UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Escuela Académico Profesional de Física

CENTRO PRE UNIVERSITARIO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

AUTORES:

ROBERTO ROJAS ALEGRIA

DEMETRIO ROCHA MÉNDEZ

MERARDO TANTAQUISPE CASTILLO

JULIO IDROGO CORDOVA

TRUJILLO - FEBRERO - 2016

Universidad Nacional de Trujillo
CENTRO PRE UNIVERSITARIO
CEPUNT

Comité Directivo:
Directora: Edith Loreley Vásquez Correa
Subdirector Académico: Elmer González López

Revisado por:
Roberto Rojas Alegría
Paúl Cosavalente Culquichicon
Merardo Tantaquispe Castillo
Demetrio Rocha Méndez

© Copyright 2018
Trujillo – Perú

Prólogo

Este libro ha sido preparado para que sirva de soporte del aspecto teórico del curso de Física, impartido a los estudiantes del Centro Pre Universitario de la Universidad Nacional de Trujillo. El material de aplicación se proporciona directamente en el aula.

Los contenidos del libro están actualizados y correlacionados con los currículos de las diferentes Escuelas Académico Profesionales de la UNT, así como con los contenidos exigidos por el Ministerio de Educación para los estudiantes de la Educación Secundaria. En tal sentido, el libro, que además recoge la amplia experiencia de los autores en enseñanza universitaria y pre-universitaria en la UNT y el CEPUNT, también puede servir de referencia a los maestros del Magisterio Nacional para sus actividades académicas relacionadas con el estudio de los fenómenos físicos.

El libro es una introducción a la física, que tiene dos objetivos: primero, proporcionar a los estudiantes una visión clara y lógica de los conceptos y principios fundamentales de la física, que les permita la comprensión más completa de la conexión que existe entre las experiencias sensibles con la física, mediante el uso mínimo posible de conceptos y relaciones; segundo, mejorar sustancialmente los conocimientos básicos del futuro estudiante de la UNT, de manera que no solo pueda afrontar con éxito el reto del Examen de Admisión, sino que le sirva de base para sus futuros estu-

dios universitarios.

El libro está organizado en 32 sesiones de aprendizaje en la siguiente secuencia: mecánica del punto y de los fluidos, calor y termodinámica, electricidad y magnetismo, óptica geométrica y física, relatividad especial física atómica y física nuclear y, física de partículas. En cada sesión de aprendizaje se presenta una breve biografía de un personaje que ha contribuido al conocimiento humano, rescatando no sólo los aportes científicos realizados, sino también el factor humano en su complejidad.

El libro está escrito en un estilo accesible para facilitar la enseñanza-aprendizaje. Pero, una recomendación a los estudiantes es mantener, ante todo, una actitud positiva hacia el tema de estudio, teniendo en mente que la física es la más esencial de todas las ciencias naturales. Otros cursos de ciencias usaran principios físicos, de modo que es importante que entiendan y sean capaces de aplicar los diversos conceptos y principios de la física. Las clases serán de mucho más provecho, si los estudiantes leen la sesión correspondiente con anticipación a la clase.

Expresamos nuestro más sinceros deseos a los estudiantes de encontrar en la Física una experiencia apasionante y agradable, que independiente de la carrera a la que postulen, descubran la belleza de la física, consistente en la simplicidad de sus principios fundamentales, conceptos y modelos matemáticos que modifican y expanden nuestra visión del mundo circundante, enriqueciéndonos como seres humanos.

Finalmente, declaramos un propósito que perseguimos al escribir este libro, es aportar con el logro de una alfabetiza-

ción científica y una actitud positiva hacia la ciencia, considerando que es absolutamente necesario preparar a los jóvenes para los grandes retos que la sociedad le propone, acorde con los avances científicos y tecnológicos. La alfabetización científica es importante para entender las cuestiones medioambientales, médicas y económicas a las que se enfrentan las sociedades modernas, las cuales dependen en gran medida de avances tecnológicos y científicos en una complejidad creciente.

LOS AUTORES

Índice general

I SUMATIVO I **2**

1. Cálculo Vectorial **3**
1.1. Introducción 4
1.2. Fenómeno 5
1.3. Magnitudes Físicas 5
1.3.1. Según su Origen 5
1.3.2. Según su Naturaleza 6
1.4. Sitema de Unidades 6
1.5. Análisis Vectorial 7
1.5.1. Elementos 7
1.5.2. Adición de Vectores 8
1.5.3. Diferencia de dos vectores 9
1.5.4. Descomposición Vectorial 10
1.5.5. Adición de Vectores 12
1.5.6. Vectores unitarios $(\vec{i}, \vec{j})$ 14
1.5.7. Vector Unitario $\vec{u}$ 15
1.5.8. Producto Escalar 16
1.5.9. Producto Vectorial 17

2. Cinemática: Movimiento Rectilíneo **20**
2.1. Movimiento Mecánico 22
2.1.1. Elementos del movimiento mecánico . . 22
2.1.2. Clasificación de los movimientos 23
2.2. Velocidad de una partícula. 24
2.2.1. Velocidad media $(\vec{v})$ 24
2.2.2. Velocidad Instantánea $(\vec{v})$ 25

2.2.3. Rapidez Promedio (v_p) 25
2.3. Aceleración de una partícula 25
2.3.1. Aceleración media ($\vec{a}$) 25
2.3.2. Aceleración Instantánea ($\vec{a}$) 26
2.4. Movimiento Rectilíneo Uniforme 27
2.4.1. Gráficas 28
2.5. Movimiento Rectilíneo Uniformemente Variado 28
2.5.1. Gráficas 29
2.5.2. Tiros Verticales Ascendente y Descente . 30

3. Cinemática: Movimiento Curvilineo 34
3.1. Posición de una partícula 35
3.2. Velocidad de una partícula 36
3.3. Aceleración de una partícula 37
3.4. Movimiento de Proyectiles 37
3.4.1. Tiro Inclinado 37
3.4.2. Tiro Horizontal 39
3.5. Movimiento Circular 40
3.5.1. Movimiento Circular Uniforme 40
3.5.2. Movimiento Circular Uniformemente Variado 43

4. Dinámica 46
4.1. Primera ley de Newton 49
4.2. Tipos de Interacciones 49
4.3. Segunda Ley de Newton 51
4.4. Peso 52
4.5. Fricción 53
4.6. Fuerza Elástica 55
4.7. Dinámica Circular 56

5. Estática 58
5.1. Equilibrio y Reposo 60
5.2. Equilibrio de Traslación 61

5.3. Teorema de Lamy 62
5.4. Torque de una fuerza 62
5.5. Resultante de Fuerzas Paralelas 64
5.6. Cupla o Par 65
5.7. Equilibrio de un cuerpo rígido 66

6. Trabajo y Energía 68
6.1. Trabajo Realizado por una Fuerza Constante . 71
6.2. Energía Mecánica 72
6.2.1. Energía Cinética (E_k) 73
6.3. Energía Potencial 74
6.4. Potencia 77
6.5. Eficiencia 78

7. Conservación de la Energía Mecánica 80
7.1. Energía 83
7.2. Manifestaciones de la Energía 84
7.2.1. Energía Cinética 84
7.2.2. Energía Potencial 85
7.2.3. Energía Radiante 85
7.3. Principios de Conservación de la Energía 86
7.3.1. Sistema 86
7.3.2. Fuerzas Conservativas 86
7.4. Principio de Conservación de la Energía Mecánica 87
7.5. Teorema del Trabajo y la Energía 89
7.6. Energías No Renovable 90
7.7. Energías Renovables 90
7.7.1. Energía Hidroeléctrica 91
7.7.2. Energía Eólica 92
7.7.3. Energía Solar 92
7.7.4. Geotérmica 93
7.7.5. Mareomotriz 93
7.7.6. La Biomasa y los Biocombustibles 94

7.7.7. Guía del Consumo y Facturación de la Energía 95

8. Cantidad de Movimiento 98

8.1. Segunda Ley de Newton y la Cantidad de Movimiento . 101

8.1.1. Principio de conservación de la cantidad de movimiento 103

8.2. Choque de dos partículas 104

8.3. Impulso 106

8.4. Colisiones y Choques 108

8.5. Coeficiente de restitución 109

II SUMATIVO II 113

9. Hidrostática 114

9.1. Nauraleza de los fluidos 117

9.2. Densidad 118

9.3. Densidad Relativa ó Densidad Específica 118

9.4. Peso Específico 118

9.5. Presión 119

9.6. Presión Atmosférica 120

9.7. Presión Hidrostática 121

9.8. Presión Absoluta 122

9.9. Presión Manométrica 122

9.10. Manómetros 122

9.11. Principio de pascal 123

9.12. Principio de Arquímdes 124

9.13. Flotación de los cuerpos 126

10. Hidrodinámica 129

10.1. Tipos de Flujos de Fluidos 132

10.2. Fluido Ideal 133

10.3. Gasto o Caudal 134

10.4. Ley de Continuidad 135

10.5 Teorema de Bernoulli 136
10.6 Algunas Consecuencias y Aplicaciones del Teorema de Bernoulli 138
10.6.1 Teorema de Torricelli 138
10.6.2 Efecto Venturi 139
10.6.3 El Medidor de Pitot 140
10.6.4 Vuelo de un Avión 140

11. Calor y Temperatura 142
11.1 Definiciones Fundamentale 145
11.1.1 Calor 145
11.1.2 Temperatura 145
11.1.3 Escalas de Temperatura 146
11.1.4 Capacidad Calorífica 148
11.1.5 Calor Específico 148
11.1.6 Equivalente Mecánico del Calor 148
11.1.7 Ecuación Calorimetrica 149
11.1.8 Cambios de estado de agregación de la materia 150
11.1.9 Calorimetría 152
11.1.10 Calentamiento Global 156

12. Gases Ideales 161
12.1 Definiciones Fundamentales 164
12.1.1 Ecuación de Estado del Gas Ideal 164
12.1.2 Teoría Cinético Molecular del Gas Ideal . 165
12.1.3 Principio de Equipartición de la Energía 166
12.1.4 Energía Interna del Gas Ideal 167

13. Primera Ley de la Temperatura 169
13.1 Definiciones Fundamentales 172
13.1.1 Trabajo Termodinámico 172
13.1.2 Energía Interna 173
13.1.3 Trabajo Termodinámico en los Procesos 174

13.1.4 Proceso Isobárico 174
13.1.5 Proceso Isotérmico 174
13.1.6 Proceso Isócoro 175
13.1.7 Proceso Adiabático 176
13.1.8 Primera Ley de la Termodinámica 176

14 Segunda Ley de la Termodinámica 177
14.1 Definiciones Fundamentales 180
14.1.1 Ciclo Termodinámico 180
14.1.2 Máquinas Térmicas 181
14.1.3 Eficiencia o Rendimiento (η) 182
14.1.4 Ciclo de Carnot 183

15 Fenómenos Electrostáticos 185
15.1 Nociones Fundamentales 188
15.1.1 Carga Eléctrica 188
15.2 Clasificación de los cuerpos según sus propiedades eléctricas 189
15.2.1. Conductores 189
15.2.2. Aislantes 189
15.3 Electrización de los cuerpos 190
15.3.1 Por contacto 190
15.3.2. Por frotamiento 190
15.3.3. Por Inducción 190
15.4 Ley de Coulomb 191
15.4.1 Interacción entre cargas 191
15.4.2 Carga Puntual 191
15.4.3 Ley Cualitativa 191
15.4.4 Ley Cuantitativa 192
15.4.5 Líenas de Fuerza Eléctrica - Propiedades 193
15.5 Campo Eléctrico 193
15.5.1 Campo creado por una carga puntual . . 194
15.5.2 Principio de superposición de campos . 195
15.5.3 Líneas de Campo Eléctrico 195

15.5.4 Propiedades de las líneas de campo . . . 195
15.5.5 Esfera conductora cargada 196
15.6 Potencial Eléctrico 196
15.6.1 Potencial eléctrico creado por una carga puntual 196
15.6.2 Principio de superposición de potenciales 197
15.6.3 Diferencia de potencial eléctrico 197
15.6.4 Líneas y superficies equipotenciales . . . 198
15.6.5 Potencial creado por una esfera conductora cargada 198
15.6.6 Esfera en el interior de un campo 199
15.6.7 Energía Potencial Eléctrica 199
15.6.8 Trabajo Realizado por el Campo Eléctrico 199

16. Electrodinámica 201
16.1 Georg Simon Ohm (1789 - 1854) 201
16.2 Materiales Eléctricos 204
16.2.1 Conductores 204
16.2.2 Semiconductores 204
16.2.3 Aislantes 204
16.3 Densidad de Electrones Libres 204
16.4 Intensidad de Corriente Electrica (I) 205
16.5 Velocidad de Arrastre (v_d) 207
16.6 Densidad de Corriente Eléctrica(J) 207
16.7 Resistencia Eléctrica (R) 208
16.8 Diferencia de Potencial Eléctrico (V) 208
16.9 Fuerza Electromotriz (Fem) 209
16.10 Ley de Ohm 209
16.1 Potencia Eléctrica (P) 209

III SUMATIVO III 211

17. Circuitos Eléctricos 212
17.1 Circuito Eléctrico 215

17.2 Asociación de Resistencias 215
17.2.1 En Serie 215
17.2.2 Asociación en Paralelo 216
17.3 Leyes de Kirchhoff 217
17.3.1 Conceptos Básicos 217
17.3.2 Primera Ley de Kirchhof 217
17.3.3 Segunda Ley de Kirchhof 218
17.4 Puente de Wheatstone 219
17.5 Instrumentos de Medición 220
17.5.1 Voltímetro 220
17.5.2 Amperímetro 220
17.5.3 Ohmetro 221

18 Fuentes de Campo Magnético 222
18.1 Los Imanes 225
18.2 Campo Magnético 226
18.3 Ley de Biot - Savart - Laplace 226
18.3.1 Conductor finito rectilíneo 227
18.3.2 Espira 227
18.3.3 Sector Circular 227
18.3.4 Fuerza entre Conductores 228
18.3.5. El Solenoide 229
18.3.6 El Toroide 230

19 Fuerza y Torque Magnético 231
19.1 Movimiento de una Partícula Cargada dentro de un Campo Magnético 234
19.2 Alambre Conductor en un Campo Magnético Uniforme . 235
19.3 Torque Magnético 237
19.4 Principio del Motor Eléctrico 240

20 Inducción Magnética 242
20.1 Flujo Magnético 245
20.1.1 Ley de Inducción de Faraday 246

20.2 Ley de Lenz 246
20.3 Movimiento de Conducotores en Presencia de un Campo Magnético 248
20.3.1 Fem Inducida en una Barra que se Mueve a través de un Campo 248
20.3.2 Fem inducida en una barra que gira alrrededor, en presencia de un campo magnético 248
20.4 El Transformador 250
20.5 Generadores Eléctricos 252

21 Reflexión de la Luz y Espejos 253
21.1 Principios Fundamentales 256
21.1.1 Naturaleza de la Luz 256
21.1.2 Frente de Onda y Rayos 257
21.2 Reflexión de la Luz 257
21.2.1 Ley de Reflexión 259
21.3 Espejos 259
21.3.1 Espejos Planos 259
21.3.2 Espejos Esféricos 261
21.3.3 Convención de Signos para Espejos Esféricos . . 265
21.3.4 Aumento o Magnificación del espejo (M) 266

22 Refracción de la Luz y Lentes 267
22.1 Refracción de la Luz 269
22.1.1 Índice de refracción 269
22.1.2 Leyes de la refración 270
22.1.3 Reflexión interna total 272
22.2 Las Lentes Delgadas 273
22.2.1 Ecuación del fabricante de lentes 274
22.2.2 Potencia de una lente 275
22.2.3 Aumento lateral 275
22.2.4 Diagramas de rayos para lentes delgadas. 276
22.3 Instrumentos Ópticos 277

22.3.1 El ojo humano 277
22.3.2 Microscópio 279
22.3.3 Microscopio Compuesto 280
22.3.4 Telescopio 282
22.3.5 Telescopios refractores 282
22.3.6 Telescopios reflectores 283

23 Propiedades Corpusculares de las Ondas 285
23.1 Efecto Fotoélctrico 287
23.1.1 Interpretación de los resultados 290
23.2 Hipótesis de Planck 291
23.3 Einstein y la Explicación del Efecto Fotoeléctrico 292
23.4 El Efecto Compton 293

24 Propiedades Ondulatorias de las Partículas 295
24.1 Hipótesis de De Broglie 298
24.2 El experimento de Young de la doble rendija . . 299
24.3 Difracción 303
24.3.1 Difracción por una ranura 303
24.3.2 Difracción de una rejilla 305
24.3.3 difracción de electrones 307

25 Física Atómica 309
25.1 Modelos Atómicos 311
25.1.1 Jhon Dalton 311
25.1.2 J. J. Thomson 312
25.1.3 E. Rutherford 312
25.1.4 Niels Bohr 314
25.1.5 Modelo Mecano Cuántico del Átomo . . . 317
25.1.6 La ecuación de Schrödinger y la Función de Onda 318
25.1.7 Los Números Cuánticos 318
25.1.8 El espín del electrón y el principio de exclusión de Pauli 319

25.1.9 Principio de Indeterminación de Heisemberg 319

26. Física Nuclear **321**

26.1 Primeros Descubrimientos en la Física Nuclear 324
26.2 Constitución del Núcleo 324
26.2.1 El Núclido (Nucleído) 324
26.2.2 Radio Nuclear 325
26.3 Energía de Enlace 325
26.4 Radiactividad 326
26.4.1 Radiación Alfa o Decaimiento Alfa (α) . . 326
26.4.2 Radiación o Decaimiento Beta (β) 326
26.4.3 Radiación o Decaimiento Gama (γ) . . . 327
26.5 Ley de Decaimiento 327
26.5.1 Tiempo de Vida Media o Semivida 328
26.5.2 Periodo de Semidesintegración 328
26.6 Centrales Nucleares 328
26.7 Fuentes de radiación 328
26.8 Reactores Nucleares y Producción de Radioisótopos 329
26.9 Usos en Medicima 329
26.10 Nociones de Protección Radiológica 330

Referencias Bibliográficas **331**

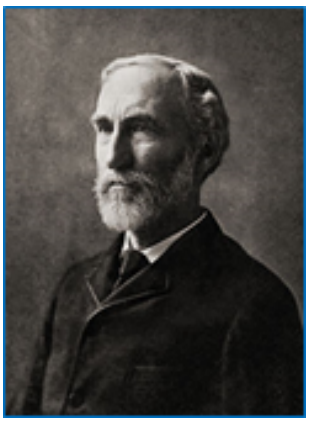
Parte I

SUMATIVO I

Sesión 1

Cálculo Vectorial

J. Willard Gibbs (1839 – 1903)



El estudio de los vectores se origina con la invención de los cuaterniones de Hamilton, quien junto a otros los desarrollaron como herramienta matemáticas para la exploración del espacio físico. Pero los resultados fueron desilusionantes, porque vieron que los cuaterniones eran demasiado complicados para entenderlos con rapidez y aplicarlos fácilmente.

Los cuaterniones contenían una parte escalar y una parte vectorial, y las dificultades surgían cuando estas partes se manejaban al mismo tiempo. Los científicos se dieron cuenta de que muchos problemas se podían manejar considerando la parte vectorial por separado y así comenzó el Análisis Vectorial.
Este trabajo se debe principalmente al físico americano Josiah Willard Gibbs, Físico estadounidense nacido en New Haven (Connecticut); estudió en las universidades de Yale, París, Berlín y Heidelberg. Fue profesor de física matemática en Yale desde 1871 hasta su muerte.

Entre 1876 y 1878 Gibbs escribió una serie de ensayos titulados colectivamente El equilibrio de las sustancias heterogéneas, considerados como uno de los mayores logros de la física del siglo XIX y la base de la química física. En estos ensayos Gibbs aplicó la termodinámica a la química y mostró la explicación y correlación de hechos aislados e inexplicables hasta ese momento. Entre los teoremas tratados está el de la regla de las fases.

1.1. Introducción

La física es la más fundamental y general de las ciencias naturales, se esfuerza en presentar siempre una imagen clara del mundo que nos rodea; estudia las interacciones de la materia con la materia o con la energía.
Hay otras ciencias que estudian la naturaleza, tales como la astronomía, química, geografía, biología. Todas estas ciencias, utilizan las leyes de la física. Estudiantes de muchas disciplinas estudian física a causa del rol básico que ésta juega en todos los fenómenos.
La física es importante no sólo porque nos ayuda a comprender los procesos que ocurren en la naturaleza, sino también porque ha permitido desarrollar técnicas y métodos experimentales que se aplican en una gran variedad de actividades humanas, tales como un hospital, un observatorio astronómico, un laboratorio geofísico o meteorológico, etc.
En la presente sesión académica se trata los sistemas de unidades y una introducción del análisis vectorial, que es la base para comprender y expresar matemáticamente las leyes físicas.

1.2. Fenómeno

Un fenómeno es un cambio, una perturbación observable en la naturaleza; es de hecho, el origen, el alimento del proceso intelectual. Los fenómenos pueden ser de orden físico, químico, biológico, social, político, etc. Los fenómenos físicos definidos sin precisión como procesos en los cuales la naturaleza de las sustancias participantes no cambia, mientras que en los fenómenos químicos sí. La química emplea las leyes de la física para estudiar la formación de moléculas y las maneras prácticas de transformar unas moléculas en otras en las reacciones químicas.

1.3. Magnitudes Físicas

Es todo aquello que se puede medir con cierto grado de precisión utilizando para ello una unidad de medida patrón convencionalmente establecido. Por ejemplo, para conocer como depende el volumen del agua de su temperatura, hay que medir estas magnitudes, al calentar el agua. El volumen, la temperatura, la longitud, el área, el tiempo, la velocidad, la masa, la fuerza y otras, son magnitudes físicas. Las magnitudes físicas se suelen clasificar en:

1.3.1. Según su Origen

- **Magnitudes Fundamentales**.- Son aquellas que no pueden ser definidas o expresadas a partir de otras; es decir, son la base para expresar las demás magnitudes físicas. Las magnitudes fundamentales en física son siete: longitud, masa, tiempo, temperatura termodinámica, intensidad de corriente eléctrica, intensidad luminosa y cantidad de sustancia.

- **Magnitudes Derivadas**.- Magnitudes físicas que pueden ser expresadas en términos de una o varias de las magnitudes fundamentales mediante definiciones y fórmulas. Así tenemos: el volumen, el área, la fuerza, el trabajo, la temperatura, la masa, etc.
- **Magnitudes derivadas**.- Aquellas que no están relacionadas con las magnitudes fundamentales. Lo conforman: el ángulo sólido y el ángulo plano.

1.3.2. Según su Naturaleza

- **Magnitudes escalares**.- Quedan determinadas por su medida (magnitud), expresada en alguna unidad conveniente. Por ejemplo: el volumen, la temperatura, el tiempo, la masa, la carga eléctrica, la energía, etc.
- **Magnitudes Vectoriales**.- Magnitudes físicas que requieren que para su completa determinación, se añada una dirección a su magnitud. Como ejemplo: el desplazamiento, la velocidad, la aceleración, la inducción magnética, la fuerza, etc.

1.4. Sitema de Unidades

La selección de las unidades o patrones para las magnitudes fundamentales se hace mediante acuerdos de la comunidad científica internacional y de los gobiernos. Así tenemos, los siguientes sistemas de unidades: el Sistema Internacional (SI), el Sistema Inglés Absoluto (SIA), el Sistema Cegesimal (CG) y el Sistema Técnico (MKST).

Magnitudes Fundamentales		Sistema de Unidades			
Nombre	Simbolo	SI	SIA	CGS	MKST
1. Longitud	L	metro (m)	foot (ft)	centímetro (cm)	metro (m)
2. Masa	M	kilogramo (kg)	libra (lb)	gramo (g)	unidad técnica de masa (utm)
3. Tiempo	T	segundo (s)	segundo (s)	segundo (s)	segundo (s)
4.Temperatura termodinámica	θ	grado Kelvin (K)	grado Fahrengheit (^{0}F)	grado Celsius (^{0}C)	grado Celsius(^{0}C)
5. Intensidad de corriente eléctrica	I	Ampere (A)	stat Ampere (stA)	stat Ampere (stA)	ampere (A)
6.Intensidad luminosa	J	candela (cd)	bujía (bj)	bujía (bj)	bujía (bj)
7. Cantidad de sustancia	N	mol	mol	mol	mol

Tabla 1.1: Tabla de magnitudes Fundamentales

Magnitudes Auxiliares		
Nombre	Unidad Básica	
	Nombre	Símbolo
Angulo Plano	radián	rad
Angulo Sólido	estereoradián	sr

Tabla 1.2: Tabla de magnitudes Auxiliares

1.5. Análisis Vectorial

Estudiaremos las propiedades de las operaciones con vectores, tales como: la adición, la sustracción, el producto escalar y el producto vectorial.
La primera definición de vector dice: *"Objeto matemático, que se representa por un segmento de recta orientado y que sirve para representar las magnitudes vectoriales"*

1.5.1. Elementos

En la figura 1.1 consideremos la recta $k\ k'$ y el segmento de recta orientado $(\overrightarrow{AB})$
Los *elementos* de un vector son:

1. **Origen**: punto A
2. **Extremo**: punto B

3. **Módulo**: Valor de la magnitud vectorial, representada a escala por "l".

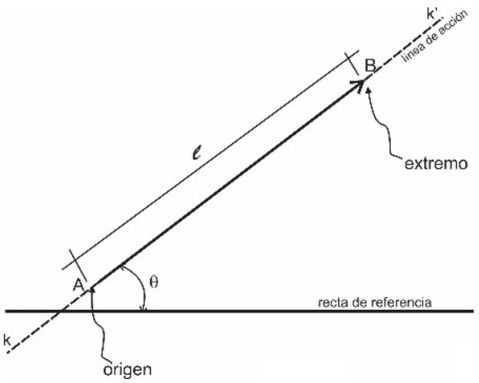


Figura 1.1:

Representación:
Vector: $\vec{V} = \overrightarrow{AB}$
Módulo: $V = |\vec{V}| = |\overrightarrow{AB}|$

4. **Dirección**: Lo define la línea de acción del vector. Está dada por el ángulo medido en sentido antihorario, respecto a la recta de referencia, que se considera horizontal. Según la posición relativa de los vectores se les denomina: colíndales, paralelos, coplanares, concurrentes, opuestos, iguales, fijos, deslizantes, etc.

1.5.2. Adición de Vectores

.- El vector "suma", que generalmente, se le denomina resultante, produce el mismo efecto que los vectores sumandos.

