de zonas donde existen campo magnéticos. Sólo estudiaremos los casos en que dicho campo magnético es uniforme. Esto conlleva que el módulo de la fuerza magnética sea constante.

Módulo de la fuerza magnética.

¿De qué variables depende el módulo de la fuerza magnética sobre una carga eléctrica en movimiento dentro de un campo magnético uniforme?

Para que actúe la fuerza magnética se tienen que dar un conjunto de condiciones que describiremos a continuación.

- En primer lugar tiene que existir una zona con un campo magnético. Si no hay un campo magnético NO actuará la fuerza magnética. El módulo de la fuerza magnética sobre la carga eléctrica en movimiento es directamente proporcional al módulo del campo magnético. $|\vec{F}_M| \propto |\vec{B}|$ (Fig. 1)
- La fuerza magnética actúa si el cuerpo tiene carga eléctrica. La fuerza magnética depende de la carga eléctrica "q" del cuerpo. El módulo

$$|\vec{F}_M| \propto |\vec{B}|$$

Para que actúe una fuerza magnética, debe existir un campo magnético.

Fig.1.

de la fuerza magnética es directamente proporcional a la carga eléctrica del cuerpo $|\vec{F}_M| \propto |q|$ (Fig. 2)

- Si la partícula cargada está en reposo dentro de un campo magnético, no actúa fuerza magnética. El cuerpo cargado debe tener velocidad para que actúe dicha fuerza. Más aún, el módulo de la fuerza magnética es directamente proporcional al módulo de la velocidad. $|\vec{F}_M| \propto |\vec{v}|$ (Fig. 3)

- Además, se ha observado que si la velocidad tiene dirección paralela al campo magnético, la fuerza magnética es nula. Por lo tanto la fuerza magnética también depende del ángulo α formado entre los vectores campo magnético y velocidad.

$$\text{si } \alpha = 0^\circ \text{ y } \alpha = 180^\circ \Rightarrow F_M = 0 \text{ N}$$

En caso que forme un ángulo α diferente de 0° y 180° actúa la fuerza magnética y es proporcional al seno del ángulo " α ". (Fig. 4)

En el caso que las direcciones de \vec{v} y \vec{B} sean perpendiculares, es decir $\alpha = 90^\circ$, el módulo de la fuerza tiene el máximo valor para una carga, velocidad y campo magnético determinado.

Resumiendo:

$$\begin{aligned} |\vec{F}_M| &\propto |\vec{B}| & |\vec{F}_M| &\propto |q| \\ |\vec{F}_M| &\propto |\vec{v}| & |\vec{F}_M| &\propto \text{sen}\alpha \end{aligned}$$

El módulo de la fuerza magnética se determina:

$$|\vec{F}_M| = |q| \times |\vec{v}| \times |\vec{B}| \times \text{sen}\alpha$$

De ahora en adelante expresaremos los módulos de los vectores sin el vector y sin las barras, dado que simplifica su notación. Del mismo modo expresaremos simplemente " q " el valor absoluto de la carga.

$$F_M = q \times v \times B \times \text{sen}\alpha$$

Esta relación es conocida como Ley de Lorentz, en honor al científico holandés que la formuló por primera vez. (Fig. 5)

Dirección de la fuerza magnética.

La fuerza magnética tiene una dirección perpendicular al vector velocidad y al vector campo magnético, esto es:

$$\vec{F}_M \perp \vec{v} \quad \vec{F}_M \perp \vec{B}$$

$|\vec{F}_M| \propto |q|$
Sobre un partícula sin carga eléctrica, NO actúa una fuerza magnética.

Fig.2.

$|\vec{F}_M| \propto |\vec{v}|$
Para que se observen los efectos de la fuerza magnética, la partícula con carga debe estar en movimiento.

Fig.3.

$|\vec{F}_M| \propto \text{sen}\alpha$
Para que se observen los efectos de la fuerza magnética, la partícula con carga debe estar en movimiento NO paralelo al campo magnético.

Fig.4.

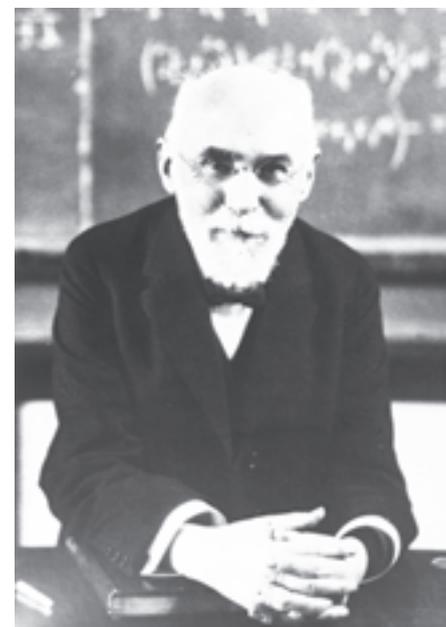


Fig.5. Hendrik Antón Lorentz (1853-1928) Matemático y físico holandés. Realizó grandes aportes a la ciencia en electromagnetismo y relatividad principalmente.

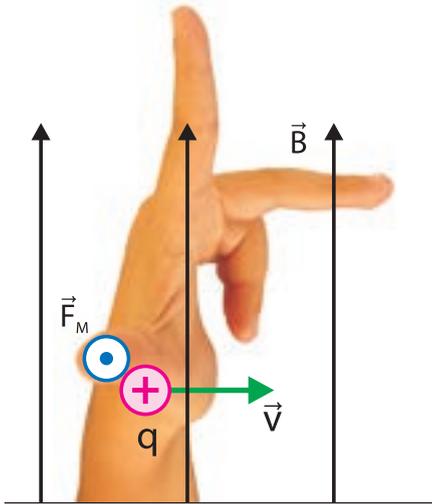


Fig.6. Regla de la mano izquierda

Pulgar \Rightarrow Fuerza
Índice \Rightarrow Campo Magnético
Mayor \Rightarrow Velocidad



Fig.7. Nikola Tesla.

Ingeniero eléctrico. Nacido el 10 de julio de 1856 en el Imperio Austríaco, hoy Croacia. Su mayor aportación en el campo de la electricidad fue sin dudas la teoría de la corriente alterna, lo cual le permitió idear el primer motor de inducción. Concibe el sistema polifásico para trasladar la electricidad a largas distancias. En 1893 consiguió transmitir energía electromagnética sin cables, construyendo el primer radiotransmisor (adelantándose a Guillermo Marconi). En ese año se construyó la primera central hidroeléctrica en las cataratas del Niágara gracias a sus desarrollos. En 1896 se logra transmitir electricidad de dicha central a la ciudad de Buffalo. La corriente alterna sustituyó a la continua. Tesla fue considerado desde entonces el fundador de la industria eléctrica. En su honor se llamó Tesla a la unidad de campo magnético en el Sistema Internacional de Unidades.

¿Cuánto es 1 Tesla?

Un campo magnético de 1 Tesla es aquel que le ejerce una fuerza de 1 Newton a una carga de 1 coulomb cuando se mueve con una velocidad de $1 \frac{m}{s}$ de forma perpendicular a dicho campo.

Fig.8.

De esto último podemos concluir que la dirección de la fuerza es perpendicular al plano determinado por los vectores velocidad y campo magnético.

Sentido de la fuerza magnética

Para determinar su sentido, aplicaremos la regla de la mano izquierda.

Si orientamos el dedo índice en la dirección y sentido del campo magnético \vec{B} y el dedo mayor en la dirección y sentido de la velocidad \vec{v} , el dedo pulgar extendido nos indicará dirección y sentido de la fuerza magnética \vec{F}_M . (Fig. 6)

Aclaración importante.

El sentido obtenido a través de la regla de la mano izquierda es válido si el cuerpo está cargado positivamente. En caso que la carga sea negativa, debemos tomar el resultado opuesto de la regla.

Análisis de las unidades

Las unidades de las magnitudes involucradas son las siguientes:

$[F] = N$, Newton

$[q] = C$, Coulomb

$[v] = \frac{m}{s}$, metro sobre segundo

$[B] = T$, Tesla (Fig. 7)

Despejando de la ecuación de Lorentz el campo magnético:

$$B = \frac{F}{q \times v \times \text{Sen}\alpha} \quad \text{Por lo tanto} \quad [B] = \frac{N}{C \times \frac{m}{s}}$$

Recuerda que el Ampere se define como el cociente entre el Coulomb y

el segundo $\frac{C}{s} = A \Rightarrow [B] = \frac{N}{A \times m}$

Definición de la unidad Tesla

Al cociente entre la unidad Newton y el producto de las unidades Am-

pere por metro se lo define como Tesla. $T = \frac{N}{A \times m}$ (Fig. 8)

(En el capítulo 17 habíamos dejado pendiente la definición de Tesla).

Ejemplo 1.

Un cuerpo cargado $q = 1,2\text{mC}$, se mueve con una velocidad de $300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, con dirección y sentido indicados en la figura 9. En la región existe un campo magnético uniforme \vec{B} de módulo $0,42\text{T}$, de dirección horizontal y sentido hacia la derecha.

a) Determina todas las características de la fuerza magnética. El módulo lo calculamos con la ley de Lorentz $F = q \times v \times B \times \text{sen}\alpha$, en la figura 10 vemos que la velocidad y el campo \vec{B} son perpendiculares, por lo que $\alpha = 90^\circ$

$$F = 1,2 \times 10^{-3}\text{C} \times 300 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,42\text{T} \times \text{sen}90^\circ \Rightarrow F = 0,15\text{N}$$

Para determinar dirección y sentido de la fuerza magnética aplicamos la regla de la mano izquierda. Concluimos que la fuerza es entrante.

b) ¿En qué cambia la respuesta anterior si ahora el campo \vec{B} tiene sentido opuesto?

Los módulos del campo magnético y la velocidad, la carga eléctrica y el ángulo no se modificaron, por lo tanto el módulo de la fuerza magnética no cambia. Sí cambiará el sentido de dicha fuerza.

Aplicando la regla de la mano izquierda obtenemos ahora que la fuerza es saliente. (Fig. 11)

c) ¿Qué dirección y sentido debe tener la velocidad de la carga para que la fuerza magnética sea nula?

La fuerza magnética la obtenemos a partir del producto $F = q \times v \times B \times \text{sen}\alpha$ por lo que si uno de los factores es 0, la fuerza magnética será cero. La carga, la velocidad y el campo no son nulos por lo tanto $\text{sen}\alpha$ debe ser 0.

Los ángulos cuyo seno vale 0 son, 0° y 180° . La velocidad debe ser paralela al campo magnético, (tener la misma dirección). Luego de definida la dirección, ambos sentidos son soluciones. Por lo tanto la velocidad puede tener el mismo sentido ($\alpha = 0^\circ$) o sentido opuesto ($\alpha = 180^\circ$) al vector campo magnético. (Fig. 12)

Esta es una situación en la que existen dos soluciones.

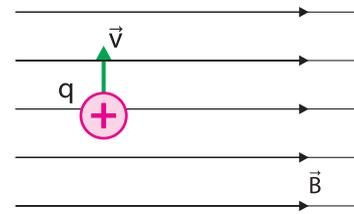


Fig.9.

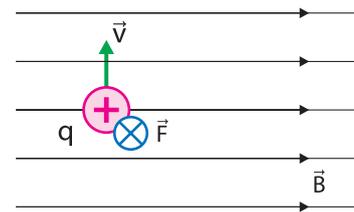


Fig.10. Sobre una carga positiva con una velocidad hacia arriba dentro de un campo magnético hacia la derecha actúa una fuerza entrante.

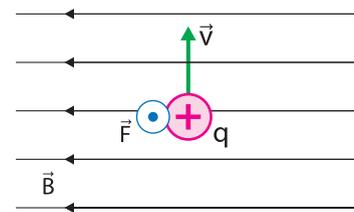


Fig.11. Sobre una carga positiva con una velocidad hacia arriba dentro de un campo magnético hacia la izquierda actúa una fuerza saliente.

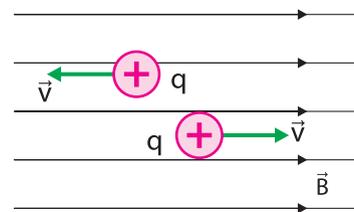


Fig.12. Si la velocidad es paralela al campo magnético la fuerza magnética sobre la carga es nula.

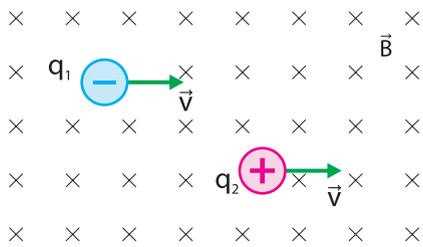


Fig.13. Dos cargas del mismo valor y signo opuesto ingresan con la misma velocidad (horizontal y hacia la derecha) a un campo magnético uniforme entrante.

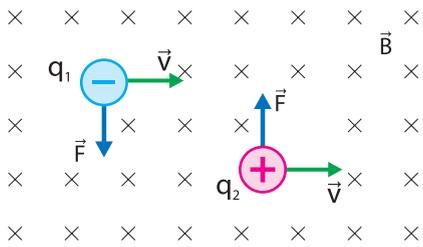


Fig.14. Las fuerzas que actúan sobre dos cargas del mismo valor y signo opuesto que ingresan con la misma velocidad a un campo magnético tienen el mismo módulo y dirección con sentido opuesto.

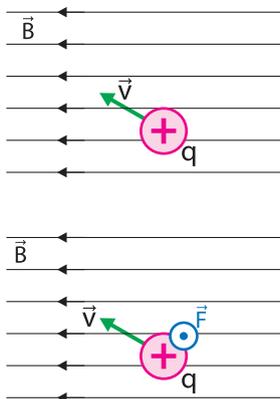


Fig.15. La fuerza magnética sobre la carga “q” es perpendicular al plano que determinan la velocidad y el campo magnético. El sentido lo determinamos con la regla de la mano izquierda.

Ejemplo 2.

Dos cuerpos cargados eléctricamente, ingresan en la región donde existe un campo magnético uniforme de módulo 0,20T, de dirección perpendicular al plano de la hoja con sentido entrante. Ambos cuerpos tienen igual velocidad $5000 \frac{m}{s}$ y valor de carga, pero uno con signo positivo y el otro negativo ($q_1 = -3,0\mu C$ y $q_2 = 3,0\mu C$). (Fig. 13)

Determina todas las características de la fuerza magnética que actúa sobre cada cuerpo cargado.

Para ambos casos la velocidad es perpendicular al campo magnético, por lo tanto $\alpha = 90^\circ$.

Como tienen igual velocidad, valor de carga y se mueven en la zona donde existe el mismo campo magnético, el módulo de la fuerza será igual para ambos cuerpos.

$$F = q \times v \times B \times \text{sen}\alpha \Rightarrow F = 3,0 \times 10^{-6} C \times 5000 \frac{m}{s} \times 0,20T \times \text{sen}90^\circ$$

$$\Rightarrow F = 3,0 \times 10^{-3} N$$

Como las direcciones de las velocidades son iguales, las fuerzas que actúan sobre cada cuerpo también tendrán la misma dirección. Los cuerpos tienen cargas de diferente signo, por lo que las fuerzas tendrán sentidos opuestos. Aplicando la regla de la mano izquierda obtenemos la dirección y el sentido en ambas situaciones. La fuerza magnética sobre el cuerpo de carga positiva es hacia arriba y para el cuerpo de carga negativa es hacia abajo (recuerda que invertimos el sentido que nos indica la regla de la mano izquierda) (Fig. 14)

Ejemplo 3.

Una partícula con carga $q = 3,0nC$ se dispara en una zona donde existe un campo magnético uniforme de módulo 0,40T, con dirección horizontal y sentido hacia la izquierda. La velocidad de la partícula es de $2,5 \times 10^3 \frac{m}{s}$. El ángulo formado entre la velocidad y el campo magnético es de 30° (Fig. 15).

a) Determina todas las características de la fuerza magnética sobre la partícula cargada.

- En primer lugar calculamos su módulo a partir de la ley de Lorentz.

$$F = q \times v \times B \times \text{sen}\alpha, F = 3,0 \times 10^{-9} C \times 2500 \frac{m}{s} \times 0,40T \times \text{sen}30^\circ$$

$$\Rightarrow F = 1,5 \times 10^{-6} N$$

- La dirección y el sentido de la fuerza lo determinamos con la regla de la mano izquierda.

Es perpendicular al plano de la hoja y saliente. (Fig. 15)

b) Resuelve lo mismo que en el caso anterior pero suponiendo que ahora la partícula tiene una carga de $q = -3,0\text{nC}$.

El módulo de la fuerza magnética no cambia y la dirección es la misma. Lo que si cambia es el sentido. Por lo tanto la fuerza, tiene las siguientes características:

- dirección perpendicular al plano de la hoja
- módulo $F = 1,5 \times 10^{-6}\text{N}$
- sentido entrante (tomamos el resultado opuesto de la regla de la mano izquierda porque la carga es negativa). (Fig. 16)

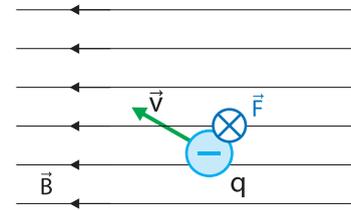


Fig.16. La fuerza magnética es opuesta porque la carga “q” tiene signo negativo. Para determinar su sentido tomamos el resultado opuesto de la regla de la mano izquierda.

Movimiento de un cuerpo cargado en una región donde existe un campo magnético uniforme.

Estudiaremos qué trayectorias puede describir un cuerpo cargado que se mueve dentro de un campo magnético. Supondremos que el campo magnético siempre es uniforme, por lo que en todos los puntos tiene el mismo módulo, dirección y sentido. También consideramos que las cargas sólo interactúan con el campo magnético. Esto significa que no se analizarán las demás interacciones. (Las otras fuerzas que actúen que no sean magnéticas se tomarán como nulas o despreciables).

Primer situación $v = 0 \frac{m}{s}$

- Si la carga eléctrica inicialmente está en reposo, permanecerá en reposo, dado que el campo magnético **NO** le ejerce fuerza magnética en estas condiciones. (Fig. 17).

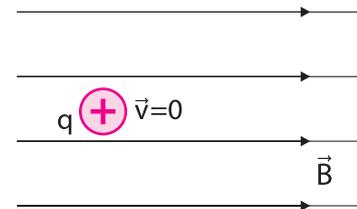


Fig.17. Si una carga eléctrica está en reposo, la fuerza magnética sobre ella será nula y permanecerá en reposo.

Segunda situación. \vec{v} forma un ángulo de 0° o 180° con \vec{B}

- Si la velocidad inicial de la carga eléctrica es paralela al campo magnético, la fuerza magnética será nula (como analizamos cuando hablamos del módulo de la fuerza magnética). Por lo tanto describirá un Movimiento Rectilíneo Uniforme (M.R.U.). (Fig. 18)

Estas dos situaciones son una consecuencia directa de la **1ra Ley de Newton**, que establece: si la fuerza neta sobre un cuerpo es nula, éste tendrá velocidad constante (el reposo es un caso particular de velocidad constante y nula).

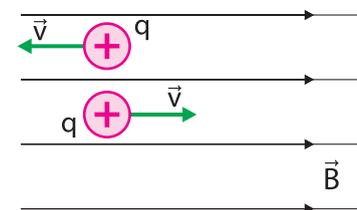


Fig.18. Si una carga tiene velocidad paralela al campo magnético, la fuerza magnética será nula y se moverá con MRU.

Tercer situación. \vec{v} forma un ángulo de 90° con \vec{B}

- Si la velocidad inicial de la carga es perpendicular al campo magnético, sobre la carga actuará una fuerza magnética de módulo constante. Por lo tanto, aplicando la 2da Ley de Newton, el cuerpo tendrá aceleración (los vectores fuerza neta y aceleración siempre tienen la misma dirección y sentido). Como la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad, la aceleración también será perpendicular a la

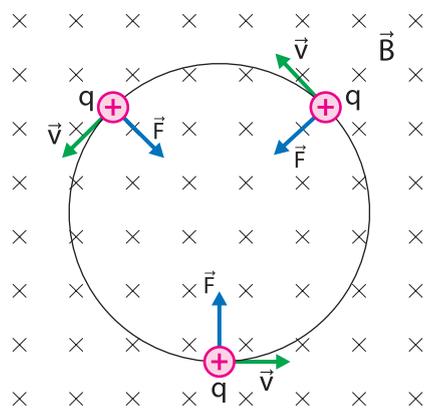


Fig.19. Si una partícula cargada ingresa con velocidad perpendicular al campo magnético, se mueve con movimiento circular uniforme.

Movimiento Circular y Uniforme M.C.U. es aquel que tiene una trayectoria circular y su velocidad cambia en todo instante de dirección y sentido, manteniendo el módulo constante.

Fig.20.

Un movimiento circular queda determinado cuando se conoce su radio de giro "r" y el período "T".

Fig.21.

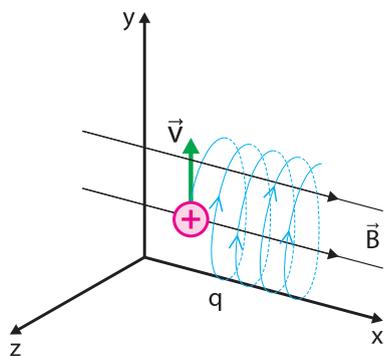


Fig.22. Trayectoria helicoidal de una partícula cargada.

velocidad. Esta particularidad hace que la velocidad cambie en todo instante de dirección pero no de módulo. (Fig. 19)

El movimiento que va a describir la carga en esta situación será "Circular Uniforme" (M.C.U.). Un cuerpo con este movimiento describe una trayectoria circular y el módulo de su velocidad es constante. (Fig. 20)

Un M.C.U. queda determinado cuando conocemos el radio "r" de giro y el período "T". El período "T" es el tiempo que demora el cuerpo en dar una vuelta completa. Como el módulo de la velocidad es constante, también lo será el período "T". (Fig. 21)

Para el caso de la partícula cargada tenemos que el radio de giro está dado por:

$$r = \frac{m \times v}{q \times B}$$

y el período será $T = \frac{2 \times \pi \times m}{q \times B}$ donde m es la masa del cuerpo.

Cuarta situación \vec{v} forma un ángulo diferente de 0°, 90° y 180° con \vec{B}

En la última situación la velocidad inicial tiene una dirección que forma un ángulo diferente de 0°, 90° y 180°. El movimiento será una combinación de un movimiento rectilíneo y circular. Avanzará con MRU en la dirección del campo magnético y a su vez girará con MCU en planos perpendiculares a la dirección del campo magnético. El movimiento resultante será helicoidal. (Fig. 22) Los resortes tiene forma helicoidal, esto es, la trayectoria que describirá tendrá forma de resorte.

Aplicaciones

A principio del siglo pasado, tomó importancia en la colectividad científica el estudio de las partículas elementales (las que se encuentran a nivel atómico).

Adquirió relevancia encontrar métodos experimentales para determinar la masa y la carga de las partículas. El selector de velocidades y el espectrógrafo de masas son ejemplos de dispositivos que se utilizaron con este objetivo.

Selector de velocidades

Si en una misma región establecemos un campo eléctrico y un campo magnético, podemos hacer que la fuerza neta sobre algunos de los cuerpos cargados que se mueven por esa zona sea nula y por lo tanto tengan M.R.U. (tendrán trayectoria recta y velocidad constante).

En el dibujo de la figura 23 las cruces representan un campo magnético uniforme y las líneas verticales representan un campo eléctrico uniforme.

Si en dicha zona ingresa un cuerpo de carga positiva con velocidad perpendicular a las direcciones de los campos, la fuerza neta sobre el cuerpo será la suma vectorial de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética.

La fuerza eléctrica tendrá igual dirección y sentido que el campo eléctrico y módulo $F_E = q \times E$.

La fuerza magnética tendrá módulo: $F = q \times v \times B \times \text{sen}\alpha$ y dirección y sentido determinados por la regla de la mano izquierda.

Si elegimos correctamente la dirección, el sentido y módulos de los campos, podemos lograr que las fuerza \vec{F}_E y \vec{F}_M tengan igual dirección, igual módulo y sentido opuesto para que la fuerza neta sea nula. (en este ejemplo $\alpha = 90^\circ$, $\text{sen } \alpha = 1$)

$$F_E = F_M \Rightarrow q \times E = q \times v \times B, \text{ cancelando } q \text{ obtenemos}$$

$$\Rightarrow E = v \times B \text{ de donde } v = \frac{E}{B}$$

Por lo tanto conociendo los módulos del campo eléctrico y magnético podemos saber la velocidad de las cargas que atraviesen la zona. O mejor aún, podemos elegir los valores de E y B para seleccionar, en función de su velocidad cuáles cargas continúen con trayectoria rectilínea. Las demás cargas, según su velocidad se desviarán hacia arriba o abajo dependiendo de cuál fuerza tenga mayor módulo.

Espectrógrafo de masas.

Si hacemos ingresar cargas eléctricas a una zona donde solamente existe un campo magnético uniforme, éstas se desviarán con una trayectoria circular como muestra la figura 25.

La velocidad con que ingresan la podemos conocer si la carga fue disparada desde un selector de velocidades. Posteriormente se mide el radio "r" de giro.

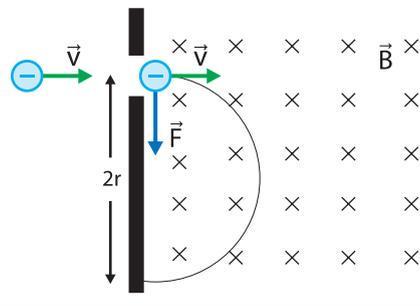


Fig.25. Espectrógrafo de masas.

De la ecuación para el radio de giro:

$$r = \frac{m \times v}{q \times B} \text{ despejamos la masa "m"} \Rightarrow m = \frac{r \times q \times B}{v}$$

Para muchas partículas estudiadas no se conocía aún su carga, por lo que se medía la relación masa-carga $\frac{m}{q}$

Dicha relación nos queda expresada:
$$\frac{m}{q} = \frac{r \times B}{v}$$

Utilizando un espectrógrafo de masas se pudo conocer la relación masa-carga de muchas partículas cargadas no conocidas. Alcanza con saber

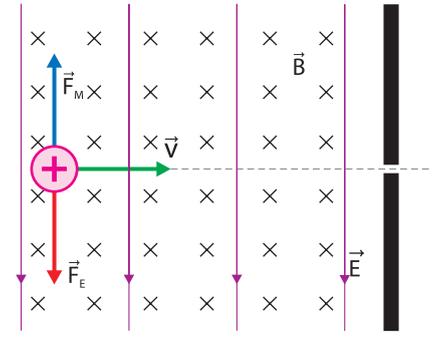


Fig.23. Selector de velocidades.

Selector de velocidades

- El campo eléctrico vertical y hacia abajo, le ejerce una fuerza eléctrica a la carga eléctrica "q" positiva también vertical y hacia abajo.
- El campo magnético, perpendicular al plano de la hoja y entrante, le ejerce una fuerza magnética vertical y hacia arriba a la carga que ingresa a la zona con una velocidad horizontal y hacia la derecha
- Si ambas fuerzas tienen el mismo módulo se cancelan, la fuerza neta es nula y la carga describe un M.R.U. Las cargas eléctricas con la velocidad seleccionada saldrán por un orificio enfrente de su trayectoria.

Espectrógrafo de masas

- Una carga eléctrica con velocidad conocida ingresa perpendicular a un campo magnético también conocido.
- La carga eléctrica describirá un movimiento circular porque \vec{v} forma un ángulo de 90° con \vec{B} .
- Se mide el radio "r" del arco de circunferencia descrito por la carga eléctrica.
- Se utiliza la ecuación y se determina la relación entre la masa y la carga de una partícula cargada desconocida.
- El signo de la carga determina que el giro sea en un sentido o en el otro (regla de la mano izquierda).

la intensidad del campo magnético \vec{B} y la velocidad con que ingresan para luego medir el radio de la trayectoria circular que describen.

El signo de la carga se puede determinar, analizando el sentido en que gira la partícula. Si cumple con la regla de la mano izquierda, la carga es positiva, y si no la cumple, la carga eléctrica es negativa.

Fuerza magnética sobre un conductor recto por el que circula corriente y se encuentra dentro de un campo magnético.

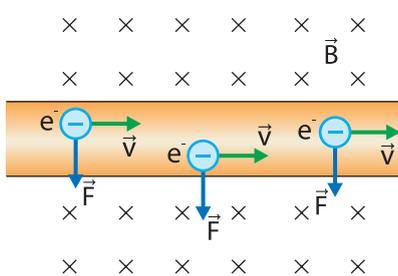


Fig.26.

Hemos estudiado que si una carga eléctrica se mueve en una región donde existe un campo magnético, sobre ella actúa una fuerza de origen magnético.

En forma análoga, si colocamos un conductor por el que circula una corriente eléctrica (cargas eléctricas en movimiento) dentro de una zona donde existe un campo magnético, actuará una fuerza magnética sobre cada una de las cargas eléctricas en movimiento dentro del conductor. (Fig. 26)

¿Qué características tiene la fuerza magnética que actúa sobre un conductor recto por el que circula una corriente eléctrica y que se encuentra en una zona donde existe un campo magnético \vec{B} uniforme?

Características de la fuerza magnética

La fuerza magnética resultante sobre el conductor es la suma de las fuerzas que actúan sobre cada una de las cargas eléctricas que se mueve por el interior del conductor.

- Podemos razonar que cuanto mayor intensidad circule por el conductor, mayor cantidad de cargas eléctricas habrá en movimiento en él, por lo que la fuerza resultante será mayor. $|\vec{F}_M| \propto I$ (Fig. 27)
- El mismo razonamiento podemos realizar con el largo del conductor "L". En un conductor más largo existirán más cargas eléctricas en movimiento, por lo que la fuerza magnética resultante es mayor. $|\vec{F}_M| \propto L$ (Fig. 28)
- El módulo de la fuerza magnética sobre cada carga eléctrica está determinado por la Ley de Lorentz:

$$F = q \times v \times B \times \text{sen}\alpha$$

Además las fuerzas sobre cada carga eléctrica tienen la misma dirección y sentido, ya que podemos considerar que las cargas se mueven con la misma velocidad. Por lo tanto la fuerza resultante, tiene esa misma dirección y sentido. Su módulo es la suma de los módulos de cada una de las fuerzas magnéticas. Esto lo expresamos:

$$F_R = \Delta q \times v \times B \times \text{sen}\alpha$$

$$|\vec{F}_M| \propto I$$

El módulo de la fuerza magnética $|\vec{F}_M|$ sobre un conductor que se encuentra en una zona con un campo magnético \vec{B} , es directamente proporcional a la intensidad de corriente "I" que circula por él.

Fig.27.

$$|\vec{F}_M| \propto L$$

El módulo de la fuerza magnética $|\vec{F}_M|$ sobre un conductor por el que circula una intensidad de corriente "I" y se encuentra en una zona con un campo magnético \vec{B} , es directamente proporcional al largo "L" de dicho conductor.

Fig.28.

donde Δq es la cantidad de carga que está circulando por todo el conductor. Si escribimos en la ecuación $v = \frac{L}{\Delta t}$ donde "L" es el largo del conductor, obtenemos:

$$F_R = \Delta q \times \frac{L}{\Delta t} \times B \times \text{sen}\alpha$$

El cociente $\frac{\Delta q}{\Delta t}$ es la intensidad "I" por el conductor, por lo que nos queda:

$$F_M = I \times L \times B \times \text{sen}\alpha \quad (\text{Fig. 29})$$

Esta ecuación es conocida como la Ley de Laplace. (Fig. 30)

La dirección de la fuerza es perpendicular al conductor y a la dirección del campo.

$$\vec{F}_M \perp \vec{v}$$

$$\vec{F}_M \perp \vec{B}$$

El sentido también lo determinamos a través la regla de la mano izquierda.

Regla de la mano izquierda:

Si colocamos el dedo índice en el sentido del campo magnético y el dedo mayor en el sentido de la intensidad, el pulgar extendido nos determina la dirección y el sentido de la fuerza magnética sobre el conductor. (Fig. 31)

Ejemplo 4.

Por un conductor recto circula una intensidad de corriente de 8,0A en el sentido indicado en la figura 32. El conductor se encuentra en una región donde existe un campo magnético uniforme de módulo 0,025T, perpendicular al plano de la hoja con sentido saliente.

a) Si el largo del conductor es de 80cm, determina la fuerza magnética sobre la corriente que circula por él.

$L = 80\text{cm} \Rightarrow L = 0,80\text{m}.$

el conductor es perpendicular a la dirección del campo magnético, por lo tanto $\alpha = 90^\circ$, $\text{sen } 90^\circ = 1$

$F_M = I \times L \times B \times \text{sen}\alpha \Rightarrow F_M = 8,0\text{A} \times 0,80\text{m} \times 0,025\text{T} \times \text{sen}90^\circ$

$\Rightarrow F_M = 0,16\text{N}$

Para representar la dirección y el sentido de la fuerza magnética aplicamos la regla de la mano izquierda. (Fig. 33)

$F_M = I \times L \times B \times \text{sen}\alpha$

En lugar de escribir F_R (fuerza resultante) escribiremos F_M (fuerza magnética) para recordar que es una fuerza de origen magnético

Fig. 29. Ley de Laplace.



Fig.30. Pierre Simon Laplace (1749-1827). Matemático, físico y astrónomo francés de relevantes aportes en diversas áreas del conocimiento: cálculo probabilístico, análisis matemático, álgebra, electromagnetismo, termoquímica, teoría de los gases.

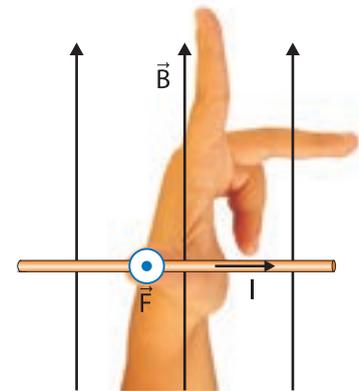


Fig.31. Regla de la mano izquierda

- Pulgar \Rightarrow Fuerza
- Índice \Rightarrow Campo Magnético
- Mayor \Rightarrow Velocidad

El pulgar quedó apuntando hacia nuestra cara por lo tanto lo representamos saliente del plano de la hoja.

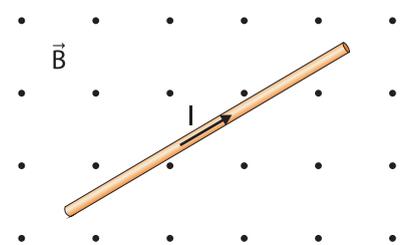


Fig.32.

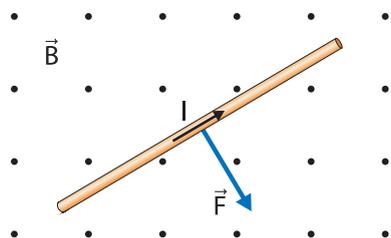


Fig.33.

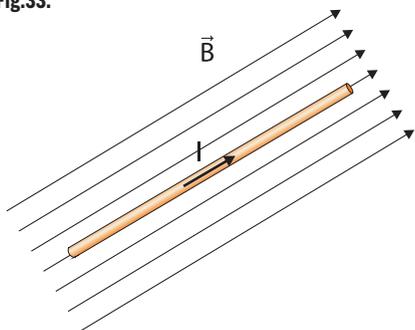


Fig.34.

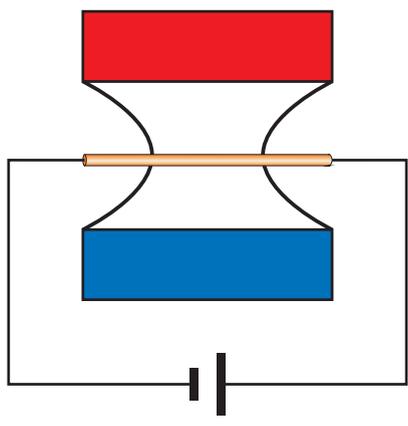


Fig.35.

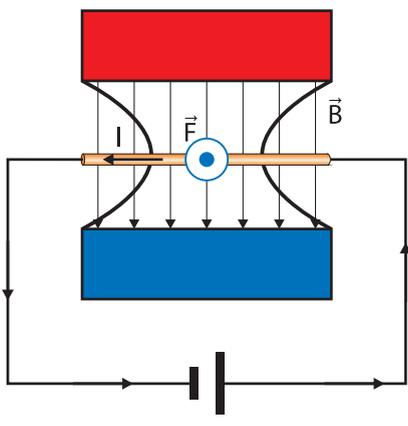


Fig.36.

b) ¿Qué dirección tiene que tener el campo magnético para que la fuerza magnética sobre la corriente en el conductor sea nula?

Para que la fuerza magnética sea nula, la dirección del campo debe ser paralela al conductor, por lo que α será 0° o 180° (recuerda que $\text{sen } 0^\circ = \text{sen } 180^\circ = 0$).

En la figura 34 se muestra una situación, $\alpha = 0^\circ$. Faltaría representar la situación $\alpha = 180^\circ$.

Ejemplo 5.

Un conductor recto de 5,0 cm de largo se conecta a un generador y circula por él una intensidad de corriente de 12 A. Se lo coloca entre dos polos de un imán en herradura (el polo Norte está indicado de color rojo y el polo Sur de color azul) (Fig. 35). En el interior del imán, entre los polos, el campo magnético es uniforme y de módulo 0,28 T.

a) Representa las líneas de campo y el sentido de la corriente eléctrica.

El sentido de las líneas de campo es desde el polo Norte al polo Sur. En la región entre los polos hemos visto que es uniforme, por lo que las líneas son paralelas y equidistantes. El sentido de la intensidad es desde el borne positivo al borne negativo del generador. En este ejemplo el sentido es antihorario. (Fig. 36)

b) Calcula el módulo de la fuerza magnética y represéntala.

$$F_M = I \times L \times B \times \text{sen } \alpha, F_M = 12A \times 0,050m \times 0,28T \times \text{sen } 90^\circ$$

$$\Rightarrow F_M = 0,17N$$

Para determinar dirección y sentido de la fuerza magnética utilizamos la regla de la mano izquierda. Vemos que es saliente. Debemos representar sobre el conductor recto el vector fuerza magnética.

Ejemplo 6.

Por un conductor en forma de "L" circula una intensidad de corriente de 6,0A, desde el punto "A" hacia el punto "C". En la región existe un campo magnético uniforme, perpendicular al plano de la hoja, con sentido saliente y módulo 0,62T .

"AB" = "BC" = 30cm. (fig. 37)

a) Calcula y representa la fuerza magnética sobre cada tramo del conductor.

$$F_M = I \times L \times B \times \text{sen} \alpha, F_{AB} = 6,0A \times 0,30m \times 0,62T \times \text{sen}90^\circ$$

$$F_{AB} = 1,1N$$

Los conductores tienen el mismo largo, circula por ellos la misma intensidad y ambos tramos "AB", "BC" son perpendiculares al campo, por lo tanto $F_{AB} = F_{BC} = 1,1N$

Aplicando la regla de la mano izquierda determinamos dirección y sentido de la fuerza magnética en ambos tramos. (Fig. 38)

b) Calcula la fuerza neta sobre el conductor.

Para determinar \vec{F}_N debemos sumar vectorialmente \vec{F}_{AB} y \vec{F}_{BC}

Primero representamos \vec{F}_{AB} y \vec{F}_{BC} a escala: 2,0cm—1,0N, por lo que medirán 2,2 cm cada uno.

Luego construimos el paralelogramo de lados \vec{F}_{AB} y \vec{F}_{BC} . La diagonal es de 3,1 cm, por lo tanto la fuerza neta tiene un módulo de 1,6 N. Su dirección y sentido están representados en el diagrama vectorial. $\beta = 45^\circ$ (Fig. 39)

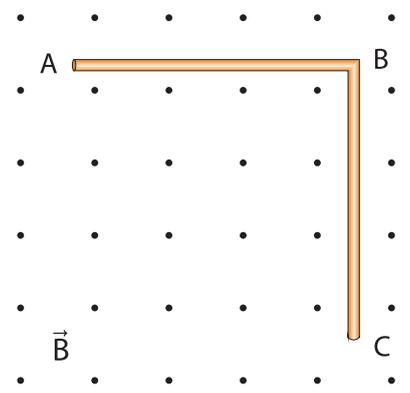


Fig.37.

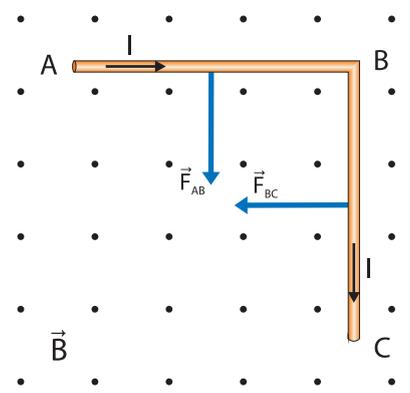


Fig.38.

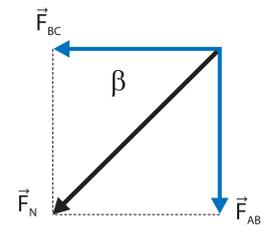


Fig.39.

Interacción entre conductores paralelos

Analizaremos de qué forma interaccionan dos conductores paralelos de igual longitud, por los que circulan intensidades de corriente, I_1 e I_2 respectivamente. (Fig. 40).

La corriente eléctrica " I_1 " que circula por el conductor "1", genera en su entorno un campo magnético \vec{B}_1 . Por el conductor "2" circula la intensidad de corriente " I_2 ". Como se encuentra ubicado dentro del campo magnético \vec{B}_1 , sobre él actúa una fuerza magnética $\vec{F}_{M_2^1}$.

En forma análoga, la corriente eléctrica " I_2 " que circula por el conductor "2", genera en su entorno un campo magnético \vec{B}_2 . Como por el conductor "1" circula la intensidad de corriente " I_1 " y además se encuentra ubicado dentro del campo magnético \vec{B}_2 , sobre él también actúa una fuerza magnética $\vec{F}_{M_1^2}$.

Recuerda que las fuerzas siempre actúan en pares, según la "3ra Ley de Newton Acción y Reacción". Si el campo magnético creado por la corriente "1" (\vec{B}_1) realiza una fuerza $\vec{F}_{M_2^1}$ (acción) sobre la corriente que circula por el conductor "2" (" I_2 "), el campo magnético creado por la corriente "2" (\vec{B}_2) realiza una fuerza $\vec{F}_{M_1^2}$ (reacción) sobre la corriente que circula por el conductor "1" (" I_1 "). (Fig. 41)



Fig.40.

Aplicando la 3ra Ley de Newton $\vec{F}_{M_2^1}$ y $\vec{F}_{M_1^2}$ tienen diferente punto de aplicación, igual dirección y módulo y sentido opuesto.

Fig. 41.

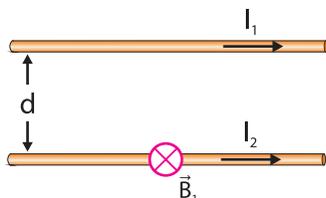
Dicho par de fuerzas de acción y reacción tienen las siguientes características:

- Punto de aplicación sobre diferentes conductores. $\vec{F}_{M_2^1}$ aplicada sobre el conductor "2" y $\vec{F}_{M_1^2}$ aplicada sobre el conductor "1".
- Módulo, es igual $|\vec{F}_{M_2^1}| = |\vec{F}_{M_1^2}|$
- Dirección, es la misma. (determinada con la regla de la mano izquierda)
- Sentido opuesto $\vec{F}_{M_2^1} = -\vec{F}_{M_1^2}$

Procedimiento para calcular y representar el par de fuerzas de interacción magnética.

Primer paso.

Determinemos el campo magnético que genera la corriente "1" (que circula por el conductor "1") en la zona donde se encuentra ubicado el conductor "2", o sea a una distancia "d" del conductor "1".



$$B_1 = \frac{k \times I_1}{d}$$

Con la regla de la mano derecha determinamos la dirección y el sentido de \vec{B}_1 . En este caso tiene dirección perpendicular al plano de la hoja y sentido entrante. (Fig. 42)

Fig.42. Con la regla de la mano derecha determinamos dirección y sentido del campo magnético \vec{B}_1 creado por la corriente "1" en la zona donde se encuentra el conductor "2".

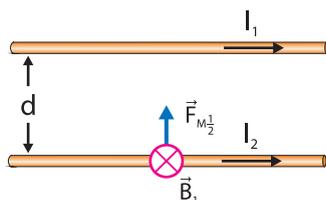
Segundo paso.

Determinemos el módulo de la fuerza magnética $\vec{F}_{M_2^1}$ que actúa sobre la corriente eléctrica "I2" que circula por el conductor "2" que se encuentra dentro del campo magnético \vec{B}_1 .

$$F_{M_2^1} = I_2 \times L \times B_1 \times \text{sen} \alpha, \text{ "L" es largo del conductor "2"}$$

α es 90° , el campo \vec{B}_1 es perpendicular al conductor "2".

$$F_{M_2^1} = I_2 \times L \times \frac{k \times I_1}{d} \times \text{sen} 90^\circ \Rightarrow F_{M_2^1} = \frac{k \times I_1 \times I_2 \times L}{d}$$



Tercer paso.

Para encontrar la dirección y el sentido de la fuerza magnética $\vec{F}_{M_2^1}$ aplicamos la regla de la mano izquierda. (Fig. 43) Para esta situación:

- dedo Índice, entrante como \vec{B}_1 ,
- dedo Mayor, hacia la derecha igual que la corriente "I2",
- dedo Pulgar, apunta hacia arriba.

Fig.43. Aplicamos la regla de la mano izquierda para determinar dirección y sentido de la fuerza magnética $\vec{F}_{M_2^1}$ sobre la corriente "I2" debida al campo magnético \vec{B}_1 .

Cuarto paso.

Repetimos el procedimiento del primer paso pero ahora con el objetivo de determinar el campo magnético que genera la corriente "I₂" (que circula por el conductor "2") en la zona donde se encuentra ubicado el conductor "1", a una distancia "d" del conductor "2".

$$B_2 = \frac{k \times I_2}{d}$$

Nuevamente con la regla de la mano derecha determinamos la dirección y el sentido de \vec{B}_2 . Dirección perpendicular al plano de la hoja y sentido saliente. (Fig. 44)

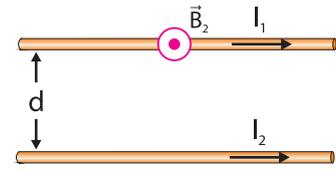


Fig.44. Con la regla de la mano derecha determinamos dirección y sentido del campo magnético \vec{B}_2 creado por la corriente "I₂" en la zona donde se encuentra el conductor "1".

Quinto paso.

Determinemos el módulo de la fuerza magnética $\vec{F}_{M_1^2}$ que actúa sobre la corriente eléctrica "I₁" que circula por el conductor "1" que se encuentra dentro del campo magnético \vec{B}_2 .

$$F_{M_1^2} = I_1 \times L \times B_2 \times \text{sen} \alpha, \text{ "L" es largo del conductor "1"}$$

α es 90°, el campo \vec{B}_2 es perpendicular al conductor "1".

$$F_{M_1^2} = I_1 \times L \times \frac{k \times I_2}{d} \times \text{sen} 90^\circ \Rightarrow F_{M_1^2} = \frac{k \times I_1 \times I_2 \times L}{d}$$

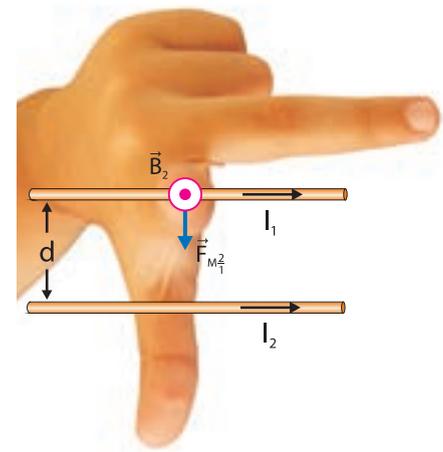


Fig.45. Aplicamos la regla de la mano izquierda. Para determinar dirección y sentido de la fuerza magnética $\vec{F}_{M_1^2}$ sobre la corriente "I₁" debida al campo magnético \vec{B}_2 .

Sexto paso.

Para encontrar la dirección y el sentido de la fuerza magnética $\vec{F}_{M_2^1}$ aplicamos la regla de la mano izquierda. (Fig. 45). Para esta situación:

- dedo Índice, saliente como \vec{B}_2 ,
- dedo Mayor, hacia la derecha igual que la corriente "I₁",
- dedo Pulgar, apunta hacia abajo.

Aclaración.

El cuarto y quinto paso se pueden simplificar aplicando la tercera Ley de Newton. La fuerza que el campo magnético \vec{B}_2 le realiza a la corriente I₁, tiene igual módulo y dirección, y sentido opuesto a la fuerza que el campo magnético \vec{B}_1 le realiza a la intensidad I₂. (Fig. 46)

Fuerza magnética por unidad de longitud.

También podemos definir una magnitud que se denomina fuerza magnética por unidad de longitud, que es el cociente entre el módulo de la fuerza de interacción magnética entre los conductores y la longitud de los mismos.

$$\frac{F_M}{L} = \frac{k \times I_1 \times I_2}{d} \text{ sus unidades en el S.I. son: } \left[\frac{F}{L} \right] = \frac{N}{m}$$

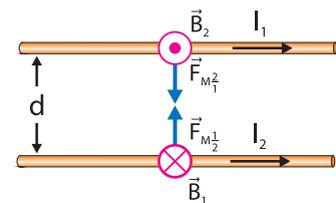


Fig.46. Las fuerzas $\vec{F}_{M_1^2}$ y $\vec{F}_{M_2^1}$ son un par de acción y reacción. Están aplicadas una sobre cada conductor, tienen igual dirección y módulo, y el sentido es opuesto.

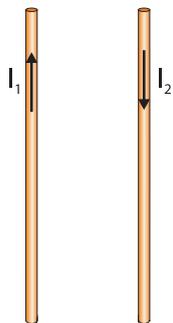


Fig.47.

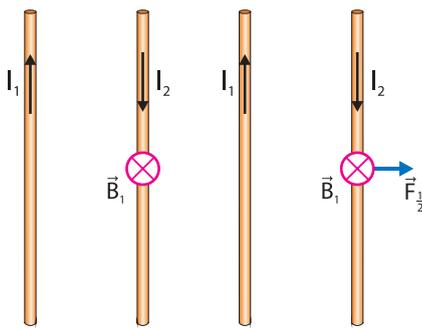


Fig.48a.

Fig.48b.

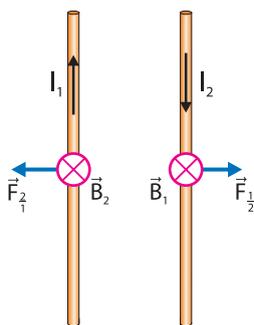


Fig.49.

Ejemplo 7.

Por dos conductores paralelos circulan corrientes $I_1 = 2,5 \text{ A}$ e $I_2 = 6,2 \text{ A}$, en los sentidos indicados en la figura 47. Los conductores están separados 20cm

a) Representa las fuerzas con que interaccionan los conductores.

Primero representamos el campo magnético que genera la corriente "1," en la zona donde se encuentra el conductor "2". Aplicando la regla de la mano derecha, vemos que el campo \vec{B}_1 es perpendicular al plano de la hoja con sentido entrante. (Fig. 48 a).

Luego aplicando la regla de la mano izquierda obtenemos la dirección y el sentido de la fuerza que el campo magnético \vec{B}_1 le hace a la corriente "2". (Fig. 48 b).

Por último aplicando la 3ra ley de Newton la fuerza que le ejerce el campo magnético \vec{B}_2 a la corriente "1," tiene la misma dirección y sentido opuesto que la fuerza que el campo magnético \vec{B}_1 le hace a la corriente "2" (Fig. 49)

b) Calcula la fuerza magnética por unidad de longitud con que interaccionan los conductores.

$$\frac{F}{L} = \frac{k \times I_1 \times I_2}{d} \quad \frac{F}{L} = \frac{2,0 \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \times 2,5\text{A} \times 6,2\text{A}}{0,20\text{m}}$$

$$\Rightarrow \frac{F}{L} = 1,6 \times 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

c) Si los conductores tienen 2,0m de largo. ¿Cuál será el módulo de las fuerzas de interacción magnética que se ejercen los conductores?

$$F_M = \frac{F}{L} \times L_{\text{cond.}} \quad F = 1,6 \times 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}} \times 2,0\text{m} \Rightarrow F_M = 3,2 \times 10^{-5} \text{N}$$

Aplicaciones: motor eléctrico

Con la siguiente secuencia, detallaremos en forma simplificada el funcionamiento de un motor eléctrico.

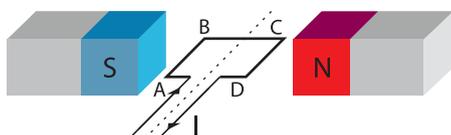


Fig.50a.

La figura 50a muestra una espira de forma rectangular, por la cual circula corriente en el sentido indicado. La espira puede girar libremente en torno a un eje que se representa con una línea punteada. También se muestran dos imanes rectos con polos de diferentes nombres enfrentados. Entre estos polos se establece un campo magnético horizontal hacia la izquierda.

Sobre los tramos AB y CD de la espira actúan fuerzas magnéticas. Si las representamos, de acuerdo a la regla de la mano izquierda, vemos que

sobre el tramo AB actúa una fuerza magnética vertical hacia arriba y sobre el tramo CD una fuerza magnética vertical hacia abajo. (Fig. 50 b)

La espira rectangular tenderá a girar en torno al eje mencionado de forma horaria, por acción de las fuerzas que realizan un torque.

Cuando la espira gire un cuarto de vuelta como muestra la figura 50 c, las fuerzas magnéticas sobre los tramos AB y CD ya no realizan torque, pero por inercia la espira seguirá girando. Si en ese preciso instante cambiamos el sentido de la corriente, nuevamente las fuerzas magnéticas realizarán torque sobre la espira. (Fig. 50 d)

Cuando la espira giró media vuelta, como muestra la figura 50 e, tenemos una situación similar a la primera. La espira sigue girando, y si continuamos cambiando el sentido de la corriente, justo cuando la espira se encuentra en forma vertical, las fuerzas magnéticas tenderán a mantener girando la espira.