1. **Método gráfico**.- En la Fig 1.2, se muestra los dos métodos, el del paralelogramo y del triángulo, para los vectores $\vec{A}$ y $\vec{B}$.
2. **Método analítico**.- Conocidos: $\vec{A}$, $\vec{B}$ y θ, para determinar el módulo de la resultante; según la ley del coseno obtenemos:

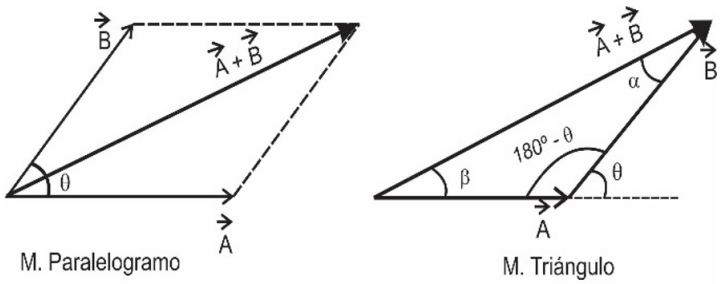


Figura 1.2:

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB\cos\theta} \tag{1.1}$$

Para la dirección de la resultante; de la ley de los senos:

$$\frac{R}{\operatorname{sen}\theta} = \frac{A}{\operatorname{sen}\alpha} = \frac{B}{\operatorname{sen}\beta} \tag{1.2}$$

Observaciones: Según θ, se tiene:

$$R_{\text{máx}} = |A + B| \quad \text{para,} \quad \theta = 0^o$$

$$R_{\text{máx}} = |A - B| \quad \text{para,} \quad \theta = 180^o$$

1.5.3. Diferencia de dos vectores

.- La Fig. 1.3 muestra los vectores resultante y diferencia, para los vectores $\vec{A}$ y $\vec{B}$. El vector diferencia se obtienen uniendo los extremos de ambos vectores; su extremo coincide con el del vector minuendo.
Según la ley del coseno, para el módulo del vector diferencia, obtenemos:

$$D = \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB\cos\theta} \tag{1.3}$$

Observaciones:

$$D_{\text{máx}} = A + B, \quad \text{para} \quad \theta = 180^o$$

$$D_{\text{mín}} = A - B, \quad \text{para} \quad \theta = 0^o$$

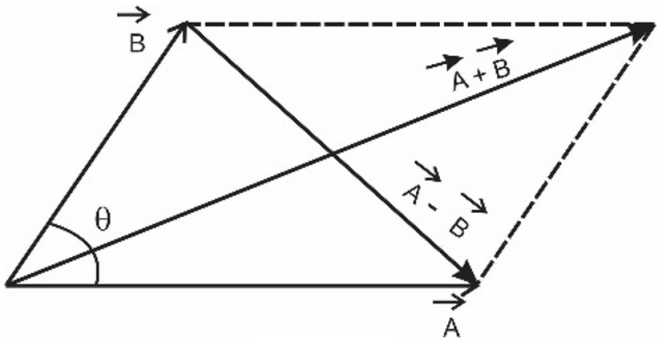
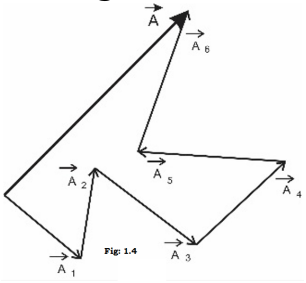


Figura 1.3:

1.5.4. Descomposición Vectorial

Cualquier vector $\vec{A}$ puede siempre considerarse como la suma de dos (o más) vectores, siendo el número de posibilidades infinito. A cualquier conjunto de vectores que al sumarse den $\vec{A}$, se les denominan componentes de $\vec{A}$(Fig. 1.4).

Figura 1.4:



Es decir, $\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2 + ... + \vec{A}_6$

Si se fija las direcciones de los vectores componentes, entonces el número de componentes no es ilimitado. Para el caso de la descomposición de un vector en dos componentes, se muestra en la Fig. 1.5, según las rectas kk' y ll'.

Para determinar los módulos de los vectores componentes usamos la ley de los senos,

$$\frac{A}{\operatorname{sen}\theta} = \frac{A_1}{\operatorname{sen}\beta} = \frac{A_2}{\operatorname{sen}\alpha} \tag{1.4}$$

Si $\theta = 90^o$, las componentes se denominan Rectangulares (Fig. 1.6).

Como $\alpha + \beta = 90^o$, tenemos:

$$\begin{aligned} A_x &= A\cos\alpha \\ A_y &= A\operatorname{sen}\alpha \end{aligned} \tag{1.5}$$

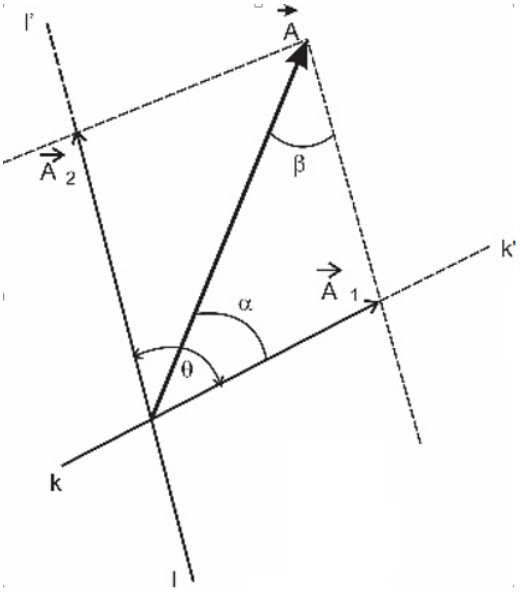


Figura 1.5:

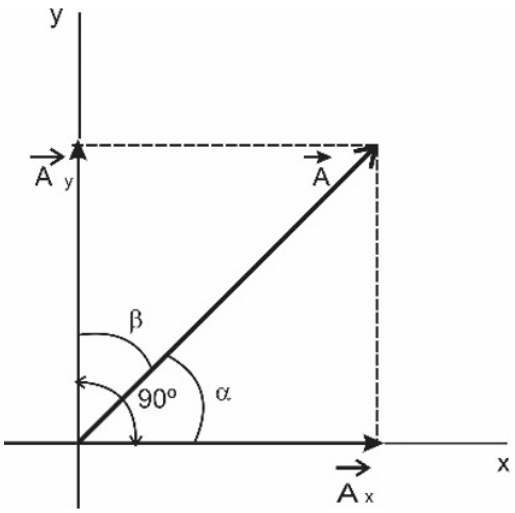


Figura 1.6:

Que expresamos como vector:

$$\vec{A} = \langle A_x, A_y \rangle \tag{1.6}$$

Aquí, debemos tener en cuenta los signos en los cuadrantes. Además, se cumple:

$$A = \sqrt{A_x^2, A_y^2} \tag{1.7}$$

y

$$\alpha = \arctan\left(\frac{A_x}{A_y}\right) \tag{1.8}$$

1.5.5. Adición de Vectores

Sean los siguientes vectores:

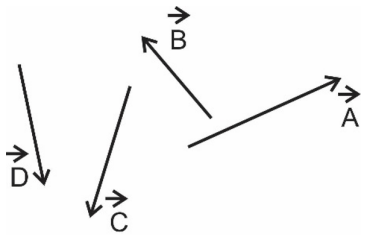


Figura 1.7:

- **Método gráfico**.- Se usa el método del polígono, que consiste en hacer coincidir el extremo del primer vector con el origen del segundo; el extremo del segundo con el origen del tercero; el extremo del tercero con el origen del cuarto y así sucesivamente. La resultante tiene por origen el origen del primero y por extremo el extremo del último. (Fig. 1.8).

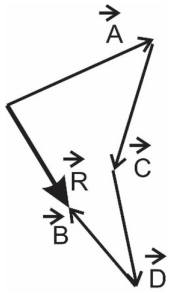


Figura 1.8:

- **Método analítico**.- Se ubican los vectores a sumar en un sistema de coordenadas rectangulares, para obtener las componentes rectangulares (Fig. 1.9)

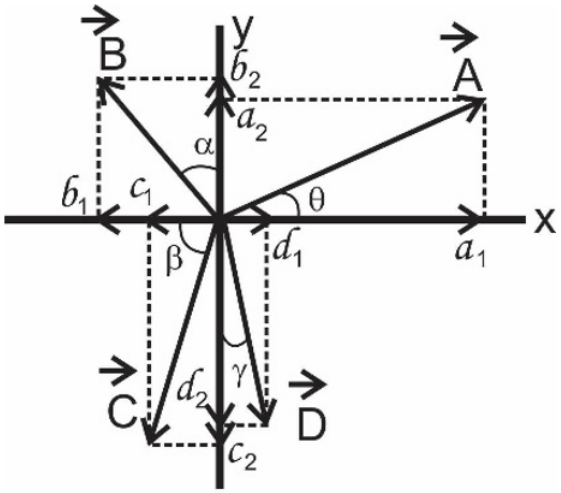


Figura 1.9:

De la Fig. 1.9 tenemos,
$\vec{A} = \langle a_1, a_2 \rangle$; $\vec{B} = \langle -b_1, b_2 \rangle$; $\vec{C} = \langle -c_1, -c_2 \rangle$; $\vec{D} = \langle d_1, -d_2 \rangle$

Para hallar la resultante, se suman componentes con componentes de los vectores, y obtenemos:

$$\vec{R} = \langle a_1 - b_1 - c_1 + d_1; a_2 + b_2 - c_2 - d_2 \rangle$$

Supongamos que la resultante está en el segundo cuadrante,

$$\vec{R} = \langle -R_x, R_y \rangle$$

La Fig. 1.10, muestra su ubicación que nos permite hallar la dirección, que en general la referencia es el eje x.
El módulo de la resultante se obtiene:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

Y su dirección

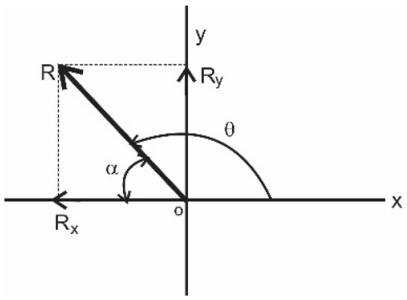


Figura 1.10:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{R_y}{R_x}\right)$$

Entonces,

$$\theta = 180^o - \alpha$$

1.5.6. Vectores unitarios ($\vec{i}, \vec{j}$)

En el plano XY, sea el vector $\vec{A} = \langle a_1, a_2 \rangle$.
Que podemos expresarlo:

$$\vec{A} = \langle a_1, 0 \rangle + \langle 0, a_2 \rangle = a_1 \langle 1, 0 \rangle + a_2 \langle 0, 1 \rangle$$

Al definir,

$$\vec{i} = \langle 1, 0 \rangle, \quad \vec{j} = \langle 0, 1 \rangle \tag{1.9}$$

Entonces, $\vec{A} = a_1\vec{i} + a_2\vec{j}$, que es otra forma de expresar el vector $\vec{A}$, Los vectores $\vec{i}$, $\vec{j}$ son ortonormales, y mantienen sus direcciones, según la gráfica de la Fig. 1.11.

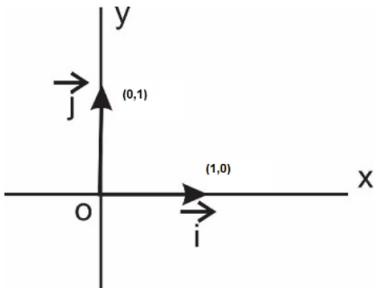


Figura 1.11:

1.5.7. Vector Unitario $\vec{u}$

El vector unitario del vector $\vec{A}$, es aquel que tiene la misma dirección que $\vec{A}$, pero su módulo es la unidad (Fig.1.12). Se define como,

$$\vec{u} = \frac{\vec{A}}{A} \tag{1.10}$$

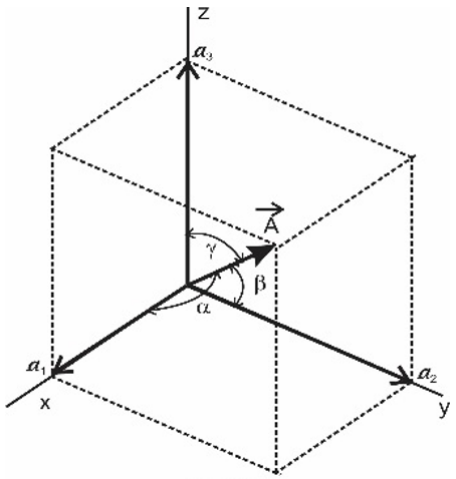


Figura 1.12:

Entonces como,

$$\vec{A} = a_1\vec{i} + a_2\vec{j} + a_3\vec{k}$$

Tenemos,

$$\vec{u} = \frac{a_1\vec{i} + a_2\vec{j} + a_3\vec{k}}{A} = \frac{a_1}{A}\vec{i} + \frac{a_2}{A}\vec{j} + \frac{a_3}{A}\vec{k}$$

De donde obtenemos:

$$\cos\alpha = \frac{a_1}{A}; \quad \cos\beta = \frac{a_2}{A}; \quad \cos\gamma = \frac{a_3}{A}$$

Son los cosenos directores; cumplen con la identidad:

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$$

1.5.8. Producto Escalar

El producto escalar o producto punto de dos vectores $\vec{A} = \langle a_1, a_2, a_3 \rangle$ y $\vec{B} = \langle b_1, b_2, b_3 \rangle$, se define:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 \tag{1.11}$$

Podemos verificar,

$$\begin{aligned} \vec{i} \cdot \vec{i} = \vec{j} \cdot \vec{j} = \vec{k} \cdot \vec{k} = 1 \\ \vec{i} \cdot \vec{j} = \vec{i} \cdot \vec{k} = \vec{j} \cdot \vec{k} = 0 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Propiedades.- Sean los vectores $\vec{A}$, $\vec{B}$ y$\vec{C}$, siendo c un escalar, entonces:

1. $\vec{A} \cdot \vec{B} = \vec{B} \cdot \vec{A}$ Ley conmutativa
2. $\vec{A} \cdot \left(\vec{B} + \vec{C}\right) = \vec{A} \cdot \vec{B} + \vec{A} \cdot \vec{C}$ Ley distributiva
3. $c\left(\vec{A} \cdot \vec{B}\right) = \left(c\vec{A}\right) \cdot \vec{B} = \vec{A} \cdot \left(c\vec{B}\right)$
4. $\vec{0} \cdot \vec{A} = 0$

Interpretación geométrica.- Sean los vectores $\vec{A}$ y $\vec{B}$ en posición normal en el sistema de coordenadas XYZ (Fig.1.13).

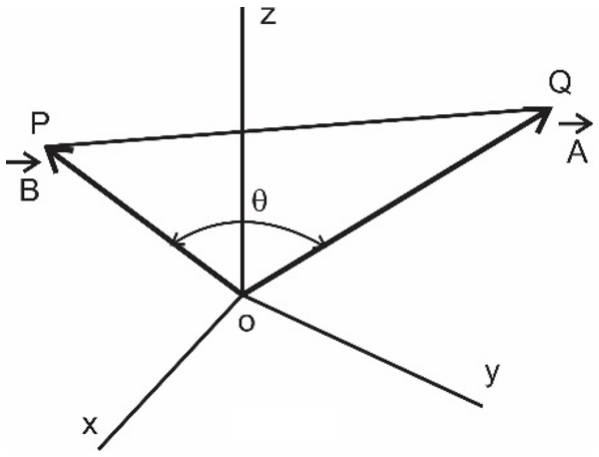


Figura 1.13:

Aplicamos la ley del coseno al triángulo POQ,

$$\overline{PQ}^2 = A^2 + B^2 - AB\cos\theta$$

$$\left[(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2\right]^2 = A^2 + B^2 - 2AB\cos\theta$$

De donde:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = AB\cos\theta \tag{1.13}$$

Es decir, el producto escalar permite encontrar el ángulo entre los vectores o proyectar uno sobre el otro:

$$\frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{B} = A\cos\theta; \quad \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{A} = B\cos\theta \tag{1.14}$$

Además, según ec. (1.13), tenemos:

- si $\theta = 0^o$, entonces: $\vec{A} \cdot \vec{B} = AB$
- si $\theta = 90^o$, entonces: $\vec{A} \cdot \vec{B} = 0$
- si $\theta = 180^o$,entonces: $\vec{A} \cdot \vec{B} = -AB$

1.5.9. Producto Vectorial

Denominado también producto cruz, tiene aplicaciones en la geometría, el movimiento planetario, la electricidad, el magnetismo y la mecánica. Sean dos vectores $\vec{A}$ y $\vec{B}$ no paralelos, representados que coincidan sus orígenes; el resultado del producto cruz de $\vec{A}$ y $\vec{B}$ es un vector que es perpendicular a éstos (Fig. 1.14).
Si $\vec{A} = (a_1, a_2, a_3)$ y $\vec{B} = (b_1, b_2, b_3)$, entonces el producto vectorial de $\vec{A}$ y $\vec{B}$, denotado por $\vec{A} \times \vec{B}$, está dado por:

$$\vec{A} \times \vec{B} = \langle a_2b_3 - a_3b_2; a_3b_1 - a_1b_3; a_1b_3 - a_3b_1\rangle \tag{1.15}$$

Propiedades.- Sean c un escalar y los vectores $\vec{A}$, $\vec{B}$ y $\vec{C}$, entonces:

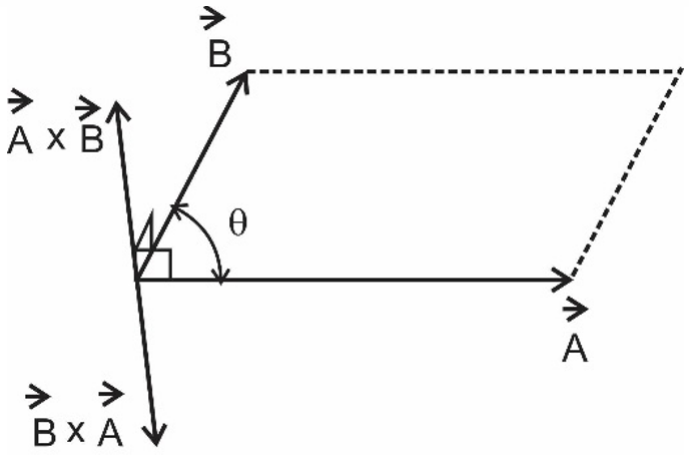


Figura 1.14:

1. $\vec{A} \times \vec{B} = -\vec{B} \times \vec{A}$ (no goza de la propiedad conmutativa).
2. $\vec{A} \times \left(\vec{B} + \vec{C}\right) = \vec{A} \times \vec{B} + \vec{A} \times \vec{C}$ (Propiedad distributiva del producto vectorial respecto de la suma).
3. $c\left(\vec{A} \times \vec{B}\right) = \left(c\vec{A}\right) \times \vec{B} = \vec{A} \times \left(c\vec{B}\right) = \left(\vec{A} \times \vec{B}\right) c$
4. $\vec{i} \times \vec{i} = \vec{j} \times \vec{j} = \vec{k} \times \vec{k} = 0$ y $\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k}$; $\vec{j} \times \vec{k} = \vec{i}$; $\vec{k} \times \vec{i} = \vec{i}$
5. Dados los vectores $\vec{A} = a_1\vec{i} + a_2\vec{j} + a_3\vec{k}$ y $\vec{B} = b_1\vec{i} + b_2\vec{j} + b_3\vec{k}$, entonces se verifica que :

$$\vec{A} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} \tag{1.16}$$

6. El módulo de $\vec{A} \times \vec{B}$ representa el área del paralelogramo de lados $|\vec{A}|$ y $|\vec{B}|$.

$$|\vec{A} \times \vec{B}| = AB \operatorname{sen} \theta \tag{1.17}$$

7. La identidad de Lagrange establece que si $\vec{A}$ y $\vec{B}$ son vectores arbitrarios, entonces

$$|\vec{A} \times \vec{B}| = A^2B^2 - (\vec{A} \cdot \vec{B}) \tag{1.18}$$

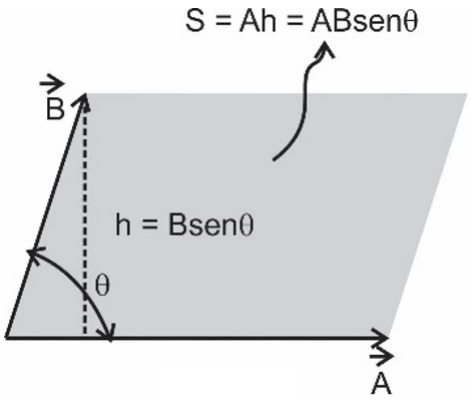


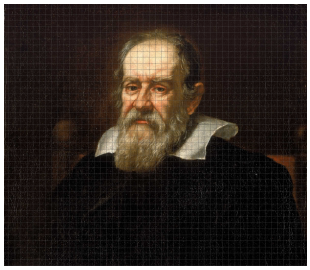
Figura 1.15:

8. Si $\vec{A} \times \vec{B} = \vec{0}$, y ninguno de los vectores es nulo, ambos tienen la misma dirección.

Sesión 2

Cinemática: Movimiento Rectilíneo

Galileo Galilei (1564 – 1642)



Nació el 15 de febrero de 1564, cerca de Pisa. Cursó estudios en Vallombroso, y en la en la Universidad de Pisa en 1581, donde pretendía estudiar medicina. Al poco tiempo dejó la medicina por la filosofía y las matemáticas, abandonando la universidad en 1585 sin conseguir el título.
En 1589, en Pisa, ejerció como profesor de matemáticas, donde demostró el error que Aristóteles había cometido al afirmar que la velocidad de caída de los cuerpos era proporcional a su peso, dejando caer desde la Torre inclinada de esta ciudad dos objetos de pesos diferentes. En 1592 fue admitido en la cátedra de matemáticas de la Universidad de Padua, donde permaneció hasta 1610. Allí inventó un compás de cálculo para resolver problemas prácticos de matemáticas.
De la física especulativa pasó a dedicarse a las mediciones precisas, descubriendo las leyes de la caída de los cuerpos y de la trayectoria parabólica de los proyectiles, se dedicó a estudiar el movimiento del péndulo e investigó la mecánica y la resistencia de los materiales. Dejó de un lado la astro-

nomía, aunque a partir de 1595 se inclinó por la teoría de Copérnico, que afirmaba que la Tierra giraba alrededor del Sol.
En 1609 presentó al duque de Venecia un telescopio de una potencia muy parecida a los prismáticos binoculares. Con su telescopio de veinte aumentos descubrió montañas y cráteres en la Luna, consiguió ver que la Vía Láctea estaba compuesta por estrellas y descubrió los cuatro satélites mayores de Júpiter.

Introducción

Un curso de física general, para un mejor estudio, se acostumbra dividirlo en las siguientes partes: mecánica, calor, acústica, electromagnetismo, óptica y física atómica y nuclear.
La mecánica estudia el estado de reposo y de las leyes del movimiento mecánico. La mecánica, que es la ciencia del movimiento, es también la ciencia del momentum, la fuerza y la energía. La mecánica tiene tres partes principales: cinemática, estática y dinámica.
En ésta unidad académica estudiaremos el movimiento mecánico en una dimensión, ya sea con velocidad constante o variando uniformemente con respecto al tiempo.

La palabra cinemática proviene del término griego *κινειν* kinéin, que significa “movimiento”; estudia los movimientos en función del tiempo sin considerar las interacciones que los producen. El problema fundamental de la cinemática consiste en determinar las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración de un móvil en función del tiempo, según las condiciones iniciales, para describir y predecir su movimiento.

2.1. Movimiento Mecánico

Es todo cambio de posición de un cuerpo con relación a otros. Estos cuerpos se les denominan cuerpos de referencia, ya que sobre ellos se ubica el sistema de referencia, constituido por un sistema de coordenadas y un instrumento que mide el tiempo. Un objeto lo consideramos como partícula, cuando sus dimensiones no intervienen en el análisis de sus movimientos; ya que una partícula es considerada como un punto material, cuyo volumen es considerado nulo.

Si los ejes del sistema de referencia están fijos, el movimiento es absoluto en ese sistema de referencia; si no lo están, el movimiento se le denomina relativo. Pero, debemos tener presente, que todo movimiento real es relativo. Por ejemplo: todo movimiento en la superficie terrestre es relativo, por el movimiento de rotación respecto a su centro y traslación respecto al centro del sol.

2.1.1. Elementos del movimiento mecánico

Respecto del sistema de referencia O (Fig.2.1) el móvil parte de A (posición inicial) y llega a B (posición final), según la curva que describe.

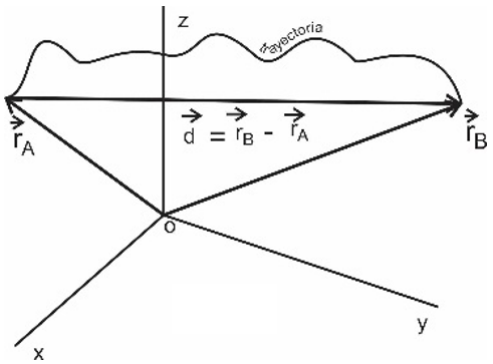


Figura 2.1:

Los elementos del movimiento mecánico son:

1. **Móvil**.- cuerpo o partícula que realiza movimiento mecánico.
2. **Vector posición ($\vec{r}$)**.- vector que une el origen del sistema de coordenadas y la ubicación del móvil, en un cierto instante de tiempo.
3. **Trayectoria**.- es la línea que describe en el espacio el móvil al desplazarse de una posición a otra. La forma de la trayectoria depende del sistema de referencia, es decir, su forma es relativa.
4. **Distancia recorrida**.- es la medida de la longitud de la trayectoria. Es una magnitud escalar.
5. **Desplazamiento ($\vec{d}$)**.- magnitud vectorial, que su origen es la posición inicial, y su extremo la posición final del móvil.

2.1.2. Clasificación de los movimientos

Los movimientos se clasifican según:

1. Su trayectoria.- Puede ser:
   - Rectilíneos
   - Curvilíneos
2. Según su rapidez.- Puede ser:
   - Uniformes.
   - Variados.
3. Según su orientación.- Puede ser:
   - Traslación pura.
   - Rotación pura
   - Traslación y rotación simultánea.

2.2. Velocidad de una partícula.

Consideramos el caso más simple, el movimiento de una partícula a lo largo de una línea recta, tal como el de un automóvil que se mueve a lo largo de una pista, recta y angosta. Cualquier objeto se puede considerar como una partícula, cuya posición puede describirse por un solo punto. Así, podemos considerar como partícula a una molécula, una persona o una galaxia, siempre que razonadamente podamos ignorar su estructura interna.

2.2.1. Velocidad media ($\vec{v}$)

Se define como la razón del vector desplazamiento al intervalo de tiempo correspondiente (Fig.2.2)

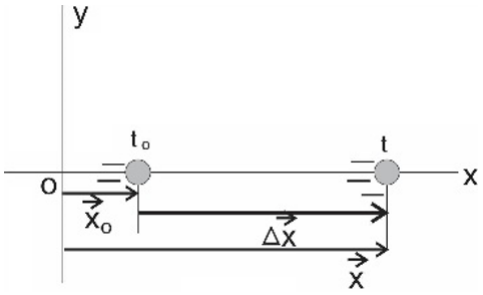


Figura 2.2:

Se define:

$$\vec{\bar{v}} = \frac{\vec{x} - \vec{x}_o}{t - t_o} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t} \tag{2.1}$$

donde:$\vec{x}_o$: es la posición inicial, $\vec{x}$: posición final. Una velocidad positiva indica que la partícula se desplaza en la dirección positiva del eje x. Una velocidad negativa indicará lo contrario (Fig. 2.2). Sólo la velocidad indicará la dirección del movimiento.
Unidades:

SISTEMAS	SI	CGS	SIA	OTRAS
UNIDADES	$\frac{m}{s}$	$\frac{cm}{s}$	$\frac{ft}{s}$	$\frac{km}{h}$, $\frac{m}{min}$, $\frac{km}{s}$

Tabla 2.1: Unidades de la velocidad

2.2.2. Velocidad Instantánea ($\vec{v}$)

Es la velocidad de la partícula en un cierto instante, o en cierta posición de su trayectoria. La velocidad media no describe el movimiento en cada instante, sino en intervalos de tiempo, por lo tanto no es adecuada para una descripción precisa del movimiento.
La velocidad instantánea o simplemente velocidad, se obtiene de la velocidad media al hacer que el intervalo de tiempo tienda a cero, que se escribe:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \vec{\overline{v}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{d\vec{x}}{dt} \tag{2.2}$$

2.2.3. Rapidez Promedio (v_p)

Expresa la rapidez que tendría el móvil para realizar la misma distancia recorrida, pero con movimiento uniforme.

$$v_p = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + ... + d_n}{t_1 + t_2 + t_3 + ... + t_n} \tag{2.3}$$

2.3. Aceleración de una partícula

Si la velocidad de la partícula cambia de magnitud o de dirección; o ambas se dice que la partícula está acelerada.

2.3.1. Aceleración media ($\vec{a}$)

Se define la aceleración media a la razón de la variación de la velocidad, al intervalo de tiempo correspondiente (Fig. 2.3).

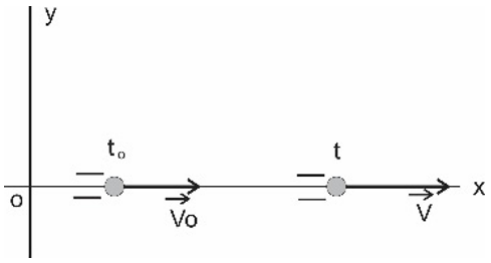


Figura 2.3:

Se define,

$$\vec{\bar{a}} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_o}{t - t_o} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \tag{2.4}$$

Unidades:

SISTEMAS	SI	CGS	SIA	OTRAS
UNIDADES	$\frac{m}{s^2}$	$\frac{cm}{s^2}$	$\frac{ft}{s^2}$	$\frac{km}{min \cdot h}$, $\frac{m}{min \cdot s}$, $\frac{km}{s \cdot h}$

Tabla 2.2: Unidades de la velocidad

2.3.2. Aceleración Instantánea $(\vec{a})$

Es la aceleración de la partícula en un instante o posición dada, y se define como la razón de la variación de la velocidad al intervalo de tiempo cuando éste tiende a cero, que escribimos como:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \vec{\bar{a}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{d^2\vec{x}}{d^2t} \tag{2.5}$$

2.4. Movimiento Rectilíneo Uniforme

Un movimiento rectilíneo es uniforme cuando no cambia ni la magnitud, ni la dirección de la velocidad, es decir, $\vec{v}$ es constante; la trayectoria es una línea recta. Entonces las características son:

- Velocidad: $\vec{v} = \vec{\overline{v}}$
- Aceleración: $\vec{\overline{a}} = \frac{\vec{v}-\vec{v}_o}{t-t_o} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = 0$
- Posición: De la definición de velocidad media y, considerando (2.1):

$$\vec{v} = \vec{\overline{v}} = \frac{\vec{x} - \vec{x}_o}{t - t_o}$$

como $\vec{v}$, $\vec{\overline{v}}$, $\Delta\vec{x}$ son colineales, entonces.

$$v = \frac{x - x_o}{t - t_o}$$

Haciendo, $t_o = 0$, con un cronómetro, tenemos:

$$x = x_o + vt \tag{2.6}$$

Denominada ecuación de posición.

Como $d = x - x_o$, distancia recorrida, entonces:

$$d = vt \tag{2.7}$$

En resumen:

$$\begin{aligned} v &= \text{constante} \\ x &= x_o + vt \\ d &= vt \\ a &= 0 \end{aligned} \tag{2.8}$$

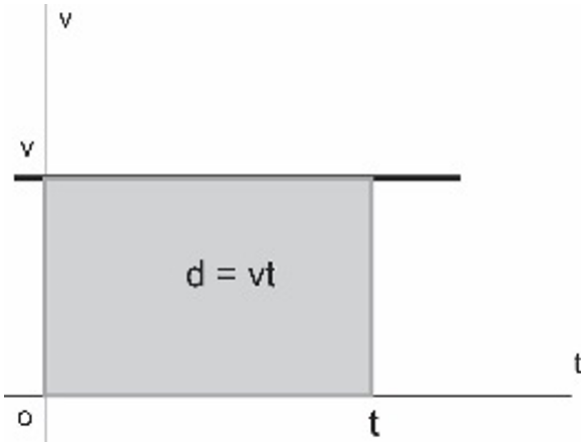


Figura 2.4:

2.4.1. Gráficas

a) $v =$ constante

b) $x = x_o + vt$

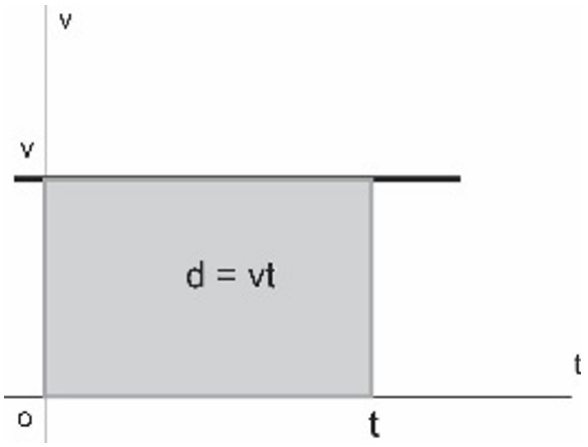


Figura 2.5:

2.5. Movimiento Rectilíneo Uniformemente Variado

El movimiento es a lo largo de una línea recta. La velocidad no cambia de dirección, pero sí de magnitud; la razón de cambio de la velocidad es constante, por lo que la aceleración a es constante.

- Aceleración.- $\vec{a} =$ constante

- Velocidad.- $\vec{a} = (\vec{a}) = \frac{\vec{v}-\vec{v}_o}{t-t_o} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$, como $\vec{a}$ y $\Delta\vec{v}$, son colineales, nos permite escribir, haciendo $t_o = 0$ y despejando,

$$v = v_o + at \tag{2.9}$$

Luego, graficamos v vs t; mediante el cálculo del área obtenemos la distancia recorrida.

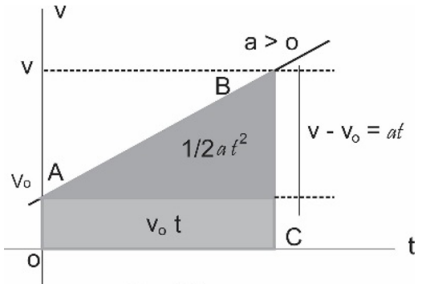


Figura 2.6:

$$d = \frac{v + v_o}{2}t = v_o t + \frac{1}{2}at^2 \tag{2.10}$$

Además, como $t = \frac{v-v_o}{a}$, entonces, $d = \frac{v+v_o}{2}\frac{v-v_o}{a}$, de donde,

$$v^2 = v_o^2 + 2da \tag{2.11}$$

Tenemos un resumen:

$$\begin{aligned} a &= \text{constante} \\ v &= v_o + at \\ x &= x_o + v_o t + \frac{1}{2}at^2 \\ d &= \left(\frac{v + v_o}{2}\right) t = v_o t + \frac{1}{2}at^2 \end{aligned} \tag{2.12}$$

2.5.1. Gráficas

a) $a =$ constante

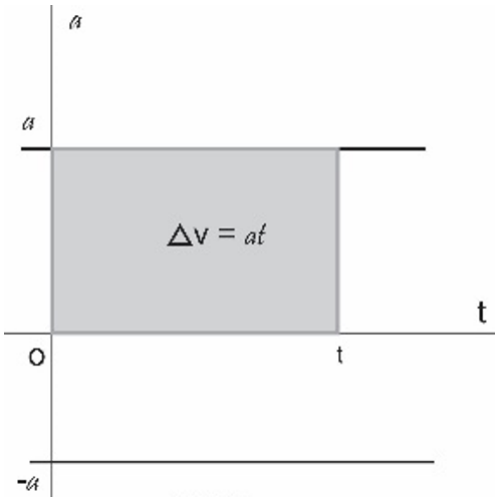


Figura 2.7:

b) $v = v_o + at$

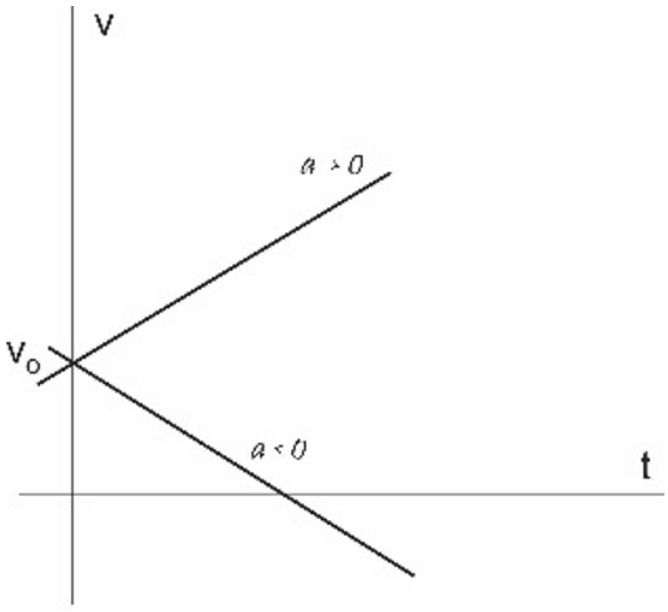


Figura 2.8:

c) $x = x_o + v_o t + \frac{1}{2}at^2$, ver figura. 2.9

2.5.2. Tiros Verticales Ascendente y Descente

Son ejemplos de movimiento rectilíneo uniformemente variado: el tiro vertical ascendente, el tiro vertical descendente y la caída libre.

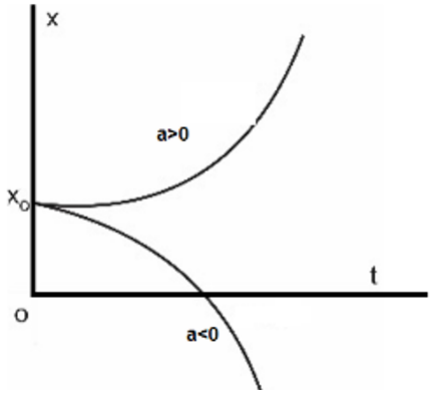


Figura 2.9:

a) Ascendente.- Cuando se lanza un objeto hacia arriba (Fig. 2.10) se sigue moviendo hacia arriba durante cierto tiempo, al cabo del cual vuelve a bajar. En el punto más elevado, cuando el objeto cambia su dirección de movimiento, la velocidad es cero. Luego, empieza a moverse hacia abajo como si se hubiese dejado caer desde el reposo a esa altura.

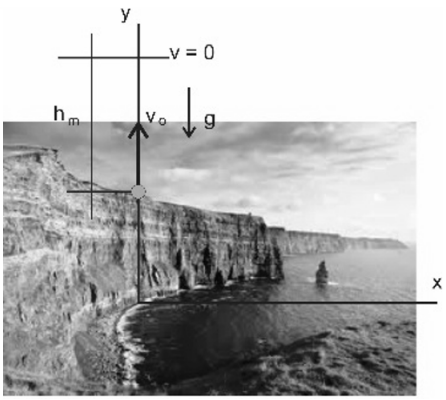


Figura 2.10:

La experiencia muestra que todos los cuerpos, en el vacío, caen (o suben) con aceleración constante debido a la acción de la gravedad que igual, aproximadamente, a $9{,}8 m/s^2$, dirigida hacia el centro de la tierra. La aceleración de la gravedad se representa por la letra g. Las ecuaciones cinemáticas del movimiento son:

$$\begin{aligned} a &= -g \\ v &= v_o - gt \\ y &= y_o + v_o t - \frac{1}{2}gt^2 \end{aligned} \tag{2.13}$$

- **Tiempo de subida(t_s)** .- En el punto más alto, la velocidad es cero ($v = 0$), entonces: $0 = v_o - gt$, de donde,

$$ts = \frac{v_o}{g} \tag{2.14}$$

- **Altura máxima(h_m)** .- Considerando que $v = 0$, en la posición más alta, entonces: $0 = v_o^2 - 2gh$, de donde,

$$h_m = \frac{v_o^2}{2g} \tag{2.15}$$

- **Tiempo de vuelo (T)**.- Tiempo que demora un objeto desde que fue lanzado, hasta que regresa a su posición inicial. Se debe cumplir que: $y = y_o$ entonces,

$$y = y_o + v_o t - \frac{1}{2}gt^2$$

de donde

$$t\left(v_o - \frac{1}{2}gt\right) = 0$$

Es decir,

$$T = \frac{2v_o}{g} \tag{2.16}$$

Que es el doble del tiempo de subida. Es decir, $t_s = t_b$ Los tiempos de subida y bajada son iguales. Para determinar la velocidad con que regresa el objeto a su posición de lanzamiento, usamos,

$$v = v_o - gt = v_o - g\left(\frac{2v_o}{g}\right) = -v_o$$

Es decir, regresa con la misma rapidez.

b) **Tiro Vertical Descendente**.- Cuando se lanza un objeto verticalmente hacia abajo (Fig. 2.11) de la parte superior de un edificio con una velocidad.

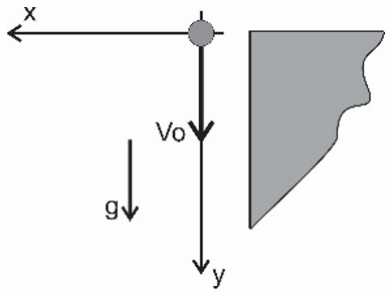


Figura 2.11:

Las ecuaciones cinemáticas son:

$$\begin{aligned} a &= g \\ v &= v_o + gt \\ y &= y_o + v_o t + \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Si $v_o = 0$, y la gravedad es la única que afecta al objeto se dice que este está en caída libre. Las ecuaciones (2.17) quedan expresadas así:

$$\begin{aligned} a &= g \\ v &= gt \\ y &= \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Sesión 3

Cinemática: Movimiento Curvilineo

Joseph-Louis de Lagrange (1736 - 1813)

Matemático francés de origen italiano. Estudió en su ciudad natal y hasta los diecisiete años no mostró ninguna aptitud especial para las matemáticas. Sin embargo, la lectura de una obra del astrónomo inglés Edmund Halley despertó su interés, y, tras un año de incesante trabajo, era ya un matemático consumado. Nombrado profesor de la Escuela de Artillería, en 1758 fundó una sociedad, con la ayuda de sus alumnos, que fue incorporada a la Academia de Turín. En su obra Miscellanea taurinensia, escrita por aquellos años, obtuvo, entre otros resultados, una ecuación diferencial general del movimiento y su adaptación para el caso particular del movimiento rectilíneo, y la solución a muchos problemas de dinámica mediante el cálculo de variantes. Escribió asimismo numerosos artículos sobre el cálculo integral y las ecuaciones diferenciales generales del movimiento de tres cuerpos sometidos a fuerzas de atracción mutuas.

A principios de 1760 era ya uno de los matemáticos más respetados de Europa, a pesar del flagelo de una salud ex-

tremadamente débil. Su siguiente trabajo sobre el equilibrio lunar, donde razonaba la causa de que la Luna siempre mostrara la misma cara, le supuso la concesión, en 1764, de un premio por la Academia de Ciencias de París. Hasta que se trasladó a la capital francesa en 1787, escribió gran variedad de tratados sobre astronomía, resolución de ecuaciones, cálculo de determinantes de segundo y tercer orden, ecuaciones diferenciales y mecánica analítica.

Introducción

El movimiento mecánico curvilíneo contiene al movimiento rectilíneo. Es decir, el movimiento rectilíneo es un caso muy particular. La velocidad, la aceleración, la posición y el desplazamiento tenemos que trabajarlos con dos o tres componentes, según sea el caso.
Para nuestro curso, trabajaremos en dos dimensiones, con el sistema de coordenadas Cartesiano en el que siempre los vectores base son unitarios y constantes en dirección; no trataremos con componentes en otros sistemas de coordenadas, salvo sea el caso del movimiento circular que si trataremos con las componentes de la aceleración: aceleración normal y tangencia.
Cabe indicar, que el alumno que comprende el movimiento curvilíneo, le es fácil analizar el movimiento rectilíneo. En la presente sesión estudiaremos: el tiro inclinado, el tiro horizontal en el campo gravitatorio y terminaremos con el movimiento circular: uniforme y uniformemente variado.

3.1. Posición de una partícula

La posición de una partícula en un plano, con respecto a un sistema de referencia, está dado por el vector posición (Fig. 3.1).

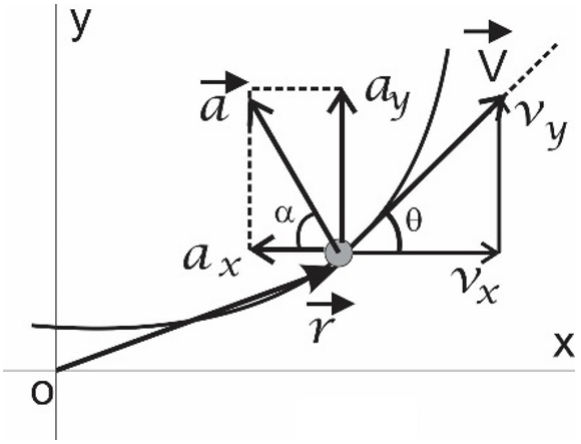


Figura 3.1:

El vector posición será una función del tiempo si la partícula se mueve sobre cualquier trayectoria. Escribimos:

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \tag{3.1}$$

Las proyecciones del vector sobre los ejes de coordenadas son también función del tiempo:

$$\begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \end{aligned} \tag{3.2}$$

se denominan, ecuaciones paramétricas de la trayectoria.

3.2. Velocidad de una partícula

La dirección de la velocidad, en cierto instante o en cierta posición de la trayectoria, está dada por la tangente a la trayectoria en la posición en ese instante y dirigida en el sentido del movimiento de la partícula (Fig.3.1).
Según el teorema de Pitágoras, tenemos:

$$v_x^2 + v_y^2 = v^2 \tag{3.3}$$

$$\tan\theta = \frac{v_y}{v_x} \tag{3.4}$$

3.3. Aceleración de una partícula

La aceleración, en el caso general podrá tener cualquier dirección en el plano y su magnitud está dada por:

$$a_x^2 + a_y^2 = a^2 \tag{3.5}$$

$$\tan\alpha = \frac{a_y}{a_x} \tag{3.6}$$

3.4. Movimiento de Proyectiles

Proyectil es cualquier objeto que es lanzado por algún agente y que continúa en movimiento en virtud de su propia inercia.

3.4.1. Tiro Inclinado

El proyectil parte del origen con velocidad inicial v_o que forma un ángulo θ con la horizontal (Fig. 3.2).

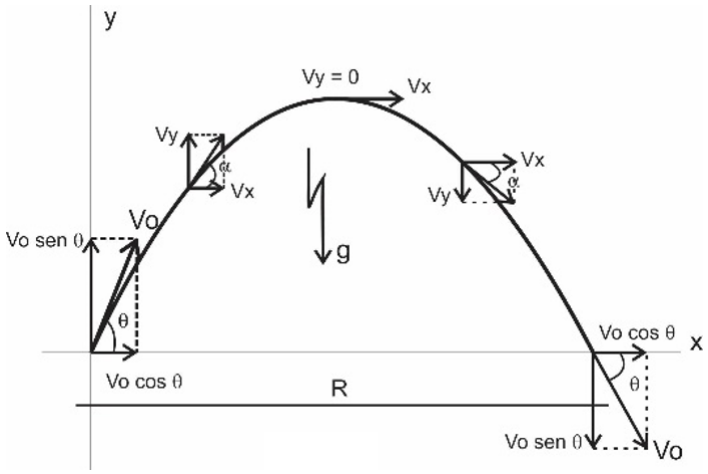


Figura 3.2:

Las ecuaciones cinemáticas son:

$$\begin{aligned} a_x &= 0 \quad a_y = -g \\ v_x &= v_o \cos\theta \quad v_y = v_o \operatorname{sen}\theta - gt \\ x &= v_o \cos\theta t \quad y = v_o \operatorname{sen}\theta t - \frac{1}{2}gt^2 \end{aligned} \tag{3.7}$$

- **Altura máxima (h_m)**.- Se determina por una expresión semejante al del tiro vertical ascendente.

$$h_m = \frac{v_o^2 \operatorname{sen}^2\theta}{2g} \tag{3.8}$$

- **Tiempo de Vuelo (T)**.- También, tenemos:

$$T = \frac{2v_o \operatorname{sen}\theta}{g} \tag{3.9}$$

Es decir, se cumple:

$$t_{\text{subida}} = t_{\text{bajada}} = \frac{v_o \operatorname{sen}\theta}{g}$$

- **Alcance (R)**.- Es la distancia alcanzada desde el lanzamiento del proyectil a su retorno en el mismo nivel. Entonces:

$$R = v_o \cdot \cos\theta \cdot T = \frac{v_o^2 \left(2 \operatorname{sen}\theta \cos\theta\right)}{g} = \frac{v_o^2 \operatorname{sen} 2\theta}{g} \tag{3.10}$$

de donde obtenemos que el alcance será máximo cuando $\theta = 45^o$, válido para cualquier velocidad de lanzamiento del proyectil.

La trayectoria del proyectil es parabólica, que es fácil demostrar. Los resultados obtenidos son válidos cuando:

a) El alcance es suficientemente pequeño como para despreciar la curvatura de la tierra.

b) La altura es suficientemente pequeña como para despreciar la variación de la gravedad con la altura.

c) La velocidad inicial del proyectil es suficientemente pequeña para despreciar la resistencia del aire.

3.4.2. Tiro Horizontal

Si el proyectil es lanzado horizontalmente con una velocidad inicial v_o (Fig. 3.3).

Las ecuaciones cinemáticas son:

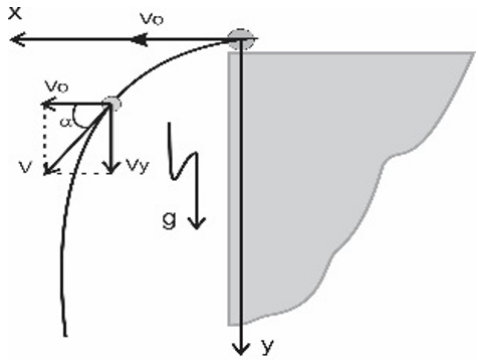


Figura 3.3:

$$\begin{aligned} a_x &= 0 & a_y &= -g \\ v_x &= v_o & v_y &= gt \\ x &= v_o t & y &= \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \tag{3.11}$$

También se cumple:

$$\begin{aligned} v^2 &= v_x^2 + v_y^2 \\ \tan\alpha &= \frac{v_y}{v_x} \end{aligned} \tag{3.12}$$

3.5. Movimiento Circular

La trayectoria es una circunferencia, por lo tanto, la velocidad lineal, por ser tangente a la trayectoria, siempre cambia de dirección y su magnitud puede o no cambiar.

Para describir el movimiento circular, se definirá la posición angular, la velocidad angular y la aceleración angular, encontrando las ecuaciones cinemáticas angulares del movimiento circular.

3.5.1. Movimiento Circular Uniforme

- **Velocidad**.- El módulo de la velocidad no cambia, pero si cambia la dirección en cada posición de la circunferencia y es perpendicular al radio.

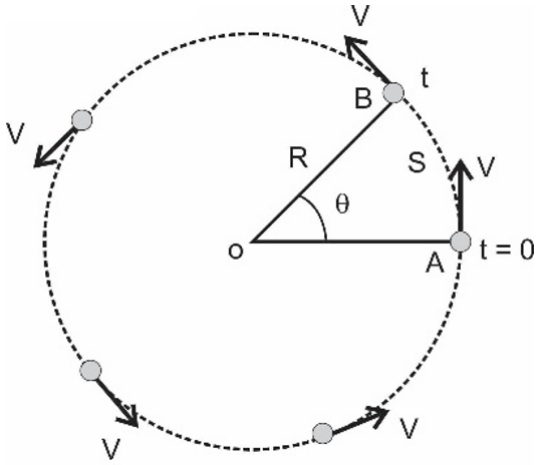


Figura 3.4:

De la fig.3.4, tenemos el módulo de la velocidad tangencial:

$$v = \frac{s}{t} \tag{3.13}$$

- **Aceleración centrípeta (a_c)**.- Es responsable del cambio de la dirección de la velocidad lineal; está dirigida al centro del círculo, (Fig.3.5).

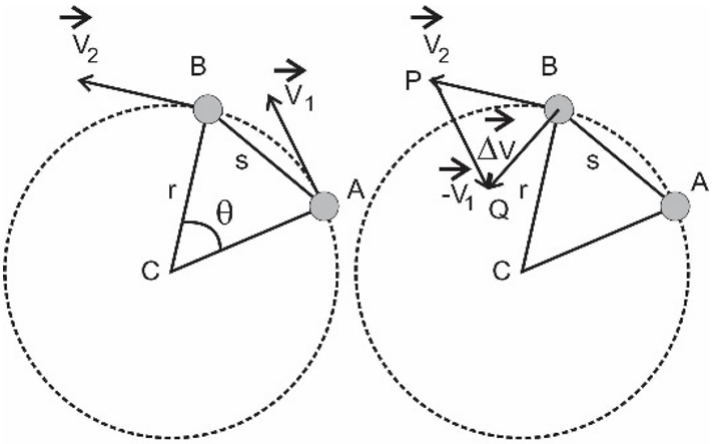


Figura 3.5:

Como, los triángulos ACB y BQP son semejantes,

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{s}{r} = \frac{v \cdot \Delta t}{r}$$

Entonces,

$$a_c = \frac{\Delta v}{r} = \frac{v^2}{r} \tag{3.14}$$

Es la denominada aceleración centrípeta, responsable sólo del cambio de la dirección de la velocidad lineal, y está dirigida hacia el centro de la circunferencia (Fig. 3.6). La unidad en el SI, es m/s^2.

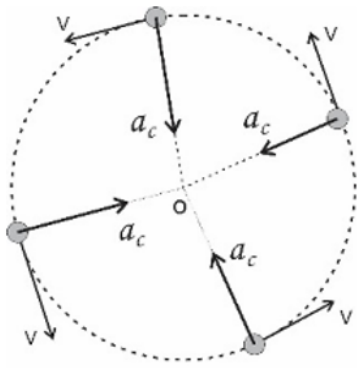


Figura 3.6:

Posición Angular

- Según el sistema de medición de ángulos radial, tenemos:

$$\theta = \frac{s}{t} \tag{3.15}$$

Nos, permite conocer la posición angular, que en el SI es el rad, es adimensional.