¿Cómo podemos lograr cambiar el sentido de la intensidad en la espira rectangular, cuando ésta se encuentra vertical?

Para que la corriente cambie de sentido cada media vuelta, los contactos de la espira terminan en escobillas (contactos móviles). Estas escobillas hacen contacto con anillos semicirculares fijos conectados a un generador de corriente continua. Cuando la espira se encuentra en posición vertical las escobillas abandonan un semi-anillo y se vinculan eléctricamente con el otro. (Fig. 50 f).

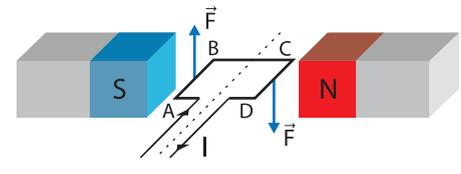


Fig.50b.

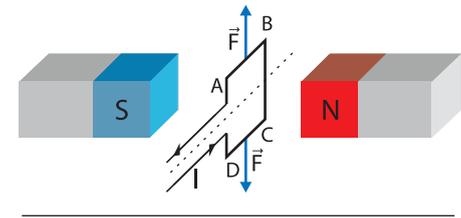


Fig.50c.

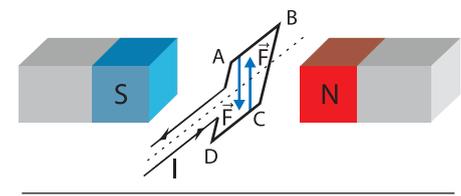


Fig.50d.

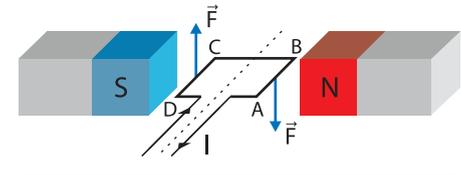


Fig.50e.

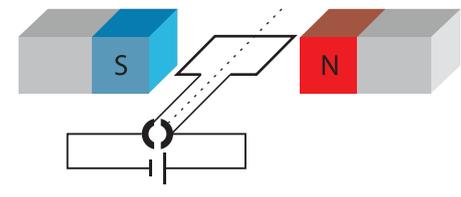


Fig.50f.

PREGUNTAS

- 1) ¿La interacción entre dos imanes es del mismo tipo que la interacción entre dos espiras por las que circula corriente?
- 2) Sobre una carga eléctrica en reposo, ¿actúa una fuerza magnética?
- 3) Si una partícula con carga eléctrica se mueve con MRU, ¿se puede afirmar que el campo magnético en la zona por donde se mueve la carga es nulo? Explica.
- 4) ¿Qué características tiene la fuerza magnética que actúa sobre una carga eléctrica que se mueve en forma paralela a la dirección del campo magnético?
- 5) ¿Qué dirección tiene la fuerza magnética sobre una carga en movimiento, con respecto a la dirección del campo magnético?
- 6) ¿Qué dirección tiene la fuerza magnética sobre una carga con respecto a la dirección de su velocidad ?
- 7) Explica la regla que utilizas para determinar el sentido de la fuerza magnética sobre una carga positiva en movimiento dentro de un campo magnético.
- 8) ¿En qué cambia la respuesta de la pregunta 7 si la carga es negativa?



Acelerador de partículas de Fermilab.

- 9) ¿Cómo se calcula el módulo de la fuerza magnética que actúa sobre una carga eléctrica que se mueve en un campo magnético?
- 10) Contesta si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas:
 - a) el módulo de la fuerza magnética sobre una carga en movimiento varía si cambia el valor de su carga.
 - b) el módulo de la fuerza magnética sobre una carga en movimiento cambia si su velocidad invierte el sentido.
 - c) el módulo de la velocidad de un cuerpo cargado en movimiento cambia debido a la fuerza magnética.
 - d) el módulo de la fuerza magnética sobre dos cuerpos que ingresan a un campo magnético con igual velocidad, igual valor de carga pero con signo opuesto, es diferente.
 - e) El vector velocidad no cambia cuando cambia el signo de la carga eléctrica.
- 11) ¿Qué tipos de movimiento puede tener una carga cuando se mueve en un campo magnético uniforme?
- 12) Explica qué es un selector de velocidades y un espectrógrafo de masas.
- 13) ¿Qué le ocurre a un conductor recto por el que circula una corriente y se encuentra en una región donde existe un campo magnético?
- 14) No se aprecian los efectos de una fuerza sobre un conductor por el que circula una corriente, cuando éste se encuentra en una zona donde existe un campo magnético ¿puede ser esto posible? Explica.
- 15) ¿Qué características tiene la fuerza magnética sobre un conductor, si éste se encuentra paralelo a la dirección del campo magnético?
- 16) ¿Cómo se determina el módulo de la fuerza magnética que actúa sobre una corriente en un conductor recto?
- 17) Si la intensidad de corriente en el conductor cambia de sentido, ¿qué características de la fuerza magnética cambian?
- 18) Si la intensidad de corriente por un conductor recto cambia su valor, ¿qué características de la fuerza magnética cambian?
- 19) ¿Qué relación existe entre la fuerza magnética que actúa sobre una corriente y el largo "L" del conductor?
- 20) Dos conductores por los que circulan corrientes, se ubican en forma paralela. ¿Hay algún tipo de interacción entre ellos?
- 21) ¿De qué depende que dos conductores paralelos por los que circula corriente se atraigan o se repelan?
- 22) Si la distancia entre dos conductores paralelos disminuye a la mitad, ¿en qué cambian las fuerzas magnéticas con que interactúan?
- 23) Por dos conductores paralelos circulan las intensidades de corriente $I_1 = 5,0A$ e $I_2 = 10A$. ¿Sobre cuál conductor es mayor la fuerza magnética? Explica.
- 24) La pregunta 23, ¿tiene relación con la 3era. Ley de Newton?
- 25) Explica el funcionamiento del motor eléctrico.



PROBLEMAS

- 1) Determina para cada caso la dirección y el sentido de la fuerza magnética sobre cada carga. Los vectores verdes representan la velocidad de la carga. (Fig. 51 a y b).

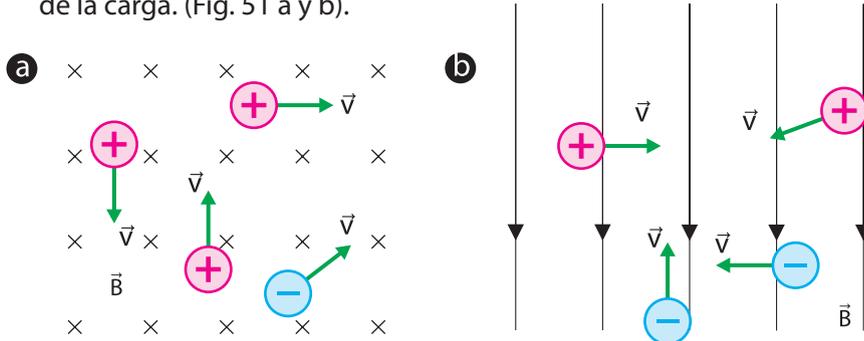


Fig.51 a y b. Problema 1.

- 2) Resuelve nuevamente el problema 1, pero considerando que el campo magnético en cada caso cambia de sentido.
 3) Un cuerpo cargado con $q = 5,0\mu\text{C}$ se mueve con una velocidad horizontal hacia la izquierda, por un campo magnético uniforme de módulo $0,26\text{T}$, con la dirección indicada en las figuras 52 a, b, c y d. Calcula y representa la fuerza magnética sobre el cuerpo en cada caso.

$$v = 3,0 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- 4) Entre los polos de un imán en herradura (Fig. 53) se mueve un cuerpo cargado con $q = 2,0\text{nC}$, con una velocidad de 600m/s , con la dirección y sentido indicadas. Sobre ella actúa una fuerza magnética de módulo $0,40\text{N}$.
- Representa con líneas el campo magnético generado por el imán.
 - Determina la dirección y el sentido de la fuerza magnética que actúa sobre la carga.
 - Calcula el módulo del campo magnético en la región donde se está moviendo la carga.
 - ¿Cómo debería ser la dirección de la velocidad de la carga para que la fuerza magnética sobre ella sea nula? Justifica.
- 5) ¿De qué forma varían las respuestas del problema 4, si la carga es negativa?
- 6) Sobre un cuerpo cargado con $q = -25\text{mC}$ actúa una fuerza magnética de módulo $0,50\text{N}$, perpendicular al plano de la hoja con sentido entrante, cuando se mueve por un campo magnético horizontal hacia la derecha de módulo $0,042\text{T}$.
- Realiza un dibujo donde se represente el campo magnético y la fuerza que actúa sobre el cuerpo cargado.
 - Calcula el módulo de su velocidad y determina la dirección y sentido.
 - Contesta nuevamente la parte b, suponiendo un cuerpo con el triple del valor de carga eléctrica.
 - Contesta nuevamente la parte b si la carga eléctrica del cuerpo tomara el mismo valor pero con signo negativo.
 - Contesta nuevamente la parte b, pero suponiendo que la fuerza fuera perpendicular y saliente con el mismo módulo.

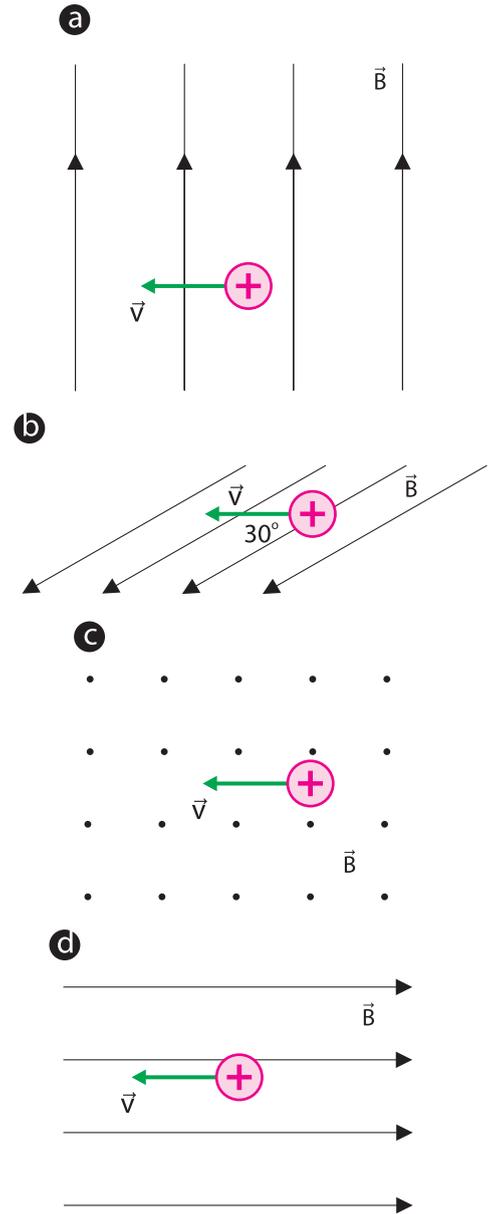


Fig.52 a, b, c y d. Problema 3.

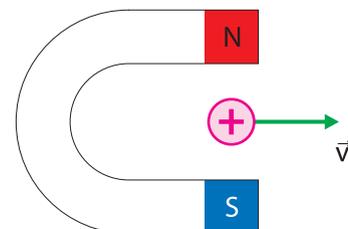


Fig.53. Problema 4.

- 7) La figura 54 a, b y c muestra diferentes conductores ubicados en una región donde existe un campo magnético uniforme. Para cada caso determina la dirección y el sentido de la fuerza magnética sobre cada conductor. (En negro se indica el sentido de la corriente eléctrica).

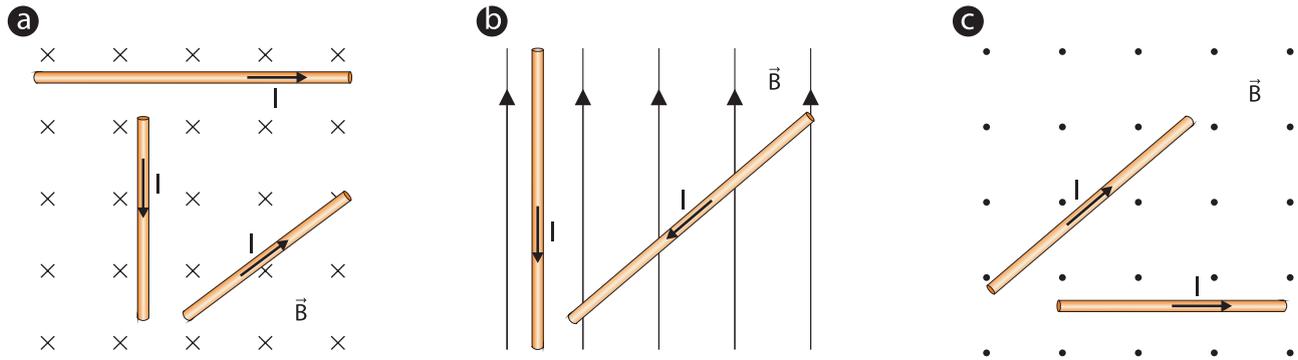


Fig.54 a, b y c. Problema 7.

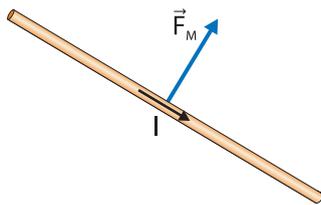


Fig.55. Problema 9.

- 8) Resuelve lo mismo que en el problema 7 pero suponiendo que las líneas de campo invierten su sentido.
- 9) Sobre una intensidad de 15 A que circula por un conductor recto, actúa una fuerza magnética de 0,86N (Fig. 55) debida a un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la hoja. $L = 80 \text{ cm}$. Determina módulo y sentido del campo magnético en la zona donde se encuentra el conductor.
- 10) Un conductor recto por el que circula corriente eléctrica se coloca en una zona donde existe un campo magnético uniforme, vertical y hacia arriba, de módulo 0,14T. Si el conductor se ubica de forma horizontal, sobre él actúa una fuerza magnética perpendicular al plano de la hoja de sentido entrante de módulo 7,2N. $L = 5,0 \text{ m}$
- Representa en un dibujo la situación planteada, donde se muestre el conductor, el campo magnético y la fuerza magnética.
 - Determina valor y sentido de la intensidad por el conductor.
 - ¿Cómo debe ubicarse el conductor para que la fuerza magnética sobre él sea nula? Justifica.

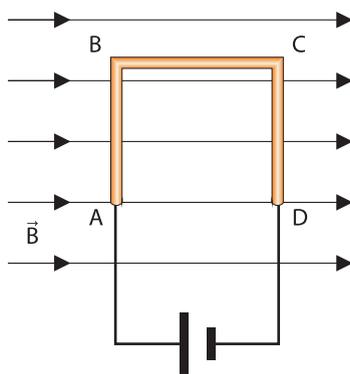


Fig.56. Problema 11.

- 11) Un conductor ABCD con forma de "U" invertida se encuentra en una zona donde existe un campo magnético uniforme de módulo 0,52T, con la dirección y sentido indicados en la figura 56. Cuando se conecta a un generador la intensidad por el conductor es de 3,4 A. Cada tramo del conductor tiene una longitud de 18cm.
- Determina la fuerza magnética sobre cada tramo del conductor.
 - Calcula la fuerza neta sobre el conductor.
 - ¿Qué dirección y sentido podría tener el campo magnético para que se ejerza fuerza magnética sobre todos los tramos del conductor?
 - Para la dirección y sentido indicadas en la parte c, resuelve nuevamente lo solicitado en las partes a y b.

- 12) Un conductor de largo 60cm se dobla por la mitad, de tal manera que forman entre sí un ángulo de 45°. El conductor doblado se coloca en una región donde existe un campo magnético saliente de módulo 0,050T, como indica la figura 57. La intensidad por el conductor es de 8,4 A. Determina la fuerza neta sobre el conductor si el sentido de la intensidad es desde:

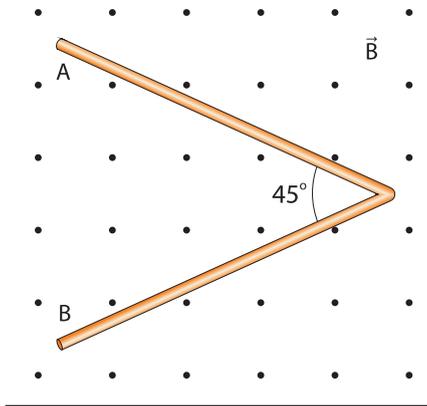


Fig.57. Problema 12.

- a) "A" hacia "B"
 b) "B" hacia "A"
- 13) Un conductor recto de largo 50cm se cuelga mediante una cuerda según muestra la figura 58. La masa del conductor es de 40g y por él circula una corriente de 10 A, con sentido hacia la derecha.
- a) Calcula y representa la fuerzas que actúan sobre el conductor, sabiendo que éste permanece en reposo y horizontal.
 b) Si en la zona se genera un campo magnético uniforme, de dirección perpendicular al plano de la hoja, ¿qué valor y sentido debe tener el campo magnético para que la tensión en la cuerda disminuya a la mitad?
- 14) La figura 59 muestra dos conductores paralelos por los que circulan las corrientes $I_1 = 15 \text{ A}$ e $I_2 = 20 \text{ A}$, separados entre si una distancia de 40cm. El largo de los conductores es de 1,5m.
- a) Determina la fuerza magnética sobre la corriente del conductor "2".
 b) Determina la fuerza magnética sobre la corriente del conductor "1".
- 15) Resuelve lo mismo que en el problema 14, pero suponiendo que los conductores se ubican según muestra la figura 60.
- 16) Resuelve lo mismo que en el problema 14, pero suponiendo :
 a) Cambia de sentido I_1 .
 b) Aumenta al triple el valor I_2 .

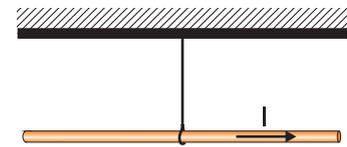


Fig.58. Problema 13.



Fig.59. Problema 14.



Fig.60. Problema 15.

- 17) Tres conductores rectos se ubican paralelos entre sí. Las intensidades por ellos son: $I_1 = 2,8 \text{ A}$, $I_2 = I_3 = 5,2 \text{ A}$. Todos los conductores tienen una longitud de 50cm. Determina la fuerza neta sobre la corriente de cada conductor. $d = 1,2 \text{ cm}$. (Fig. 61) (supón que los conductores interactúan solamente entre sí)

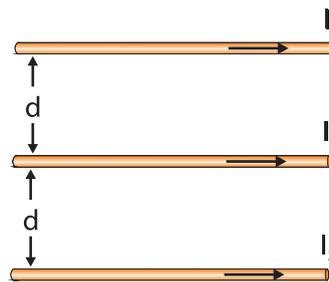


Fig.61. Problema 17.

Inducción electro-magnética



Fig. 1. Michael Faraday

Físico y químico inglés. Nació en Londres el 22 de septiembre de 1791 y falleció el 25 de agosto de 1867. Logró demostrar la relación existente entre los fenómenos magnéticos y eléctricos, fundamento del funcionamiento de transformadores, motores y generadores.



Fig. 2. Joseph Henry

Físico estadounidense. Nació en Albany el 17 de diciembre de 1797 y falleció en Washington en 1878. Las vidas de M. Faraday y Joseph Henry tienen muchos elementos en común. Los dos provenían de familias muy humildes y se vieron obligados a trabajar desde muy jóvenes por lo que no pudieron seguir sus estudios. Trabajó en electromagnetismo con electroimanes y relés. Descubrió la inducción electromagnética (al mismo tiempo que Faraday, quien publicó primero los resultados obtenidos). A la unidad de inductancia se le llamó Henry en su honor.

Introducción

En el capítulo 18 estudiamos que una corriente eléctrica genera un campo magnético. Por lo tanto existe una relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Cabe hacerse la siguiente interrogante:

¿Un campo magnético generará una corriente eléctrica?

Esta pregunta se la formuló Michael Faraday, en el siglo XIX. (Fig. 1) En la investigación de la interacción de ambos fenómenos, logró demostrar que son dos manifestaciones de un mismo fenómeno. Los resultados obtenidos son el fundamento de algunos dispositivos muy utilizados como generadores, transformadores y otros.

Experimentos de Michael Faraday

Faraday investigó con conductores que arrollaba en grandes bobinas e imanes potentes. Él pensaba que si las cargas eléctricas pueden inducir cargas eléctricas (como vimos en el capítulo 10 de electrostática), las corrientes eléctricas que circulan por un conductor deberían inducir corrientes eléctricas en otro conductor.

En el año 1831, trabajó con dos bobinas arrolladas una sobre otra. A una le conectó un amperímetro y a la otra una batería.

Al conectar y desconectar la bobina de la batería, por el amperímetro conectado a la otra bobina circulaba una corriente, lo que indicaba que en dicha bobina, se inducía una corriente.

Lo que lo desconcertaba, era que después de cerrado el circuito se establecía una corriente constante en la bobina y en la otra bobina la corriente inducida cesaba.

Después de experimentar largamente concluyó:

Una corriente eléctrica que varía en el tiempo induce en un circuito cercano otra corriente eléctrica.

El descubrimiento de las corrientes inducidas no tiene nada de casual o improvisado. Entre los años 1824-1828, hizo del orden de 30.000 experimentos, que describía cuidadosamente y registraba en su diario.

Observaciones similares y aparentemente independientes fueron documentadas por el físico norteamericano Joseph Henry. (Fig. 2)

Michael se enfrentó entonces a explicar lo que encontró experimentalmente. No tenía una formación matemática formal, lo que no impidió que hiciera un razonamiento brillante. Se dio cuenta que “algo” debía estar cambiando.

Una corriente constante produce un campo magnético que mantiene una dirección, un sentido y un módulo constante en todos los puntos donde se establece. Este campo magnético no produce ninguna fuerza sobre una carga en reposo. Si no se movía la carga con respecto al campo magnético, entonces el campo magnético se “debería mover” con respecto a la carga. Esto se puede interpretar como un campo magnético que varía con el tiempo. Un campo variable lo podemos generar con una corriente variable.

Si sus conclusiones eran ciertas, moviendo un imán en las cercanías de un conductor, como un solenoide, debería aparecer en él una corriente eléctrica inducida. (Fig. 3)

Faraday satisfactoriamente verificó:

Un campo magnético variable en el tiempo (producido por una corriente variable o un imán en movimiento) induce en otro circuito una corriente eléctrica.

Si las corrientes eléctricas en un conductor aparecen cuando se establecen campos eléctricos, también podemos concluir que los campos magnéticos variables generan campos eléctricos.

Estos avances dejaron establecido definitivamente que los fenómenos eléctricos y magnéticos no son independientes, sino que son manifestaciones de un mismo tipo de interacción. Los campos eléctricos pueden generar campos magnéticos y los campos magnéticos pueden generar campos eléctricos.

Estos fenómenos se denominan “Inducción Electromagnética”.

Corrientes inducidas

Es importante que los pasos descritos a continuación para obtener corrientes inducidas, los verifiques en el laboratorio de tu liceo. Ello permitirá que compruebes inmediatamente cada afirmación realizada y además fijarás mejor los conceptos al visualizarlos.

Primer paso.

Conectamos un solenoide a un amperímetro y colocamos un imán recto en frente. (Fig. 4). Si mantenemos en reposo uno con respecto al otro, (imán-solenoide), **NO** se observa una corriente inducida en el solenoide (el amperímetro no registra pasaje de corriente).

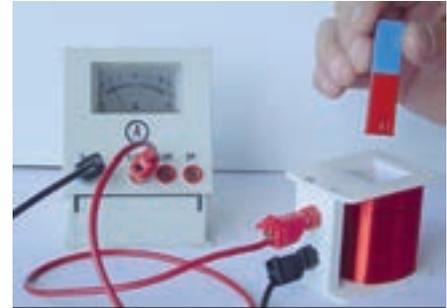


Fig. 3. Al mover un imán en las cercanías de un solenoide, aparece en él una corriente eléctrica inducida, que se detecta con el amperímetro.

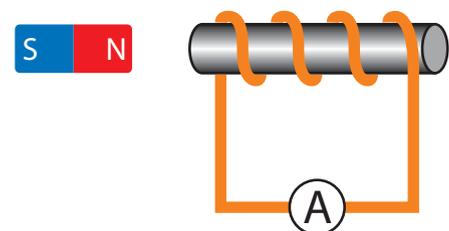


Fig. 4. Imán y solenoide, en reposo uno respecto al otro. No se induce ninguna corriente en la bobina.

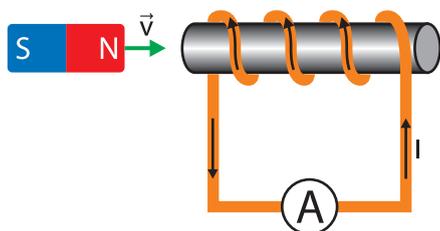


Fig. 5. Mientras acercamos el imán aparece una corriente inducida en la bobina.

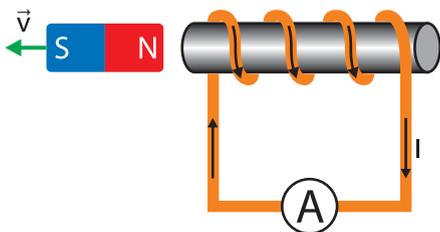


Fig. 6. Mientras alejamos el imán también aparece una corriente inducida, pero de sentido opuesto en la bobina.

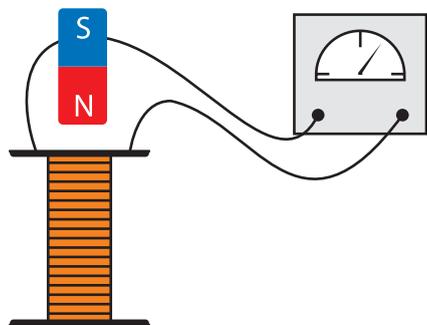


Fig. 7. Al mover el imán recto con respecto al solenoide estamos logrando un campo magnético variable, el que produce una fem inducida en el solenoide.

Segundo paso.

Ahora acercamos el imán al solenoide. En esta situación **SÍ** se aprecia una corriente inducida en el solenoide (el amperímetro registra pasaje de corriente). (Fig. 5). Cuando detenemos el movimiento del imán, la corriente inducida deja de observarse.

Tercer paso.

Alejamos el imán del solenoide. Nuevamente aparece una corriente inducida en él, ahora la corriente tiene sentido contrario a la situación anterior. (Fig. 6)

Cuarto paso.

Si repitiéramos los pasos dos y tres, pero acercando o alejando más rápidamente el imán, observaríamos que la corriente eléctrica va a ser de mayor intensidad.

Análisis y síntesis.

Es claro que se induce corriente en el solenoide debido al movimiento del imán con respecto a él, por ese motivo se denomina **corriente inducida**.

El circuito por el que circula dicha corriente inducida está formado únicamente por el solenoide y el instrumento de medición, amperímetro. Por lo tanto el solenoide se comporta como un generador, que crea en sus extremos una ddp.

Al mover el imán con respecto al solenoide (también podríamos mover al solenoide con respecto al imán) estamos logrando un campo magnético variable (mediante un procedimiento sencillo), el que nos produce una fem inducida en el solenoide. (Fig. 7).