- **Velocidad angular (ω)**.- Expresa la rapidez con la cual un móvil barre un ángulo central. De la fig.3.5,

$$\omega = \frac{\theta}{t} \tag{3.16}$$

La unidad en el SI es: rad/s.
Reemplazando ec. (3.14) en ec. (3.12) y considerando ec. (3.15),

$$v = \omega r \tag{3.17}$$

También, reemplazando ec. (3.16) en ec. (3.13),

$$a_c = \omega^2 r \tag{3.18}$$

- **Período (T)**.- Tiempo que emplea un móvil en realizar una vuelta completa. Entonces, según ec. (3.15),

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{3.19}$$

- **Frecuencia (f)**.- Es la razón del número de vueltas realizado por un móvil para cada intervalo de tiempo definido.

$$f = \frac{\text{Número de vueltas}}{T} \tag{3.20}$$

Para una vuelta, el tiempo es un período,

$$f = \frac{1}{T} \tag{3.21}$$

En el SI, la unidad del período es el segundo (s), entonces la frecuencia, $s^{(}-1) = Hz$ (Hertz)

3.5.2. Movimiento Circular Uniformemente Variado

- **Aceleración tangencial (a_t).**- Es responsable del cambio del módulo de la velocidad lineal (Fig. 3.7).

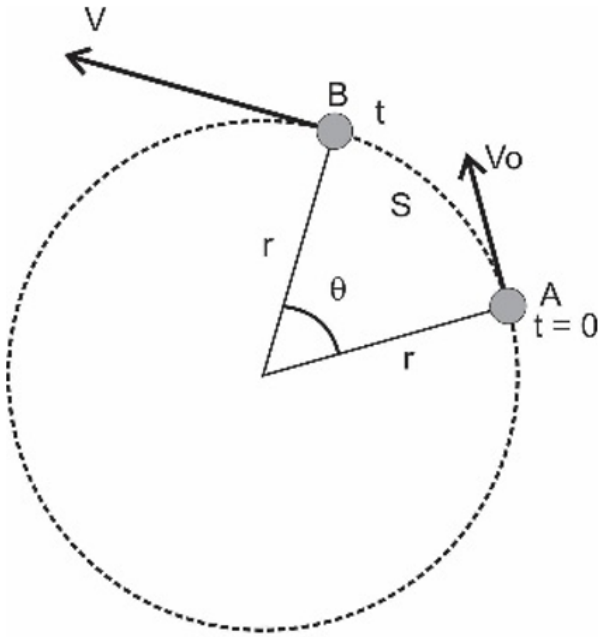


Figura 3.7:

Entonces, la aceleración tangencial, queda expresada mediante la ec. (3.16):

$$a_t = \frac{v - v_o}{t} = \frac{\omega r - \omega_o r}{t} = r\left(\frac{\omega - \omega_o}{t}\right) \tag{3.22}$$

Se define:

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_o}{t} \tag{3.23}$$

Es la aceleración angular. En el SI su unidad es rad/s^2. Así tendríamos:

$$a_t = r\alpha \tag{3.24}$$

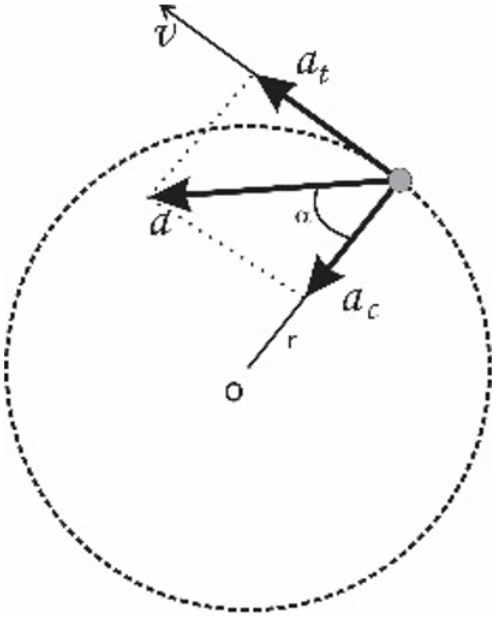


Figura 3.8:

En el SI se tiene: m/s^2. En la Fig. 3.8 se muestra las aceleraciones: centrípeta, tangencial y total.
La aceleración "a" se denomina aceleración total, y se determina mediante:

$$a^2 = a_c^2 + a_t^2 \tag{3.25}$$

Además,

$$\tan\alpha = \frac{a_t}{a_c} \tag{3.26}$$

Movimiento Uniforme	
Lineal	**Circular**
$v =$ constante	$\omega =$ constante
$x = vt$	$\theta = \omega t$

Movimiento Uniformemente Variado	
Lineal	**Circular**
$a = \text{constante}$	$\alpha = \text{constante}$
$v = v_o + at$	$\omega = \omega_o + \alpha t$
$d = \frac{v+v_o}{2}t = v_o t + \frac{1}{2}at^2$	$\theta = \frac{\omega+\omega_o}{2}t = \omega_o t + \frac{1}{2}\alpha t^2$
$v^2 = v_o^2 + 2ad$	$\omega^2 = \omega_o^2 + 2\alpha d$
$d_n = v_2 + \frac{a}{2}(2n-1)$	$\theta_n = \omega_2 + \frac{\alpha}{2}(2n-1)$

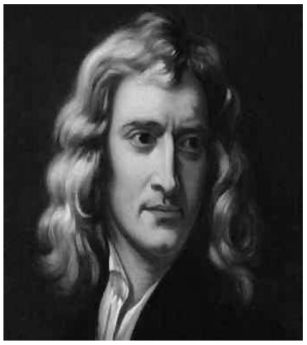
Relación entre aceleraciones lineales y angulares

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r, \qquad a_t = \alpha r, \qquad a^2 = a_c^2 + a_t^2$$

Sesión 4

Dinámica

Isaac Newton (1642 - 1727)



Científico inglés. Hijo póstumo y prematuro, su madre preparó para él un destino de granjero; pero finalmente se convenció del talento del muchacho y le envió a la Universidad de Cambridge, en donde hubo de trabajar para pagarse los estudios. Allí Newton no destacó especialmente, pero asimiló los conocimientos y principios científicos de mediados del siglo XVII, con las innovaciones introducidas por Galileo, Bacon, Descartes, Kepler y otros.

Tras su graduación en 1665, Isaac Newton se orientó hacia la investigación en Física y Matemáticas, con tal acierto que a los 29 años ya había formulado teorías que señalarían el camino de la ciencia moderna hasta el siglo XX; por entonces ya había obtenido una cátedra en su universidad (1669).

Suele considerarse a Isaac Newton uno de los protagonistas principales de la llamada «Revolución científica» del siglo XVII y, en cualquier caso, el padre de la mecánica moderna. No obstante, siempre fue remiso a dar publicidad a sus

descubrimientos, razón por la que muchos de ellos se conocieron con años de retraso.

Newton coincidió con Leibniz en el descubrimiento del cálculo integral, que contribuiría a una profunda renovación de las Matemáticas; también formuló el teorema del binomio (binomio de Newton). Pero sus aportaciones esenciales se produjeron en el terreno de la Física.

Sus primeras investigaciones giraron en torno a la óptica: explicando la composición de la luz blanca como mezcla de los colores del arco iris, Isaac Newton formuló una teoría sobre la naturaleza corpuscular de la luz y diseñó en 1668 el primer telescopio de reflector, del tipo de los que se usan actualmente en la mayoría de los observatorios astronómicos; más tarde recogió su visión de esta materia en la obra Óptica (1703).

También trabajó en otras áreas, como la termodinámica y la acústica; pero su lugar en la historia de la ciencia se lo debe sobre todo a su refundación de la mecánica.

Introducción

Las leyes de Newton no son producto de deducciones matemáticas, sino una descripción matemática a partir de la observación de experimentos con cuerpos en movimiento. Estas leyes son fundamentales porque no pueden deducirse ni demostrarse a partir de otros principios. Y su importancia radica en que permite entender la mayor parte de los movimientos comunes: son la base de la mecánica clásica o mecánica newtoniana. Sin embargo estas leyes no son universales, en el sentido de que requieren modificaciones a velocidades muy altas (cercanas a la velocidad de la luz)

y para tamaños muy pequeños (del orden del átomo). En dinámica, se estudia cómo las interacciones producen el movimiento; la segunda ley de Newton es la ley fundamental de la dinámica.

Las leyes de la Mecánica, aunque no son las más complejas, son muy fundamentales en la vida de la humanidad, basta solo pensar que gobiernan nuestros movimientos; es decir, está sujeto a la Ley de la Gravitación Universal descrita por Newton y a las leyes de Kepler, es decir nuestro hábitat está regido por leyes físicas.

Las leyes de Newton son unas de las leyes físicas más conocidas universalmente, ellas poseen carácter de sistema y de manera general, que permiten explicar el movimiento de partículas y constituyen la base para el análisis de otros fenómenos físicos en otros campos de la Física.

4.1. Primera ley de Newton

La primera ley del movimiento de Newton, conocida como la ley de la inercia, establece que: *"Todo cuerpo persiste en su estado de reposo, o de movimiento rectilíneo uniforme, a menos que reciba alguna interacción externa que lo obligue a cambiar dicho estado."*
La experiencia cotidiana muestra que la velocidad de un cuerpo sólo puede variar cuando otro cuerpo actúa sobre él; es decir, que los cuerpos interaccionan, cuyo producto se denomina fuerza. El fenómeno de persistencia en su estado de reposo, o de movimiento rectilíneo uniforme de un cuerpo, cuando otros cuerpos no actúan sobre él, recibe el nombre de inercia.

La inercia de un objeto depende de su masa, es decir, de la cantidad de materia del objeto. Cuanta más masa tenga un objeto, mayor es su inercia; mayor será la fuerza necesaria para cambiar su estado de movimiento. La masa es una medida de la inercia de un cuerpo. El estado natural de un cuerpo es el reposo o el movimiento rectilíneo uniforme.

4.2. Tipos de Interacciones

Todas las interacciones en el universo se reducen a cuatro clases o tipos que, en orden de intensidad creciente, son las siguientes:

- **Gravitacional**.- Es importante cuando los cuerpos tienen gran masa, como la tierra o el sol; es responsable, por ejemplo, del movimiento de los planetas alrededor del sol, que los cuerpos caigan hacia la superficie terrestre, que suba la marea, etc. Es la fuerza de menor

magnitud comparada con las otras. Su alcance es infinito.

- **Débil**.- Explica el cambio de identidad de partículas elementales, tales como el de los nucleones. Es de corto alcance (10-18 m). La fuerza débil o fuerza nuclear débil actúa entre partículas elementales. La fuerza nuclear débil es importante en la velocidad de reacción de algunas reacciones nucleares que ocurren en estrellas. También está presente en el origen de las explosiones volcánicas. La transformación de hidrógeno en helio produciendo deuterio, es causada por la fuerza débil. Sin esta fuerza nuestro universo sería muy diferente; un universo en tinieblas, sin estrellas ni galaxias que dieran luz.

- **Electromagnética**.- Existe entre partículas con carga eléctrica en reposo, o en movimiento. Es responsable del movimiento de los electrones alrededor del núcleo, de la unión de átomos formando moléculas y de la unión de éstas formando cuerpos, etc. Las partículas fundamentales interactúan electromagnéticamente mediante el intercambio de fotones entre partículas cargadas. La interacción electrostática, que actúa sobre cuerpos cargados en reposo respecto al observador, y la interacción magnética, que actúa solamente sobre cargas en movimiento respecto al observador.

- **Interacción fuerte**.- Denominado nuclear, es la que gobierna la existencia del núcleo de los átomos. Son de corto alcance (10-15 m). Explica la fisión y fusión nuclear de diversos núclidos, obteniéndose grandes cantidades de energía. Contrariamente a las fuerzas de gra-

vedad y electromagnética que tienen un alcance infinito. Como su alcance es menor que el radio del núcleo, no interactúa con otros núcleos cercanos. Si no fuera así, todos los núcleos del universo se habrían colapsado para formar un gran conglomerado de masa nuclear.

4.3. Segunda Ley de Newton

Newton se percató de que la aceleración de un cuerpo no depende únicamente de la fuerza a la que está sometido, sino también de su masa. La segunda ley de Newton establece que, *"La aceleración de un cuerpo es directamente proporcional a la resultante de todas las fuerzas aplicadas a dicho cuerpo e inversamente proporcional a la masa del cuerpo; tiene la misma dirección que la resultante"* (Fig.4.1).

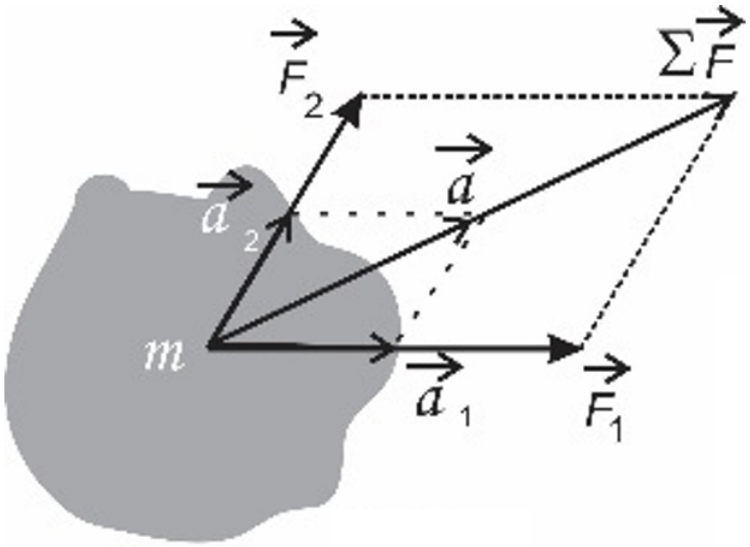


Figura 4.1:

La expresión matemática es,

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} \tag{4.1}$$

De lo que obtenemos,

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \tag{4.2}$$

Que es la versión más conocida de la segunda ley de Newton.

Unidades:

Sistema	m	a	F
SI	kg	m/s^2	N
CGS	g	cm/s^2	dy
Técnico	utm	m/s^2	kgf

Tabla 4.1: N: newton; dy: dina; kgf: kilogramo fuerza y utm: unidad técnica de masa

También tenemos las siguientes equivalencias:

$1N = 10^5 dy$, $1kgf = gN$ y $1utm = gkg$.

4.4. Peso

Fuerza que ejercen los planetas sobre un cuerpo debido a la gravedad (Fig.4.2).

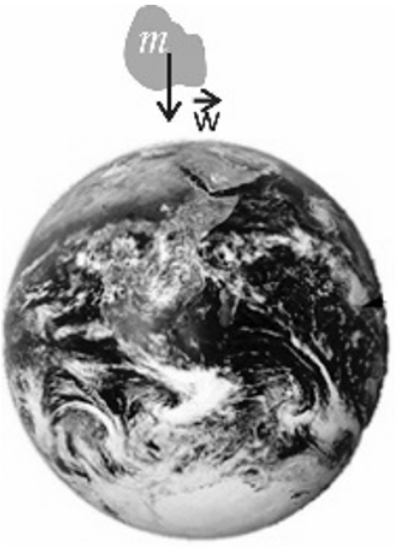


Figura 4.2:

Según ec.(4.2),

$$\vec{w} = m\vec{g} \tag{4.3}$$

$g = 9,8m/s^2$, valor promedio a pequeñas alturas de la superficie de la Tierra.

Así, masa y peso no son lo mismo, pero si son proporcionales uno al otro. La masa tiene que ver con la cantidad de materia de un cuerpo. El peso, con la intensidad del campo gravitacional que ejercen los planetas sobre los cuerpos.

Cada planeta tiene su propia gravedad, $\vec{g}$, según la cantidad de masa que tienen. Si un cuerpo se encontrase en una región del espacio en la que no actúa la gravedad, su peso será cero. En la superficie de la Luna el peso de un cuerpo es de sólo una sexta parte de su peso en la tierra. Esto se debe a que la fuerza gravitacional en la Luna es seis veces menor que en la tierra. El peso aproximado de un hombre medio ($m = 70kg$), en distintos lugares tenemos, aproximadamente:

En la Tierra:	w = 700N
En la Luna:	w = 113N
En Marte:	w = 260N
En Júpiter:	w = 1 600N
En Phobos (sat. Marte):	w = 0,7 N

4.5. Fricción

La experiencia muestra que es necesario aplicar una fuerza para mover un cuerpo que está en contacto con otro. Esto indica la presencia de otra fuerza que actúa en dirección opuesta al movimiento relativo de los cuerpos en contacto. Esta fuerza recibe el nombre de fricción o rozamiento.

Las fuerzas de fricción resultan de la adhesión de una superficie a la otra y por el inter acomodo de las irregularidades de las superficies en fricción para dos cuerpos sólidos y uno de ellos se desliza sobre el otro se tiene la fricción por deslizamiento, pero si uno de los cuerpos rueda sobre el otro se tiene la fricción por rodadura y, si uno de los cuerpos, o ambos, es un fluido (líquido o gas), la fricción recibe el nombre de viscosidad.

La fricción por lo general es negativa en todo mecanismo por el desgaste que produce, pero es indispensable para caminar, coger las cosas, clavar, frenar y embragar a los automóviles, etc.

- Fricción por deslizamiento
  La experiencia muestra que la fuerza de fricción por deslizamiento es proporcional a la fuerza normal que se ejerce sobre las superficies en contacto (Fig. 4.3).

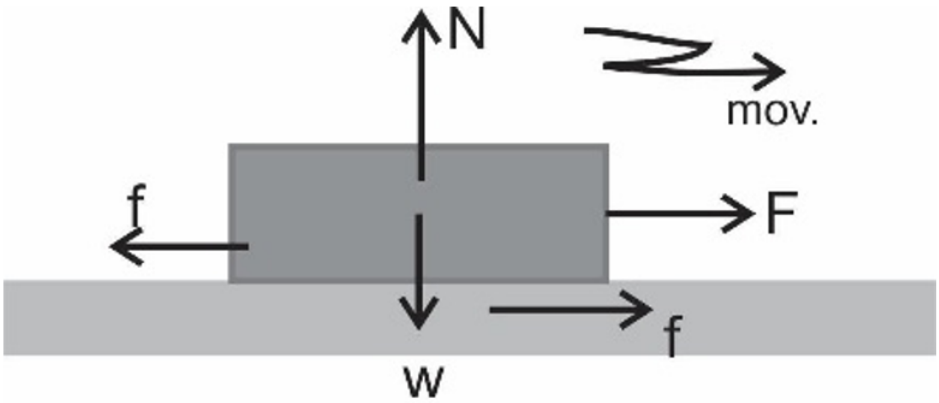


Figura 4.3:

Es decir,

$$f = \mu N \tag{4.4}$$

La constante de proporcionalidad es llamada coeficiente de fricción, y se designa por μ.

Hay dos clases de coeficientes de fricción. El coeficiente estático de fricción (μ_s), que al multiplicarse por la fuerza normal, da la fuerza mínima necesaria para poner en movimiento relativo dos cuerpos que están inicialmente en contacto y en reposo. El coeficiente cinético de fricción (μ_k), que al multiplicarse por la fuerza normal, nos da la fuerza necesaria para mantener dos cuerpos en movimiento uniforme.

Experimentalmente se ha encontrado que $\mu_s > \mu_k$. La fricción depende de muchos factores tales como la condición y la naturaleza de las superficies, la velocidad relativa, pero es independiente del área de la superficie en contacto, etc.

Asimismo, se debe tener presente que para calcular las fuerzas de rozamiento, debemos conocer la normal que, en general, no es igual al peso de los cuerpos.

4.6. Fuerza Elástica

Es aquella fuerza interna manifestada en los cuerpos elásticos, cuando son estirados o comprimidos por fuerzas externas. Esta fuerza se opone a las fuerzas externas y trata de que el cuerpo elástico recupere su longitud natural (L_o) (Fig. 4.4).
Supongamos que un peso mg cuelga de un resorte de constante k. En equilibrio se alarga una distancia d tal que la fuerza recuperadora $F_r = -kd$ contrarrestre el peso. Es decir: $-kd + mg = 0$.
Si el peso de desplaza hacia abajo una distancia adicional x entonces la fuerza recuperadora es $-k(d + x)$. Entonces,

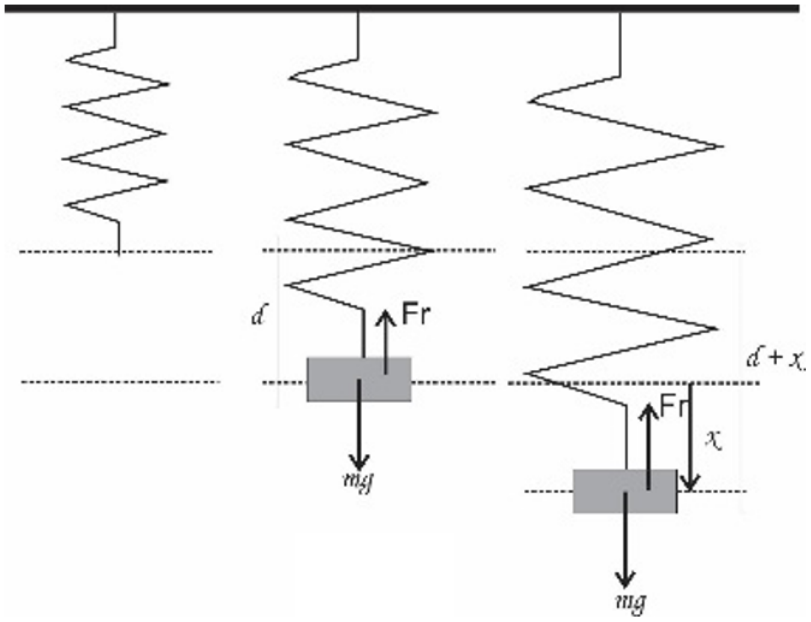


Figura 4.4:

$$-k(d+x)+mg=ma$$

Es decir,

$$-kx=ma=F \tag{4.5}$$

Esto demuestra que cuando el resorte se estira una distancia x con respecto a su posición de equilibrio, ejerce una fuerza recuperadora $F=-kx$; el signo menos indica que la fuerza se opone al desplazamiento x. Este resultado se denomina ley de Hooke. Al la constante k, se le denomina constante de elasticidad del muelle, constante elástica o constante de Hooke que depende de la naturaleza del muelle. Su unidad es N/m en el SI; unidad de fuerza por unidad de longitud.

4.7. Dinámica Circular

Si una partícula se mueve con movimiento curvilíneo, la aceleración total $\vec{a}$ puede descomponerse en dos direccio-

nes mutuamente perpendiculares: normal y tangencial, denominadas aceleraciones normal y tangencial (Fig. 4.5).

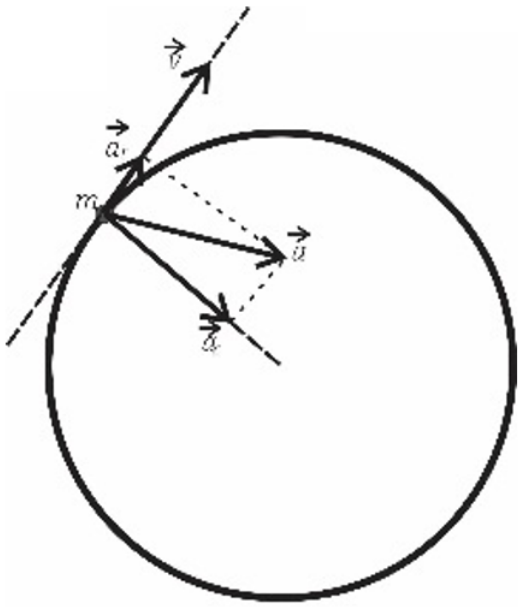


Figura 4.5:

- **Fuerza centrípeta**.- Es la componente de la fuerza resultante dirigida hacia el centro de la circunferencia. Esta dada por la expresión:

$$F_c = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r \tag{4.6}$$

  Como es componente de la fuerza resultante, se consideran positivas la fuerzas dirigidas hacia el centro de la circunferencia y negativas las que salen del centro.

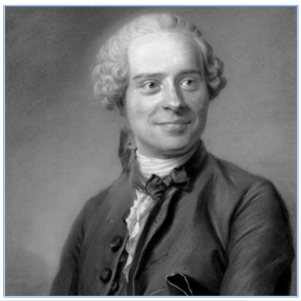
- **Fuerza tangencial**.- Es la componente de la fuerza resultante dirigida a lo largo de la tangente a la trayectoria. Está dada por la expresión,

$$F_t = ma_t = m\alpha r \tag{4.7}$$

Sesión 5

Estática

D'Lambert (1717 - 1783)



Científico y pensador francés. Sus investigaciones en matemáticas, física y astronomía le llevaron a formar parte de la Academia de Ciencias con sólo 25 años; y resultaron de tal relevancia que aún conservan su nombre un principio de física que relaciona la estática con la dinámica y un criterio de convergencia de series matemáticas.

Sin embargo, su mayor renombre lo iba a alcanzar como filósofo. Junto con Diderot dirigió la Enciclopedia, compendio del saber de su tiempo que ha dado nombre a este tipo de obras hasta nuestros días; el propio D'Alembert redactó en 1751 el «Discurso Preliminar», en el cual apuntaba el enfoque general de la obra, ligado a la filosofía de las «Luces». Su pensamiento resulta una síntesis entre el racionalismo y el empirismo, que subraya la unidad del saber y la fe en el progreso de la Humanidad a través de las ciencias, unificadas por una filosofía desprendida de mitos y creencias trascendentales.

Cuando la campaña de los reaccionarios contra la Enciclopedia consiguió que se prohibiera continuar su edición (1759), se retiró de la obra, dejando a Diderot como único director. Pero siguió sosteniendo el pensamiento crítico, humanista y reformista de los ilustrados desde su puesto como secretario perpetuo de la Academia Francesa (1772).

Introducción

La Estática es la parte de la física que estudia los sistemas sobre los que actúan fuerzas y torques cuyas resultantes son nulas, de forma que permanecen en reposo o en movimiento no acelerado. El objeto de la estática es determinar la fuerza resultante y el torque resultante de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo para poder establecer sus condiciones de equilibrio. La estática proporciona, mediante el empleo de la mecánica del sólido rígido, solución a los problemas denominados isostáticos. En estos problemas, es suficiente plantear las condiciones básicas de equilibrio, que son:

- El resultado de la suma de fuerzas es nulo.
- El resultado de la suma de momentos respecto a un punto es nulo.

Estas dos condiciones, mediante el álgebra vectorial, se convierten en un sistema de ecuaciones; la resolución de este sistema de ecuaciones, es resolver la condición de equilibrio.

Existen métodos de resolución de este tipo de problemas estáticos mediante gráficos, heredados de los tiempos en que la complejidad de la resolución de sistemas de ecuaciones se evitaba mediante la geometría, si bien actualmente se tiende al cálculo computacional.

5.1. Equilibrio y Reposo

Una partícula se encuentra en reposo cuando su velocidad es cero. Pero se encuentra en equilibrio si su aceleración es cero ($\vec{a} = 0$). Luego, de la segunda ley de Newton:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \tag{5.1}$$

Esto es, una partícula se encuentra en equilibrio cuando la resultante de todas las fuerzas actuantes es cero.

Una partícula puede estar en reposo, pero no estar en equilibrio. Por ejemplo, cuando un proyectil es lanzado verticalmente y adquiere su altura máxima ($\vec{v} = 0$); se encuentra en reposo, pero no en equilibrio ya que está sometida a la fuerza de la gravedad, y comienza inmediatamente a caer. Así mismo, una partícula puede estar en equilibrio y no estar en reposo. Un ejemplo lo constituye el MRU de una partícula ($\vec{a} = 0$). Por lo tanto, reposo indica equilibrio, pero equilibrio no necesariamente reposo.

- **Clases de equilibrio**.- Se tiene los siguientes tipos de equilibrio (Fig.5.1).

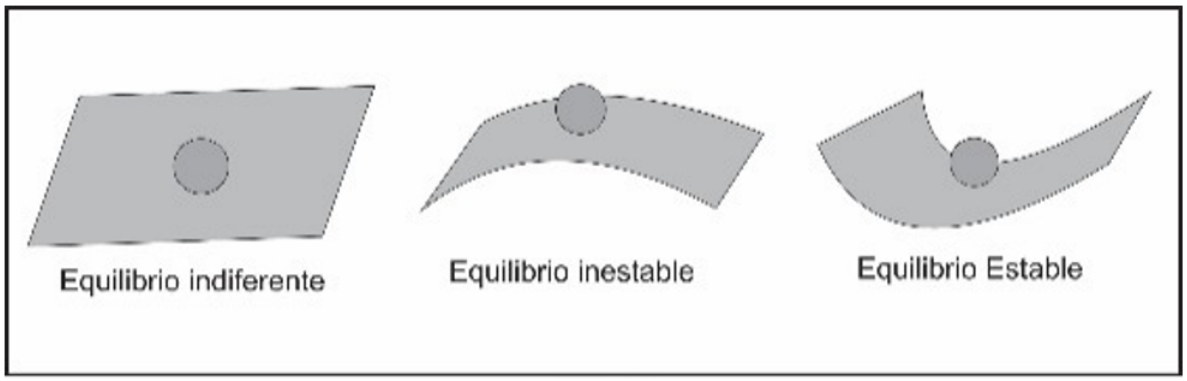


Figura 5.1:

- **Equilibrio estable**.- Si las fuerzas aplicadas en la posición desplazada hacen volver al cuerpo a su po-

sición inicial. Por ejemplo, un cono apoyado sobre su base.

- **Equilibrio inestable**.- Si las fuerzas aplicadas actúan aumentando aún más el desplazamiento.
- **Equilibrio indiferente**.- Si el cuerpo sigue en equilibrio en la posición desplazada.

5.2. Equilibrio de Traslación

Un cuerpo se encuentra en equilibrio de traslación si la suma de todas las fuerzas que actúan sobre ella es cero (Fig.5 2).

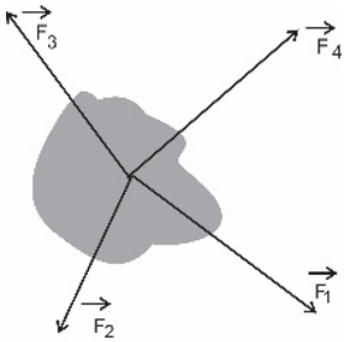


Figura 5.2:

Es decir,

$$\begin{aligned} &\sum \vec{F} = 0 \\ &\left(\sum F_x\right)\vec{i} + \left(\sum F_y\right)\vec{j} = 0 \end{aligned} \tag{5.2}$$

En dos dimensiones:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \end{aligned} \tag{5.3}$$

5.3. Teorema de Lamy

Este teorema establece que: *"Un cuerpo sometido a la acción de tres fuerzas se encontrará en equilibrio de traslación si éstas son coplanares, concurrentes, y la resultante de dos de ellas es siempre igual en módulo, pero opuesta a la tercera"* (Fig.5.3).

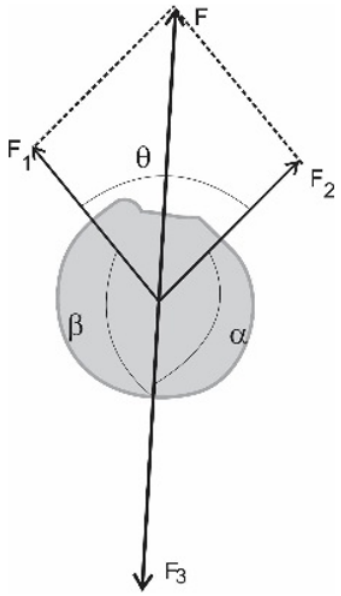


Figura 5.3:

Al aplicar el método gráfico para las tres fuerzas de la Fig.5.3, se grafica un polígono y mediante la ley de los senos, obtenemos.

$$\frac{F_1}{\operatorname{sen}\alpha} = \frac{F_2}{\operatorname{sen}\beta} = \frac{F_3}{\operatorname{sen}\theta} \tag{5.4}$$

5.4. Torque de una fuerza

Si una fuerza $\vec{F}$ actúa en un cuerpo C que puede rotar alrededor del punto O (Fig. 5.4).
A la distancia perpendicular desde O a la línea de acción de la fuerza, se denomina brazo de palanca (b), entonces según Fig. 5.4,

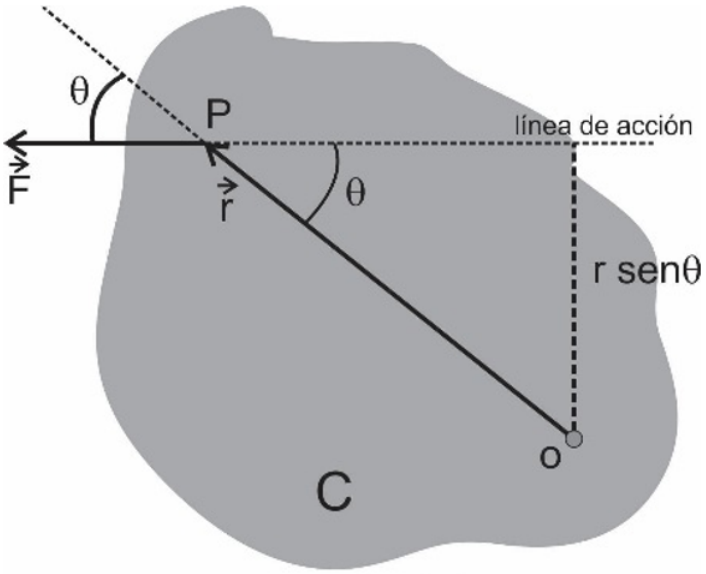


Figura 5.4:

$$b = r \operatorname{sen} \theta$$

Al abrir una puerta o un grifo, o apretar una tuerca con una llave, se ejerce una fuerza de giro. Esta fuerza de giro produce un torque. El torque no es lo mismo que la fuerza. Si se quiere que un objeto se mueva, se le aplica una fuerza. Recuerde que la fuerza tiende a acelerar a los cuerpos. Para que un cuerpo gire o dé vueltas se le aplica un torque. Las torques producen rotación.
La experiencia muestra que a mayor brazo de palanca, aumenta la efectividad de rotación de $\vec{F}$; por lo tanto, se define el torque o momento de una fuerza ($\vec{\tau}$), de acuerdo a la relación:

$$\tau = Fb \tag{5.5}$$

Entonces,

$$\tau = Fr \operatorname{sen} \theta \tag{5.6}$$

Las unidades: SI: $N \cdot m$, CGS: $dy \cdot cm$ y Técnico:$kgf \cdot m$.
La expresión vectorial:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \tag{5.7}$$

Observaciones :

1. $\tau_{\text{mán}} = Fr$, para $\theta = 90^o$
2. $\tau_{\text{mín}} = 0$, para $\theta = 0^o, 180^o$
3. $\tau = (F \operatorname{sen}\theta r = F_{\perp} r)$

   donde, $F_{\perp}$ es la componente perpendicular de la fuerza $\vec{F}$, respecto a la línea de acción de $\vec{r}$.

   El torque o momento de fuerza es una magnitud vectorial. Por convenio se dice que el momento de una fuerza es (+), si el efecto de la fuerza es producir una rotación alrededor de "o" contraria al movimiento de las agujas del reloj, y (-) cuando la rotación se produce en el mismo sentido del movimiento de las agujas del reloj.

5.5. Resultante de Fuerzas Paralelas

Cuando las fuerzas son coplanares, siempre es posible reducir el sistema a una sola fuerza, mediante:

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i \tag{5.8}$$

El torque, respecto a un punto del plano de la fuerza, de cada una de las fuerzas,

$$\vec{\tau} = \sum \vec{\tau}_i \tag{5.9}$$

para el sistema de fuerzas paralelas de la fig. 5.5

Entonces.

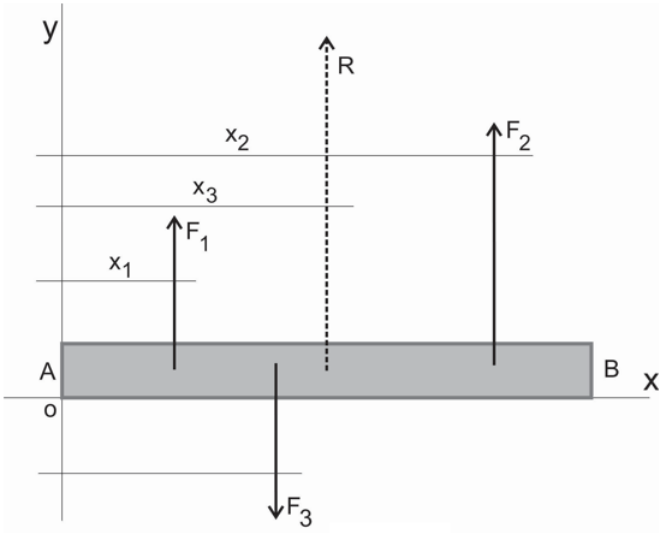


Figura 5.5:

1. $R = \sum F_i$
2. $\tau_o = \sum \tau_i$
3. También se debe cumplir, $X_c R = \tau_o$, es decir,

$$X_c = \frac{\sum \tau_i}{\sum F_i} = \frac{x_i F_i}{\sum F_i} \tag{5.10}$$

Si tenemos fuerzas paralelas al eje x, entonces

$$Y_c = \frac{\sum \tau_i}{\sum F_i} = \frac{y_i F_i}{\sum F_i} \tag{5.11}$$

5.6. Cupla o Par

Se define como un sistema de dos fuerzas de igual magnitud pero de direcciones opuestas que actúan a lo largo de líneas paralelas (Fig. 5.6).
Según fig.5.6,

1. $R = \sum F_i = 0$, es decir, que la cupla no produce efecto de traslación.
2. La suma de los torques respecto a “o”, si consideramos que: $F_1 = F_2 = F$,

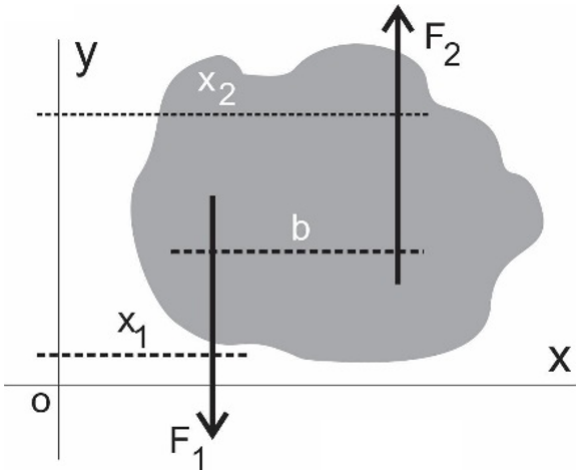


Figura 5.6:

$$\tau_o = -x_1F_1 + x_2F_2 = (x_2 - x_1)F = bF \tag{5.12}$$

donde b se denomina brazo de palanca de la cupla. Como $\tau \neq 0$ y$R = 0$, la cupla produce sólo un efecto de rotación.

Así tenemos el diseño de diferentes aspersores para el regado del césped.

5.7. Equilibrio de un cuerpo rígido

Cuando un cuerpo rígido, cuerpo indeformable, está sometido a varias fuerzas no concurrentes, es necesario considerar el equilibrio en relación a la traslación como a la rotación (Fig.5.7).

1. **Equilibrio de traslación**: La suma de todas las fuerzas debe ser cero.
$$\sum \vec{F}_i = 0 \tag{5.13}$$
2. **Equilibrio de rotación**: La suma de torques con respecto a cualquier punto debe ser igual cero.

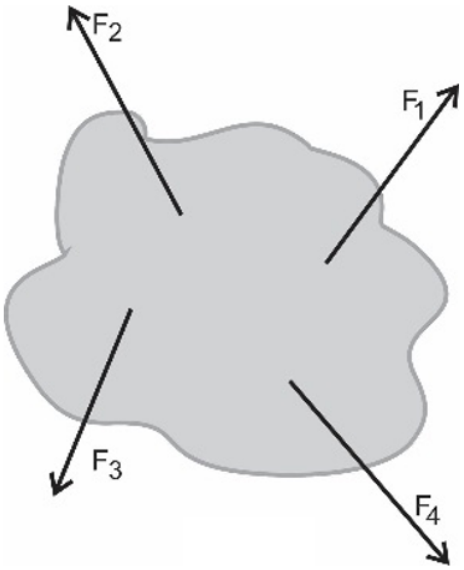


Figura 5.7:

$$\sum \vec{\tau}_i = 0 \tag{5.14}$$

para fuerzas coplanares, estas ecuaciones se reducen a tres ecuaciones algebraicas:

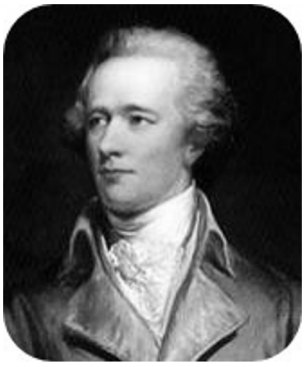
$$\begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0 \\ \sum \tau_i &= 0 \end{aligned} \tag{5.15}$$

que nos permiten determinar solamente tres cantidades desconocidas.

Sesión 6

Trabajo y Energía

William Rowan Hamilton (1717 - 1783)



William Rowan Hamilton fue el científico más grande de Irlanda. Fue un matemático, físico y astrónomo e hizo importantes aportes en la óptica, la dinámica y el álgebra.

William Hamilton vivió con su tío, el reverendo James Hamilton lingüista y un sacerdote anglicano, con quien vivió desde antes de la edad de tres años hasta que entró en la universidad. Desde niño mostro sus cualidades de genio, a la edad de cinco años empezó a aprender latín y griego, a los siete años ya hablaba hebreo, A la edad de diez leyó una copia latina de Euclides, su introducción en la geometría.

Además lenguas como el sánscrito, el malayo, el persa, el árabe, el hindi, el persa y árabe para la relajación. Unos 15 idiomas para cuando cumplió 13 años de edad. A esa misma edad aprendió francés y con el idioma comenzó sus estudios con el álgebra de Clairaut.

En 1822 a la edad de 17 años, encontró un error en el

Mechanique C'eleste de Laplace. Esto llamó la atención del Dr. John Brinkley, astrónomo real de Irlanda y el obispo de Cloyne, quien afirmo en 1823 de Hamilton: "Este joven, no sé qué será, pero sé que es el primer matemático de su edad".

Dos documentos principales de Hamilton, "Sobre un Método General en la Dinámica", se publicaron en 1834 y 1835. En el segundo de ellos, las ecuaciones de movimiento de un sistema dinámico se expresan en una forma muy elegante (las ecuaciones de movimiento de Hamilton). El enfoque de Hamilton fue perfeccionado por el matemático alemán Carl Jacobi, y se le dio importancia en el desarrollo de la mecánica celeste y la mecánica cuántica.

Introducción

La energía es una propiedad que está relacionada con los cambios o procesos de transformación en la naturaleza. Sin energía ningún proceso físico, químico o biológico sería posible.

La forma de energía asociada a las transformaciones de tipo mecánico se denomina energía mecánica y su transferencia de un cuerpo a otro recibe el nombre de trabajo. Ambos conceptos permiten estudiar el movimiento de los cuerpos de forma más sencilla que usando términos de fuerza y constituyen, por ello, elementos clave en la descripción de los sistemas físicos.

En el lenguaje ordinario energía es sinónimo de fuerza; en el lenguaje científico, aunque están relacionados entre sí, ambos términos hacen referencia a conceptos diferentes. Algo semejante sucede con el concepto de trabajo, que en

el lenguaje científico tiene un significado mucho más preciso que en el lenguaje corriente.

El movimiento, el equilibrio y sus relaciones con las fuerzas y con la energía, define un amplio campo de estudio que se conoce con el nombre de mecánica. La mecánica engloba la cinemática o descripción del movimiento, la estática o estudio del equilibrio y la dinámica o explicación del movimiento. El enfoque en términos de trabajo y energía viene a cerrar, pues, una visión de conjunto de la mecánica como parte fundamental de la física.

Al aplicar una fuerza sobre un cuerpo, durante un intervalo de tiempo, el cuerpo recorre una distancia. La cantidad fuerza x distancia se denomina trabajo mecánico.

La capacidad para efectuar trabajo se denomina energía y la tasa a la cual se lleva a cabo un trabajo se define como potencia.

6.1. Trabajo Realizado por una Fuerza Constante

En la figura (6.1) el bloque se mueve por la fuerza $\vec{F}$ a lo largo de un desplazamiento d; entre la fuerza y el desplazamiento hay un ángulo θ.

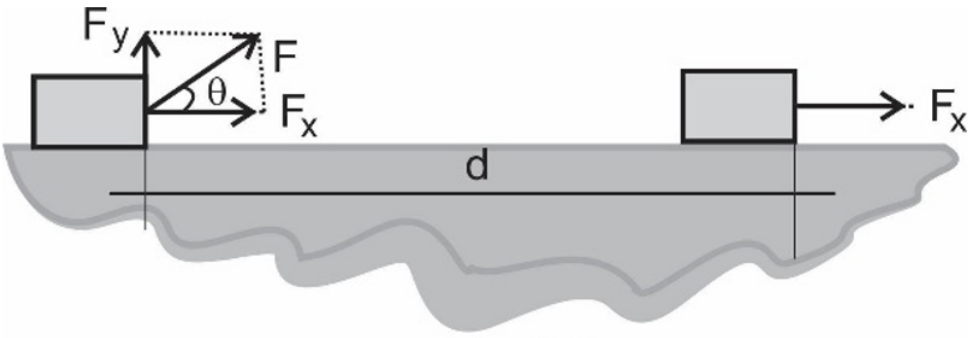


Figura 6.1:

En todos los casos en los que se realiza un trabajo, es necesario:

1. Debe existir una fuerza aplicada $\vec{F}$.
2. La fuerza debe aplicarse a través de una cierta distancia d.
3. La fuerza debe tener una componente F_x a lo largo del desplazamiento.

Cumplidas estas condiciones se define el trabajo como: *"El trabajo es una magnitud escalar igual al producto de las magnitudes del desplazamiento y la componente de la fuerza en la dirección del desplazamiento"*
Trabajo = Componente de fuerza $\times$ Desplazamiento

$$\begin{aligned} W &= F_x \cdot d \\ W &= F\cos\theta \cdot d \end{aligned} \tag{6.1}$$

Observaciones:

1. $W = F \cdot d, \quad si \quad \theta = 0^o$

2. $W = 0$, si $\theta = 90^o$, Esto es, toda fuerza perpendicular al desplazamiento no realiza trabajo.

3. $W = -Fd$, si $\theta = 180^o$, Es decir, toda fuerza que se opone al desplazamiento, realiza un trabajo negativo, como es el caso de la fuerza de fricción por deslizamiento.

Unidades:

Sistema	F	d	W
SI	N	m	J=N.m
CGS	din	cm	Erg=din.cm
Técnico	kgf	m	kgm= kgf m

Tabla 6.1: Equivalencias: 1J=10^7 erg, 1kgm=gJ

Si varias fuerzas actúan sobre un cuerpo en movimiento, el trabajo total es la suma de los trabajos efectuados por cada una de las fuerzas. Si la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo es cero, el trabajo total es cero.

6.2. Energía Mecánica

La energía puede considerarse como la capacidad de un objeto para realizar un trabajo. Si un objeto tiene energía, entonces es capaz de ejercer una fuerza sobre otro objeto para efectuar un trabajo sobre él. Así mismo, al realizar trabajo sobre un objeto, éste gana una cantidad de energía igual al trabajo efectuado. Las unidades de energía son las mismas que las del trabajo: el Joule (J), Ergio (Erg), el Kilográmetro (kgm), etc.

La energía se da en muchas formas: mecánica, térmica, elástica, luminosa, nuclear, etc. En mecánica es de interés dos tipos de energía: La energía que se debe a su movimiento y la que depende de la posición de un cuerpo, es decir la

energía mecánica puede estar en forma de energía cinética o de energía potencial.

6.2.1. Energía Cinética (E_k)

En lo que sigue determinaremos el trabajo que una fuerza F, aplicada a un cuerpo de masa m, que tiene una velocidad inicial Vo, realiza durante un desplazamiento d, en función de la velocidad del cuerpo (Fig.6.2).

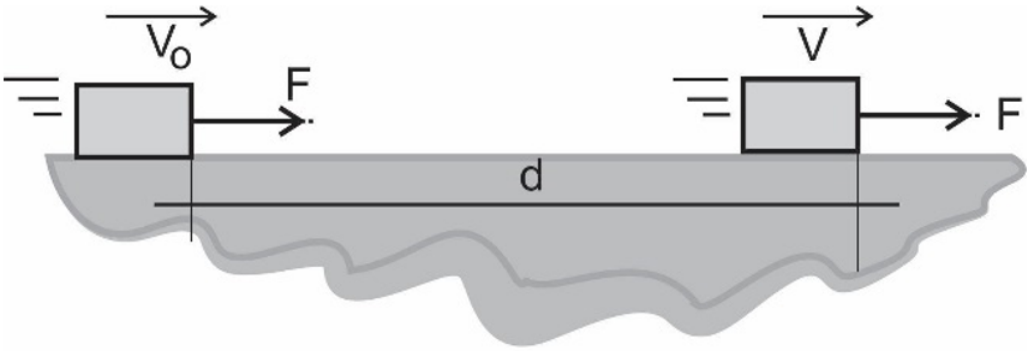


Figura 6.2:

cuando la fuerza F es constante:

$$\begin{aligned} F = ma &= m\left(\frac{v^2 - v_o^2}{2d}\right) \\ Fd &= \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_o^2}{2} \\ WE_k - E_{k_0} &= \Delta E_k \end{aligned} \tag{6.2}$$

Donde

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \tag{6.3}$$

se denomina energía cinética. Es decir, *"El trabajo realizado por la fuerza ejercida sobre un cuerpo es igual a la variación de su energía cinética"*.

Este resultado (6.2) tiene validez general, cualquiera que sea la naturaleza de la fuerza.

6.3. Energía Potencial

La energía que un cuerpo puede almacenar en virtud a su posición se llama energía potencial, porque en este estado tiene el potencial para realizar trabajo. Por ejemplo, la energía potencial debida a que un objeto que se encuentra a una posición elevada se llama energía potencial gravitatoria; un resorte estirado o comprimido, la energía almacenada, se denomina energía elástica; la energía química de los combustibles es energía potencial, etc.

- **Energía potencial gravitatoria**.- La fuerza de gravitación o peso que actúa sobre los cuerpos cerca de la superficie terrestre es constante. Determinaremos el trabajo del peso de un objeto de dos maneras:
  - Trabajo del peso de un cuerpo cuando se desplaza de una altura inicial h_o a una altura final h, siguiendo el camino vertical $AB = h_o - h$, según la figura (6.3).

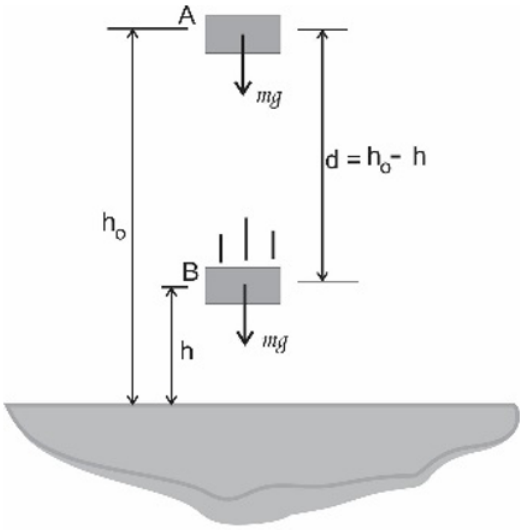


Figura 6.3:

$$W = Fd = mg(h_o - h) \tag{6.4}$$

10cm

- Trabajo del peso de un cuerpo cuando se desliza sobre un plano inclinado sin rozamiento de una altura inicial h_o a una altura final h, según la figura (6.4).

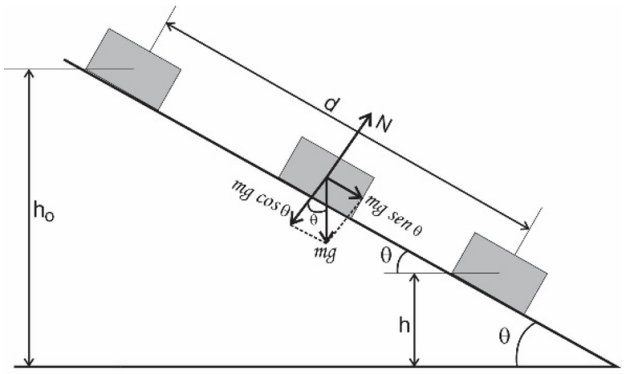


Figura 6.4:

También

$$W = Fd = mg\,\text{sen}\,\theta d = mg(d\,\text{sen}\,\theta)$$

pero,

$$d\,\text{sen}\,\theta = (h_o - h)$$

luego,

$$W = mg(h_o - h) = mgh_o - mgh \tag{6.5}$$

Según (6.4) y (6.5), el trabajo del peso de los cuerpos es independiente del camino que se ha seguido y depende solamente de la posición final y de la posición inicial; es positivo cuando el cuerpo baja y negativo cuando el cuerpo sube. Se define a la energía potencial gravitatoria (E_p) de un cuerpo, según la expresión.

$$E_p = mgh \tag{6.6}$$

Entonces,

$$W = E_{p_o} - E_p = -\Delta E_p \tag{6.7}$$

Las energías cinética y potencial gravitatorias dependen del sistema de referencia con respecto al cual se miden la velocidad y la posición (altura); es decir son conceptos relativos.

- **Energía potencial elástica**.- Para una fuerzas constante, tenemos: $W = Fd$

  si graficamos F vs d,

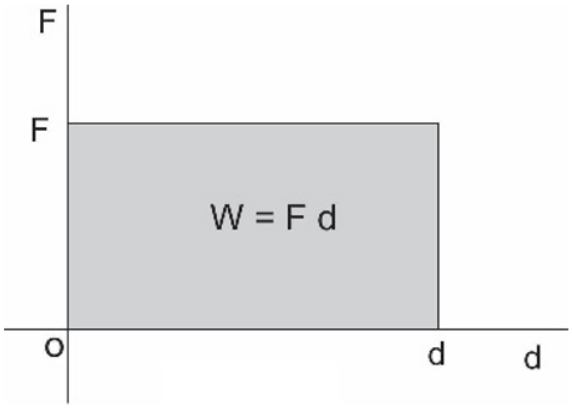


Figura 6.5:

por tanto, de la gráfica F vs. d el área bajo la curva nos da el trabajo realizado por F.