Flujo magnético

Para cuantificar la fem inducida es necesario definir otra magnitud llamada **"flujo magnético"** que se representa con la letra griega " Φ ".

En una situación particular en donde el campo magnético tiene una dirección perpendicular al plano de una espira, el flujo magnético se calcula $\Phi = B_{\perp} \times S$, donde: S es el valor de la superficie y B_{\perp} es el módulo del campo magnético perpendicular a la superficie. (Fig. 8) (Suponemos al campo magnético uniforme, por lo que el módulo es único).

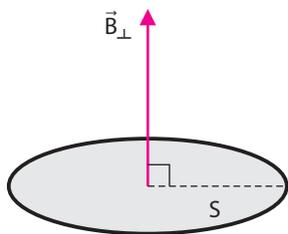


Fig. 8. B_{\perp} el campo magnético es perpendicular al plano de la superficie.

Situación general

A continuación analizaremos la situación general, donde la dirección del campo magnético puede tener cualquier ángulo con respecto al plano de la espira.

Para explicarla debemos previamente definir una nueva magnitud, denominada "Vector Superficie" \vec{S} .

Vector superficie \vec{S} .

Definimos \vec{S} al vector que tiene las siguientes características:

- Dirección, perpendicular al plano de la superficie (Fig.9).
- Módulo de \vec{S} , es igual al valor de la superficie.
- Sentido, arbitrario.

Cálculo del flujo magnético

El flujo magnético por una determinada superficie se define a partir de la siguiente ecuación:

$$\Phi = B \times S \times \cos\alpha$$

- B es el módulo del campo magnético en la región.
- S es el valor de la superficie.
- α es el ángulo formado entre la dirección del campo magnético \vec{B} y el vector superficie \vec{S} . (Fig. 10)

Aclaración: Un error común es considerar a α como el ángulo formado entre la dirección del campo y el plano de la superficie.

Unidades de flujo magnético.

- [B] = T, Tesla.
- [S] = m², metros cuadrados.
- [cos α] no tiene unidades.

[Φ] = T x m² = Wb, que recibe el nombre de Weber (Fig. 11).

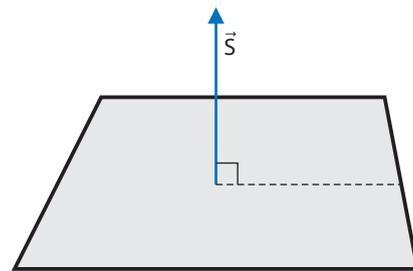


Fig. 9. Vector superficie

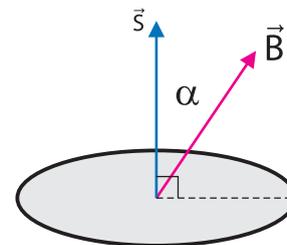


Fig. 10. El vector campo magnético forma un ángulo α con el vector superficie.



Fig. 11. Wilhelm Eduard Weber
Físico alemán. (1804 -1891) En 1831 en la ciudad de Gotinga lo contratan como profesor de Física, recomendado por su amigo Gauss, (donde él ya era director del observatorio astronómico). Sus más importantes aportes fueron dos publicaciones elaboradas en colaboración con Gauss:
*El Atlas des Erdmagnetismus (Atlas de Geomagnetismo), compuesto por una serie de mapas magnéticos de la Tierra.
*Medidas Proporciones Electromagnéticas conteniendo un sistema de medidas absolutas para corrientes eléctricas, que sentó las bases de las unidades que usamos hoy en día. En su honor a la unidad del Sistema Internacional para el flujo magnético, se la denominó Weber, (Wb).

Ejemplo 1.

Una espira cuadrada de lado 5,0cm, se encuentra en una zona donde existe un campo magnético uniforme, horizontal hacia la derecha de módulo 0,20T. Calcula el flujo magnético para las diferentes posiciones que va tomando la espira según muestra la figura 12 a, b, c.

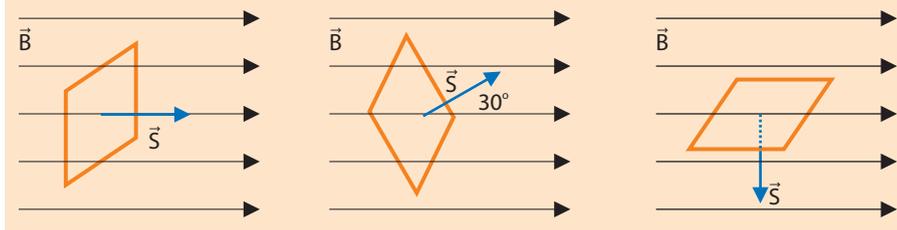


Fig. 12 a. Fig. 12 b. Fig. 12 c.

En primer lugar calculamos el área de la espira.
 $S = l^2 \quad S = (0,050m)^2 \Rightarrow S = 2,5 \times 10^{-3} m^2$.
 Para calcular el flujo magnético utilizamos la ecuación

$$\Phi = B \times S \times \cos\alpha$$

• En la figura "a" se aprecia claramente que el ángulo formado entre los vectores superficie y campo magnético es $\alpha = 0^\circ$,

$$\Phi = 0,20\text{T} \times 2,5 \times 10^{-3}\text{m}^2 \times \cos 0^\circ \Rightarrow \Phi_a = 5,0 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

• En la figura "b" $\alpha = 30^\circ$

$$\Phi = 0,20\text{T} \times 2,5 \times 10^{-3}\text{m}^2 \times \cos 30^\circ \Rightarrow \Phi_b = 4,3 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

• En la figura "c" $\alpha = 90^\circ$

$$\Phi = 0,20\text{T} \times 2,5 \times 10^{-3}\text{m}^2 \times \cos 90^\circ \Rightarrow \Phi_c = 0\text{Wb}$$

Ley de Faraday

Retomemos el análisis de las situaciones donde el imán se alejaba y acercaba al solenoide y por éste se inducía una corriente eléctrica. La cantidad de líneas de campo magnético que atraviesan cada espira del solenoide, varía al acercar o alejar el imán, (recuerda que el campo magnético generado por un imán es más intenso en las cercanías de sus polos), por lo tanto el flujo magnético también varía. Además habíamos observado que el valor de la intensidad de corriente inducida dependía de la rapidez con que movíamos el imán.

La intensidad de corriente inducida es proporcional a la rapidez con que se hace variar el flujo magnético por las espiras del solenoide.

La corriente inducida se establece debido a una fem inducida (ε_i) en la bobina.

La fem inducida en una espira es directamente proporcional a la variación de flujo magnético a través de ella e inversamente proporcional al tiempo en que se produce dicha variación.

Si no existe variación de flujo, no se induce una fem y NO se obtiene una corriente inducida.

La **Ley de Faraday** para determinar la fem inducida en un solenoide se expresa con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

- N es el número de espiras que tiene el solenoide,
- $\Delta\Phi$ es la variación de flujo magnético,
- Δt es la variación de tiempo.
- El signo de menos está vinculado con el sentido de la corriente inducida (veremos cómo determinar el sentido más adelante).

Para que se genere una fem inducida, el flujo magnético debe estar variando.

¿De qué formas podemos variar el flujo magnético?

Las variaciones de flujo magnético se pueden producir por distintos procedimientos:

Primer situación. Variación del flujo magnético debido a variaciones en el campo magnético.

Un campo magnético que esté variando, produce variaciones del flujo magnético en un circuito. Podemos lograr un campo magnético variable, variando la corriente eléctrica que circula por un solenoide, cerrando o abriendo el circuito con un interruptor, conectándolo a una fuente de corriente alterna o acercando y alejando un imán. (Fig. 13)

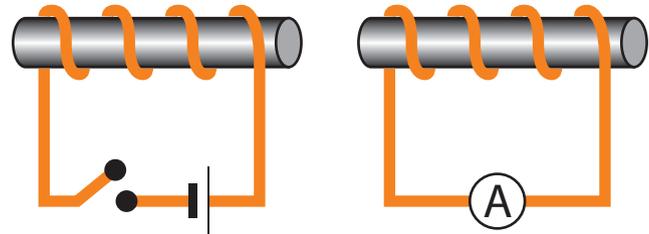


Fig. 13. Al abrir y cerrar el interruptor de la bobina de la izquierda, el campo magnético que genera es variable. Esto hace que el flujo magnético en la bobina de la derecha sea variable.

Segunda situación. Variación del flujo magnético debido a variaciones en la superficie de la espira.

Si el campo magnético permanece constante podemos variar el flujo variando el valor de la superficie. Esto se logra con un dispositivo móvil de tal forma que la superficie de la espira se pueda ir modificando. (Fig. 14)

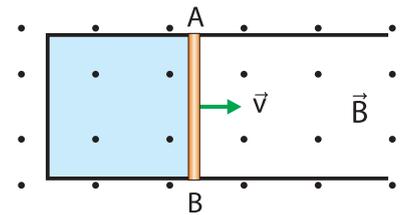


Fig. 14. El tramo móvil del circuito, conductor AB, permite que la superficie de la espira varíe (indicada en color celeste).

Tercer situación. Variación del flujo magnético debido a variaciones en el ángulo α .

El valor del ángulo α que forma la dirección del campo magnético con el vector superficie, se puede variar en forma sencilla girando la espira dentro de un campo magnético constante. Este es un procedimiento de gran aplicación industrial. (Fig. 15)

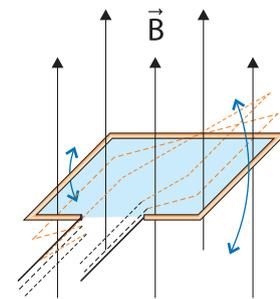


Fig. 15. Al girar la espira dentro del campo magnético, el ángulo α entre \vec{B} y \vec{S} varía.

Cualquier combinación de las 3 situaciones estudiadas producirá un cambio en el flujo magnético.

Ejemplo 2.

El flujo magnético por un solenoide de 100 vueltas, aumenta desde cero hasta 0,40 Wb en un tiempo de 0,20s (suponemos que el flujo cambia uniformemente).

a) Determina la fem inducida en los extremos del solenoide.

Aplicando la Ley de Faraday

$$\epsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \epsilon_i = -100 \frac{0,40\text{Wb} - 0\text{Wb}}{0,20\text{s}} \Rightarrow \epsilon_i = -200\text{V}$$

Observa que la Fem inducida es negativa, más adelante veremos el significado físico de este resultado.

b) En el solenoide se produce la misma variación de flujo pero en un tiempo cuatro veces mayor. Calcula la fem inducida en sus extremos. Como el tiempo es cuatro veces mayor, la fem inducida debe ser cuatro veces menor, por lo tanto $\epsilon_i = -50V$. Verifiquemos con el cálculo a partir de la ecuación

$$\epsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad \epsilon_i = -100 \frac{0,40Wb - 0Wb}{0,80s} \Rightarrow \epsilon_i = -50V$$

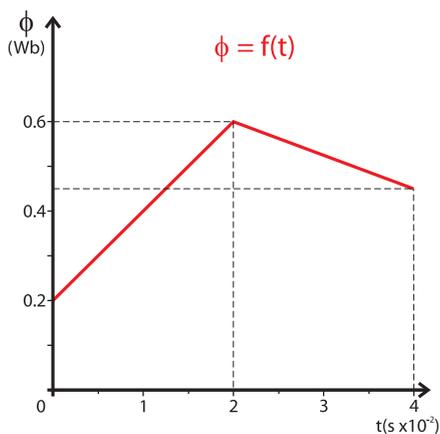


Fig. 16. $\Phi = f(t)$

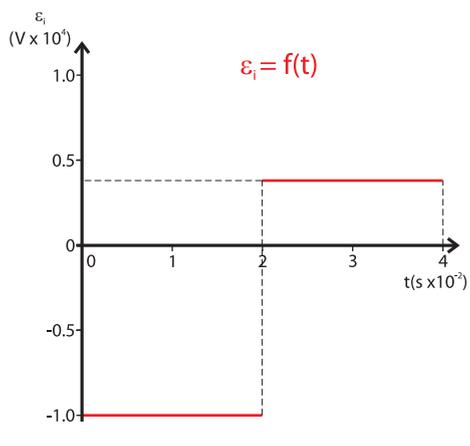


Fig. 17. $\epsilon_i = f(t)$.

El valor positivo de la intensidad significa que tiene un sentido de circulación y el valor negativo el sentido opuesto.

Ejemplo 3.

Se conectan en serie una bobina de 500 vueltas y una resistencia de $2,0k\Omega$. El flujo magnético que atraviesa dicha bobina cambia como se muestra en la gráfica $\Phi = f(t)$. (Fig. 16)

a) Determina la fem inducida en los extremos de la bobina y construye la gráfica $\epsilon_i = f(t)$.

En la gráfica $\Phi = f(t)$ el cociente $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ corresponde al valor de la pendiente. Por lo tanto si hacemos su cálculo y la multiplicamos por $-N$, obtenemos el valor de la fem inducida.

Observando en la gráfica $\Phi = f(t)$ la forma como varía el flujo magnético con respecto al tiempo, vemos que se distinguen dos tramos rectos diferentes. Por lo tanto tendremos dos valores diferentes de fem inducida en la bobina.

Para el primer tramo,

$$\epsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \epsilon_i = -500 \frac{0,60Wb - 0,20Wb}{2,0 \times 10^{-2}s - 0s} \Rightarrow \epsilon_i = -1,0 \times 10^4 V$$

Para el segundo tramo

$$\epsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \epsilon_i = -500 \frac{0,45Wb - 0,60Wb}{4,0 \times 10^{-2}s - 2,0 \times 10^{-2}s} \Rightarrow \epsilon_i = 3,8 \times 10^3 V$$

b) Determina la intensidad de corriente inducida que circula por la resistencia.

Suponemos la resistencia interna de la bobina despreciable, por lo que

$$I = \frac{\epsilon_i}{R}$$

Para el primer tramo $I_1 = \frac{-1,0 \times 10^4 V}{2000\Omega} \Rightarrow I_1 = -5,0A$

Para el segundo tramo $I_2 = \frac{3,8 \times 10^3 V}{2000\Omega} \Rightarrow I_2 = 1,9A$

La primera intensidad es negativa. ¿Cómo se interpreta dicho signo? La intensidad por un conductor puede tener dos sentidos posibles, hacia un lado o hacia el otro. Una forma de especificar hacia qué lado circula es a través de los signos, por lo que tendremos que aclarar el criterio de signos utilizado.

Ley de Lenz

Esta ley nos permite determinar el sentido de la corriente inducida y su enunciado es el siguiente:

El sentido de la corriente inducida es tal, que sus efectos magnéticos se oponen a la causa que la origina.

Cuando analizamos la Ley de Faraday planteamos que el signo negativo estaba vinculado con el sentido de la corriente inducida.

Dicho signo es una forma de expresar que la fem inducida produce una corriente inducida **siempre en oposición** a la causa que la está originando. Para comprender la Ley de Lenz analizaremos dos situaciones:

Primer situación, un imán recto se acerca a un solenoide.

Si un imán recto se acerca a un solenoide como muestra la figura 18, el flujo magnético en el solenoide aumenta porque el campo magnético que genera el imán es mayor cerca de sus polos. Esto hace que en el solenoide se origine una fem inducida. La misma genera una corriente eléctrica inducida, que detectamos en el amperímetro.

A su vez la corriente inducida origina un campo magnético, que se denomina campo magnético inducido \vec{B}_i (representado en negro). Este campo magnético inducido \vec{B}_i se opone al cambio del flujo magnético a través del solenoide.

La causa que originó la corriente inducida es el aumento del flujo magnético al **acercar el polo Norte** del imán. Por lo tanto el **campo magnético inducido \vec{B}_i** , **se opondrá** a que el flujo magnético aumente. La forma de oponerse es creando otro polo Norte en el solenoide, en la cara enfrentada al imán. De esta forma el solenoide repele al imán.

Conociendo la dirección del campo magnético inducido \vec{B}_i , aplicamos la **regla de la mano derecha**, para determinar el sentido de la corriente inducida. Orientamos el pulgar en la dirección y sentido del campo magnético inducido, y el resto de los dedos enrollados, nos indican hacia dónde circula la corriente inducida por el solenoide.

Si el flujo de campo magnético Φ aumenta, el vector campo magnético inducido tiene sentido opuesto al vector campo magnético que lo produce.

Segunda situación, alejamos el imán del solenoide.

Si ahora retiramos el imán recto, al alejar el polo norte el flujo magnético en el solenoide disminuye. Esto genera una fem inducida en el solenoide, que origina a su vez una corriente eléctrica inducida. Esta corriente eléctrica inducida crea un campo magnético \vec{B}_i . Dicho campo magnético inducido se opondrá a que el flujo magnético disminuya, por lo que tenderá a



Heinrich Friedrich Emil Lenz.

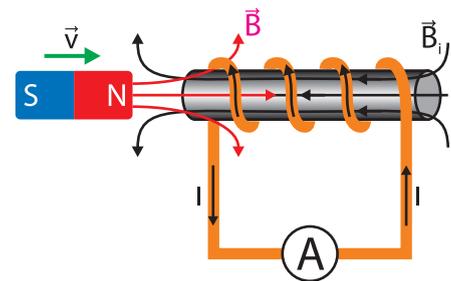


Fig. 18. Mientras acercamos el imán, el flujo magnético en el solenoide está aumentando porque el campo magnético aumenta. Por lo tanto se establece una fem inducida en el solenoide que provocará una corriente inducida. La corriente inducida creará un campo magnético inducido \vec{B}_i .

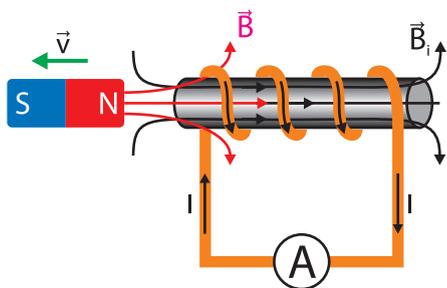


Fig. 19. Mientras alejamos el imán, el flujo magnético en el solenoide está disminuyendo porque el campo magnético disminuye. Por lo tanto la fem inducida en el solenoide provocará una corriente inducida que creará un campo magnético inducido \vec{B}_i que se opondrá a dicha disminución.

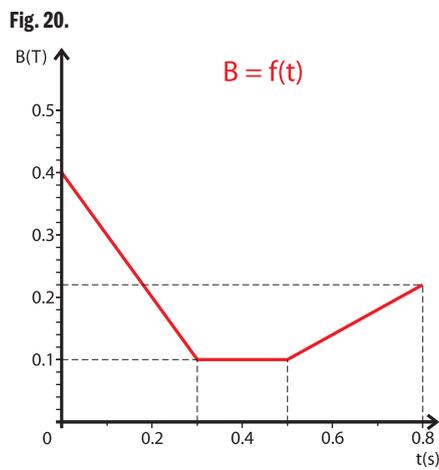
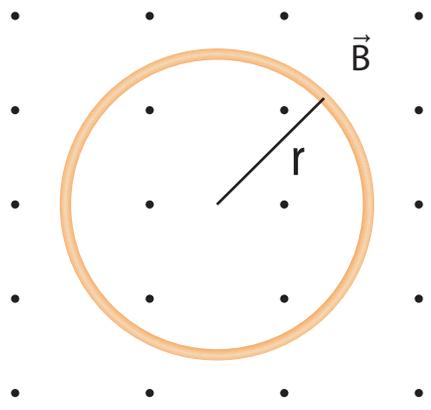
“reforzarlo”. Entonces creará un polo Sur en el solenoide, en la cara enfrentada al imán. De esta forma el solenoide atrae al imán.(Fig. 19)

Volvemos a utilizar la regla de la mano derecha para determinar el sentido de la corriente inducida por la bobina. Es claro que tendrá sentido opuesto al que tenía cuando el imán se acercaba.

Si el flujo de campo magnético Φ disminuye, el vector campo magnético inducido tiene el mismo sentido que el vector campo magnético que lo produce.

En resumen, según la Ley de Lenz:

Si Φ aumenta \Rightarrow	\vec{B}_i es opuesto al campo magnético que lo origina	\Rightarrow	\vec{B}_i tiende a disminuir el flujo magnético oponiéndose al aumento del flujo magnético
Si Φ disminuye \Rightarrow	\vec{B}_i tiene igual sentido al campo magnético que lo origina	\Rightarrow	\vec{B}_i tiende a aumentar el flujo magnético oponiéndose a la disminución del flujo magnético



Ejemplo 4.

Una espira circular de radio 20cm es atravesada por un campo magnético saliente variable. (Fig. 20) El módulo del campo magnético cambia según la gráfica $B=f(t)$ (Fig. 21)

a) Construye la gráfica de flujo magnético en función del tiempo.

Como la espira se encuentra en el plano de la hoja el vector superficie es saliente, por lo que formará 0° con el campo magnético.

$$\Phi = B \times S \times \cos\alpha \quad , \quad S = \pi \times r^2 \Rightarrow S = 3,14 \times (0,20 \text{ m})^2 \quad S = 0,13 \text{ m}^2$$

Calculamos Φ para $t = 0,00\text{s}$

$$\Phi_0 = 0,40\text{T} \times 1,3 \times 10^{-1}\text{m}^2 \cos 0 \Rightarrow \Phi_0 = 5,2 \times 10^{-2}\text{Wb}$$

Calculamos Φ para $t = 0,30\text{s}$

$$\Phi_{0,3} = 0,10\text{T} \times 1,3 \times 10^{-1}\text{m}^2 \cos 0 \Rightarrow \Phi_{0,3} = 1,3 \times 10^{-2}\text{Wb}$$

Calculamos Φ para $t = 0,50\text{s}$

$$\Phi_{0,5} = 0,10\text{T} \times 1,3 \times 10^{-1}\text{m}^2 \cos 0 \Rightarrow \Phi_{0,5} = 1,3 \times 10^{-2}\text{Wb}$$

Calculamos Φ para $t = 0,80s$

$$\Phi_{0,8} = 0,22T \times 1,3 \times 10^{-1}m^2 \cos 0 \Rightarrow \Phi_{0,8} = 2,9 \times 10^{-2}Wb$$

Como S y α en este ejemplo son constantes, podemos concluir que $\Phi \propto B$. Por lo tanto las gráficas $B=f(t)$ y $\Phi=f(t)$ tendrán la "misma forma". (Fig. 22)

b) Grafica $\varepsilon_i = f(t)$ en la bobina.

Calculamos la fem inducida entre los tiempos:

• $t = 0,00s$ y $t = 0,30s$

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \varepsilon_i = -1 \frac{1,3 \times 10^{-2}Wb - 5,2 \times 10^{-2}Wb}{0,30s - 0,00s} \Rightarrow \varepsilon_i = 1,3 \times 10^{-1}V$$

• $t = 0,30s$ y $t = 0,50s$

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \varepsilon_i = -1 \frac{1,3 \times 10^{-2}Wb - 1,3 \times 10^{-2}Wb}{0,50s - 0,30s} \Rightarrow \varepsilon_i = 0,00V$$

(observa que la pendiente es cero en este tramo)

• $t = 0,50s$ y $t = 0,80s$

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \varepsilon_i = -1 \frac{2,9 \times 10^{-2}Wb - 1,3 \times 10^{-2}Wb}{0,80s - 0,50s} \Rightarrow \varepsilon_i = -5,3 \times 10^{-2}V$$

c) Indica el sentido de la corriente inducida en cada intervalo.

• Entre $t = 0,00s$ y $t = 0,30s$, el módulo del campo magnético está disminuyendo. El campo inducido, que se opone a esta disminución, es también saliente. Aplicando la regla de la mano derecha, el sentido de la corriente inducida es antihorario.

También podemos razonar de la siguiente forma: como el flujo por la espira está disminuyendo, el campo inducido tiende a aumentar el flujo magnético, por lo que su sentido es saliente. (fig. 24)

• Entre $t = 0,30s$ y $t = 0,50s$, el módulo del campo magnético permanece constante, no existe variación de flujo, por lo que no existe en este intervalo corriente inducida.

• Entre $t = 0,50s$ y $t = 0,80s$, el módulo del campo magnético está aumentando. El campo inducido, que se opone a este aumento, es entrante. Aplicando la regla de la mano derecha el sentido de la corriente inducida es horario. (Fig. 25)

Hagamos también el análisis a partir de la variación de flujo magnético. Como éste está aumentando, el campo magnético inducido tiende a disminuir el flujo, por lo tanto \vec{B}_i es entrante.

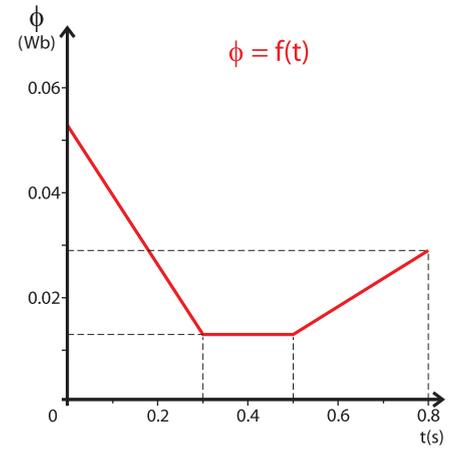


Fig. 22.

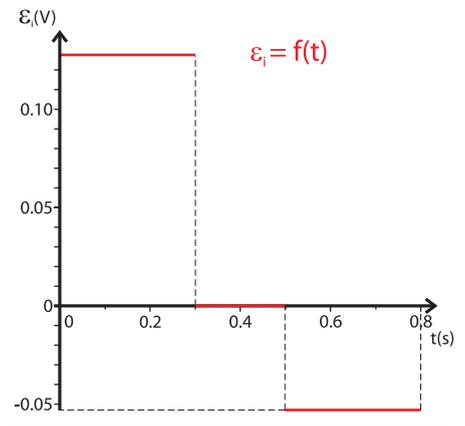


Fig. 23.

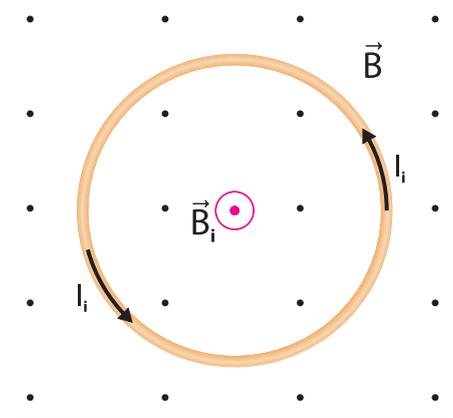


Fig. 24. \vec{B}_i e I_i entre $t=0,00s$ y $t=0,30s$.

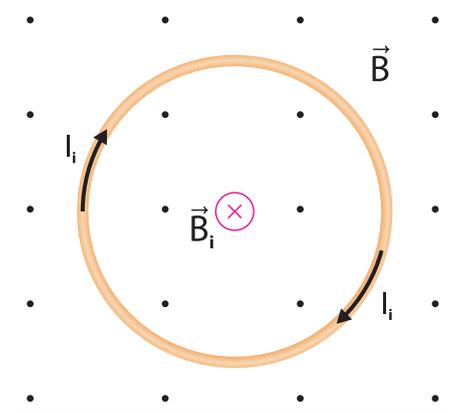


Fig. 25. \vec{B}_i e I_i entre $t=0,50s$ y $t=0,80s$.

Aplicación de la Ley de Faraday: transformadores.