Cuando se deforma un resorte, aparece una fuerza recuperadora,

$$F = kx$$

la gráfica F vs X, es

por tanto, cuando se estira o comprime un resorte, el agente externo almacena energía potencial elástica, que se determina mediante:

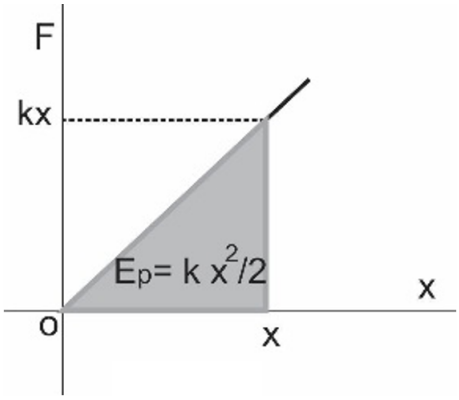


Figura 6.6:

$$E_{pe} = \frac{1}{2}kx^2 \tag{6.8}$$

También, el trabajo realizado por la fuerza elástica es igual a la diferencia,

$$W = E_{peo} - E_{pe} \tag{6.9}$$

En conclusión, el trabajo para ir de un punto a otro de las fuerzas de gravedad o elásticas es independiente de la trayectoria; este hecho se traduce diciendo que las fuerzas son conservativas. Por el contrario, si el trabajo depende de la trayectoria, se dice que las fuerzas son no conservativas o disipativas; por ejemplo tenemos a las fuerzas de fricción.

6.4. Potencia

En la definición de trabajo no se hace referencia al tiempo invertido para realizarlo. Para comparar diferentes máquinas, es conveniente conocer que cantidad de trabajo efectúan, en la unidad de tiempo. La potencia es la rapidez con la que se hace un trabajo; es el cociente del trabajo realizado entre el tiempo transcurrido.

$$P = \frac{W}{t} \tag{6.10}$$

Pero,

$$W = F\cos\theta d$$

Entonces,

$$P = \frac{F\cos\theta d}{t} = F\cos\theta v = \vec{F}\cdot\vec{v} \tag{6.11}$$

donde v es la velocidad del cuerpo sobre el cual se aplica la fuerza F; ésta ec.(6.11) nos permite determinar la potencia instantánea; mientras que la ec. (6.10) muestra resultados promedios de potencia.

Unidades:
SI: watt(W)=J/s
Técnico: kgm/s

En la industria se utilizan las siguientes unidades: 1HP=746 W=76 kgm/s
1CV=735 W=75 kgm/s

La unidad kilowatt hora (KWh) es utilizada por las compañías eléctricas al facturar, es una unidad de energía. Es equivalente a: $1kWh = 3,6 \times 10^6 J$

6.5. Eficiencia

Durante el funcionamiento de cualquier máquina, ocurren tres procesos. (Fig. 6.7)

a) Energía de entrada (Ee)

b) Energía disipada (Ed)

c) Energía útil (Eu).

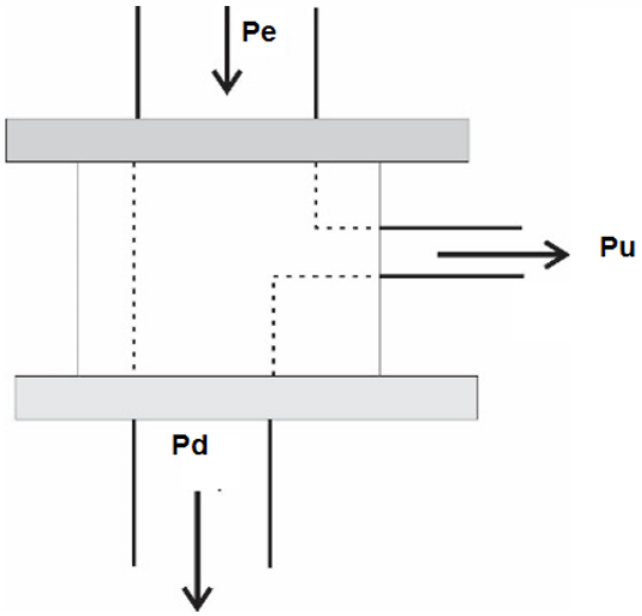


Figura 6.7:

Según el principio de conservación de la energía:

$$E_e = E_u + E_d$$

Entonces,

$$\eta = \frac{E_u}{E_e} = \frac{P_u}{P_e} \tag{6.12}$$

Sesión 7

Conservación de la Energía Mecánica

Julius Robert Mayer (1814 - 1878)

Hacia finales del siglo XVIII, científicos e ingenieros se referían al concepto de trabajo mecánico como .el producto de la fuerza por la distancia". Comenzaron a darse cuenta que realizar un trabajo era sinónimo de entregar o adquirir Energía.

Coriolis (1792-1843) logró matematizar el concepto de Energía cinética o de movimiento. William Rankine (1820-1872), llamó Energía potencial a la .Energía almacenada.en un sistema.

Hacia 1798, Sir Benjamín Thompson, conocido como el Conde Rumford, dirigía el taladrado de cañones en una fábrica de Münich observó que se desprendía mucho calor durante el proceso de taladrado. Los defensores del calórico explicaban este fenómeno diciendo que el metal liberaba calórico. Rumford postuló que se podía seguir generando calor indefinidamente, mientras se mantuviera el rozamiento. A mediados del siglo XIX la teoría del calórico fue

totalmente descartada, cuando James Prescott Joule logró establecer una equivalencia entre el trabajo (Energía) y el calor.

En 1842, un joven médico alemán de 28 años, Julius Robert Mayer, publicó su primer ensayo en el que afirmaba que todas las distintas formas de Energía "son convertibles", es decir que la Energía puede transformarse de una forma a otras. Ridiculizado por la comunidad científica, y tras la muerte de dos de sus hijos, intentó suicidarse saltando por la ventana de un segundo piso. Depresivo, estuvo internado en un manicomio hasta 1853. Finalmente, y tras los experimentos de Joule, su trabajo fue reconocido hacia fines de la década de 1860. Mayer aún vivía.

Introducción

Probablemente el concepto más importante y fundamental de la Ciencias Naturales, y particularmente de la Física, es el de la energía. Todos los fenómenos y procesos naturales conocidos podemos explicarlos mediante su aplicación. El concepto de energía nos ayuda a entender el comportamiento de los seres vivos, que como agentes autónomos, intercambian materia y energía con su entorno, en un proceso dinámico de autorregulación. La energía es la sangre que mueve el mundo. Como individuos estamos en una permanente lucha en la búsqueda de asegurarnos una fuente de energía. Estudiamos y trabajamos para ello.

El desarrollo sostenible de las naciones implica el consumo creciente de energía, por lo que éste sólo será posible si somos capaces de asegurar la producción de energía, así como el descubrimiento de nuevas fuentes de energía, capaces de sustituir a las actuales fuentes, que actualmente

en un alto porcentaje lo representan los combustibles fósiles como el petróleo y el gas natural, que claramente se terminaran en un futuro cercano terminaran por extinguirse. De allí, la gran responsabilidad que tenemos los seres humanos de ser responsables con el uso racional y cuidado de las fuentes de energía.

Varias son las fuentes de energía para el hombre, pero el Sol es indudablemente la más importante: da vida al planeta tierra. Para la humanidad, el Sol ha sido siempre un Dios. Gracias a la luz y al calor que recibimos de él, las plantas pueden realizar ese maravilloso proceso llamado fotosíntesis, la reacción fotoquímica más fundamental de la vida. Al sol le debemos los vientos y la energía, la luz y la energía fotovoltaica, las lluvias y la energía hidráulica, las diferencias de temperatura en los océanos y la energía marina, la radiación y la energía solar.

Vivimos en un planeta hermoso y en delicado equilibrio. Debemos ser conscientes de que las transformaciones de energía que realizamos generan también contaminación. Preservar nuestro planeta es hacer uso de sus recursos y uso inteligente, racional y respetuoso de la energía.

7.1. Energía

Uno de los conceptos más importantes que interesan a toda la humanidad es la Energía. Sin embargo, en el habla popular la palabra Energía la asociamos, en general, con vitalidad, fuerza, temperamento, poder, etc. Así, se acostumbra decir que determinada persona "es muy enérgica" o "tiene mucha energía" para expresar que es muy activa, que es capaz de trabajar continuamente o que puede realizar un gran número de tareas durante una jornada sin que padezca los efectos del cansancio (al menos aparentemente). Por otra parte, cuando alguien se esfuerza con tenacidad en alguna labor difícil, complicada y poco productiva, pensamos que está "gastando inútilmente sus energías". Los diferentes significados que adopta el término Energía dependen en gran medida del ámbito en que se los utilice. En el ámbito científico, el concepto de Energía tiene un significado específico, que a continuación comenzaremos a analizar.

Empezaremos diciendo que en la física actual no tenemos una definición simple, precisa y a la vez general de esta magnitud; no sabemos exactamente que es la energía, sin embargo, sí pueden definirse de forma precisa los diferentes tipos de energía en que se manifiesta diciendo cómo se mide. Por ello, en las ciencias físicas no hablamos de "energía" a secas, pues el término expresado aisladamente carece de una definición por no ser una cantidad mensurable.
La hacemos mensurable cuando especificamos el tipo de energía que deseamos. Así, son perfectamente conocidos muchos tipos específicos de energía: cinética, potencial, magnética, energía en reposo, elástica, etc. Todos ellas son mensurables, en el sentido de que podemos expresarlas analíticamente; es decir, se les puede asignar un determinado valor

Expresón Analítica de Algunos Tipos de Energía		
Energía	**Expresión Analítica**	**Magnitud a Medir**
Cinética	$\frac{1}{2}mv^2$	Masa y Velocidad
Potencial Gravitatoria	mgh	Masa, Velocidad y Aceleración de la gravedad
Elástica	$\frac{1}{2}kx^2$	Constante elástica y deformación.
Potencial eléctrica	$\frac{kQq}{r}$	Carga eléctrica, distancia

Tabla 7.1:

numérico, que dependerá de las características particulares del sistema analizado en un instante determinado. Ver tabla 7.1.

Existen diversas formas de expresar la energía. Sin embargo, la definición en términos del trabajo, sin ser la más completa, resulta muy fructífera. Por lo que, para los objetivos que nos planteamos en el estudio de los fenómenos mecánicos, utilizaremos la definición, dada por Maxwell, *Un cuerpo tiene ENERGÍA cuando tiene una capacidad para realizar un trabajo.*

7.2. Manifestaciones de la Energía

La Energía puede manifestarse básicamente en tres formas: Energía cinética (en virtud de su movimiento), Energía potencial (en virtud de su posición) y Energía radiante (Ondas electromagnéticas). Las dos últimas, a su vez, incluyen una gran diversidad de manifestaciones.

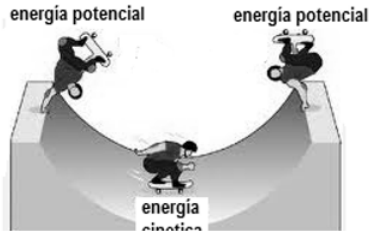
7.2.1. Energía Cinética

Es la Energía asociada al movimiento de traslación, rotación, vibración, etc. Todo objeto o sistema físico en movimiento posee una cierta cantidad de Energía cinética. Es una cantidad relativa porque el valor de la

velocidad es relativo.

7.2.2. Energía Potencial

Es la energía asociada a la interacción entre los cuerpos. Depende de las posiciones relativas entre los cuerpos.



Energía potencial gravitatoria

Energía potencial elástica

Energía potencial electrostática

7.2.3. Energía Radiante

Es la Energía que transportan las ondas electromagnéticas como la luz, las infrarrojas, las ultravioletas, las de radio y los rayos X, entre otras. Cada tipo de onda transporta distinta cantidad de Energía. Entre todas conforman el denominado “espectro electromagnético”. Los objetos concretos no poseen Energía radiante. La absorben o liberan y se transporta por ondas

7.3. Principios de Conservación de la Energía

Antes de enunciar el principio de conservación de la energía mecánica, es necesario definir que es un sistema y que tipos de sistemas existe.

7.3.1. Sistema

Porción del Universo cuyos límites y elementos que lo integran se eligen arbitrariamente para su estudio. En todo sistema los elementos que lo constituyen están relacionados entre sí.

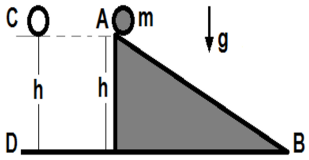
Los sistemas pueden clasificarse de acuerdo al tipo de interacciones que establecen con el medio exterior

- **Abierto**, es aquel en el que se intercambia materia y energía con otro sistema externo (el medio exterior). Es el caso de los seres vivientes. El ser humano ingiere alimentos (materia), y desecha materia (sudor, excrementos); absorbe y radia energía.
- **Cerrado**, es aquel en el que se intercambia energía pero no materia con el medio exterior. Una olla arrocera cociendo arroz., Las comunicaciones que hace un submarino sumergido.
- **Aislado**: es el sistema que no intercambia materia ni energía con el medio exterior.
- **Adiabático**, aquel que permite intercambio de materia pero no de energía.

¿Qué tipo de sistema es el Universo?

7.3.2. Fuerzas Conservativas

Las fuerzas conservativas son aquellas en las que el trabajo a lo largo de un camino cerrado es nulo. El trabajo depende de los puntos inicial y final y no de la trayectoria.



Considere un objeto de masa m que se deja caer desde el reposo desde el punto A por un plano inclinado sin rozamiento; otro objeto también de masa m que se deja caer desde C, que se encuentra a la misma altura de A. Observe que las trayectorias que recorren los objetos son diferentes, sin embargo, el trabajo que realiza la fuerza de la gravedad para trasladar los objetos, hasta los puntos B y D, que se encuentran a la misma altura, es el mismo. Esto es:

$$W_{AB} = mgh = W_{CD} = mgh \tag{7.1}$$

Por lo tanto, la fuerza gravitatoria es una fuerza conservativa. Son ejemplos de fuerzas conservativas la fuerza elástica, la fuerza electrostática, la fuerza magnética, etc. La fuerza de fricción es NO conservativa.

7.4. Principio de Conservación de la Energía Mecánica

Es importante investigar qué es la energía, pero mucho más importante es entender su comportamiento: como se transforma. Podemos entender mejor casi cualquier proceso o cambio que se produce en la naturaleza si lo analizamos en términos de su transformación de una forma a otra.

El Principio de Conservación de la Energía se puede enunciar de la siguiente manera:

Si en un sistema sólo existen fuerzas conservativas, la cantidad de Energía Mecánica total al principio de una

transformación es igual a la Energía Mecánica total al final de dicha transformación. La Energía Mecánica se conserva.

Cuando una fuerza (F) se aplica a un cuerpo, el trabajo realizado (W) puede incrementar la energía cinética el cuerpo:

$$W = \Delta E_K \tag{7.2}$$

ó, en el caso de que la fuerzas sean conservativas pueden realizar un trabajo para incrementar la energía potencial de la partícula:

$$W = -\Delta E_P \tag{7.3}$$

Igualando estas expresiones, tenemos:

$$\Delta E_k = -\Delta E_P \tag{7.4}$$

$$E_k - E_{ko} = -(E_P - E_{Po}) \tag{7.5}$$

Transponiendo términos y reagrupando,

$$E_k + E_P = E_{ko} + E_{Po} \tag{7.6}$$

La suma de los términos de la izquierda es la energía al final del proceso, y el de la derecha, es la energía al inicio del proceso. Esto es,

$$E_{\text{final}} = E_{\text{inicial}} \tag{7.7}$$

$$E = \text{constante} \tag{7.8}$$

Si después de una serie de transformaciones o procesos, una cantidad permanece constante, se dice que se conserva. Por lo tanto, la energía mecánica se conserva, si las

fuerzas que actual en el sistema son conservativas.

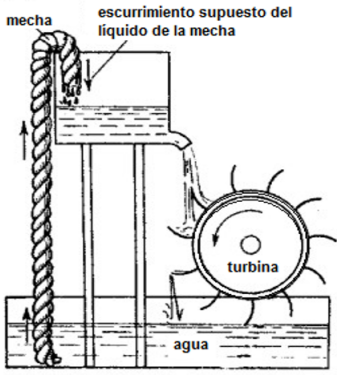
Si la energía no se pierde y sólo se transforma, ¿el Universo ha existido siempre?

7.5. Teorema del Trabajo y la Energía

Si en el sistema, además de las fuerzas conservativas, existen fuerzas no conservativas, la energía inicial es igual a la energía final más el valor absoluto del trabajo realizado por las fuerzas no conservativas, W_{NC},

$$E_{\text{inicial}} = E_{\text{final}} + |W_{NC}|$$

Observe que el efecto del trabajo realizado por las fuerzas conservativas es disminuir la energía del sistema.
Analice el sistema mostrado en la figura adjunta. ¿es posible que la turbina se mueva permanentemente?



7.6. Energías No Renovable

La energía no renovable, es el tipo de energía que se obtiene de un recurso natural limitado, por lo que una vez que éste se agote, no podrá sustituirse. Proceden de combustibles fósiles o nucleares: petróleo, gas natural, carbón, uranio, etc. Actualmente la velocidad de extracción y consumo, es muchísimo mayor que su capacidad de regeneración.

La capacidad de liberar la energía los combustibles fósiles y nucleares ha permitido el inmenso desarrollo que venimos experimentando a nivel mundial. Sin embargo, el acceso a las fuentes de energía no es equitativo y su consumo es un índice de pobreza y subdesarrollo, mal mundial que de no resolverse amenaza con una disgregación social. Asimismo, la utilización indiscriminada de los combustibles fósiles es uno de los responsables del cambio climático y las terribles consecuencias a las que nos enfrentamos como humanidad, sino somos capaces de producir energías limpias y renovables.

7.7. Energías Renovables

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque

son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la hidroeléctrica, eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, la biomasa y los biocombustibles

Dos caras de la mala distribucion de la riqueza que produce el hombre: mientras un niño estudia con velas, en el otro lado de mundo, el vicio consume millones de joules de energía

7.7.1. Energía Hidroeléctrica

La energía potencial acumulada en los saltos de agua puede ser transformada en energía eléctrica. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía de los ríos para poner en funcionamiento unas turbinas que mueven un generador eléctrico.

La figura muestra la represa de Gallito Ciego, ubicada en Yonan-Tembladera, posee una potencia instalada de 34 me-

gawatts. Su producción anual es de 150 gigawatts-hora. Sus dos turbinas giran al recibir el agua que cae desde una altura bruta de 83 metros, con un caudal de 42 metros cúbicos por segundo.

7.7.2. Energía Eólica

La energía eólica es la energía obtenida de la fuerza del viento, es decir, mediante la utilización de la energía cinética generada por las corrientes de aire. La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas.

En Malabrigo se ha instalado un aerogenerador de 250 kW el cual fue instalado en 1996, teniendo una eficiencia de 36 %, dentro del proyecto del bosque eólico de Malabrigo de 40 MW. Se obtiene a través de las turbinas eólicas que son las que convierten la energía cinética del viento en electricidad por medio de aspas o hélices que hacen girar un eje central conectado un generador eléctrico.

7.7.3. Energía Solar

La energía total incidente en un día completo puede superar los 8 kWh/m^2 en nuestra latitud. La radiación solar puede ser utilizada en su forma energéticamente directa

o bien a través del calor que lleva. Estas dos formas de energía del sol, fotónica y calorífica, son las que distinguimos cuando hablamos de manera genérica de energía solar.

Recogiendo de forma adecuada la radiación solar, esta puede transformarse en otras formas de energía como energía térmica o energía eléctrica utilizando paneles solares.

Mediante colectores solares, la energía solar puede transformarse en energía térmica, y utilizando paneles fotovoltaicos la energía luminosa puede transformarse en energía eléctrica.

7.7.4. Geotérmica

La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. Parte del calor interno de la Tierra (5000 ^{0}C) llega a la corteza terrestre. En algunas zonas del planeta, cerca de la superficie, las aguas subterráneas pueden alcanzar temperaturas de ebullición, y, por tanto, servir para accionar turbinas eléctricas o para calentar.

7.7.5. Mareomotriz

Es la energía renovable producida por las olas del mar, las mareas, la salinidad y las diferencias de temperatura del

océano. El movimiento del agua en los océanos del mundo crea un vasto almacén de energía cinética o energía en movimiento. Esta energía se puede aprovechar para generar electricidad que alimente las casas, el transporte y la industria. Los principales tipos son:

7.7.6. La Biomasa y los Biocombustibles

Por biomasa entendemos el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de ésta.

La biomasa tiene en común que deriva directa o indirectamente del proceso de la fotosíntesis. Por este motivo, se la considera una fuente de energía renovable. Según su origen, la biomasa se clasifica en biomasa natural, biomasa

residual y los cultivos energéticos.

Los biocombustibles son alcoholes, éteres, esteres y otros productos químicos que provienen de estos compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa) que se extraen de plantas silvestres o de cultivo. El término biocombustible se aplica tanto a los combustibles destinados a producir electricidad como a los que se utilizarán en los medios de transporte.

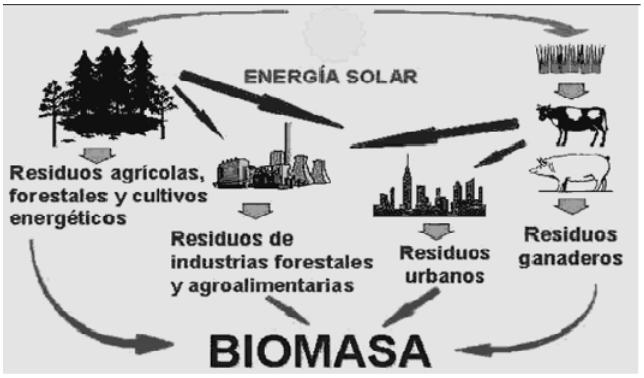


Figura 7.1:

7.7.7. Guía del Consumo y Facturación de la Energía

La energía es cada vez más cara y más escasa, aparte de que su transformación implica necesariamente contaminación ambiental. Por lo que, debemos tener conciencia ecología y responsabilidad con nuestro medio ambiente. El Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERMIN) ha publicado un folleto educativo que nos permite calcular el consumo eléctrico domestico de los aparatos electrodomésticos que se tienen en un hogar.

Como ejemplo, vamos a calcular cuanta energía consume un foco ahorrador de 20 W y una lámpara incandescente de 100 W, ambas prendidas cinco horas diarias.

1. Convertimos la potencia del foco ahorrador y de la lámpara incandescente de Watt a kilowatts (kW)

- Foco ahorrador: $20W = 0,02kW$
- Lámpara incandescente: $100W = 0,1kW$

2. Calculamos la cantidad de horas que están prendidos al mes:
   - Foco ahorrador: 5 horas por 30 días= 150 horas
   - Lámpara incandescente: 5 horas por 30 días=150 horas
3. Calculamos la energía consumida al mes:
   - Foco ahorrador: 0,02kWx150h = 3 kWh
   - Lámpara incandescente: 0,1Wx150h= 15 kWh
4. Si consideramos un costo de 0,35 S/./kWh, tenemos:
   - Foco ahorrador: 3 kW- h x 0,35 S/./kWh = S/. 1,05 soles
   - Lámpara incandescente: 15 kWh x 0,35 S/./kWh =S/.5,25 soles
5. Calculamos la diferencia de costo, tendremos un ahorro mensual de:
   - Ahorro mensual = S/4,2 soles.
   - Ahorro anual= S/4,2 soles x 12 meses = 50,4 soles
6. Tiempo de vida de:
   - Foco ahorrador: 8000 horas
   - Lámpara incandescente: 1000 horas.

Entonces, ¿nos pasamos a focos ahorradores?
¡Seamos responsables con el consumo de energía, el planeta te lo agradecerá, y tu bolsillo también!
CALCULA TU CONSUMO DE ENERGÍA

Cocina eléctrica de 4 hornillas 4500 W
Ducha eléctrica 3500 W
Terma 1500 W
Secadora 1200 W
Microondas 1100 W
Plancha 1000 W
Olla arrocera 1000 W
Cafetera 800 W
Aspiradora 600 W
Lavadora 500 W
Congeladora 500 W
Electrobomba 375 W (1/2 HP)
Refrigeradora 350 W
Computadora 300 W
Licuadora 300 W
TV 20" 120 W
Equipo de sonido 80 W
Ventilador 50 W
Radiograbadora 30 W
DVD 20 W
Radio-reloj 10 W

Figura 7.2:

Sesión 8

Cantidad de Movimiento

René Descartes (1596 - 1650)

Filósofo, matemático, físico y fisiólogo francés, René Descartes nació en La Haye en Touraine, Francia, en 1596. Miembro de una familia relativamente acomodada, tuvo una educación privilegiada en el colegio La Fléche, dirigido por los jesuitas, quienes lo ponen al tanto de los últimos descubrimientos científicos. Sirvió como voluntario en el ejército, trasladándose luego a los países bajos donde pasó 20 años entregado a sus preocupaciones científicas y filosóficas.

La filosofía de Descartes se halla vinculada a su matemática, cosmogonía y física. En matemática Descartes es uno de los creadores de la geometría analítica, junto con Pierre de Fermat. En mecánica, señaló el carácter relativo del movimiento y del reposo, formuló la ley de acción y la reacción, así como la ley de la conservación de la cantidad de movimiento, que conocemos como momento o momentum, como una propiedad básica que no se crea ni se destruye, postulando una conservación total de dicha cantidad que solo se transfiere de un cuerpo a otro por medio de colisio-

nes según reglas fijas.

El desenlace de su muerte se debió a que contrajo una neumonía porque, obligado a esperar a la intemperie la entrada al Palacio de la Reina Cristina, a quien le daba clases de filosofía por la madrugada, contrajo una neumonía que finalmente le produjo la muerte cuando corría el año 1650.

Introducción

Los científicos no siempre han realizado su trabajo con el suficiente apoyo, ni con plena libertad. Muchas veces se han visto enfrentados a poderes, como los dogmas religiosos o poderes constituidos que por algún interés particular se oponen al avance del conocimiento científico.

Dos episodios dramáticos, son el proceso contra el filósofo Giordano Bruno, que fue quemado vivo en la hoguera principalmente por sus enseñanzas sobre los múltiples sistemas solares y sobre la infinitud del universo y, el proceso a Galileo Galilei (1564-1642) quien en su libro Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, en el que defiende el modelo heliocéntrico propuesto por Copérnico, en el cual la Tierra y los planetas giran alrededor del Sol, y ridiculiza el geocentrismo, que coloca a la Tierra en el centro fijo del universo y que está basado en la física aristotélica y, sobre todo, en el modelo ptolemaico, el que mejor encajaba con las Sagradas Escrituras. Este clima de mediocridad e intolerancia de la edad media, expulsa la revolución científica de Italia.

Primero llegó a Francia, al filósofo René Descartes, profundamente conocedor de la geometría y del principio de la inercia. Descartes creía en la idea de un Universo mecáni-

co, un universo que funcionaba como si fuese un reloj. Pero como la analogía fallaba por la necesidad de dar cuerda al reloj desde fuera, Descartes pensó que tenía que haber un principio que mantuviera al universo funcionando permanentemente sin injerencia externa. Así, dio con la idea de que la cantidad de movimiento del Universo era una cantidad fija: si un cuerpo reducía su velocidad y se paraba, otro se aceleraría y empezaría a moverse. Esa idea se convirtió en el Principio de Conservación de la Cantidad de Movimiento, una de las leyes más universales dela física, principio que nos permite analizar colisiones entre carros, el movimiento de cohetes, desintegraciones radiactivas, o responder preguntas como ¿Por qué no es más doloroso caerse sobre un piso de madera que en uno de cemento?, ¿Por qué retrocede el cañón cuando se dispara?, ¿Por qué dos bolas de billar cuando colisionan se separa en ángulos rectos?

8.1. Segunda Ley de Newton y la Cantidad de Movimiento

Si tenemos un cuerpo de masa m, sobre el que actúan un conjunto de fuerzas no equilibradas, la segunda ley de Newton se escribe:

$$\vec{F} = m\vec{a} \tag{8.1}$$

Si la masa es constante, entonces ésta ecuación puede reescribirse, como:

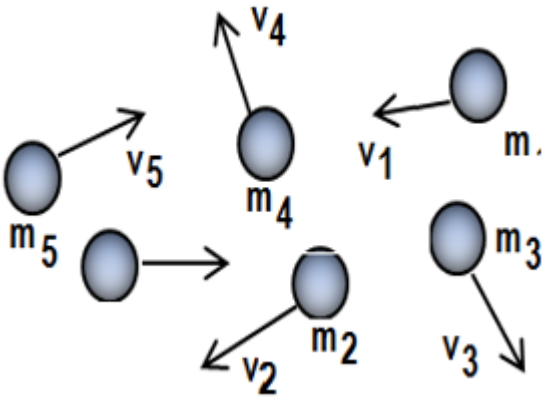
$$\vec{F} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} \tag{8.2}$$

Por lo tanto, la fuerza neta que actúa sobre un cuerpo es igual a la variación con respecto al tiempo de $\vec{p}$.

$$\vec{p} = m\vec{v} \tag{8.3}$$

Esta cantidad, se denomina cantidad de movimiento; es una cantidad vectorial que contiene mucha más información que la sola velocidad del móvil. Puede considerarse como una medida de la dificultad para detener un cuerpo, es decir, para llevarlo al reposo. Así por ejemplo, es más difícil detener a un camión que va a 100 km/h, que a un auto que se mueve a la misma velocidad. La figura adjunta muestra una serie de vehículos transitando por una carretera: cada uno de ellos tiene un valor de cantidad de movimiento.
¿pueden un camión y un patín tener la misma cantidad de movimiento?
Si tenemos un sistema donde existen N partículas, entonces la cantidad de movimiento del sistema es la suma vectorial de la cantidad de movimiento de cada una de las partículas del sistema.

$$\vec{p} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 + ... + m_n\vec{v}_n \tag{8.4}$$



La unidad de medida es el producto de una unidad de masa por una unidad de velocidad, por ejemplo, En SI: [p]=kg.m/s.
No tiene un nombre especial.

Observaciones

- Los cambios en la cantidad de movimiento pueden suceder cuando hay un cambio en la masa, en la velocidad o en ambas.
- La masa suele permanecer constante, por tanto suele cambiar la velocidad.
- Si cambia la velocidad es porque hay aceleración, y si hay aceleración es debido a una fuerza neta actuando sobre el objeto . Pero también depende del tiempo en el que actúe la fuerza.
- Si una fuerza pequeña se aplica durante poco tiempo, se producirá un cambio pequeño de su cantidad de movimiento.
- Pero si esa misma fuerza se aplica durante un tiempo más largo, el cambio será mayor. Es decir, la variación de la cantidad de movimiento depende de la fuerza y del intervalo de tiempo aplicado.

8.1.1. Principio de conservación de la cantidad de movimiento

Cuando la fuerza externa que actúa sobre un sistema de partículas es cero, el cambio con respecto al tiempo de la cantidad de movimiento total también es cero, por lo tanto, la cantidad de movimiento permanece constante.

$$\vec{p} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 + ... + m_n\vec{v}_n = \text{constante} \qquad (8.5)$$

Este resultado se conoce como Principio de Conservación de la Cantidad de Movimiento, y se puede expresar como sigue:
"En un sistema aislado, en el que la fuerza externa resultante sobre el sistema es cero, por tanto, sólo actuan fuerzas internas, el momento lineal total del sistema permanece constante".

Observaciones

- Esta es una de las leyes más universales, y por lo tanto, más importantes de la física.
- Es, en general, de mayor amplitud que el principio de conservación de la energía mecánica, debido que las fuerza internas que una partícula del sistema ejerce sobre otra puede ser conservativa o no conservativa.
- Las fuerzas no conservativas pueden hacer variar la energía mecánica del sistema, pero la cantidad de movimiento permanece constante.

¿Será posible hacer un disparo con una pistola, sin que el arma no sufra retroceso? ¿Será constante el momento lineal del universo?

8.2. Choque de dos partículas

Supongamos que dos partículas de masas m1 y m2, se mueven al encuentro, con velocidades v1 y v2, respectivamente. La figura muestra los eventos antes, durante y después de la colisión. Antes de la colisión, los objetos van al encuentro; después el movimiento de las partículas dependerá de los valores específicos de las masas y velocidades que tenían los objetos al momento de colisionar.

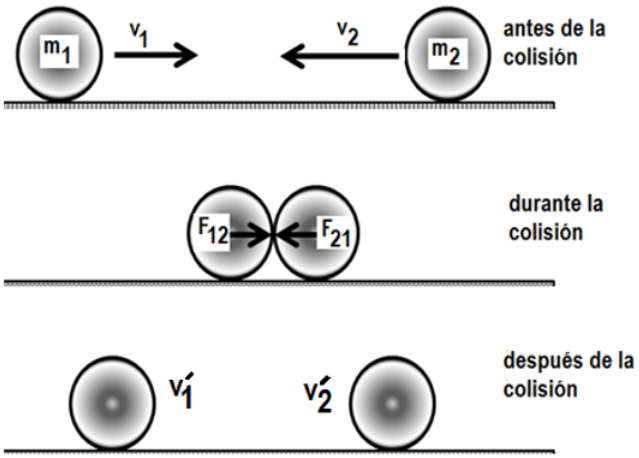


Figura 8.1:

Un Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) para cada partícula, revela que las fuerzas que actúan sobre cada objeto, son externas (el peso y la reacción normal) e internas: acción y reacción F_{12} sobre el objeto de masa m_2, y F_{21} sobre el objeto de masa m_1. Las fuerzas externas están equilibradas, en cada caso.
De acuerdo a la tercera ley de Newton:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \tag{8.6}$$

$$m_2 \left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)_2 = -m_1 \left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)_1 \tag{8.7}$$

Como las fuerzas actúan simultáneamente, podemos sim-

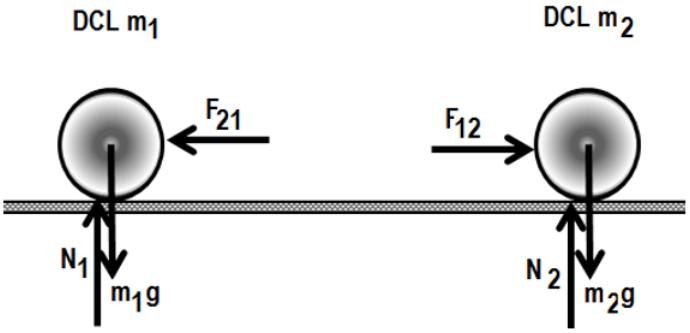


Figura 8.2:

plificar los intervalos de tiempo, tenemos:

$$m_2(\Delta v)_2 = -m_1(\Delta v)_1 \tag{8.8}$$

$$m_2 v\prime_2 - m_2 v_2 = -(m_1 v\prime_1 - m_1 v_1) \tag{8.9}$$

Transponiendo términos y reagrupando,

$$m_2 v\prime_2 + m_1 v\prime_1 = m_2 v_2 + m_1 v_1 \tag{8.10}$$

La suma de términos de la izquierda es la cantidad de movimiento después de la colisión, y la suma de términos de la derecha es la cantidad de movimiento antes de la colisión.

$$p\prime_1 + p\prime_2 = p_1 + p_2 \tag{8.11}$$

$$P_{\text{final}} = P_{\text{inicial}} \tag{8.12}$$

$$P = \text{constante} \tag{8.13}$$

Por lo que podemos concluir, que en la colisión de dos partículas puntuales, efectivamente se verifica la conservación de la cantidad de movimiento.

El resultado que se ha obtenido para dos partículas se generaliza para un sistema de partículas.

$$m_3v\prime_3 + m_2v\prime_2 + m_1v\prime_1.... = m_3v_3 + m_2v_2 + m_1v_1.... \quad (8.14)$$

NOTA: la cantidad de movimiento es una magnitud vectorial, por eso, en las ecuaciones hay que tener presente que tanto la cantidad de movimiento como la velocidad, son vectores.

8.3. Impulso

Escribir la segunda ley de Newton en términos de la cantidad de movimiento permite, además de hacer interpretaciones adicionales, obtener nuevas magnitudes físicas que se deriva de ella.

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$

Si despejamos el intervalo de tiempo, podemos definir el impulso ($\vec{I}$), sobre una partícula

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p} = \vec{I} \quad (8.15)$$

El impulso puede entenderse como el efecto que produce una fuerza actuando durante un corto intervalo de tiempo sobre una partícula:

$$\vec{I} = \vec{F}\Delta t \quad (8.16)$$

Alternativamente, podemos decir que un impulso actuando sobre una partícula, le cambia su cantidad de movimiento.

$$\vec{I} = \Delta\vec{p} \quad (8.17)$$

En esta aproximación, se supone que una fuerza media que actúan sobre la partícula es muy grande pero de muy corta duración. Esta aproximación es de gran utilidad cuando se

estudian los choques, por ejemplo, de una pelota con una raqueta o un karateca rompiendo espectacularmente ladrillos. El tiempo de colisión es muy pequeño, del orden de centésimas o milésimas de segundo, y la fuerza promedio que ejerce la raqueta, o el karateca, es de varios cientos o miles de newtons. Esta fuerza es mucho mayor que la gravedad, por lo que se puede utilizar la aproximación del impulso. Cuando se utiliza esta aproximación es importante recordar que la cantidad de movimiento inicial y final se refieren al instante antes y después de la colisión, respectivamente.

NOTA: el impulso necesario para detener un objeto y después "lanzarlo de regreso" es mayor que el que se requiere para sólo detenerlo.
La figura muestra una la turbina Pelton. Observe que sus paletas parecen cucharones; en ella cae el agua de un dique y se genera movimiento. Si las paletas fuesen planas, ¿en qué caso se tendría mayor eficacia para lograr el mayor torque? ¿Por qué? ¿Qué tiene en común la explicación de este hecho con explicación con explicar la eficacia del karateca para romper los ladrillos?

Una aplicación importante del teorema del impulso-cantidad de movimiento es la instalación del airbag(bolsa de aire) como un complemento al cinturón de seguridad en los automóviles. Es sistema de seguridad pasiva del vehículo que

amortigua los golpes cuando hay algún choque, y consiste de una bolsa que se infla automáticamente cuando el auto choca disminuye su velocidad debido a la colisión.

8.4. Colisiones y Choques

Una de las aplicaciones más importantes de la conservación de la cantidad de movimiento, es el estudio de las colisiones. Decimos que hay colisión entre dos objetos cuando al aproximarse el uno al otro interaccionan fuertemente durante un tiempo muy corto. Al pasar los cuerpos uno cerca del otro interaccionan entre sí, y como resultado de ello, pueden originarse los procesos más diferentes: los cuerpos pueden unirse, poder surgir nuevos cuerpos y por último, puede ocurrir un choque en el cual los cuerpos, después de cierto acercamiento, se alejan de nuevo sin variar el estado interno de los mismos.

Tipos de Colisiones

Los choques o colisiones se pueden clasificar en elásticos, inelásticos, plásticos o completamente inelásticos.

Tipo de Colisión	Energía	Cantidad de movimiento	Estado	Coef. de restitución
Elástico	Se conserva	Se conserva	No deformado permanentemente se mueven separados después de la colisión	1
Inelástico	no conserva	no conserva	Deformado permanentemente. Se mueven separados después de la colisión.	$0 < e < 1$
Completamente inelástico	no conserva	no conserva	Deformado permanentemente. Se mueven juntos después de la colisión.	0

8.5. Coeficiente de restitución

En general un, un choque es una situación intermedia entre un choque elástico y un choque plástico en el que la velocidad relativa después del choque es cero. El coeficiente de restitución es una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas clásicas, en consecuencia, de la elasticidad de una colisión.

Para obtener una expresión, supongamos que las esferas

mostradas en la figura realizan un choque frontal y elástico. Entonces, se conservan tanto la energía cinética, como la cantidad de movimiento.

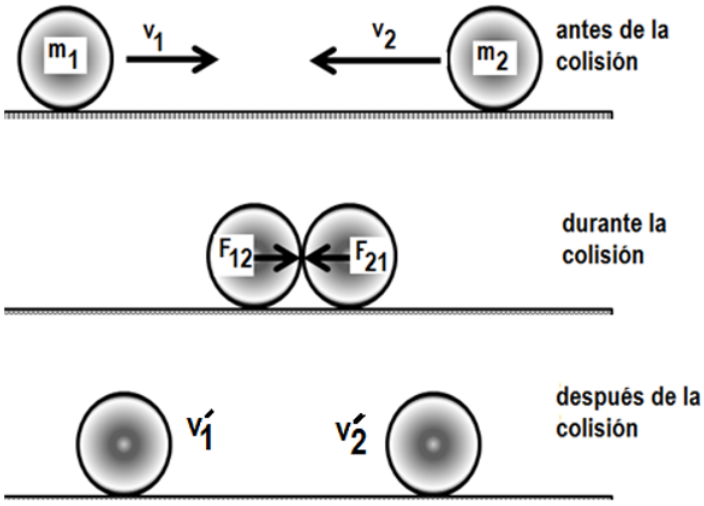


Figura 8.3:

Conservación de la energía cinética

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1v'^2_1 + \frac{1}{2}m_1v_2'^2 \tag{8.18}$$

Conservación de la cantidad de movimiento

$$m_1v_1^2 + m_2v_2^2 = m_1v_1' + m_1v_2' \tag{8.19}$$

Factorizando m1 y m2, en (8.18) y dividiéndola entre (8.19), tenemos,

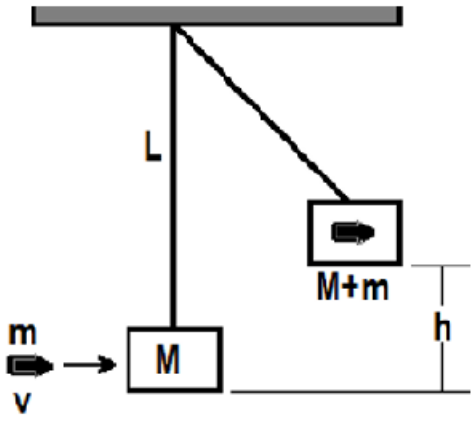
$$1 = -\frac{(v_2' - v_1')}{v_2 - v_1}$$

Si generalizamos, obtenemos:

$$e = -\frac{(v_2' - v_1')}{v_2 - v_1} \tag{8.20}$$

En esta expresión vemos que el numerador es la velocidad relativa de las partículas y después de la colisión, el denominador es la velocidad relativa de las partículas antes de la colisión.

- Si la velocidad relativa después de la colisión es cero, el coeficiente de restitución es cero; los cuerpos se mueven juntos después de la colisión, y quedan permanentemente deformados con la consiguiente pérdida de energía cinética: choque completamente inelástico.



- Si la velocidad relativa después de la colisión es igual a menos la velocidad relativa antes de la colisión, el choque es elástico; los cuerpos se deforman temporalmente, y luego se mueven separados el uno del otro, sin que la energía del sistema se altere: choque elástico.

- Si la velocidad relativa después del choque es menor que la velocidad relativa antes del choque, con signo cambiado, el choque es inelástico; los cuerpos quedan deformados permanentemente, con la consiguiente pérdi-

da de energía y se mueven separadamente: choque inelástico.

Parte II

SUMATIVO II

Sesión 9

Hidrostática

El gran Arquímedes (287 a.C - 212 a.C)

A diferencia de muchos filósofos griegos que despreciaban el experimento por considerarlo poco relevante frente a la capacidad de razonamiento que debería tener un intelectual para la explicación de las cosas, Arquímedes destaca porque a su pensamiento abstracto unió la práctica. Él hizo muchos descubrimientos e inventos, como el empuje hidrostático, la espiral de Arquímedes, el tornillo de Arquímedes, la reflexión de la luz en espejos, las leyes de la palanca, etc. Es famosa la frase que se le atribuye, " dame una palanca y un punto de apoyo y moveré el mundo", o el famosísimo grito de alegría "eureka, eureka.." cuando desnudo corría por las calles de Siracusa cuando descubrió como determinar el empuje hidrostático que ejerce el agua sobre un cuerpo que flota en él.

Arquímedes estudió con los discípulos de Euclides en Alejandría, que en aquella época era considerada como el centro de investigación más importante del mundo conocido. Ello representó una enorme influencia en su forma de en-

tender las matemáticas. El resto de su vida lo paso en Siracusa, su ciudad natal, dedicado por completo a sus investigaciones.

Su vasta obra lo coloca como el pensador y científico más importante del mundo antiguo.

Murió atravesado por la espada de un soldado durante la invasión romana a su tierra natal, mientras resolvía un problema matemático.

Introducción

En esta sesión de clase estudiaremos el comportamiento de los fluidos en equilibrio estático. Se denominan fluidos los cuerpos que no tienen forma propia, sino que se adaptan a la forma de la vasija que los contiene, son líquidos o gases. Los líquidos tienen forma variable, volumen constante, son poco compresibles, y ejercen, a causa de su peso, presiones sobre las paredes del recipiente que los contienen. Se deforman con facilidad y su superficie libre tiene forma definida. Los gases no tienen volumen constante y son fácilmente compresibles.

La parte de la física y de la mecánica de fluidos que se encarga de este estudio de los fluidos en equilibrio, se denomina Hidrostática. Para estar en equilibrio estático, el fluido debe estar en reposo o moviéndose de forma que entre partículas de fluido adyacente no haya movimiento relativo. Un fluido en equilibrio estático, por lo tanto, sólo está influido por fuerzas debidas a la presión y a su propio peso, y quizá por fuerzas que aparecen cuando el sistema donde se encuentra el fluido está en un sistema acelerado. En tal caso hay que tener en cuenta, adicionalmente, las fuerzas

de inercia ocasionadas por aceleraciones impuestas al fluido en forma externa.

El caso más simple ocurre cuando el fluido está en reposo. Por ejemplo, si un líquido se envasa en un recipiente y se deja en reposo hasta que desaparecen todos los movimientos relativos, el fluido está en equilibrio estático. En estas condiciones, no hay fuerza resultante que actúe en el fluido.

El estudio de la Hidrostática, nos capacitará para poder comprender y explicar muchos fenómenos físicos que observamos diariamente, como la flotación de los barcos, porque los cuerpos menos densos están por encima de los más densos, como multiplican las máquinas hidráulicas la fuerza, como flotan los peces y submarinos, etc.

9.1. Nauraleza de los fluidos

La característica fundamental de los fluidos es su fluidez. Es decir, la capacidad de cambiar su forma ante cualquier esfuerzo tangencial que se haga sobre ellos. En ese sentido, los fluidos no tienen forma propia, sino que se adaptan a la forma de la vasija que los contiene, son líquidos o gases.

Dentro de los fluidos, la principal diferencia entre líquidos y gases está la diferente capacidad de compresibilidad de los mismos.

Gases. Los gases presentan gran compresibilidad, que influye sobre las características del flujo, ya que tanto el volumen como la densidad varían con facilidad. En el caso de los gases el movimiento térmico vence a las fuerzas atractivas, y por tanto tienden a ocupar todo el volumen del recipiente que los contiene.

Líquidos. En el caso de los líquidos, por el contrario, la compresibilidad es muy débil. Esto es debido a que las fuerzas atractivas entre las moléculas del líquido vencen al movimiento térmico de las mismas colapsando las moléculas y formando el líquido. Al contrario de los gases, que tienden a ocupar todo el volumen que los contiene, los líquidos tienden a formar una superficie.

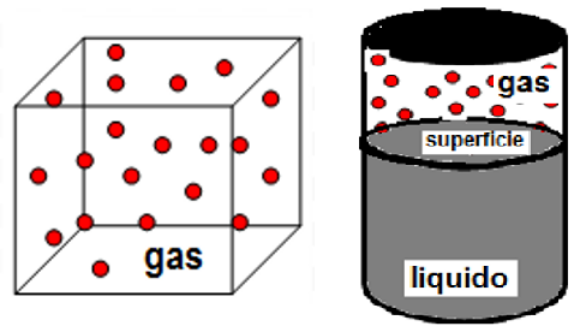


Figura 9.1:

9.2. Densidad

La densidad (ρ) de un cuerpo se define como su masa (m) por unidad de volumen (V).

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{9.1}$$

- $\rho_{\text{agua}} = 1g/cm^3 = 1000kg/m^3$
- $\rho_{\text{Hg}} = 13,6g/cm^3 = 13600kg/m^3$

Por regla general, la densidad varia para una misma sustancia liquida en funcion de la temperatura (a mayor temperatura, menor densidad) y de la presion(a mayor presion, mayor densidad). Efectivamente, un aumento de la temperatura implica un aumento del volumen por dilatacion, y un aumento de la presion, una disminucionde volumen por compresion, mientras que en ambos cass la masa permanece constante.

9.3. Densidad Relativa ó Densidad Específica

La densidad relativa se define como la razón de la densidad de una sustancia respecto a la densidad del agua.

$$\rho_r = \frac{\text{densidad de la sustancia}}{\text{densidad del agua}} \Longrightarrow \rho_r = \frac{\rho}{\rho_{\text{agua}}} \tag{9.2}$$

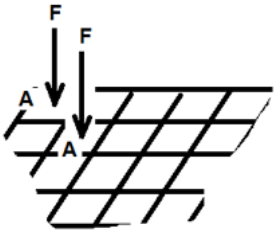
9.4. Peso Específico

El Peso específico de un cuerpo se define como su peso por unidad de volumen.

$$\gamma = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}} = \frac{mg}{v} = \rho g \tag{9.3}$$

9.5. Presión

La presión se define como la fuerza normal por unidad de área, de manera que aun cuando la fuerza misma sea moderada, la presión puede llegar a ser muy grande si el área es suficientemente pequeña.



Si llamamos (P) a la presión, (F) la fuerza resultante aplicada, (A) a la superficie donde actúa dicha fuerza, la presión, queda definida por:

$$P = \frac{F}{A} \tag{9.4}$$

Por definición, la presión es una magnitud escalar.

Unidad SI:
P se mide en pascales(Pa); F se mide en Newton (N); A se mide en(m^2) $\Longrightarrow [Pa] = \frac{[N]}{[m^2}$

En el caso, cuando un gas se mantiene en un depósito, sus moléculas se mueven y chocan contra sus paredes. Si una molécula golpea la pared, experimenta un choque elástico, lo cual significa que sus magnitudes de cantidad de movimiento y energía se conservan, pero cambia su dirección del movimiento, de manera que la pared debió ejercer una fuerza sobre la molécula de gas. Por lo tanto, la partícula de gas ejerció una fuerza opuesta de igual magnitud en la pared durante el impacto. La resultante de estas fuerzas, por unidad de área del recipiente es la presión del gas.

¿Cómo explicamos el simple proceso de cortar carne o clavar un clavo?

9.6. Presión Atmosférica

Uno de los problemas técnicos, inexplicables y por lo tanto irresolubles, de la época medieval, era la imposibilidad de elevar agua por medio de una bomba o sifón a una altura mayor de unos 10,33 metros a nivel del mar. El concepto fundamental que trababa la explicación al problema, era la afirmación aristotélica de que el aire no pesa y que además, la naturaleza le tiene horror al vacío (horror vacui).

Evangelista Torricelli, con un inteligente y simple experimento realizado en Florencia en 1644, demostró que el vacío existe y el aire pesa.

Un tubo de vidrio de un metro de longitud, abierto en un extremo, se llena con mercurio y se tapa con el dedo, se le da vuelta y se coloca en un recipiente que también contiene mercurio. Se observa que la columna de mercurio desciende pero se detiene a una altura de 76 cm. Torricelli afirma que el espacio creado por encima del mercurio en la columna está vacío y que es el peso del aire el que sostiene la columna de mercurio.

Torricelli afirmó que la columna de mercurio se mantiene debido al peso del aire que presiona sobre la superficie del mercurio en el recipiente, por fuera del tubo, forzando al mercurio a subir en el tubo ya que no hay aire en el interior del tubo y por tanto ninguna fuerza que la compense. Por tanto, de acuerdo a Torricelli, vivimos en el fondo de un océano de aire.

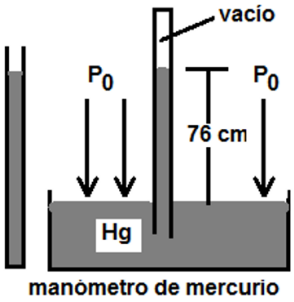
El experimento de Torricelli, es importante no sólo porque nos dio un sencillo método para la presión que la atmosfera ejerce sobre los cuerpos sumergidos en ella, además de

resolver el enigma de porque el agua no sube las allá de los 10,33 m, sino porque acabo con uno de los mitos aristotélicos que los intelectuales de la época no osaban contradecir.

Resultado del Experimento de Torricelli

El peso de una columna de aire al nivel del mar, a la temperatura de 0°C y a la gravedad existente a 45° de latitud, está equilibrado por el peso de una columna de mercurio de 760 mm de longitud.

$$P_o \equiv 760\text{mm de Hg} \equiv 1atm$$



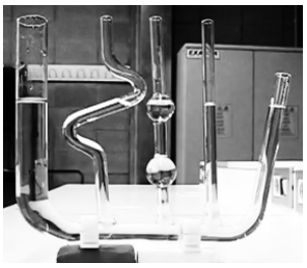
Otras unidades de presión

$$1\text{mm de Hg} \equiv 1\text{torr}$$

$$1\text{bar} \equiv 100kPa$$

9.7. Presión Hidrostática

La presión en un punto de un fluido es independiente de la orientación de la superficie que pasa a través del punto. La presión es un escalar y siempre actúa en ángulos rectos a una superficie dada.



Si un fluido está en reposo en un recipiente, todas las partes del fluido, deben encontrarse en equilibrio estático. Asimismo, todos los puntos que están a la misma profundidad deben hallarse a la misma presión.

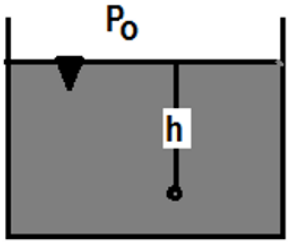
La presión ejercida por un líquido no depende de la forma, ni del volumen, ni de la forma del fondo del recipiente que lo contiene.

$$P_h = \rho gh \tag{9.5}$$

9.8. Presión Absoluta

Es la suma de todas presiones que se ejercen sobre una sustancia por cualquier mecanismo.

$$P = \frac{F}{A} + P_h + P_o + ... \tag{9.6}$$



Para el caso de un recipiente abierto a la atmosfera, que contiene un líquido, la presión a una profundidad, h, es:

$$P = P_o + \rho_{Hg} g h \tag{9.7}$$

9.9. Presión Manométrica

La presión manométrica se define como la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica.

$$P_m = P - P_0 \tag{9.8}$$

9.10. Manómetros

Cualquier instrumento que se use para medir la presión.