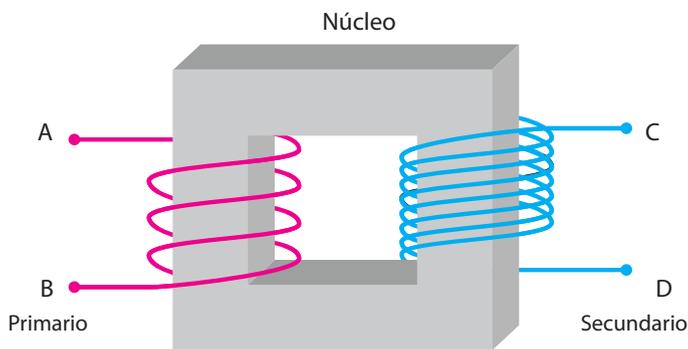


Fig. 26.

La red eléctrica de UTE nos proporciona un ddp de 220V, pero muchos electrodomésticos funcionan correctamente cuando se los conecta a una ddp menor.

El dispositivo que se utiliza para obtener diferentes valores de ddp, se denomina transformador.

En la figura 26 se muestra el esquema simplificado de un transformador. Está constituido por un núcleo y dos bobinados en él. A dichos bobinados se les denomina "primario" y "secundario".

Si conectamos los puntos A y B, (terminales del arrollamiento primario), a una ddp que varíe en el tiempo como la que nos proporciona UTE, por el bobinado primario se originará una corriente alterna. Esta a su vez generará un campo magnético variable.

Los dos bobinados están vinculados por el núcleo, por lo tanto en condiciones ideales, todas las líneas de campo magnético atravesarán también el bobinado secundario.

Al ser dicho campo magnético variable, el flujo magnético por el secundario estará variando constantemente.

De acuerdo a la Ley de Faraday, se originará un fem inducida en el secundario, que establece una ddp variable entre los puntos C y D.

Llamemos N_1 al número de vueltas del bobinado primario y N_2 al número de vueltas del bobinado secundario.

Se cumple en el transformador

$$\frac{V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{N_2}{N_1}$$

Siendo V_{AB} y V_{CD} los valores máximos de ddp de la corriente alterna que se conecta al primario y se obtiene en el secundario.

A partir de la relación anterior podemos concluir que:

Si $N_2 > N_1$ la diferencia de potencial V_{CD} (en el secundario) es mayor que la diferencia de potencial V_{AB} (en el primario). De esta forma utilizaríamos el transformador para elevar la ddp.

Si $N_2 < N_1$ la diferencia de potencial en el secundario es menor que en el primario. En este caso utilizamos el transformador para disminuir la ddp.

Es muy importante aclarar que el transformador no crea energía. Esto violaría el principio de conservación de la energía. La energía que se suministra en el primario, nunca puede ser menor a la que se obtiene en el secundario, en condiciones ideales serán iguales (en los transformadores reales siempre existen "pérdidas" de energía hacia el medio ambiente, por

Un transformador de estas características sólo funciona cuando se conecta el primario a una corriente alterna.

La corriente que se obtiene en el secundario también es alterna.

Fig. 27.

Si $N_2 > N_1 \Rightarrow V_{CD} > V_{AB}$
el transformador eleva la ddp.

Si $N_2 < N_1 \Rightarrow V_{CD} < V_{AB}$
el transformador reduce la ddp.

Fig. 28.

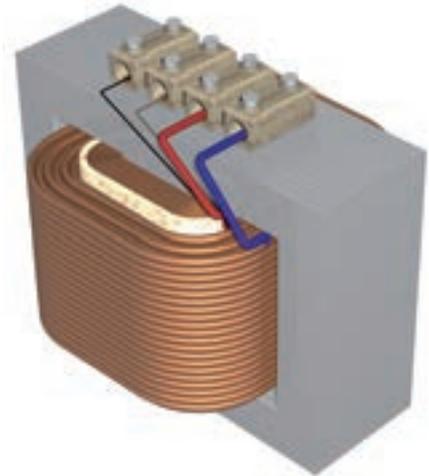
lo que la energía obtenida en el secundario es menor a la que se entrega en el primario).

Si entregamos cierta cantidad de energía en el primario en determinado tiempo, y en dicho lapso obtenemos la misma energía en el secundario, las potencias de ambos bobinados son iguales.

$$P_{\text{primario}} = P_{\text{secundario}} \Rightarrow V_{AB} \times I_{\text{PRIMARIO}} = V_{CD} \times I_{\text{SECUNDARIO}}$$

$$\text{de donde } \frac{V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{I_{\text{PRIMARIO}}}{I_{\text{SECUNDARIO}}}$$

$$\text{por lo tanto si } \frac{V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{N_2}{N_1} \text{ entonces } \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_{\text{PRIMARIO}}}{I_{\text{SECUNDARIO}}}$$



PREGUNTAS

- 1) ¿Están vinculados los fenómenos eléctricos y magnéticos?
- 2) ¿Es posible generar una corriente eléctrica a partir de un campo magnético? Explica.
- 3) ¿Por qué las corrientes inducidas se denominan de esa forma?
- 4) ¿En qué situación observó Faraday que se producían corrientes inducidas en una bobina?
- 5) Faraday concluyó que "algo" debía estar cambiando para que se produzca una corriente inducida, ¿a qué se refería?
- 6) Explica tres formas de producir corrientes inducidas en un solenoide.
- 7) Define el flujo magnético.
- 8) ¿Cómo se debe colocar una espira en una zona donde existe un campo magnético uniforme para que el flujo magnético por ella sea cero?
- 9) ¿Cómo se debe colocar la espira de la pregunta 8 para que el flujo magnético adquiera el máximo valor posible? ¿Qué ángulo formarán en este caso el vector superficie y la dirección del vector campo magnético?
- 10) Explica la Ley de Faraday.
- 11) Una espira se ubica en una zona donde existe un campo magnético uniforme. Las líneas de campo son paralelas al vector superficie. ¿De qué forma puedo mover la espira para que no se induzca corriente en ella?
- 12) ¿De qué forma puedo mover la espira de la pregunta anterior para que se induzca una corriente en ella?
- 13) Cuando acercamos un imán a una bobina se genera una fem inducida. Si ahora acercamos el imán por la misma trayectoria pero empleando un tiempo mayor, ¿la fem inducida es mayor, menor o igual?
- 14) Cuando acercamos un imán a una bobina se genera una fem inducida. Si ahora acercamos el imán a la misma velocidad pero con los polos invertidos, ¿en qué cambia la fem inducida en la bobina?
- 15) Enuncia la Ley de Lenz.
- 16) Explica el funcionamiento de un transformador.

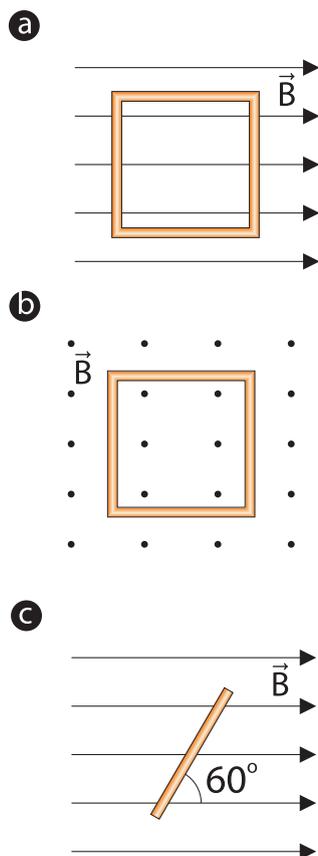


Fig. 29 a, b y c. Problema 1.

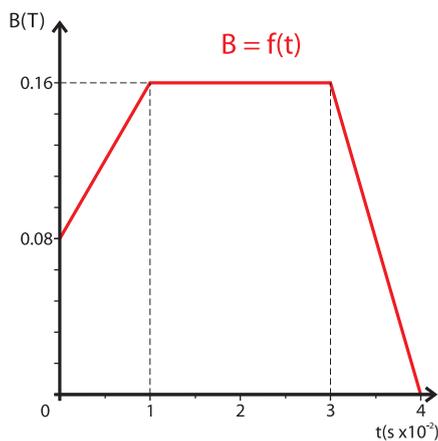


Fig. 30. Problema 5.

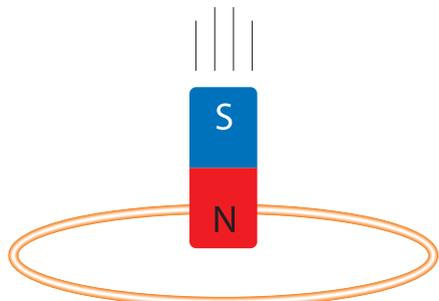


Fig. 31. Problema 8.

PROBLEMAS

- Una espira cuadrada, de lado 5,0cm se ubica en una región donde existe un campo magnético uniforme de módulo 0,80T. Para cada caso representa el vector superficie y calcula el flujo magnético en la espira. (Fig. 29)
- Una bobina de 25 vueltas es atravesada por un campo magnético. El flujo magnético a través de ella cambia de 0,050Wb a 0,042Wb en un tiempo de 800ms. Determina la fem inducida en la bobina.
- En un solenoide de 500 vueltas el flujo magnético se reduce a un 80% de un valor inicial de $3,0 \times 10^{-3}$ Wb. La fem inducida en el solenoide es de 7,5V.

Determina el tiempo en que se produce el cambio de flujo.

- El flujo magnético por un solenoide de 1000 vueltas, tiene un valor inicial de 30mWb. Durante 5,0s dicho flujo magnético varía uniformemente y en el solenoide se induce una fem de 3,0 V. Calcula el valor final del flujo magnético en el solenoide.
- El módulo del campo magnético que atraviesa un solenoide de 200 vueltas, cambia según la gráfica $B = f(t)$ de la figura 30. (el campo es perpendicular a las caras del solenoide y mantiene constante su dirección). El área de la cara del solenoide es de 20 cm^2 .

a) Construye la gráfica de $\Phi = f(t)$.

b) Construye la gráfica de $\varepsilon_i = f(t)$.

- En el interior de un solenoide de 180 vueltas y largo 10cm, se coloca una espira cuadrada de lado 1,5cm. Esta última se ubica en forma perpendicular al eje del solenoide.

a) Determina el flujo magnético por la espira si la intensidad por el solenoide es de 5,0A.

b) Si en un tiempo de 0,20s la intensidad en la bobina se reduce a la mitad ¿cuál es el valor de la fem inducida en la espira?

- En todas las situaciones del problema 1, el campo magnético aumenta su módulo al doble en 10ms, manteniendo su dirección y sentido.

a) Explica por qué se induce una corriente en algunos casos y en otros no.

b) Determina el sentido de la corriente inducida en cada caso.

c) Representa el campo magnético inducido en cada caso.

d) Contesta nuevamente las partes b y c, si el módulo del campo magnético se reduce a la mitad.

- Un imán recto se deja caer verticalmente, pasando por dentro de una espira circular que se encuentra ubicada horizontalmente.(fig. 31)

a) Indica el sentido de la corriente inducida en la espira cuando el imán se va acercando a ella.

b) Determina el sentido de la corriente inducida cuando el imán ya pasó por la espira y se va alejando de esta.

- Contesta nuevamente lo mismo que en el problema anterior pero suponiendo que el imán cae con el polo sur hacia abajo.

- 10) Dos bobinas se encuentran muy próximas como muestra la figura 32. Determina el sentido de la corriente por la resistencia conectada a la bobina 2:
- cuando se cierra el interruptor conectado a la bobina 1.
 - cuando se abre el interruptor conectado a la bobina 1.

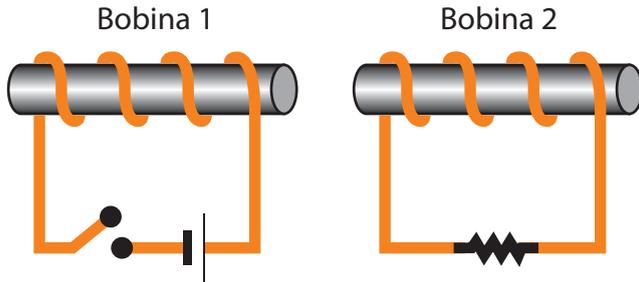


Fig. 32. Problema 10.

- 11) Se tiene un conjunto de 18 espiras circulares, cada una de ellas de radio 6,0cm. Son atravesadas por un campo magnético que mantiene constante su dirección (fig. 33) pero cambia de módulo según la gráfica $B = f(t)$ adjunta. (Fig. 34)
- Calcula la fem inducida en cada intervalo.
 - Indica el sentido de la corriente inducida en cada intervalo.
- 12) Una espira de superficie 10cm^2 se encuentra en una región donde existe un campo magnético uniforme, horizontal hacia la derecha de módulo $4,0 \times 10^{-3}\text{T}$. Inicialmente la espira se encuentra vertical, de tal forma que el campo la atraviesa perpendicularmente. En un tiempo de 2,0s la espira gira hasta quedar horizontal.
- Representa en un dibujo las posiciones inicial y final de la espira con respecto al campo magnético.
 - Determina la fem inducida en la espira.
 - Calcula nuevamente la fem pero suponiendo que el giro se realiza en 2,0 ms.
- 13) Un alambre conductor AB, de longitud 10cm se mueve hacia la derecha, deslizándose sobre un conductor en forma de "U". (Fig. 35). En la región existe un campo magnético uniforme saliente de módulo 0,28T. El alambre AB se desplaza 2,0cm empleando un tiempo de 0,50s.
- Calcula el valor de la fem inducida en el circuito formado por el conductor en forma de "U" y el alambre AB.
 - Determina la dirección y sentido del campo magnético inducido.
 - Determina el sentido de la corriente inducida en el circuito mencionado.
- 14) Resuelve lo mismo que en el problema anterior suponiendo que el alambre emplea el mismo tiempo en recorrer 2,0cm hacia la izquierda desde su posición inicial.

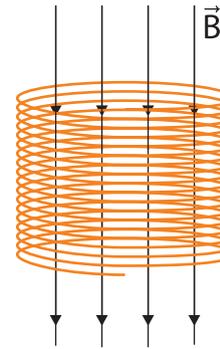


Fig. 33. Problema 11.

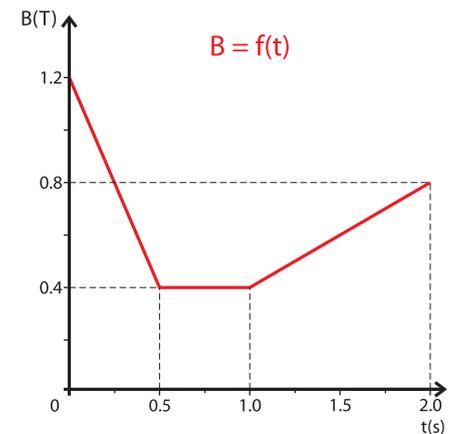


Fig. 34. Problema 11.

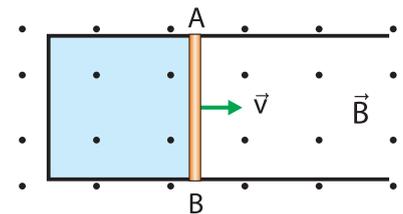


Fig. 35. Problema 13.

Ondas electro-magnéticas

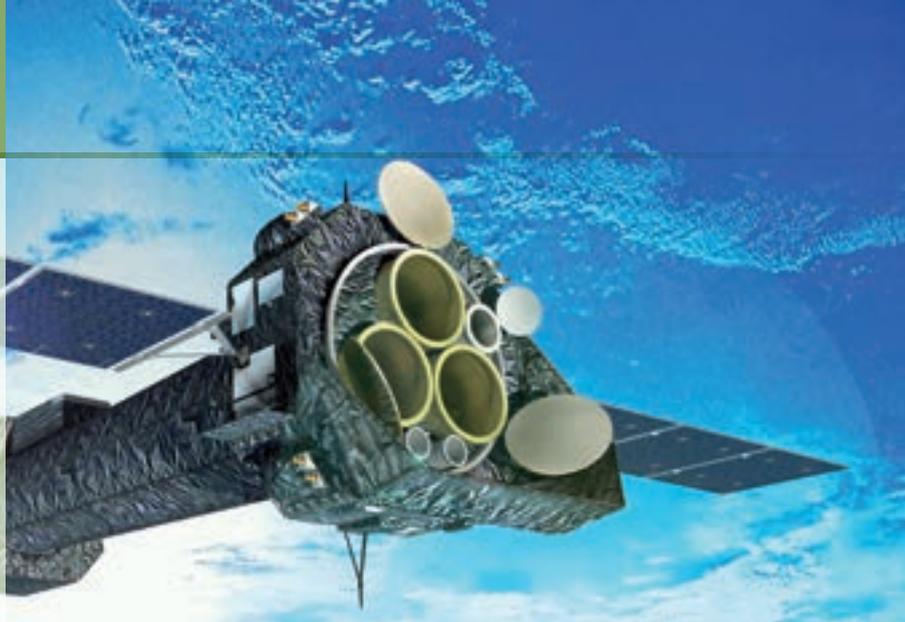


Fig. 1. Heinrich Rudolf Hertz, físico alemán (1857-1894). Gran experimentador, fue el primero en demostrar la existencia de la radiación electromagnética construyendo un aparato para producir ondas de radio. A partir del experimento de Michelson en 1881 probó experimentalmente que las señales eléctricas pueden viajar a través del aire, como había sido predicho por James Maxwell. También descubrió el efecto fotoeléctrico que fue explicado más adelante por Albert Einstein.

Introducción

En el capítulo anterior, al estudiar la Ley de Faraday, se planteó que **un campo magnético variable genera un campo eléctrico**. En su maravillosa síntesis del electromagnetismo, Maxwell introduce la contraparte simétrica de la ley de inducción de Faraday: **un campo eléctrico variable genera un campo magnético**.

Además, predice la existencia de ondas autosustentadas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes: **ondas electromagnéticas**. Estas ondas se propagaban en el vacío con la misma velocidad que la luz y se reflejaban, refractaban, difractaban e interferían como la luz.

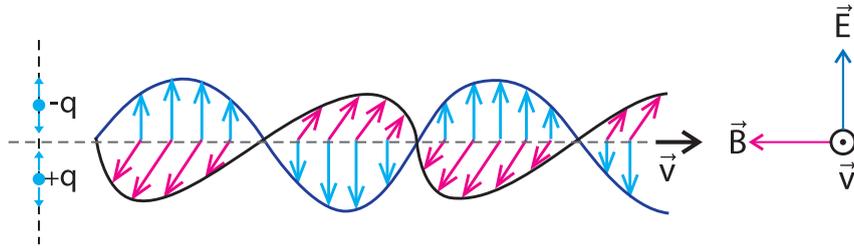
Por lo tanto la luz debería ser una onda electromagnética.

Ocho años después de la muerte de Maxwell, Heinrich Hertz (Fig 1) generó y detectó ondas electromagnéticas en una serie de experimentos determinantes para la verificación de las ecuaciones de Maxwell.

Ondas electromagnéticas

Consideremos una partícula cargada que oscila. Una carga en movimiento es una corriente eléctrica. Por lo tanto generará a su alrededor un campo magnético. En su movimiento oscilatorio, la velocidad de la partícula cargada varía en valor y sentido. El campo magnético generado por ella es variable también en módulo y sentido. De acuerdo a la Ley de Faraday, un campo magnético que varía en esta forma generará un campo eléctrico variable, que a su vez generará un campo magnético variable. Estos campos emanan de la partícula, y se propagan, en forma de onda transversal, incluso en el vacío.

Estas ondas en las que campos eléctricos y magnéticos varían perpendicularmente entre sí y a la dirección de propagación se denominan ondas electromagnéticas (Fig 2 y 3).



Una onda electromagnética es la combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía.

Fig. 2.

Fig. 3. Esquema de una onda electromagnética producida por una carga oscilante. En azul se aprecia el campo eléctrico, que varía en el plano de la hoja. En rojo se aprecia el campo magnético, que varía perpendicularmente al plano de la hoja. La velocidad de propagación de la onda electromagnética es perpendicular a los campos eléctrico y magnético.

El espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío con la misma velocidad "c" (Fig.4). Difieren entre sí en su longitud de onda y frecuencia. Como $c = \lambda \times f$, para todas las ondas electromagnéticas el producto $\lambda \times f$ debe ser constante. Las o.e.m. de mayor frecuencia tienen menor longitud de onda y viceversa. Al continuo de o.e.m. ordenadas de acuerdo a su frecuencia y longitud de onda se le denomina "espectro electromagnético" (Fig. 5).

Las ondas electromagnéticas se propagan por el vacío con

$$v = c = 3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Fig. 4.

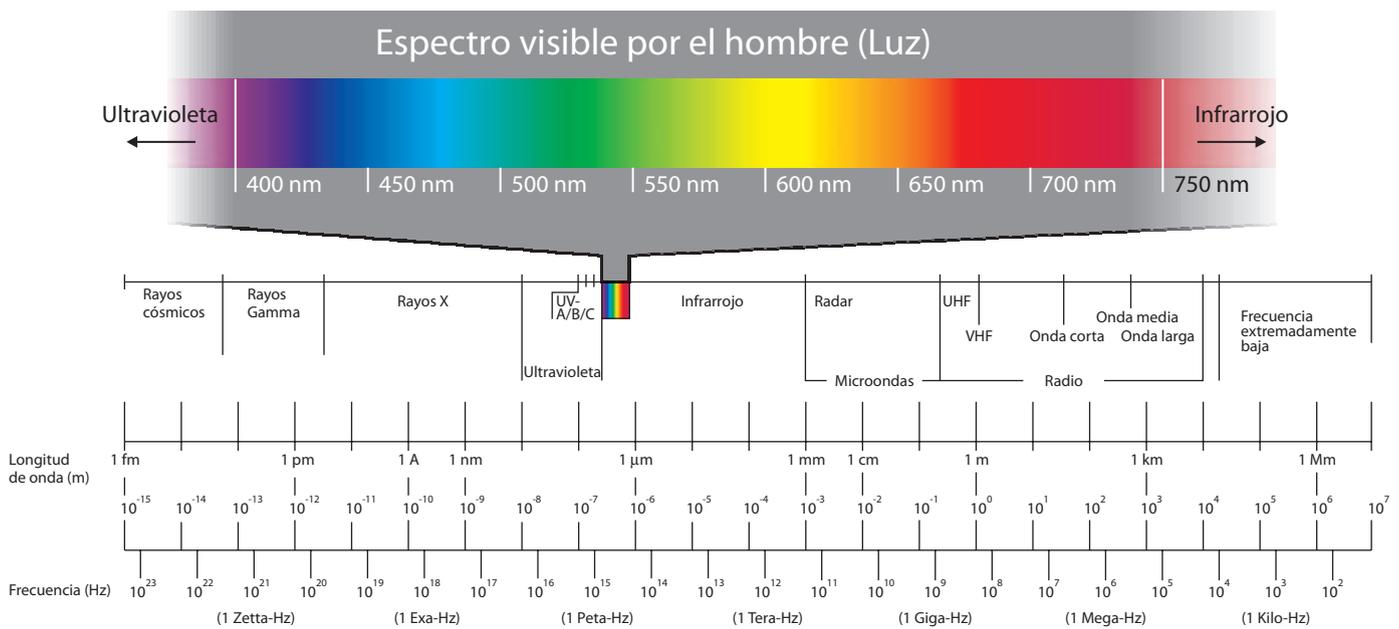


Fig. 5. Espectro de ondas electromagnéticas. En la zona de la izquierda aparecen las ondas más energéticas, que son las de mayor frecuencia y menor longitud de onda. La luz visible es una pequeñísima parte del espectro.

Hay "antenas" específicas para detectar o.e.m. pertenecientes a distintas regiones del espectro (ondas de radio, microondas). Las células de la retina de nuestros ojos detectan o.e.m. de frecuencias entre $4,3 \times 10^{14}$ Hz y $7,0 \times 10^{14}$ Hz. Esta pequeña región del espectro recibe el nombre de "luz visible".



a. Antena emisora de radio.



b. La víbora cascabel posee fosetas sensibles al infrarrojo.



c. Imagen de rayos X de una mano.

Fig. 6. Aplicaciones de ondas electromagnéticas

Ejemplo

a) Determina la frecuencia de una o.e.m. de longitud de onda $\lambda = 2,0 \times 10^{-10} \text{ m}$ que se propaga en el vacío.

Todas las o.e.m. se propagan en el vacío con $v = c = 3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Podemos plantear $c = \lambda \times f$

$$\Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow f = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,0 \times 10^{-10} \text{ m}} \Rightarrow f = 1,5 \times 10^{18} \text{ Hz}$$

b) ¿A qué región del espectro electromagnético pertenecen estas ondas?

Si localizamos en la figura 5 las ondas electromagnéticas correspondientes a $\lambda = 2,0 \times 10^{-10} \text{ m}$, podemos ver que son ondas de rayos X.

Aplicaciones

Las distintas regiones del espectro tienen nombres de acuerdo a la circunstancia histórica en la que fueron descubiertos o a su utilidad práctica.

- Las radios de AM transmiten mediante ondas electromagnéticas de frecuencias que van desde 500kHz ($5,0 \times 10^5 \text{ Hz}$) hasta 1600kHz ($16,0 \times 10^5 \text{ Hz}$). (Fig 6a)
- Las radios de FM transmiten mediante ondas electromagnéticas de frecuencias que van desde 85MHz ($8,5 \times 10^7 \text{ Hz}$) hasta 107 MHz ($10,7 \times 10^7 \text{ Hz}$).
- El horno microondas funciona con ondas electromagnéticas de frecuencia 2,45GHz.
- Las ondas electromagnéticas de frecuencia un poco menor que la luz visible se ubican en la zona infrarroja del espectro. Están asociadas a la temperatura del cuerpo que las emite. Algunos animales localizan a sus presas mediante órganos sensoriales que detectan las emisiones en el infrarrojo.(Fig 6 b)
- Los rayos ultravioletas, de los cuales debemos protegernos apropiadamente, son o.e.m. de frecuencias mayores que la luz visible, en el entorno de los 10^{15} - 10^{16} Hz .
- Las o.e.m. que se encuentran en la región del espectro de altas frecuencias, transportan una energía mayor. La exposición a este tipo de radiaciones puede ocasionar serios perjuicios. No es conveniente realizarse radiografías muy seguidas. Los médicos y técnicos que manejan los aparatos de rayos X (frecuencias entre 10^{17} y 10^{19} Hz) toman muchas precauciones para minimizar los efectos nocivos de la exposición prolongada a esta radiación.(Fig 6c)
- Las ondas electromagnéticas generadas en zonas muy lejanas del universo y detectadas con radiotelescopios nos proporcionan información sobre el origen y evolución del universo.

PREGUNTAS

- 1) Explica los aportes de Maxwell y Hertz al estudio de las ondas electromagnéticas.
- 2) ¿Cómo se pueden generar ondas electromagnéticas?
- 3) Indica si cada una de las siguientes afirmaciones es verdadera o falsa. Justifica.
 - a) En una onda electromagnética el campo eléctrico tiene la misma dirección y sentido que su velocidad de propagación.
 - b) En una onda electromagnética el campo magnético tiene la misma dirección y sentido que su velocidad de propagación.
 - c) En una onda electromagnética el campo magnético es perpendicular al campo eléctrico.
 - d) Las ondas electromagnéticas son ondas transversales.
- 4) ¿Qué es el espectro electromagnético?
- 5) ¿Qué ondas del espectro electromagnético viajan a mayor velocidad en el vacío?
- 6) ¿A qué le llamamos "luz visible" en el espectro electromagnético?
- 7) ¿Qué ondas electromagnéticas tienen mayor frecuencia, los rayos X o los UV?
- 8) ¿Qué ondas electromagnéticas tienen mayor longitud de onda, las ondas de radio o los infrarrojos?
- 9) ¿Qué ondas transportan más energía, los rayos gamma o la luz visible?



PROBLEMAS

- 1) Los diagramas de la figura 7 representan campo eléctrico (azul), campo magnético (rojo) y velocidad de propagación (verde) de una onda electromagnética. Indica cuál de los diagramas es correcto. Explica.
- 2) ¿A qué región del espectro electromagnético corresponden ondas de frecuencia $f = 5,0 \times 10^5 \text{ Hz}$?
- 3) ¿Qué longitud de onda corresponde a las ondas electromagnéticas del problema 2?
- 4) ¿A qué región del espectro electromagnético corresponden ondas de longitud de onda $\lambda = 1,0 \text{ m}$?
- 5) ¿Qué frecuencia corresponde a las ondas electromagnéticas del problema 4?
- 6) Ordena las siguientes ondas electromagnéticas de acuerdo a su frecuencia, en orden creciente:
-UV -microondas -Luz visible roja -Luz visible violeta
- 7) Ordena las mismas ondas electromagnéticas del problema 6 de acuerdo a su longitud de onda, en forma creciente.
- 8) Ordena las mismas ondas electromagnéticas del problema 6 de acuerdo a la energía que transportan, en orden creciente.

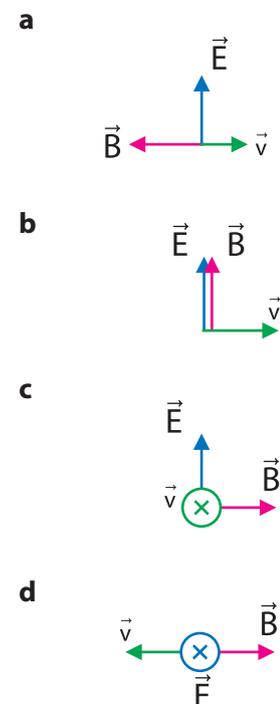


Fig. 7. Problema 1

Efecto fotoeléctrico, fotones



Introducción

A finales del siglo XIX la comunidad científica estaba de acuerdo en que la luz era una onda electromagnética. El desarrollo teórico de Maxwell verificado por los experimentos de Hertz no dejaban lugar a dudas. Pero en estos años aparecen algunos fenómenos relacionados con la luz que no pueden ser explicados por la teoría ondulatoria. La radiación de un cuerpo negro (que por su complejidad no trataremos en el curso) y el efecto fotoeléctrico, presentaron nuevos desafíos a los científicos de la época.

Efecto fotoeléctrico

Este efecto fue descubierto involuntariamente por Heinrich Hertz, mientras realizaba sus experimentos con ondas electromagnéticas. Su descripción aparece por primera vez en un artículo de 1887 titulado "Sobre un efecto de la luz ultravioleta en la descarga eléctrica". Consiste en la extracción de electrones de una superficie metálica al incidir luz sobre ésta (Fig.1)

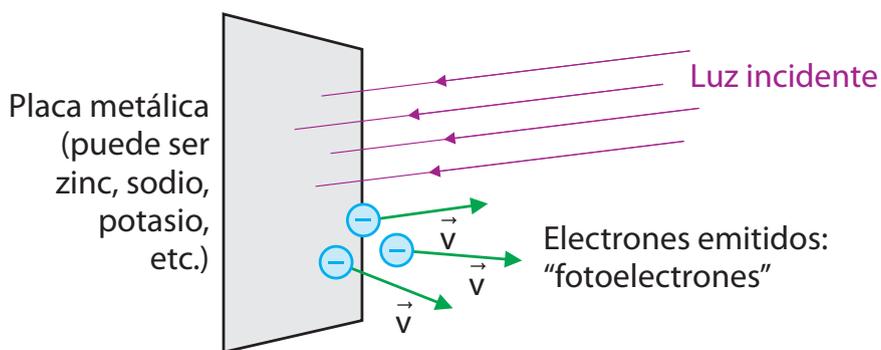


Fig. 1. Al incidir luz sobre la placa metálica los fotoelectrones son "arrancados" de ella.

En el estudio del efecto fotoeléctrico se utiliza luz monocromática.

Esto quiere decir que dicha radiación es de una única frecuencia.

Fig. 2.

Una vez identificado el fenómeno físico, varios científicos (Hallwachs, Lenard, Elster y Geitel) se dedicaron a estudiarlo con minuciosidad, intentando responder las siguientes preguntas:

Efecto fotoeléctrico, fotones



Introducción

A finales del siglo XIX la comunidad científica estaba de acuerdo en que la luz era una onda electromagnética. El desarrollo teórico de Maxwell verificado por los experimentos de Hertz no dejaban lugar a dudas. Pero en estos años aparecen algunos fenómenos relacionados con la luz que no pueden ser explicados por la teoría ondulatoria. La radiación de un cuerpo negro (que por su complejidad no trataremos en el curso) y el efecto fotoeléctrico, presentaron nuevos desafíos a los científicos de la época.

Efecto fotoeléctrico

Este efecto fue descubierto involuntariamente por Heinrich Hertz, mientras realizaba sus experimentos con ondas electromagnéticas. Su descripción aparece por primera vez en un artículo de 1887 titulado "Sobre un efecto de la luz ultravioleta en la descarga eléctrica". Consiste en la extracción de electrones de una superficie metálica al incidir luz sobre ésta (Fig.1)

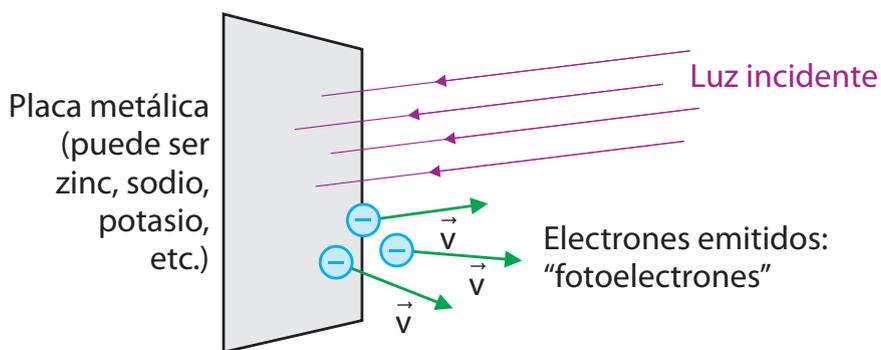


Fig. 1. Al incidir luz sobre la placa metálica los fotoelectrones son "arrancados" de ella.

En el estudio del efecto fotoeléctrico se utiliza luz monocromática.

Esto quiere decir que dicha radiación es de una única frecuencia.

Fig. 2.

Una vez identificado el fenómeno físico, varios científicos (Hallwachs, Lenard, Elster y Geitel) se dedicaron a estudiarlo con minuciosidad, intentando responder las siguientes preguntas:

¿Se observa efecto fotoeléctrico para todas las frecuencias de luz incidente?

¿De qué depende la energía de los fotoelectrones emitidos?

¿Cuánto tiempo transcurre entre la llegada de la luz incidente y la emisión de fotoelectrones?

¿Sucede lo mismo con cualquier metal?

Para el estudio detallado del efecto fotoeléctrico se utiliza el siguiente dispositivo (Fig 3).

Al incidir luz sobre la placa "A", pueden desprenderse electrones de ella. Para detectarlos, se carga en forma positiva la placa "B", moviendo el cursor del reóstato hacia la izquierda. Los electrones emitidos (fotoelectrones) son atraídos hacia ella y se genera una corriente eléctrica en el circuito, que es detectada por el amperímetro. Si no se produce efecto fotoeléctrico, la aguja del amperímetro no se mueve.

¿Cómo medir la energía de los electrones emitidos más veloces?

No todos los electrones se desprenden de la placa con la misma energía cinética (Fig 4). Para medir la energía de los electrones más rápidos, se carga en forma negativa la placa "B", moviendo lentamente el cursor del reóstato hacia la derecha, hasta que no se detecte corriente en el circuito (Fig 5). En esta situación, la fuerza eléctrica frena completamente a los electrones emitidos, que no alcanzan a llegar a la placa "B". La diferencia de potencial entre las placas "A" y "B" necesaria para que esto ocurra se denomina "potencial de frenado" ("V₀") y se puede medir con un voltímetro conectado a los extremos de "A" y "B".

El trabajo realizado por la fuerza eléctrica para frenar los electrones más veloces es igual a la variación de su energía cinética.

$$T = \Delta E_c = E_{c_{final}} - E_{c_{inicial}}$$

Si los electrones se frenan completamente, $E_{c_{final}} = 0 \text{ J}$, para los electrones emitidos. Por lo tanto, $|T| = E_{c_{inicial}}$. Esto significa que el valor absoluto del trabajo realizado sobre los electrones para frenarlos es igual al valor de la energía cinética que tienen al ser emitidos.

$V_{AB} = \frac{T}{q}$ y si los electrones más veloces se frenan completamente $V_{AB} = V_0$ (potencial de frenado). Por lo tanto tenemos que $V_0 = \frac{E_{c_{inicial}}}{q}$

Como los electrones más veloces son aquellos que tienen mayor energía cinética al ser emitidos

$$E_{c_{MAX}} = |V_0 \times q|$$

Esto quiere decir que midiendo "V₀" podemos calcular la energía de los electrones emitidos a mayor velocidad.

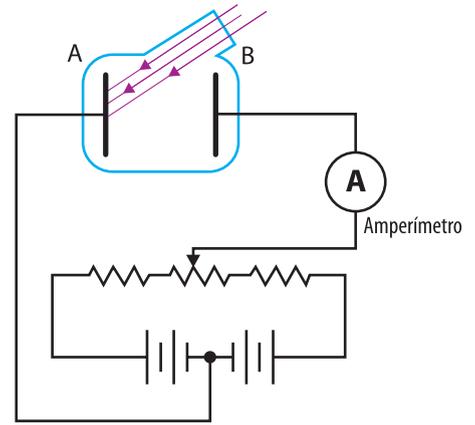


Fig. 3. Las placas metálicas A y B están encerradas en un recipiente de vidrio al vacío. La luz incide sobre la placa "A". Si se mueve el cursor del reóstato a la izquierda, la placa "B" se carga positivamente y atrae a los electrones "arrancados". Se establece una corriente eléctrica que es detectada por el amperímetro.

Recuerda que la energía cinética de un cuerpo se calcula $E_c = \frac{m \times v^2}{2}$ Y que la masa del electrón es $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Fig. 4.

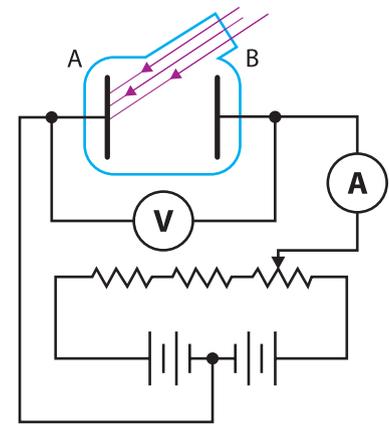


Fig. 5. Al mover el cursor del reóstato a la derecha hasta que no se detecte corriente, el voltímetro marcará el valor del potencial de frenado "V₀".

La carga del electrón es: $q_e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Fig. 6.

Una unidad de energía utilizada comúnmente a escala atómica es el electrón volt "eV".

1eV equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ J

1eV es la energía que adquiere un electrón cuando pasa de un punto a otro entre los que existe una ddp de 1,0V.

De los resultados experimentales se obtuvieron las siguientes respuestas:

- No se observa efecto fotoeléctrico para cualquier frecuencia de luz incidente. Hay una frecuencia mínima, dependiente del metal de la placa llamada "frecuencia umbral" (" f_0 "). Si la frecuencia de la luz incidente es mayor que " f_0 ", se emiten fotoelectrones, si es menor no hay emisión (Fig 7).
- La energía de los fotoelectrones más veloces, determinada a partir de la medida del potencial de frenado " V_0 ", no depende de la intensidad de la luz incidente ni del tiempo que esté incidiendo. Para un metal determinado, depende solamente de la frecuencia de la luz incidente. (Fig. 8)
- El tiempo entre la llegada de la luz a la placa y la emisión de electrones ("tiempo de retardo") es del orden de 10^{-9} s. Es un fenómeno prácticamente instantáneo, para cualquier metal.

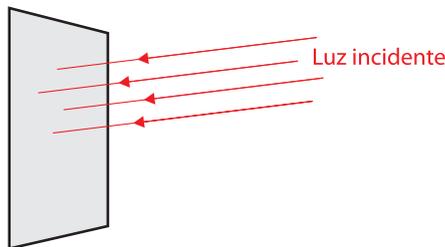


Fig. 7. No se emiten fotoelectrones si la frecuencia de la luz incidente es baja.

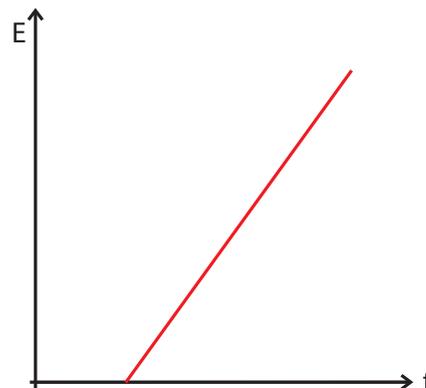


Fig. 8. La gráfica muestra como varía la energía de los electrones más veloces en función de la frecuencia de la luz incidente.



Fig. 9. Si damos un empujoncito a un niño en una hamaca en forma periódica (por ejemplo cada vez que alcanza un extremo de su oscilación), la amplitud de su movimiento aumentará, de forma similar a lo que debería suceder con un electrón al incidir sobre él una onda electromagnética.

La crisis del modelo ondulatorio

¿Cómo explica el modelo ondulatorio el efecto fotoeléctrico?

Si la luz es una onda electromagnética, al incidir sobre un electrón, le aplicaría "impulsos periódicos", de acuerdo al período de la luz incidente. Estos impulsos periódicos harían que el electrón oscile con una amplitud cada vez mayor, de forma similar que al impulsar a un niño en una hamaca (Fig. 9). Si continuamos aplicando fuerza periódicamente al electrón, la amplitud de su oscilación aumenta hasta que el electrón adquiere una energía tal que se separa del metal. (No experimentar esto con niños y hamacas).

Esta explicación del efecto fotoeléctrico no es consistente con la evidencia experimental:

- Una frecuencia mayor de impulsos haría disminuir el tiempo de retardo en la emisión de electrones. Pero si la frecuencia es baja, es de esperar que también los electrones alcancen la energía necesaria para desprenderse, aunque demoren más tiempo.

Experimentalmente se observó que sólo se produce efecto fotoeléctrico para frecuencias mayores que " f_0 ", y se produce en forma casi instantánea

- Mayor intensidad de luz incidente significa ondas electromagnéticas de mayor amplitud, transportando más energía. Es de esperar que la energía de los fotoelectrones dependa de la intensidad de la luz incidente.

Experimentalmente se observó que la energía de los electrones más rápidos emitidos depende solamente de la frecuencia de la luz incidente y del metal de la placa.

Aportes de Einstein

1905 fue un año maravilloso para Albert Einstein (Fig. 10) y para la Física (Fig.11). Con tan solo 26 años publicó tres artículos muy trascendentes:

- uno sobre el "movimiento browniano", movimiento aleatorio de las partículas suspendidas en un líquido estacionario.
- en otro planteó la "teoría especial de la relatividad", en la cual desarrolla la cinemática y dinámica a velocidades cercanas a la de la luz.
- en el tercero presentó una interpretación revolucionaria del efecto fotoeléctrico, que le valió el premio Nobel de física en 1921.

Interpretación de Einstein del efecto fotoeléctrico

En el artículo sobre el efecto fotoeléctrico plantea lo siguiente:

- La energía de la luz incidente está cuantizada (como la carga eléctrica, cap.10), en "paquetes" denominados "fotones" ¹. La energía de cada fotón depende de la frecuencia de la luz.

$$E_f = h \times f$$

donde "h" es una constante denominada "constante de Planck"

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

- Cada fotón interactúa con un electrón de forma similar a un choque entre dos partículas.

¹ El término "fotón" fue introducido por Lewis en 1926.

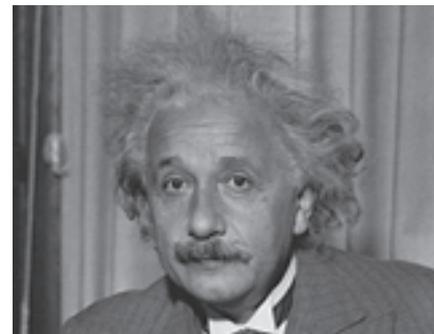


Fig. 10. Albert Einstein (1879-1955) Científico de origen alemán, considerado generalmente como el físico más importante del siglo XX y uno de los hombres más influyentes en el desarrollo histórico de la sociedad moderna. En 1905, siendo un desconocido que trabajaba en la Oficina de Patentes de Berna, publicó trascendentes artículos que cambiarían el curso de la Física y tendrían gran influencia en la sociedad. En 1915 publica su "Teoría general de la relatividad". Su genio, carisma y militancia social pacifista lo convierten en un ícono popular, alcanzando un reconocimiento nunca logrado por un científico. Visitó nuestro país en abril de 1925, permaneciendo por una semana y dictando conferencias en la Universidad de la República. Tuvo un recordado encuentro con el filósofo uruguayo Carlos Vaz Ferreira en la plaza de los 33 (foto) donde intercambiaron reflexiones sobre causalidad y determinismo.



Fig. 11. 2005 fue declarado "Año Internacional de la Física" para conmemorar los cien años de 1905.

“Función trabajo” (Φ) es la mínima energía necesaria para que un electrón se desprenda de la superficie del metal.

Fig. 12.

Material	Φ ($\times 10^{-19}$ J)	f_0 ($\times 10^{14}$ Hz)
Sodio	3,7	5,6
Aluminio	6,5	9,8
Cobre	7,5	11,3
Zinc	6,9	10,4
Cesio	3,4	5,1
Hierro	7,2	10,9
Oro	8,2	12,4
Plata	7,6	11,5
Platino	10,2	15,4

Fig. 13. Función trabajo y frecuencia umbral para distintos metales.

También podemos expresar la constante “h” en eV.s

$$h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$$

- Si la energía del fotón incidente es menor que cierto valor llamado “función trabajo” (Φ) (Fig 12), no alcanza para “arrancar” el electrón de la superficie del metal y no se produce efecto fotoeléctrico.

Por lo tanto si $h \times f < \Phi$, no se emiten fotoelectrones.

El caso límite sucede para frecuencias de umbral cuando $h \times f_0 = \Phi$. Entonces la frecuencia de umbral “ f_0 ” se puede determinar:

$$f_0 = \frac{\Phi}{h}$$

Como “ Φ ” es característico de cada metal, “ f_0 ” también lo es. (Fig 13)

- Si la energía del fotón incidente supera a la función trabajo, se emite un fotoelectrón de la superficie del metal, cuya energía es la diferencia de la recibida en la interacción con el fotón y la función trabajo.

$$E_e = E_f - \Phi$$

Esto es una consecuencia de la conservación de la energía.

Sustituyendo E_f por “ $h \times f$ ” obtenemos la siguiente expresión para determinar la energía del fotoelectrón emitido:

$$E_e = h \times f - \Phi$$

- En esta última expresión se aprecia que la energía de los fotoelectrones emitidos no depende de la intensidad de la luz incidente. Depende únicamente de su frecuencia “ f ” de la radiación incidente y de la función trabajo “ Φ ” del metal.

• Como la interacción fotón-electrón se lleva a cabo en forma similar a un choque de partículas, el desprendimiento de electrones es casi instantáneo, sin tiempo de retardo. Si el fotón “choca” al electrón con la energía suficiente, éste último se desprende en ese instante.

- La ecuación $E_e = h \times f - \Phi$, se puede expresar también en función de la longitud de onda de la radiación.

$c = \lambda \times f$ entonces $f = \frac{c}{\lambda}$ y sustituyendo nos queda:

$$E_e = \frac{h \times c}{\lambda} - \Phi$$

Al igual que la frecuencia umbral, cada metal tiene una longitud de onda límite o longitud de onda umbral λ_0 , que se puede calcular como:

$$\lambda_0 = \frac{h \times c}{\Phi}$$

Para longitudes de onda mayores que λ_0 no se producirá efecto fotoeléctrico, para longitudes de onda menores que λ_0 se producirá emisión de fotoelectrones.

Ejemplo 1

Se hace incidir luz de frecuencia $f = 8,5 \times 10^{14}$ Hz, en una placa de sodio montada en un dispositivo para estudiar el efecto fotoeléctrico.

a) ¿Se produce efecto fotoeléctrico?

La función trabajo del sodio " Φ_{Na} " es $3,7 \times 10^{-19}$ J. A partir de este valor podemos calcular la frecuencia umbral " f_0 " correspondiente.

$$f_0 = \frac{\Phi}{h} \Rightarrow f_0 = \frac{3,7 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} \Rightarrow f_0 = 5,6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Como la frecuencia de la luz incidente es mayor que " f_0 ", se produce efecto fotoeléctrico.

b) Determina la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos.

$$E_e = h \times f - \Phi \Rightarrow E_e = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \times 8,5 \times 10^{14} \text{ Hz} - 3,7 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\Rightarrow E_e = 1,9 \times 10^{-19} \text{ J}$$

c) Expresa la energía anterior en eV

$$1 \text{ eV} \text{-----} 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$x \text{ eV} \text{-----} 1,9 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$x = 1,2 \text{ eV}$$

$$E_e = 1,2 \text{ eV}$$

d) ¿Qué diferencia de potencial se necesita para frenar completamente a los electrones emitidos?

Esta diferencia de potencial es la que hemos denominado "potencial de frenado" " V_0 ".

$$V_0 = \frac{E_e}{q} \Rightarrow V_0 = \frac{1,9 \times 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} \Rightarrow V_0 = 1,2 \text{ V}$$

Ejemplo 2

La misma radiación del ejemplo 1 se hace incidir ahora en una placa de aluminio.

¿Se emiten fotoelectrones de dicha placa?

La función trabajo del aluminio " Φ_{Al} " es $6,5 \times 10^{-19}$ J. A partir de este valor podemos calcular la frecuencia umbral " f_0 " correspondiente.

$$f_0 = \frac{\Phi}{h} \Rightarrow f_0 = \frac{6,5 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} \Rightarrow f_0 = 9,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Como la frecuencia de la luz incidente es menor que " f_0 ", NO se emiten fotoelectrones, NO se produce efecto fotoeléctrico.

¿Qué es la luz entonces?

La interpretación de Einstein del efecto fotoeléctrico nos presenta un fenómeno en el cual la luz interactúa con los electrones como si fuera una partícula, no como una onda.

¿Debemos descartar los esfuerzos de Huygens, Young y tantos otros en demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz?

De ninguna forma. Podemos concluir lo siguiente:

La luz presenta “naturaleza dual”. Se propaga como onda electromagnética e interactúa con las partículas subatómicas como partícula.

Este doble comportamiento de la luz es uno de los pilares sobre los que se construye la Física Moderna.

PREGUNTAS

- 1) ¿Qué es el efecto fotoeléctrico?
- 2) Esquematiza el dispositivo utilizado para el estudio experimental del efecto fotoeléctrico.
- 3) ¿Todos los fotoelectrones emitidos tienen la misma energía?
- 4) ¿A qué se le llama “potencial de frenado”? ¿Cómo se puede medir?
- 5) ¿A cuántos Joules equivale 1 eV?
- 6) ¿Se produce efecto fotoeléctrico para todas las frecuencias de luz incidente en una placa metálica?
- 7) ¿Qué es la “frecuencia umbral”?
- 8) ¿De qué depende la energía de los fotoelectrones más veloces?
- 9) ¿A qué se le llama “tiempo de retardo”?
- 10) ¿Cómo explica el modelo ondulatorio el efecto fotoeléctrico?
- 11) ¿En qué falla el modelo ondulatorio al intentar explicar el efecto fotoeléctrico?
- 12) ¿Qué significa para Einstein que la energía de la luz está cuantizada?
- 13) ¿Cómo se calcula la energía de un fotón?
- 14) ¿Qué es la “función trabajo” de un metal?
- 15) ¿Cómo se puede calcular la frecuencia umbral de un metal?
- 16) ¿Qué significa que un fotón interactúa con un electrón como si fuera un choque de partículas?
- 17) ¿Qué significa que la luz presenta una “naturaleza dual”?

PROBLEMAS

- 1) Calcula la energía de un fotón de frecuencia $f = 7,0 \times 10^{14}$ Hz.
- 2) Calcula la energía de un fotón de longitud de onda $\lambda = 5,2 \times 10^{-7}$ m.
- 3) Estudiando el efecto fotoeléctrico se obtuvo para cierto metal y cierta frecuencia de luz incidente un potencial de frenado de 1,8V.
 - a) Determina la energía con que se desprenden los fotoelectrones más veloces.
 - b) Determina la velocidad con que se desprenden los fotoelectrones más veloces.
- 4) Determina la frecuencia umbral de un metal cuya función trabajo es $\Phi = 4,5 \times 10^{-19}$ J.
- 5) Determina la longitud de onda correspondiente a la frecuencia umbral hallada en el problema anterior.
- 6) La función trabajo del cobre es $\Phi_{\text{Cu}} = 7,5 \times 10^{-19}$ J. Determina la frecuencia mínima de luz incidente para que se produzca efecto fotoeléctrico.
- 7) Sobre una placa de oro incide luz de frecuencia $f = 9,0 \times 10^{14}$ Hz.
¿Se observa efecto fotoeléctrico?
- 8) Sobre una placa de cesio incide luz de longitud de onda $\lambda = 5,0 \times 10^{-7}$ m.
¿Se observa efecto fotoeléctrico?
- 9) Sobre una placa de aluminio incide luz de frecuencia $f = 1,2 \times 10^{15}$ Hz.
Calcula la energía de los fotoelectrones emitidos.
- 10) Sobre una placa metálica de Zinc se hace incidir una radiación monocromática. ¿Qué frecuencia debe tener la radiación para que los fotoelectrones emitidos tengan una energía cinética máxima de 1,5 eV?
- 11) Al incidir luz sobre una placa metálica ($\Phi = 3,7 \times 10^{-19}$ J), se emiten electrones. Los más veloces tienen una energía de $1,2 \times 10^{-19}$ J.
 - a) Determina la energía de cada fotón incidente.
 - b) Determina la frecuencia de la luz incidente.
- 12) Al incidir luz de $f = 7,8 \times 10^{14}$ Hz sobre una placa metálica, se emiten electrones. Los más veloces tienen una energía de $1,7 \times 10^{-19}$ J.
 - a) Determina la energía de cada fotón incidente.
 - b) Determina la función trabajo del metal.
- 13) Al incidir luz sobre una placa metálica ($\Phi = 3,4 \times 10^{-19}$ J), se emiten electrones. La diferencia de potencial necesaria para frenar los fotoelectrones es de 0,85V.
 - a) Determina la energía con que se desprenden los fotoelectrones más veloces.
 - b) Determina la energía de cada fotón incidente.
 - c) Determina la frecuencia de la luz incidente.

¿Cómo hacer un proyecto?



Introducción

Seguramente tendrás que realizar un proyecto como parte del curso, en este capítulo te plantearemos algunas sugerencias para la realización del mismo.

El proyecto te ofrece la oportunidad de conectarte a tu entorno y de enfrentarte a situaciones complejas, retadoras, a las cuales tendrás que dar respuestas científicas. Éstas te llevarán a investigar, a compartir resultados con tus compañeros, a asumir responsabilidades y a involucrarte en un proceso activo de trabajo real.

Se espera que durante todas las etapas del proyecto tú y tus compañeros desarrollen habilidades, descubran y aprendan conceptos y principios además de desarrollar estrategias de investigación creadora y de resolución de problemas. El trabajo en base a proyectos promueve la integración de asignaturas y permite un trabajo más globalizado. También desarrolla habilidades de carácter social, como comunicación, liderazgo y resolución de conflictos.

Un trabajo de éstas características lleva mucho tiempo, no dejes todo para último momento.

Además las impresoras se truncan, las computadoras se cuelgan y aparecen virus permanentemente.

¡Hay que ser previsor!

La implementación de un proyecto permite la creación de un ambiente de aprendizaje propicio para la colaboración y para la generación de nuevas actitudes. La colaboración conduce al desarrollo de autonomía, a la construcción de una relación diferente entre las personas, la cual está guiada por el principio de solidaridad. Aprender a oír la voz de los demás miembros del grupo, reconocer que **trabajando juntos se logra un resultado mejor**. Deberán superar el ánimo competitivo con comportamientos que impliquen dar y recibir ayuda, intercambiar recursos e información, retar y animar al otro y reflexionar conjuntamente sobre el proceso.

En un grupo siempre existirán diferencias, por lo que durante el proceso de participación tendrán muchos debates y discusiones. Para alcanzar soluciones creativas requerirán mucho diálogo y negociación y lo que es más importante, tener la **mente abierta y actuar de manera íntegra**, de modo que las relaciones se construyan en base a la confianza.

No existe una forma única para implementar un proyecto. Puede ser encarado como una investigación bibliográfica, experimental o mixta. Si

Llevar a cabo un abordaje bibliográfico debe incluir mención a experimentos. En caso de ser un experimento necesita una fundamentación teórica sólida que lo sustente.

Metodología de trabajo.

Para diseñar buenos proyectos se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Selección del tema, situación o problema.**

Como primer paso, deberán seleccionar algún tema de Física o relacionado con la asignatura, que sea de su interés. Tendrán que describir un problema específico, un fenómeno concreto que el proyecto busca atender o resolver. Cuanto más acotado y concreto sea el planteo, más fácil será llevarlo a cabo.

Este proyecto puede servirte para explorar las opciones de estudios futuros. Puedes elegir temas relacionados con la orientación que piensas seguir. Por ejemplo, si te gustan las ciencias sociales, te recomendamos temas que tengan que ver con la historia de la Física, o con la influencia de los descubrimientos en el desarrollo de las sociedades. Si tus intereses están cercanos a la Medicina o a la Biología, puedes desarrollar tu proyecto en torno a la Física en los métodos de diagnóstico no invasivo (ecografías, resonancias magnéticas, etc.). Al final de este capítulo te proponemos una serie de temas que te pueden resultar interesantes.

- **Descripción y propósito del proyecto. Planteo de objetivos.**

Para que el alcance del proyecto quede mejor definido, es necesario plantear claramente los objetivos. Redactar una explicación concisa del objetivo del proyecto y de qué forma éste intenta dar respuesta a la situación o el problema. Puede ser formulado en forma de pregunta o utilizando verbos en infinitivo. Veamos algunos ejemplos:

Tema general:	Comunicaciones
Objeto de estudio:	Fibras ópticas
Objetivo específico:	¿qué son las fibras ópticas? ¿cómo se utilizan en las comunicaciones?
Tema general:	Electrostática
Objeto de estudio:	Generador de Van de Graaf
Objetivo específico:	Estudiar el funcionamiento de un generador de Van de Graaf y reparar el existente en el laboratorio.
Tema general:	Ondas
Objeto de estudio:	Guitarra
Objetivo específico:	Por qué suenan distinto las diferentes cuerdas.



Te recomendamos llevar un registro detallado de las tareas desarrolladas con sus fechas correspondientes. Esto te servirá para ordenar el trabajo, para no perder información y como base para la elaboración del informe final.

Preguntas orientadoras

- ¿Cuál es mi propósito fundamental?
- ¿Cuál es la pregunta clave que quiero contestar?
- ¿Qué información necesito para contestar la pregunta?
- ¿Cuál es el concepto básico que encierra la pregunta?
- ¿Mis razonamientos son válidos?
- ¿Qué suposiciones utilizo en mi razonamiento?
- ¿Cuáles son mis inferencias o conclusiones fundamentales?
- ¿Cuál es mi punto de vista respecto al tema?

• Especificaciones de desempeño.

Aquí se debe especificar quiénes serán los integrantes del proyecto y los roles que asumirá cada uno. Elaborar una lista de indicadores de desempeño que les permita ir reconociendo sus logros. (Más adelante les planteamos una propuesta de autoevaluación). Tienen que aclarar el tiempo que les insumirá. (Por ejemplo, completar las entrevistas para cierta fecha, tener la investigación realizada el 30 de octubre, etc.)

• Búsqueda y procesamiento de la información.

Una vez formulados los objetivos, ha llegado el momento de la búsqueda de información. Podrán recurrir a fuentes escritas (libros, revistas, manuales), informáticas (internet, material multimedia), orales (entrevistas con técnicos y/o especialistas). Lo más importante es identificar y localizar fuentes de información adecuadas y confiables.

Aquí tienen que desplegar habilidades, conocimientos y actitudes para identificar lo que necesitan saber, buscar efectivamente la información, determinar si esta información es pertinente para atender a sus necesidades y convertirla en conocimiento útil aplicable en el proyecto. Por lo tanto es necesario elaborar un plan que oriente la búsqueda, el análisis y la síntesis de la información para resolver sus interrogantes.

- 1) **Localizar, discriminar, ordenar y seleccionar** entre diversas fuentes la información que es útil para atender una pregunta o necesidad. Es decir, **organizar, clasificar y jerarquizar** la información para facilitar su análisis y síntesis. Para ello deben descomponer bloques de información para extraer de ellos únicamente lo que se necesita.
- 2) **Leer, entender, comparar y evaluar** la información seleccionada para verificar si es **coherente, pertinente, suficiente e imparcial**; si existen sobre ella planteamientos o puntos de vista contrarios entre uno o más autores; y si los conceptos fundamentales se explican con la claridad y profundidad suficientes, o si es necesario descartar y buscar más información.
- 3) **Sintetizar** la información, expresar **conclusiones** o respuestas a las preguntas y comunicarlas de manera efectiva.

Es necesario registrar apropiadamente las fuentes consultadas para especificar en el informe final de dónde fue obtenida dicha información. Más adelante te brindamos diferentes formas de registrar la bibliografía consultada.

Si el proyecto es de carácter experimental, en ésta etapa se realizará además el diseño y armado del experimento. Es sumamente importante que la recolección de datos, realización de mediciones, así como su registro, utilizando tablas, gráficas o cuadros, sean minuciosas y rigurosas. Ello permitirá un análisis más completo de los resultados.

Conclusiones

Llegó el momento en el que deben plasmar sus conclusiones personales, la contrastación de los resultados obtenidos con los objetivos planteados.

Deben hacer una síntesis de lo aprendido, relacionando las nuevas explicaciones científicas con las distintas interrogantes y destacar los avances registrados desde las primeras respuestas.

Pueden hacer esquemas conceptuales de las relaciones que se han establecido.

Además deben incluir las técnicas aprendidas, los tipos de estrategias utilizadas, como ser las de razonamiento más riguroso y un modo de proceder más científico.

Presentación final

Como en todo trabajo científico, es ineludible la creación y presentación de un informe escrito que documente el trabajo realizado.

Aquí es donde se muestran los conocimientos, herramientas, experiencias, adquiridas en todo el proceso.

Debe incluir carátula, índice, desarrollo del proyecto, evaluación, conclusión y bibliografía. Si utilizaron frases tomadas textualmente de una fuente, deben aparecer entre comillas, citando la fuente.

Según el acceso a distintos tipos de tecnología que posean podrán utilizar otros recursos para compartir el trabajo con sus compañeros, como presentaciones multimedia, películas, posters, simulaciones o lo que les sugiera su creatividad. Con la ayuda de la tecnología, tienen más control sobre los resultados finales y cuentan con la oportunidad de personalizar sus trabajos. Deben ir más allá de las paredes de las aulas, colaborando con clases distantes a través del correo electrónico y sitios Web hechos por ustedes mismos. Es fundamental instrumentar actividades de aplicación de lo aprendido a otros contextos, de esa forma reforzarán los nuevos aprendizajes.

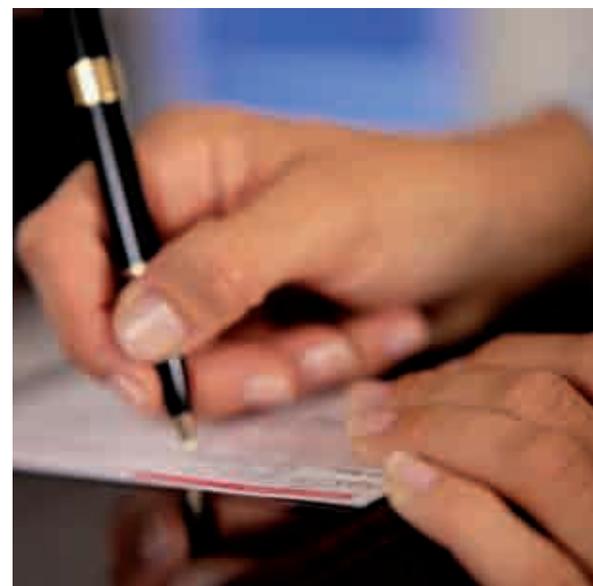
Autoevaluación

Es bueno que reflexionen sobre el proceso y resultados de su trabajo. ¿Qué dificultades encontraron? ¿Cómo las superaron? ¿Los integrantes del grupo trabajaron por igual? ¿Cómo manejaron los tiempos? Si volvieran a hacer el mismo trabajo ¿qué harían distinto? ¿Qué les aportó el trabajo? ¿Quedaron satisfechos con el proceso y resultados?

Incluimos una breve ficha para que evalúen la tarea realizada. Quizás sean evaluados de forma similar por el docente. A continuación de cada frase agreguen "sí", "más o menos", "no" según corresponda. Si lo realizan a conciencia, al ver el conjunto de sus respuestas tendrán una buena evaluación del trabajo. ¡Suerte!

Importante.

Recomendamos realizar permanentemente respaldos de todo el material que producen y guardarlos en más de un lugar, como ser C.D., pen drive o en tu casilla de correo electrónico.



Ficha de evaluación del proyecto

Elección del tema:

- El tema es apropiado.
- El tema está suficientemente acotado para ser abordado.
- El objetivo del trabajo es claro.

Búsqueda de información:

- El tipo de fuentes utilizadas es apropiado.
- La cantidad de fuentes utilizada es apropiada.
- La calidad de las fuentes utilizadas es apropiada.

Procesamiento y análisis de la información:

- La información está seleccionada adecuadamente.
- La información está analizada adecuadamente.
- Se lleva registro del trabajo realizado.
- Se extraen conclusiones personales.
- Se extraen conclusiones fundamentadas.

Presentación final:

- El informe final está presentado en forma prolija y ordenada.
- El informe final está redactado en forma coherente y fluida.
- Se incluye índice y citas bibliográficas.
- La obra o experimento es adecuada al objetivo planteado.
- La obra o experimento funciona.
- La presentación de la obra o experimento es adecuada.

Dinámica grupal:

- El grupo trabajó en forma constante y pareja, a lo largo del proceso.
- La colaboración entre los integrantes del grupo fue adecuada.
- Se cumplieron los plazos de entrega pautados por el docente.



Bibliografía

A continuación brindamos una forma de presentar las diversas fuentes consultadas al final del informe.

Escritas:

HECHT, E. (2000). "Óptica". Addison Wesley Iberoamericana. Madrid.

Informáticas:

FRANCO GARCÍA, A. "Física con ordenador", [en línea] (www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/) consultado el 17/12/2007

Orales:

RODRÍGUEZ, Mario, Técnico electricista autorizado por UTE, entrevista personal el 23/11/2007

También pueden generar sus propias fuentes, haciendo relevamiento de datos (encuestas, trabajos de campo, medidas experimentales).

Otros temas que pueden resultarte interesantes:

¿Cómo funciona un microscopio/ telescopio/ binocular/ cámara fotográfica/ ojo humano?

¿Cómo se puede medir la velocidad de la luz?

Las ondas en los instrumentos musicales de cuerda /de viento.

¿Cómo se puede medir la velocidad del sonido?

¿Cómo aislar acústicamente un cuarto?

¿Qué es un laser?

El campo magnético de la Tierra.

Magnetismo y geología.

¿Qué es un rayo? ¿Para qué sirve un pararrayos?

Historia del Electromagnetismo/ Óptica /Física Moderna.

Consecuencias sociales de los descubrimientos del laser/ fibra óptica/ otros.

Construcción de sensores de temperatura, luz y otros.

Estudio y construcción de motores eléctricos.

La Física en los cuentos/películas de ciencia ficción.

Física de la TV.

TV cable analógica, TV cable digital, TV aérea.

Física de la radio.

Lámparas comunes y lámparas de bajo consumo.

Aplicaciones de las microondas. Horno microondas.

Importante.

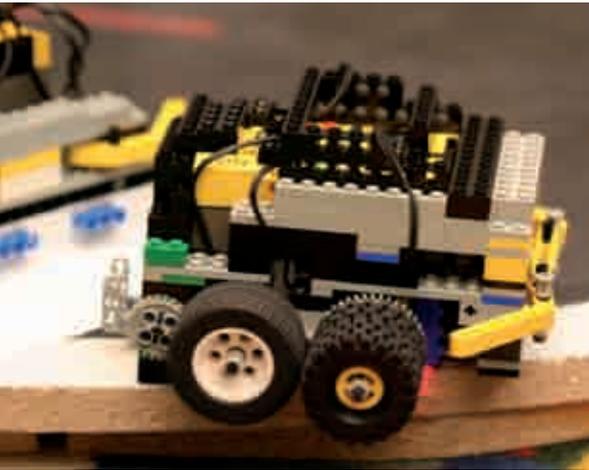
Las citas bibliográficas deben contener la información especificada, en el orden y en la forma detallados. Además tienen que respetar paréntesis, comas y puntos.

APELLIDO, inicial del nombre del autor. Si es más de un autor, poner punto y coma entre ellos. (año de edición), "Título", Editorial, Ciudad.

AUTOR/ES o INSTITUCIÓN, "Título", [formato], dirección web, fecha de consulta.

NOMBRE, Característica relevante para el trabajo, fecha y modalidad de consulta.





Diseño y construcción de circuitos lógicos.

¿Cómo medir el radio de la Tierra?

¿Cómo funciona una fotocopiadora?

Físicos uruguayos. La investigación científica en el Uruguay.

Einstein en Uruguay.

Grandes experimentos actuales: el CERN, el LHC, el observatorio Auger, otros.

La Física en el agro.

La Física en el tambo.

Refrigeración, conservación de alimentos.

Las transformaciones de energía en el Uruguay. UTE/ ANCAP.

Energía del futuro. Alternativas energéticas en el Uruguay.

La Física en las distintas industrias.

La Física en los deportes.

La Física en el cuerpo humano.

La Física en los juguetes.

La Física en los medios de transporte: bicicleta, moto, auto, barco, avión, etc.

Construcción de artefactos, dispositivos creativos.

SEIS PRINCIPIOS DEL APRENDIZAJE POR PROYECTOS

Consideramos importante incluir seis principios del aprendizaje por proyectos obtenidos de la siguiente página:

<http://www.eduteka.org/AesAprendizajePorProyectos.php>

AUTENTICIDAD

- ¿El proyecto se basa en un problema o pregunta que es significativo o importante para el estudiante?
- ¿El problema o pregunta se relaciona con los que pueden encontrarse en el desempeño de un trabajo o en la comunidad?
- ¿El proyecto ofrece al estudiante oportunidades de producir algo que tenga valor personal y/o social fuera del entorno del colegio?

RIGOR ACADÉMICO

- ¿El proyecto demanda del estudiante la adquisición y la aplicación de conocimiento relacionado con una o más asignaturas o áreas de contenido?

- ¿El proyecto reta al estudiante para utilizar métodos de indagación de una o más disciplinas? (Por ejemplo: ¿lo induce a pensar cómo piensan los científicos?)
- ¿El estudiante desarrolla habilidades de pensamiento de orden superior? (Por ejemplo: ¿lo estimula a que haga búsquedas basadas en evidencia o a buscar una perspectiva diferente?)

APLICACIÓN DEL APRENDIZAJE

- ¿El estudiante soluciona un problema que está claramente relacionado con la vida y el trabajo? (Ej: diseña un producto, mejora un sistema u organiza un evento)
- ¿La realización del proyecto requiere que el estudiante desarrolle habilidades para organizarse y auto dirigirse?
- ¿El proyecto requiere que el estudiante aprenda y ponga en uso habilidades (tales como solución de problemas, comunicación, TICs y trabajo en equipo) que se demandan en el sitio de trabajo?

EXPLORACIÓN ACTIVA

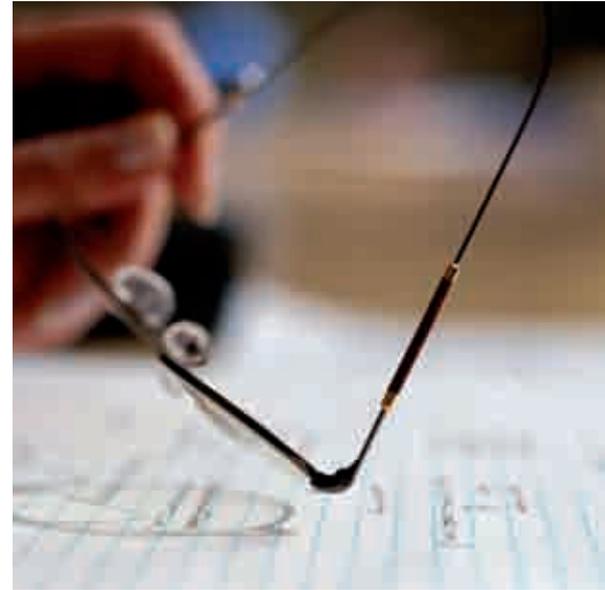
- ¿El estudiante requiere hacer trabajo de campo durante un tiempo significativo?
- ¿El proyecto requiere que el estudiante use varios métodos, medios y fuentes para realizar una investigación?
- ¿Se espera que el estudiante haga una presentación para explicar lo que aprendió?

INTERACCIÓN CON ADULTOS

- ¿El estudiante puede conocer y observar un adulto cuya experiencia es tanto reconocida como relevante?
- ¿El estudiante puede trabajar de cerca con al menos un adulto, y llegar a conocerlo?
- ¿Los adultos colaboran entre ellos y con los estudiantes en el diseño y valoración de proyectos?

EVALUACIÓN

- ¿El estudiante utiliza criterios de proyecto (que ayuda a establecer) para calibrar o valorar lo que está aprendiendo?
- ¿Adultos, que están fuera del aula de clase, ayudan a los estudiantes a desarrollar un sentido de estándares del mundo real?
- ¿Se evalúa con regularidad el trabajo del estudiante mediante exhibiciones, demostraciones y portafolios?



ESTÁNDARES INTELECTUALES UNIVERSALES

Los estándares intelectuales universales obtenidos en la página: <http://www.criticalthinking.org/resources/international/spanish.cfm> resultarán muy útiles para enriquecer aún más el proyecto.

CLARIDAD

- ¿Podría elaborar un poco más sobre ese punto?
- ¿Podría darme un ejemplo?
- ¿Podría ilustrar lo que quiere decir?
- ¿Podría expresar ese punto de otra manera?

EXACTITUD

- ¿Cómo podríamos verificarlo?
- ¿Cómo podríamos averiguar que es verdad?
- ¿Cómo podemos comprobarlo?

PRECISIÓN

- ¿Podría ser más específico?
- ¿Podría dar más detalles?
- ¿Podría ser más preciso?

PERTINENCIA

- ¿Cómo se conecta esto con el problema?
- ¿Cómo se relaciona con la pregunta?
- ¿Cómo nos ayuda con el asunto en cuestión?

PROFUNDIDAD

- ¿Qué factores hacen de este un problema difícil?
- ¿Cuáles son algunas de las complejidades de esta pregunta?
- ¿Cuáles son algunas de las dificultades que necesitamos atender?

AMPLITUD

- ¿Es necesario considerar esto desde otra perspectiva?
- ¿Necesitamos tener en cuenta otro punto de vista?
- ¿Existen otras maneras de enfocar este problema?

LÓGICA

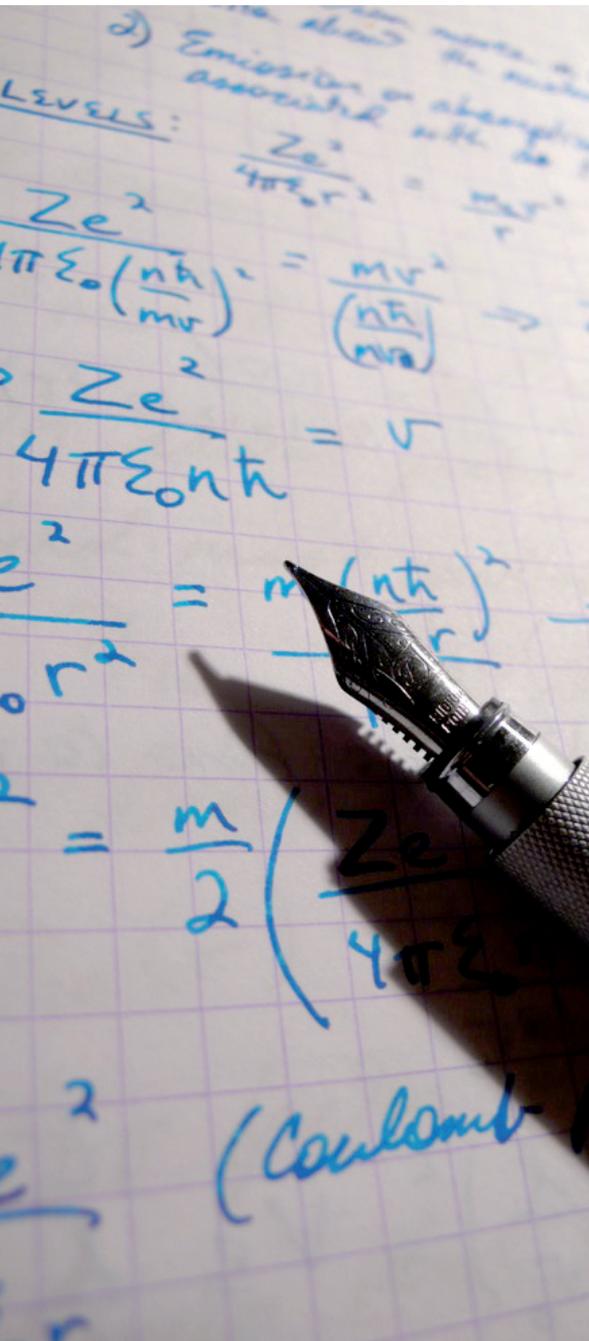
- ¿Considerado en conjunto, esto tiene sentido?
- ¿Guarda relación su primer párrafo con el último?
- ¿Lo que usted dice se desprende de evidencia?

IMPORTANCIA

- ¿Es este el problema más importante a considerar?
- ¿Es esta la idea central en la que hay que enfocarse?
- ¿Cuál de estos datos es el más importante?

IMPARCIALIDAD

- ¿Tengo un interés personal en este asunto?
- ¿Represento justamente los puntos de vista de otros?



FÍSICA / 1° B.D.

interacciones

campos y ondas



soluciones

Capítulo 1

- 1) Altura = 0,38m
- 2) a) Aumenta su tamaño
b) Disminuye su tamaño
c) Disminuye su tamaño
d) Disminuye hasta ser una línea
e) Disminuye su tamaño
f) Aumenta su tamaño
- 4) $d = 9,5 \times 10^{15} \text{ m}$
- 5) $t = 1,1 \times 10^{-5} \text{ s}$

Capítulo 2

- 1) $\hat{\alpha} = 27^\circ$; $\hat{\beta} = 63^\circ$
 $\hat{\alpha} = \hat{r}$
- 3) Opción b. Girado 30°
- 4) 10°
- 5) b) son paralelos
- 7) $\hat{i} = 60^\circ$

Capítulo 3

- 1) $v_{\text{Ambar}} = 1,94 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $v_{\text{Alcohol etílico}} = 2,21 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $v_{\text{vidrio flint}} = 1,81 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

2)

$\hat{i} (^\circ)$	$\hat{r} (^\circ)$
0,0	0,0
23,5	15,2
33,3	21,2
73,0	39,0

- 3) $n_2 = 1,08$
 $v_1 = 2,14 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $v_2 = 2,78 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

- 4) $\hat{r}_{\text{rojo}} = 34,9^\circ$
 $\hat{r}_{\text{violeta}} = 34,4^\circ$
- 5) $\hat{r} = 0^\circ$
 $\hat{r} = 44,8^\circ$
se produce reflexión total interna
- 6) $\hat{i}_L = 33,3^\circ$
- 7) a) $\hat{r}_1 = 21,5^\circ$ $\hat{r}_2 = 27,2^\circ$
b) $\hat{r}_1 = 46,5^\circ$ $\hat{r}_2 = 74,6^\circ$

Capítulo 4

- 4) c) real e invertida
d) $D_i = 16 \text{ cm}$, $H_i = -2,5 \text{ cm}$
e) Aumenta
- 5) a) real e invertida
 $D_i = 18 \text{ cm}$, $H_i = -3,0 \text{ cm}$
Aumenta
b) real e invertida
 $D_i = 36 \text{ cm}$, $H_i = -5,4 \text{ cm}$
Aumenta
c) virtual y derecha
 $D_i = -11 \text{ cm}$, $H_i = 6,8 \text{ cm}$.
Disminuye
- 6) del ejercicio 4
c) real e invertida
d) $D_i = 16 \text{ cm}$, $H_i = -2,5 \text{ cm}$
e) Aumenta
del ejercicio 5
a) real e invertida
 $D_i = 18 \text{ cm}$, $H_i = -3,0 \text{ cm}$
Aumenta
b) real e invertida
 $D_i = 36 \text{ cm}$, $H_i = -5,4 \text{ cm}$
Aumenta
c) virtual y derecha
 $D_i = -11 \text{ cm}$, $H_i = 6,8 \text{ cm}$.
Disminuye
- 8) c) Virtual y derecha
d) $H_i = 3,5 \text{ cm}$, $D_i = -2,8 \text{ cm}$
e) $A = 0,70$
f) Aumenta
- 9) c) Virtual y derecha
d) $H_i = 3,5 \text{ cm}$, $D_i = -2,8 \text{ cm}$
e) $A = 0,70$
f) Aumenta
- 10) $D_i = -3,0 \text{ cm}$, $H_i = 10 \text{ cm}$
Virtual y derecha
- 12) Virtual, derecha y de mayor tamaño
- 13) a) $D_i = 13 \text{ cm}$, $H_i = -0,33 \text{ cm}$.
Real, invertida y más chica
b) $D_i = -10 \text{ cm}$, $H_i = 2,0 \text{ cm}$
Virtual, derecha y mayor
- 14) a) $D_i = -8,0 \text{ cm}$, $H_i = 0,20 \text{ cm}$
Virtual, derecha y menor
b) $D_i = -3,3 \text{ cm}$, $H_i = 0,67 \text{ cm}$
Virtual, derecha y menor

Capítulo 5

- 1) a) $\hat{r}_1 = 19,2^\circ$ $\hat{r}_2 = 30,0^\circ$
b) $\hat{r}_1 = 0^\circ$ $\hat{r}_2 = 40,9^\circ$
c) $\hat{r}_1 = 25,8^\circ$, se refleja internamente con
 $\hat{r} = 64,2^\circ$ y $\hat{r}_2 = 41,5^\circ$
- 3) c) Real, invertida y mayor
d) $D_i = 40 \text{ cm}$, $H_i = -12 \text{ cm}$
f) Aumenta
- 4) a) Real, invertida y mayor
 $D_i = 16 \text{ cm}$, $H_i = -3,0 \text{ cm}$
Aumenta
b) Virtual, derecha y mayor
 $D_i = -13,3 \text{ cm}$, $H_i = 8,0 \text{ cm}$
Disminuye
- 5) No se forma imagen

- 6) Del problema 3
 c) Real, invertida y mayor
 d) $D_i = 40 \text{ cm}$, $H_i = -12 \text{ cm}$
 f) Aumenta

Del problema 4

- a) Real, invertida y mayor
 $D_i = 16 \text{ cm}$, $H_i = -3,0 \text{ cm}$
 Aumenta
 b) Virtual, derecha y mayor
 $D_i = -13,3 \text{ cm}$, $H_i = 8,0 \text{ cm}$
 Disminuye
 7) $D_o = 1,4 \text{ m}$
 9) c) Virtual y derecha
 d) $D_i = -3,2 \text{ cm}$, $H_i = 1,6 \text{ cm}$
 e) $A = 0,64$ f) Disminuye
 10) Virtual y derecha
 $D_i = -3,2 \text{ cm}$, $H_i = 1,6 \text{ cm}$
 $A = 0,64$
 11) $D_i = -5,0 \text{ cm}$
 12) a) Real, invertida y menor
 $D_i = 17 \text{ cm}$, $H_i = -0,33 \text{ cm}$
 b) Virtual, derecha y menor..
 $D_i = -10 \text{ cm}$, $H_i = 1,0 \text{ cm}$
 13) a) $A = 2,0$
 b) $D_o = 75 \text{ cm}$
 14) a) $A = 2,0$
 b) $D_o = 25 \text{ cm}$

Capítulo 6

- 1) b) $t = 0,50 \text{ s}$ sube
 $t = 1,00 \text{ s}$ sube
 $t = 1,50 \text{ s}$ está en reposo
 $t = 2,00 \text{ s}$ baja
 2) b) con la misma velocidad
 3) b) con la misma velocidad
 4) b) $v_{\text{incidente}} = v_{\text{reflejado}} = 120 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $v_{\text{refractado}} = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

- 5) b) $v_{\text{incidente}} = v_{\text{reflejado}} = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $v_{\text{refractado}} = 120 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 6) a) $v = 141 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 b) $v = 200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 7) $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$
 8) $v = 5,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $\mu = 5,0 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
 $T = 1,3 \text{ N}$
 9) a) $|\vec{v}|$ igual para ambos
 b) Se superponen de forma destructiva luego que se refleja el primer pulso
 12) a) $A = 22 \text{ cm}$
 b) $A = 2 \text{ cm}$
 15) a) No.
 16) a) Derecho con respecto al pulso de la figura
 b) Invertido con respecto al pulso de la figura

Capítulo 7

- 1) $T = 1,79 \times 10^{-6} \text{ s}$, $\lambda = 540 \text{ m}$
 2) $\lambda = 0,77 \text{ m}$, $T = 2,27 \times 10^{-3} \text{ s}$
 3) $f = 10 \text{ Hz}$, $v = 8,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 4) a) $A = 1,0 \text{ cm}$, $f = 5,0 \text{ Hz}$,
 $\lambda = 0,20 \text{ m}$
 b) $v = 1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 c) Por encima
 5) a) $v = 250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 b) $\lambda = 25 \text{ m}$
 6) a) $f = 8,3 \text{ Hz}$
 b) $v = 1,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 c) v no varía, λ disminuye a la mitad
 7) a) $v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 b) $\lambda = 2,5 \text{ m}$

- c) $\mu = 0,13 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
 8) a) $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_2$
 b) v_1, v_3, v_2
 9) a) $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_2$
 b) $v_1 = v_3 = v_2$
 c) f_2, f_3, f_1
 10) a) $f_1 = 12,0 \text{ Hz}$, $\lambda_1 = 2,8 \text{ m}$
 b) $f_1 = 12,0 \text{ Hz}$, $\lambda_2 = 5,6 \text{ m}$

Capítulo 8

- 1) a) Crestas
 c) $\hat{i} = 25^\circ$
 e) no varían
 2) a) misma frecuencia
 b) en el medio 1
 c) $\frac{v_1}{v_2} = 1,9$
 d) $\hat{r} = 27^\circ$
 3) a) $v_2 = 0,31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 b) $\lambda_i = 0,10 \text{ m}$, $\lambda_r = 0,052 \text{ m}$
 4) a) porque la separación entre las crestas es diferente
 b) si existe, pero $\hat{i} = \hat{r} = 0^\circ$
 c) $\lambda_i = 1,0 \text{ cm}$, $\lambda_r = 0,32 \text{ cm}$
 d) $v_i = 0,10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $v_r = 0,033 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 5) a) No porque está detrás del obstáculo
 6) b) La difracción es más notoria
 7) a) porque $a \gg \lambda$
 b) la frecuencia debe disminuir
 9) b) Si
 c) En todo instante se superponen crestas con valles. Se llaman líneas nodales

Capítulo 9

- 1) a) rojo.
b) $\lambda = 6,328 \times 10^{-7} \text{ m}$
c) $f = 4,74 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- 2) a) Violeta, $\lambda = 4,05 \times 10^{-7} \text{ m}$,
 $f = 7,41 \times 10^{14} \text{ Hz}$
b) Azul, $\lambda = 4,73 \times 10^{-7} \text{ m}$,
 $f = 6,34 \times 10^{14} \text{ Hz}$
c) Amarillo, $\lambda = 5,93 \times 10^{-7} \text{ m}$,
 $f = 5,06 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- 3) $\lambda = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m}$. Naranja
- 4) a) $\Delta x = 1,0 \text{ cm}$
b) $\Delta x = 4,0 \text{ cm}$
c) $\Delta x = 4,0 \text{ cm}$
d) $\Delta x = 1,0 \text{ cm}$
- 5) $\Delta x = 1,4 \times 10^{-2} \text{ m}$
- 6) $d = 4,4 \times 10^{-4} \text{ m}$
- 7) $L = 1,1 \text{ m}$
- 8) $\lambda = 4,7 \times 10^{-7} \text{ m}$

Capítulo 10

- 1) a) $q_1 = 3,2 \times 10^{-7} \text{ C}$
b) $q_2 = -3,2 \times 10^{-7} \text{ C}$
- 2) $F = 1,5 \times 10^{-3} \text{ N}$, atractiva
- 3) $F = 0,68 \text{ N}$, repulsiva
- 4) $q = 2,0 \mu\text{C}$
- 5) $d = 0,20 \text{ m}$
- 6) $q = 3,0 \text{ nC}$
- 7) $F_{N2} = 16 \text{ N}$, horizontal hacia la derecha
- 8) $F_{N1} = 3,6 \text{ N}$, horizontal hacia la izquierda
 $F_{N3} = 13 \text{ N}$, horizontal hacia la izquierda
- 9) $F_{N2} = 12 \text{ N}$, $\hat{\alpha} = -64^\circ$
- 10) $F_{N1} = 8,3 \text{ N}$, $\hat{\alpha} = 162^\circ$
 $F_{N2} = 8,6 \text{ N}$, $\hat{\alpha} = 73^\circ$

- 11) a) $q_2 = 1,3 \mu\text{C}$
b) No
- 12) $F_{N4} = 3,9 \text{ N}$, $\hat{\alpha} = 10^\circ$
- 13) $6,3 \times 10^6 \text{ e}^-$, $T = 6,0 \times 10^{-5} \text{ N}$
- 14) $E_A = 68 \frac{\text{N}}{\text{C}}$, hacia q.
 $E_B = E_C = 30 \frac{\text{N}}{\text{C}}$, hacia q
- 15) a) $q = 8,9 \times 10^{-14} \text{ C}$
b) No
- 16) $d = 3,0 \text{ m}$
- 17) a) $E_{RA} = 5,4 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$, hacia la derecha
b) $E_{RB} = 2,4 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$, hacia la izquierda
c) No
- 18) $q_3 = -16 \text{ nC}$
- 19) a) $E_{RA} = 3,8 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$, $\hat{\alpha} = -45^\circ$
b) $E_{RB} = 3,8 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$, $\hat{\alpha} = -45^\circ$
c) $E_{RA} = 1,08 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$, $\hat{\alpha} = -45^\circ$

Capítulo 11

- 1) $I = 5,0 \times 10^{-2} \text{ A}$
 $I = 50 \text{ mA}$
 $I = 5,0 \times 10^4 \mu\text{A}$
- 2) $q = 15 \text{ C}$,
 $9,4 \times 10^{19} \text{ e}^-$
- 3) $\Delta t = 8,0 \times 10^4 \text{ s}$
- 4) $V = 30 \text{ V}$
- 5) a) $q = 27 \text{ C}$
b) $T = 2,4 \times 10^2 \text{ J}$
- 6) $V = 2,2 \times 10^2 \text{ V}$

7)

Para encender la lámparadebo cerrar los interruptores...	Al cerrarlos se encienden también las lámparas...
L_1	ABCD/CD	L_2 y L_3/L_4
L_2	ABC	L_1 y L_3
L_3	ABC	L_1 y L_2
L_4	DC	L_1

- 8) a) 1 Voltímetro
2 Amperímetro
b) 3 Voltímetro
1, 2, 4 Amperímetro
- 10) A_1
- 11) V_2
- 12) a) F
b) V
c) F
d) V
e) V
- 13) $I_3 = 0,30 \text{ A}$
 $I_4 = 0,40 \text{ A}$
- 14) $V_{BC} = 2,5 \text{ V}$
 $V_{AB} = 2,0 \text{ V}$

Capítulo 12

- 1) a) $R = 1,2 \times 10^2 \Omega$
b) $I = 33 \text{ mA}$
- 2) $I = 0,32 \text{ A}$
- 3) $V = 3,3 \times 10^2 \text{ V}$
- 4) a) $q = 2,3 \times 10^2 \text{ C}$
b) $1,4 \times 10^{21} \text{ e}^-$
- 5) $R = 2,8 \Omega$
- 6) $S = 2,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2 = 0,21 \text{ mm}^2$
 $S = 3,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2 = 0,35 \text{ mm}^2$

- 7) a) $R = 240\Omega$
 b) $R = 40\Omega$
 c) $R = 480\Omega$
 d) $R = 120\Omega$
 e) $R = 30\Omega$

8) $T = 52^\circ\text{C}$

- 9) a) $l = 1,8 \times 10^2 \text{ m}$
 b) $1,4 \times 10^3$ vueltas
 c) $T = 54^\circ\text{C}$

- 10) b) conductor 2 óhmico, 1 y 3 no óhmicos
 c) $R = 1,0 \times 10^2 \Omega$

- 11) $R_1 = 29 \times 10^1 \Omega \pm 10\%$
 $R_2 = 65 \Omega \pm 5\%$
 $R_3 = 84 \times 10^3 \Omega \pm 10\%$
 $R_4 = 72 \times 10^{-2} \Omega \pm 5\%$

Capítulo 13

- 1) a) $\Delta t = 27\text{s}$
 b) $\Delta E = 4,5 \times 10^3 \text{ J}$
- 2) El televisor
- 3) a) $P = 29 \text{ W}$
 b) $\Delta E = 2,6 \times 10^4 \text{ J}$
- 4) a) Si
 b) No
- 5) $R = 24 \Omega$
- 6) $R = 29 \Omega$
- 7) $q = 0,96 \text{ C}$
- 8) No es óhmico
- 9) $P = 15 \text{ W}$
- 10) Se estropea
- 11) a) $l = 23 \text{ A}$
 b) $\Delta E = 2,9 \times 10^9 \text{ J}$,
 $\Delta E = 800\text{kWh}$
- 12) $\Delta E = 8,4 \times 10^6 \text{ J}$,
 $R = 3,5\Omega$

- 13) a) $\Delta E = 4,5 \times 10^5 \text{ J}$
 b) $T = 87^\circ\text{C}$
 c) $R = 51 \Omega$

- 14) a) $\Delta t = 2400\text{s} = 40$ minutos
 b) $l = 4,1 \text{ A}$

Capítulo 14

- 1) a) $I_1 = I_2 = 1,5 \text{ A}$
 b) $V_1 = 12\text{V}, V_2 = 18\text{V}$
 c) $P_1 = 18\text{W}, P_2 = 27\text{W}$
 d) $P_T = 45\text{W}$
- 2) a) $I_1 = 3,8\text{A}, I_2 = 2,5 \text{ A}$
 b) $V_1 = V_2 = 30\text{V}$
 c) $P_1 = 1,1 \times 10^2 \text{ W}, P_2 = 75 \text{ W}$
 d) $P_T = 1,9 \times 10^2 \text{ W}$
- 3) a) $I_1 = 3,0\text{A}, I_2 = 1,8 \text{ A}$,
 $I_3 = 1,2 \text{ A}$
 b) $V = 29\text{V}$
 c) $P_T = 87 \text{ W}$
- 4) a) $P_1 = P_2 = 5,4 \text{ W}, P_3 = 22\text{W}$
 b) $V = 36\text{V}$
 c) $P = 33\text{W}$
- 5) $R = 19 \Omega$
- 6) a) $I_1 = 3,0\text{A}$
 $I_2 = 1,0\text{A}, I_3 = 2,0 \text{ A}$
 b) $V_1 = 27\text{V}$
 $V_2 = V_3 = 15 \text{ V}$
 c) $P_1 = 81\text{W}, P_2 = 15 \text{ W}$,
 $P_3 = 30\text{W}$
- 7) $I_1 = 0,83\text{A}, I_2 = 1,7 \text{ A}, I_3 = 2,5 \text{ A}$,
 $I_4 = 3,1\text{A}, I_T = 5,6 \text{ A}$
- 8) a) $V_{AB} = 72 \text{ V}$.
 b) $R_1 = R_2 = 12 \Omega$
 $I_1 = I_2 = 3,0 \text{ A}$
 c) $I_1 = I_2 = 3,0 \text{ A}, I_3 = 2,0\text{A}$
- 9) a) $R_1 = 2,0\Omega$
 b) $I_T = 10\text{A}$

10) Cerrado

- 11) $R_3 = 70\Omega$
 $P_1 = 8,4 \text{ W}, P_2 = 34 \text{ W} (P_2 = 4 P_1)$

- 12) $V = 6,6\text{V}$
 $l = 0,22\text{A}$, para R en serie,
 $l = 0,11\text{A}$, para c/R del paralelo

Capítulo 15

- 1) a) $l = 0,30\text{A}$
 b) $V = 1,4\text{V}$
- 2) a) Generador 2
 b) Generador 3
 c) Generador 2
 d) Generador 1
- 3) a) $l = 0,44 \text{ A}$
 $V = 6,6 \text{ V}$
 b) $l = 0,53 \text{ A}$
 $V = 8,0 \text{ V}$
- 4) a) $I_T = 0,39\text{A}$
 b) $I_1 = I_2 = 0,39\text{A}$
 c) $V_1 = 7,0\text{V}, V_2 = 3,5 \text{ V}$
- 5) a) $I_T = 1,2 \text{ A}$
 b) $I_1 = 0,40 \text{ A}, I_2 = 0,80 \text{ A}$
 c) $V_1 = V_2 = 7,2 \text{ V}$
- 6) a) $r_1 = 3,0\Omega$
 b) $\varepsilon = 36\text{V}$
 c) $P = 96\text{W}$
 d) $P_G = 1,4 \times 10^2 \text{ W}$
- 7) b) real
 c) $\varepsilon = 14,0\text{V}$
 d) $r_1 = 1,2 \Omega$
 e) $P = 70 \text{ W}$
- 8) a) $I_1 = 0,34 \text{ A}$
 b) $I_2 = I_3 = 0,17\text{A}$
 c) $P_1 = 2,3\text{W}, P_2 = P_3 = 0,58 \text{ W}$
 d) $P_T = 4,1 \text{ W}$

- 9) a) $I_1 = I_2 = 0,22 \text{ A}$
 $I_3 = 0,44 \text{ A}$
 b) $P_1 = P_2 = 0,97 \text{ W}$,
 $P_3 = 3,9 \text{ W}$
 d) $P_G = 7,9 \text{ W}$

Capítulo 16

- 1) Or
 2) And
 3) Not
 4)

E_1	E_2	S
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

5)

E_1	E_2	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

6) a)

E_1	E_2	E_3	S
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

b)

E_1	E_2	E_3	S
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

c)

E_1	E_2	E_3	S
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

d)

E_1	E_2	E_3	S
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

7)

E_1	E_2	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Capítulo 17

- 1) c) $|\vec{B}_D|, |\vec{B}_B|, |\vec{B}_E|$
 2) cambian las respuestas a y b
 3) b) $|\vec{B}_D|, |\vec{B}_C|, |\vec{B}_B|, |\vec{B}_A|$
 5) El de la izquierda sur y el de la derecha norte
 8) a) El polo de la izquierda norte y el de la derecha sur
 b) En la región comprendida entre sus polos
 9) b) $\hat{\alpha} = 63^\circ$
 c) $B_R = 4,5 \times 10^{-5} \text{ T}$
 10) b) $B_R = 0,11 \text{ T}$, horizontal a la derecha
 c) $B_R = 4,1 \times 10^{-2} \text{ T}$, vertical

Capítulo 18

- 1) $B_A = 4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, saliente
 $B_B = 2,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, saliente
 $B_C = 4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, entrante
 2) $B_A = 8,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, entrante
 $B_B = 4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, entrante
 $B_C = 8,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, saliente
 3) $B_A = B_B = B_C = B_D = 4,0 \times 10^{-6} \text{ T}$
 4) $B_A = B_B = B_C = B_D = 1,0 \times 10^{-6} \text{ T}$
 5) a) $B_A = 4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, entrante
 $B_B = 0,0 \text{ T}$
 b) $B_A = 4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, saliente
 $B_B = 2,0 \times 10^{-5} \text{ T}$, saliente
 c) $B_A = 2,0 \times 10^{-5} \text{ T}$,
 hacia arriba
 $B_B = 2,0 \times 10^{-5} \text{ T}$,
 hacia arriba
 6) a) $B_{RM} = 6,6 \times 10^{-5} \text{ T}$, $\hat{\alpha} = -143^\circ$
 b) $B_{RM} = 4,7 \times 10^{-5} \text{ T}$, $\hat{\alpha} = -99^\circ$
 c) $B_{RM} = 5,5 \times 10^{-5} \text{ T}$, $\hat{\alpha} = 23^\circ$

- 7) a) $I_2 = 3,0A$ hacia la derecha
 b) $I_2 = 2,0A$ hacia la derecha
 c) $I_2 = 3,6A$ hacia la derecha

- 8) $I_1 = 5,4A$, saliente
 $I_2 = 9,5A$, entrante

- 9) $B = 1,9 \times 10^{-4} T$, entrante

- 10) $I = 3,6 A$, sentido horario

- 11) a) Atraen
 b) Atraen
 c) Repelen
 d) Repelen

- 12) a) $B = 0,15T$
 b) i) $B = 0,45T$
 ii) $B = 7,5 \times 10^{-2} T$
 iii) $B = 7,5 \times 10^{-2} T$
 iv) $B = 0,15T$
 v) $B = 0,15T$,
 se invierte el sentido

- 13) Aumenta el módulo

- 14) $I = 4,7 \times 10^{-2} A$.

- 15) a) $B = 5,0 \times 10^{-5} T$
 b) $B = 1,6 \times 10^{-4} T$
 c) $B = 0,13 T$

- 16) $\frac{B_{\text{SOLENOIDE}}}{B_{\text{CONDUCTOR}}} = 1,6 \times 10^6$

Capítulo 19

- 3) a) $F = 3,9N$, entrante
 b) $F = 2,0N$, saliente
 c) $F = 3,9N$, hacia arriba
 d) $F = 0,0N$
- 4) b) Entrante
 c) $B = 3,3 \times 10^{-2} T$
 d) Vertical
- 5) Solo la parte b:
 la Fuerza es saliente

- 6) b) $v = 4,8 \times 10^2 \frac{m}{s}$,
 vertical hacia abajo

- c) $v = 1,6 \times 10^2 \frac{m}{s}$,
 vertical hacia abajo

- d) $v = 4,8 \times 10^2 \frac{m}{s}$,
 vertical hacia arriba

- e) $v = 4,8 \times 10^2 \frac{m}{s}$,
 vertical hacia arriba

- 9) $B = 7,2 \times 10^{-2} T$, Entrante

- 10) b) $I = 10 A$, hacia la derecha
 c) Vertical

- 11) a) $F_{AB} = 0,32N$, saliente
 $F_{BC} = 0N$
 $F_{CB} = 0,32N$, entrante
 b) $F_N = 0,0N$
 c) Cualquier dirección
 que no sea horizontal o
 vertical

- 12) a) $F_N = 9,6 \times 10^{-2} N$,
 horizontal a la izquierda
 b) $F_N = 9,6 \times 10^{-2} N$,
 horizontal a la derecha

- 13) a) $P = 0,40N$,
 vertical hacia abajo
 $T = 0,40N$,
 vertical hacia arriba
 b) $B = 4,0 \times 10^{-2}$ entrante

- 14) a) $F_{12} = 2,3 \times 10^{-4} N$,
 vertical hacia arriba
 b) $F_{21} = 2,3 \times 10^{-4} N$,
 vertical hacia abajo

- 15) a) $F_{12} = 2,3 \times 10^{-4} N$,
 horizontal a la derecha
 b) $F_{21} = 2,3 \times 10^{-4} N$,
 horizontal a la izquierda

- 16) a) Cambian de sentido las
 fuerzas
 b) $F_M = 6,9 \times 10^{-4} N$

- 17) $F_{N1} = 5,9 \times 10^{-5} N$,
 vertical hacia abajo
 $F_{N2} = 3,5 \times 10^{-4} N$,
 vertical hacia arriba
 $F_{N3} = 2,9 \times 10^{-4} N$,
 vertical hacia abajo

Capítulo 20

- 1) a) $\phi = 0,0Wb$
 b) $\phi = 2,0 \times 10^{-3} Wb$
 c) $\phi = 1,7 \times 10^{-3} Wb$

- 2) $\epsilon_i = 0,25 V$

- 3) $\Delta t = 4,0 \times 10^{-2} s$

- 4) $\phi_i = 15 mWb$

- 6) a) $\phi = 2,5 \times 10^{-6} Wb$
 b) $\epsilon_i = 6,3 \times 10^{-6} V$

- 7) a) En el caso "a)" no se
 induce corriente porque
 no hay $\Delta\phi$
 b) caso 1. $I = 0$
 caso 2. sentido de I horario
 caso 3. Sentido de I hacia
 arriba por adelante
 c) caso 1. \vec{B}_i nulo
 caso 2. \vec{B}_i entrante
 caso 3 \vec{B}_i formando 120°
 con la horizontal
 d) Sentido de la intensidad:
 caso 1. $I = 0$
 caso 2. sentido de I
 antihorario
 caso 3. Sentido de I hacia
 abajo por adelante
 El Campo magnético
 inducido:
 caso 1. \vec{B}_i nulo
 caso 2. \vec{B}_i saliente
 caso 3. \vec{B}_i formando -30°
 con la horizontal

- 8) a) Visto desde arriba, sentido antihorario
b) Visto desde arriba sentido horario
- 9) a) Visto desde arriba, sentido horario
b) Visto desde arriba sentido antihorario
- 10) a) Hacia la izquierda
b) Hacia la derecha
- 11) a) $\varepsilon_i = 0,33\text{V}$ entre $t = 0,0\text{s}$ y $t = 0,5\text{s}$
 $\varepsilon_i = 0,0\text{V}$ entre $t = 0,5\text{s}$ y $t = 1,0\text{s}$
 $\varepsilon_i = -1,2 \times 10^{-2}\text{V}$ entre $t = 1,0\text{s}$ y $t = 2,0\text{s}$
b) horario visto desde arriba entre $t = 0,0\text{s}$ y $t = 0,5\text{s}$
 $I = 0$ entre $t = 0,5\text{s}$ y $t = 1,0\text{s}$
antihorario visto desde arriba entre $t = 1,0\text{s}$ y $t = 2,0\text{s}$
- 12) b) $\varepsilon_i = 2,0 \times 10^{-6}\text{V}$
c) $\varepsilon_i = 2,0 \times 10^{-3}\text{V}$

Capítulo 21

- 1) opción c
2) radio (onda media)
3) $\lambda = 6,0 \times 10^2\text{ m}$
4) VHF (TV)
5) $f = 3,0 \times 10^8\text{ Hz}$
6) microondas, rojo, violeta, UV
7) UV, violeta, rojo, microondas
8) microondas, rojo, violeta, UV

Capítulo 22

- 1) $E = 4,6 \times 10^{-19}\text{ J}$
2) $E = 3,8 \times 10^{-19}\text{ J}$
3) a) $E = 2,9 \times 10^{-19}\text{ J}$
b) $v = 8,0 \times 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
4) $f = 6,8 \times 10^{14}\text{ Hz}$
5) $\lambda = 4,4 \times 10^{-7}\text{ m}$
6) $f = 1,1 \times 10^{15}\text{ Hz}$
7) No. $f < f_{\text{uORO}} = 1,24 \times 10^{14}\text{ Hz}$
8) Si. $f > f_{\text{uCESIO}} = 5,1 \times 10^{14}\text{ Hz}$
9) $E = 1,5 \times 10^{-19}\text{ J}$
10) $f = 1,4 \times 10^{15}\text{ Hz}$
11) a) $E = 4,9 \times 10^{-19}\text{ J}$
b) $f = 7,4 \times 10^{14}\text{ Hz}$
12) a) $E = 5,2 \times 10^{-19}\text{ J}$
b) $\phi = 3,5 \times 10^{-19}\text{ J}$
13) a) $E = 1,4 \times 10^{-19}\text{ J}$
b) $E = 4,8 \times 10^{-19}\text{ J}$
c) $f = 7,2 \times 10^{14}\text{ Hz}$



Primero, los libros.