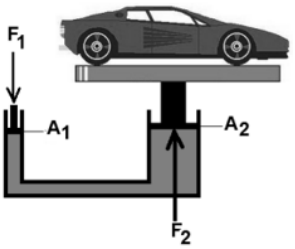
Figura 9.2:

9.11. Principio de pascal

Una propiedad importante de la presión es que se transmite a través del fluido; por ejemplo, si llenamos un globo con aire y lo oprimimos en un punto, la presión se incrementa en todos sus demás puntos. Esta propiedad de la transmisión de presión sin cambiar, es un hecho bien establecido experimentalmente, y una propiedad que poseen todos los fluidos. Blaise Pascal (1623-1662), enunció para los líquidos incompresibles lo que ahora denominamos en su honor, el Principio de Pascal (ya que fue enunciado de forma empírica, actualmente es un demostrable), el teorema

"La presión ejercida en un punto de un líquido se transmite íntegramente a todos sus puntos sin disminuir su valor"

Prensa y elevadores hidráulicos



Una prensa hidráulica utiliza la transmisividad de la presión de los fluidos para producir fuerzas grandes. Una prensa sencilla consta de dos cilindros conectados, de tamaños muy diferentes, cada uno con un pistón y llenado de aceite o agua

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 \tag{9.9}$$

Entonces, si $A_2 > A_1 \Longrightarrow F_2 > F_1$

La prensa hidráulica es una aplicación del principio fundamental de la Mecánica: la fuerza se multiplica a costa de mayor recorrido. La presión amplifica la fuerza que se aplica; en ese sentido, una prensa hidráulica es sólo una palanca hidráulica. Las siguientes figuras muestran algunas importantes aplicaciones de la hidráulica. Te imaginas cuanto ha ayudado a la humanidad el Principio de Pascal?

Figura 9.3:

Nota Importante:

La transmisión de la presión no ocurre en forma instantánea, pues depende de la velocidad del sonido en el medio y de la forma del recipiente. La velocidad del sonido es importante porque mide la rapidez a la que se propagan las perturbaciones de presión (el sonido es sólo una perturbación de presión pequeña que viaja a través de un medio). La forma del recipiente es importante porque las ondas de presión se refractan y reflejan desde las paredes, y este proceso incrementa la distancia y el tiempo que las ondas de presión necesitan para viajar.

9.12. Principio de Arquímdes

¿Te has preguntado como hacen los peces para ascender, descender o mantenerse flotando los peces en al agua? ¿Por qué flota el hielo en agua y, por supuesto, esos enormes moles tecnológicos llamados barcos y submarinos? Has notado también que cuando nos sumergimos en una piscina, aparentemente pesamos menos.

¿Cómo se explican estos fenómenos?

La explicación está en que los fluidos, líquidos y gases, ejercen una fuerza sobre los objetos sumergidos en ellos, llamada empuje hidrostático. Claro está que Arquímedes no descubrió la existencia de tal fuerza, lo extraordinario que descubrió es cómo calcular el empuje hidrostático.

El principio de Arquímedes establece:

"Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido es empujado hacia arriba con una fuerza que es igual al peso del líquido desalojado, que actúa verticalmente a través del centro de gravedad del fluido antes de ser desplazado".

Empuje Hidrostático (E) = Peso del fluido desalojado (W_d)

$$E = W_d = \rho_d V_d g \tag{9.10}$$

9.13. Flotación de los cuerpos

Consideremos una esfera de masa m y volumen V y densidad ρ. Si la sumergimos es un líquido de densidad ρ_L, una vez alcanzado el equilibrio, una de las posiciones finales será alcanzada. Aplicando las condiciones de equilibrio para cada caso, tenemos:

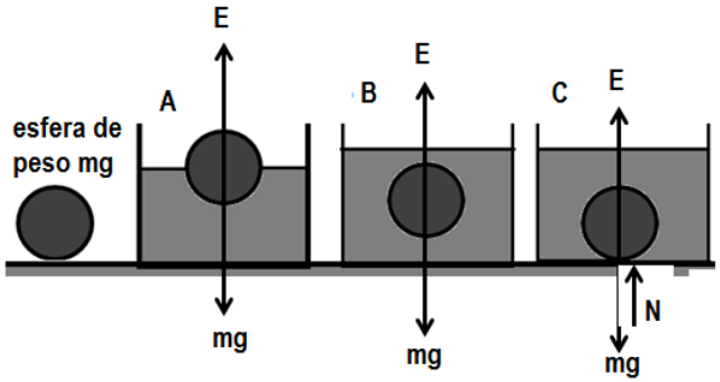


Figura 9.4:

Caso A Caso B Caso C

$$mg = E \qquad mg = E \qquad mg = E + N$$

$$mg = m_{fd} \qquad mg = m_{fd}g \qquad mg > m_{fd}g$$

Simplificando la aceleración de la gravedad, tenemos

$$m = m_{fd} \qquad m = m_{fd} \qquad m > m_{fd}$$

Reemplazando la masa por densidad y volumen,

$$\rho V = \rho_f V_{fd} \qquad \rho V = \rho_f V_{fd} \qquad \rho V > \rho_f V_{fd}$$

Dividiendo

$$\frac{\rho}{\rho_f} < \frac{V_{fd}}{V} \qquad \frac{\rho}{\rho_f} = \frac{V_{fd}}{\rho_f} \qquad \frac{\rho}{\rho_f} > \frac{V_{fd}}{V}$$

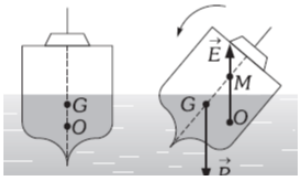
Finalmente, tenemos:

$$\frac{\rho}{\rho_f} < 1 \qquad \frac{\rho}{\rho_f} = 1 \qquad \frac{\rho}{\rho_f} > 1$$

Resultados que se conocen como condiciones de flotación: un cuerpo flotará en un líquido si su densidad relativa al fluido es:

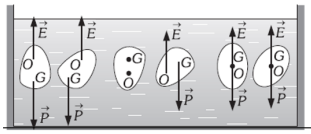
- menor que la unidad, el cuerpo flota con parte de él fuera de la superficie libre del líquido.
- igual a la unidad, el cuerpo flota en el seno del líquido en cualquier parte del líquido, sin tocar el fondo.
- mayor que la unidad, el cuerpo se hunde completamente en el líquido hasta llegar al fondo del recipiente.

Estabilidad de un cuerpo sumergido



Al estudiar la estabilidad de un cuerpo sumergido no solamente es importante conocer el valor del empuje, sino como actúa éste. Así, es de gran importancia conocer la capacidad de un cuerpo flotante de recuperar el estado de equilibrio una vez sacado del mismo. En el caso de un barco, por ejemplo, no nos sirve que el barco flote, sino la posición en que debe hacerlo.

El equilibrio existe cuando el centro de gravedad (G) del cuerpo sumergido y el centro del empuje (O) están en la misma vertical, pues en caso contrario, se origina un par de fuerzas que hace girar al cuerpo, hasta que las verticales correspondientes al peso y al empuje coinciden.



Para el estudio de la estabilidad basta considerar las tres posiciones siguientes de G

(centro de gravedad) y O (centro de empuje). 1. G debajo de O: equilibrio estable. (El par EP hace retornar al cuerpo a su posición primitiva). 2. G encima de O: equilibrio inestable. (El par EP hace girar al cuerpo 180^o). 3. G coincide con O: equilibrio indiferente. (No se origina ningún par).

Sesión 10

Hidrodinámica

Los Bernoulli (1654 - 1705)

El apellido Bernoulli, es uno de los raros casos en que varios sus integrantes han realizado notables aportes a la ciencia y, en consecuencia, a la humanidad. Jakob Bernoulli (Basilea, Suiza, 1654 - id., 1705), Johann Bernoulli (Basilea, 1667 - id., 1748) y Daniel Bernoulli (Groninga, Holanda, 1700 - Basilea, 1782). Jakob Bernoulli, el iniciador de la dilatada saga de los Bernoulli, nació en el seno de una familia de comerciantes procedentes de los Países Bajos.

En 1687 se hizo cargo de la cátedra de matemáticas en la Universidad de Basilea. Con su hermano, estudió las aportaciones de G. W. Leibniz al cálculo infinitesimal, el cual aplicó al estudio de la catenaria (la curva que forma una cadena suspendida por sus extremos), y en 1690 introdujo el término de integral en su sentido moderno.

Daniel Bernoulli, que se doctoró en medicina en Basilea (1721) con una tesis sobre la respiración, fue nombrado en 1725 profesor de matemáticas en la Academia de San Pe-

tersburgo; se trasladó a Rusia en compañía de su hermano Nikolaus, quien falleció al año siguiente de su llegada.

Autor de notables contribuciones a la teoría de las ecuaciones diferenciales, el tercer Bernoulli destacó sobre todo por su estudio de la mecánica de fluidos; su obra principal, Hydrodynamica, se publicó en 1738, aunque ya la había concluido en 1734. Contiene la idea de lo que más tarde se conoció como teorema de Bernoulli, así como los fundamentos de la moderna teoría cinética de los gases. Desde 1750 hasta 1776 ocupó la cátedra de física en Basilea; se distinguió por ilustrar sus clases con interesantísimos experimentos que le valieron grandes éxitos de audiencia.

Introducción

En esta sesión estudiaremos el comportamiento de los fluidos en movimiento. La mecánica de fluidos es la parte de la física que se encarga del estudio del comportamiento de los fluidos bajo la acción de fuerzas aplicadas. Basta observar nuestro entorno para darnos cuenta de la importancia que tiene el flujo de los fluidos: el viento que sopla, los ríos que fluyen, las corrientes marinas, las nubes que pasan, el humo de un cigarrillo, la sangre en nuestro cuerpo, el movimiento de los peces en el agua, o el de las aves en el aire, los huracanes, tifones, etc.

En las aplicaciones ingenieriles, el agua que llega a nuestros hogares través de las tuberías, el diseño aerodinámico de aviones, automóviles, barcos, aparatos de propulsión, sistemas de aire acondicionado, intercambiadores de calor, vertederos, represas, sistemas de riego, efecto invernadero, el movimiento del agua en los lavatorios.

No menos importante, es el mantenimiento de las funciones vitales que involucra el flujo de fluidos, pues desde el transporte de oxígeno y nutrientes a través del cuerpo están regidos por el flujo de aire y sangre. Por lo tanto, el flujo de fluidos es crucial para conformar el mundo que nos rodea, y su comprensión integral es uno de los retos más grandes de la física y la ingeniería, para ello, en general interesa encontrar la fuerza requerida para mover un cuerpo sólido a través de un fluido, o la potencia necesaria para mover un fluido a través de un sistema.

Para avanzar en la comprensión de la mecánica de fluidos y en la solución de problemas, con frecuencia es necesario hacer aproximaciones y usar modelos simplificados del fluido del fluido.

La propiedad más obvia de los fluidos, es su capacidad de fluir y cambiar de forma; los fluidos no conservan su forma independientemente de sus vecinos y fluyen de manera espontánea en los recipientes que los contienen. En este aspecto los gases y líquidos responden de manera diferente: los gases llenan por completo sus recipientes, en tanto que los líquidos ocupan un volumen definido. En esta sesión estudiaremos el movimiento de los fluidos sin interesarnos por las fuerzas que entran en juego. Nuestro propósito es desarrollar un conjunto de conceptos cinemáticos útiles para introducirnos comprender en el fascinante mundo de los fluidos, sus consecuencias y aplicaciones.

10.1. Tipos de Flujos de Fluidos

- **Turbulento**, es aquel en el que en cada punto del espacio ocupado por el fluido la velocidad de la partícula que en él se encuentra toma más de un valor a medida que transcurre el tiempo, y en su corriente hay formación de torbellinos o remolinos. Ocurre cuando las moléculas de un fluido en movimiento siguen trayectorias erráticas.

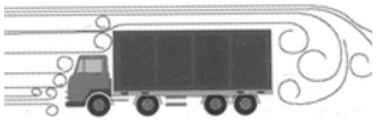


Figura 10.1:

- **Laminar**, es aquel en el que la función que define el campo de velocidades de sus partículas es única para cada instante y en cada punto del espacio y recíprocamente; las capas de fluido en tal régimen se deslizan unas sobre otras como si se tratase de verdaderas láminas fluida.

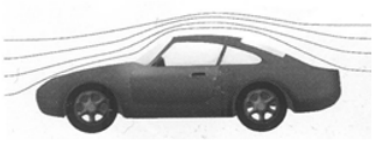


Figura 10.2:

- **Estacionario**, el régimen laminar es además estacionario cuando cualquiera que sea el instante considerado, en cada punto del espacio ocupado por el fluido la velocidad de la partícula que en él se encuentra es la misma, aunque varíe de unos puntos a otros; en consecuencia el vector velocidad que nos define el campo en dicho punto es independiente del tiempo.

- **Compresible**,si su densidad varía con la posición al interior del fluido.
- **Incompresible** aquel en los cuales los cambios de densidad de un punto a otro son despreciables.
- **Viscoso**, cuando el rozamiento interno de capas moleculares es apreciable.

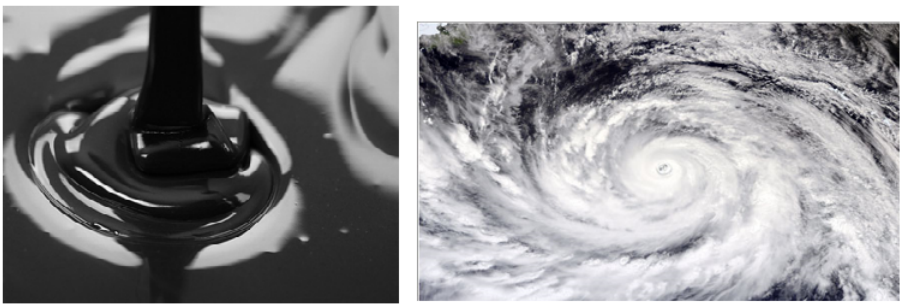


Figura 10.3:

- **Rotacional**,cuando la velocidad angular del elemento del fluido no es nula.

10.2. Fluido Ideal

Llamamos fluido ideal a aquel que fluye sin dificultad alguna, aquel cuya viscosidad vale cero. Tal fluido no existe pero en ciertas circunstancias -en las que resulta una razonable aproximación a la realidad- se pueden aplicar algunas de sus propiedades y leyes de movimiento a los fluidos reales.
Definamos con más precisión algunas de sus propiedades:

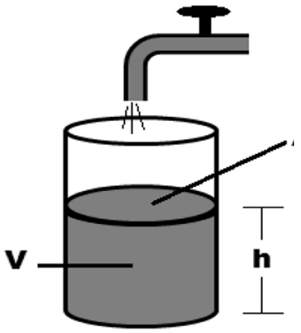
- Viscosidad cero.
- Son incompresibles (su densidad es constante)
- El flujo es laminar (se desplaza ordenadamente sin hacer remolinos, ni reflujos.)

- La velocidad de todas las moléculas del fluido en una sección transversal de tubería es la misma.

Cuando un fluido fluye bajo estas condiciones se dice que está en régimen de Bernoulli. En tal caso se conserva la energía mecánica.

10.3. Gasto o Caudal

Para una mejor definición y comprensión, fijémonos en el siguiente experimento: tenemos un caño inicialmente cerrado y un vaso cilíndrico, también inicialmente vacío. Si abrimos en caño, el vaso irá progresivamente llenando. Observamos que el volumen (V) del líquido en el vaso, aumenta con el paso del tiempo (t).



Definimos el caudal como:

$$Q = \frac{V}{t} \tag{10.1}$$

Es decir, es la velocidad a la cual se llena un volumen de líquido en el vaso. Si generalizamos y lo referimos al paso de un fluido por una tubería o ducto, llamamos **gasto o caudal (Q)** de una tubería al **volumen que pasa por la sección transversal en la unidad de tiempo**.

Alternativamente, podemos expresar el caudal en términos de la sección transversal de la tubería (**A**) y la velocidad (**v**) con la que pasa el fluido por dicha sección transversal:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{Ah}{t} = Av \tag{10.2}$$

Donde $v = \frac{h}{t}$

Así, el **gasto o caudal** también se puede expresar como el **producto del área (A) de la sección transversal de la tubería por la velocidad (v) con la que pasa el fluido por dicha sección transversal.**

10.4. Ley de Continuidad

La ley de continuidad establece que si tenemos una tubería por la que pasa un fluido incompresible, y este llena completamente la tubería, la cantidad de fluido que entra en la tubería en la unidad de tiempo, es igual a la cantidad de fluido que sale de la tubería en el mismo tiempo.

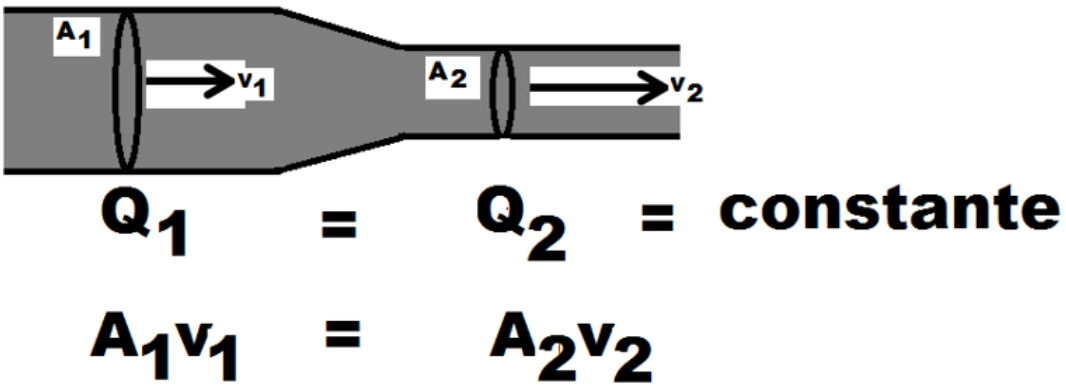


Figura 10.4:

En otras palabras, la ley de continuidad establece que **el producto de la velocidad de la corriente de un fluido que discurre en régimen de Bernouilli por la sección transversal del tubo de corriente, es una magnitud constante** para el tubo de corriente considerado.

Una consecuencia importante que se deriva, es que si se redice la sección transversal en un punto de la tubería, en ese mismo lugar la velocidad del fluido aumenta:

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \tag{10.3}$$

Si, $A_1 > A_2 \Longrightarrow v_2 > v_1$

10.5. Teorema de Bernoulli

Observar el vuelo de las aves, como el movimiento de los tiburones o delfines en el inmenso océano, es absolutamente conmovedor; lo mismo es impresionante observar el vuelo de esa maravilla de la tecnología moderna como son los aviones. No podemos dejar de preguntarnos ¿cómo hace una avión para poder volar con semejante peso?, ¿Cómo realiza el cóndor la majestuosidad de su vuelo?, ¿y el feroz tiburón, como realiza la delicadeza de su nado? Para poder entender estas y otras cuestiones, mucho nos ayudará comprender el teorema de Bernoulli que discutimos en esta sección.

La denominada ecuación o teorema de Bernoulli representa el principio de conservación de la energía mecánica aplicado al caso de una corriente fluida ideal, es decir, el flujo del fluido cumple con las siguientes hipótesis:

- Es estacionario; es decir, invariable en el tiempo.
- Es incompresible; es decir, densidad ρ constante. Fluido no viscoso.
- Las fuerzas presentes en el movimiento son fuerzas su-

perficiales de presión y fuerzas másicas gravitatorias (peso del fluido).

- No hay intercambio de trabajo o calor con el exterior del flujo.

Para obtener la ecuación de Bernoulli, consideremos un tubo de corriente como el representado en la figura 3, con un elemento de volumen $\Delta V_1 = S_1 \Delta x_1 = \Delta V_2 = S_2 \Delta x_2 = \Delta V$ situado a una altura h_1, y que se desplaza hasta una altura h_2, debido al trabajo que se hace sobre tal elemento de volumen.

El teorema del trabajo (W) y la energía establece que el trabajo realizado sobre un cuerpo sirve para incrementar la energía cinética (ΔE_K) y la energía potencial (ΔE_P) del objeto.

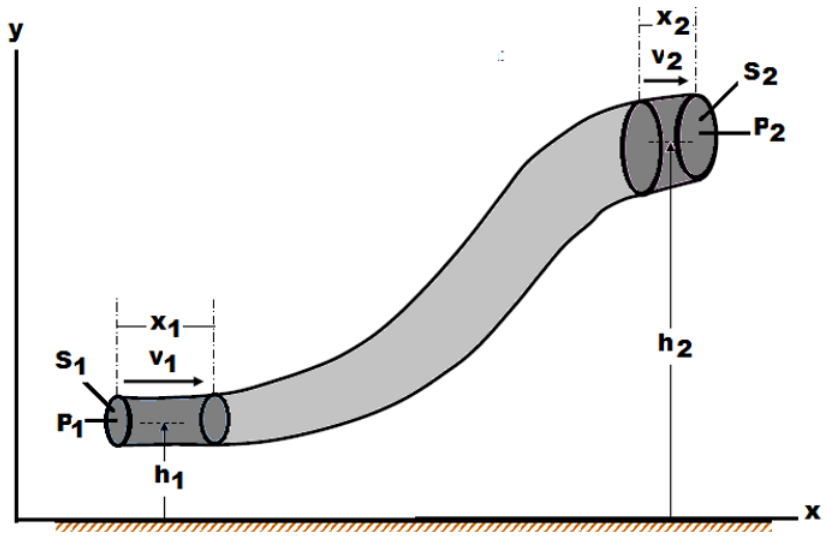


Figura 10.5:

$$W = \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$(P_1 - P_2)\Delta V = \left(\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \right) + (mgh_2 - mgh_1)$$

Dividiendo ambos términos de la ecuación entre ΔV, obtenemos:

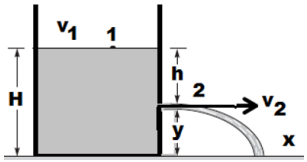
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \qquad (10.4)$$

Esta ecuación es la denominada Ecuación de Bernoulli, donde $\rho = \frac{m}{\Delta V}$, es la densidad volumétrica de masa del fluido.

10.6. Algunas Consecuencias y Aplicaciones del Teorema de Bernoulli

10.6.1. Teorema de Torricelli

"La velocidad de salida de un líquido en vasija abierta, por un orificio practicado en pared delgada, es la que tendría un cuerpo cualquiera cayendo libremente en el vacío desde el nivel del líquido hasta el centro de gravedad del orificio"



En efecto, si en un gran recipiente, por ejemplo un tanque de almacenamiento abierto a la presión atmosférica P0, hacemos un orificio de sección muy pequeña en comparación con la superficie libre del líquido que contiene, al salir líquido por el orificio, podremos considerar con suficiente aproximación, que la superficie libre está en reposo; considerando. Además, como nivel de referencia para las alturas el punto 2 por donde sale el líquido, al aplicar el teorema de Bernouilli,

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

los puntos 1 y 2 obtendremos:

$$P_o + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_o + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

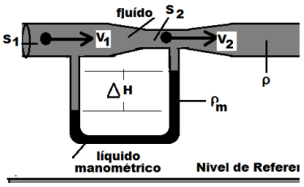
Considerando $v_1 = 0$ y que $h_2 = 0$, y simplificando la densidad, obtenemos:

$$v_2 = v = \sqrt{sgh} \tag{10.5}$$

que es lo que se pretendía demostrar

10.6.2. Efecto Venturi

La figura muestra un tubo colocado horizontalmente, y que tiene secciones transversales diferentes, y por el cual pasa un fluido de densidad ρ. Al tubo se le ha colocado un manómetro en U, que contiene un líquido manométrico de densidad ρ_m. Aplicando la ecuación de Bernoulli,



$$P_1 \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Al simplificar el término de altura, h, observamos que la presión en el punto 1, es mayor que la presión en el punto 2, por lo que podemos concluimos que **si la velocidad de un fluido aumenta en un punto del tubo de corriente, su presión disminuye. Este resultado constituye el Efecto de Venturí.**

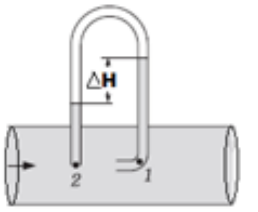
$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

La diferencia de presiones en los puntos 1 y 2 del tubo puede obtenerse analizando el manómetro.

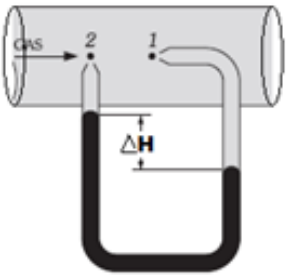
$$\Delta P = \rho_m g \Delta H \tag{10.6}$$

10.6.3. El Medidor de Pitot

Si tenemos un tubo de área de su sección transversal uniforme y colocado horizontalmente, y deseamos medir la velocidad con la que pasa el fluido por el tubo, es una idea brillante, colocar un manómetro en U al tubo, con una de sus ramas rasante con el fluido y la otra enfrentada a él, de modo que en el interior de la segunda rama, la velocidad del fluido es cero. Tal disposición se denomina Medidor de Pitot, y se usa en dos configuraciones: para medir velocidad de líquidos y para medir velocidad de gases, como se muestra respectivamente en cada figura. En cada caso la velocidad,



Tubo de Pitot (líquidos)



Tubo de Pitot (gases)

$$v = \sqrt{2g\Delta H\frac{\rho_m}{\rho}} \quad \text{líquidos}$$
$$v = \sqrt{2g\Delta H} \quad \text{gases} \tag{10.7}$$

10.6.4. Vuelo de un Avión

Aun cuando no es suficiente para explicar cómo los aviones sostienen su peso y pueden volar, puede utilizarse de forma cualitativa el efecto Venturi para comprender el empuje ascensional que actúa sobre el ala de un avión. El ala de los aviones se proyecta de forma que el aire se mueve con más rapidez sobre la parte superior de la misma que el que circula por su parte inferior, haciendo así que la presión del aire sea menor en la parte de arriba del ala que la existente en su parte inferior. Esta diferencia de presión da como resultado una fuerza neta sobre el ala dirigida hacia arriba.

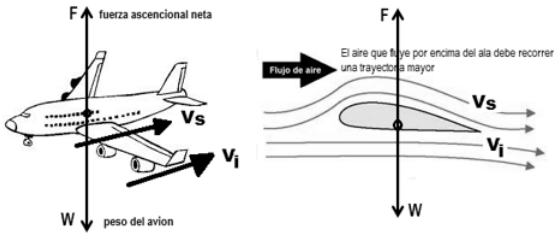


Figura 10.6:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \frac{F}{A}$$

Sesión 11

Calor y Temperatura

James Prescott Joule (1818 - 1889)

Físico británico a quien se le debe la TEORÍA MECÁNICA DEL CALOR, y en cuyo honor la unidad de la energía en el sistema internacional recibe el nombre de Julio.

James Prescott Joule nació en el seno de una familia dedicada a la fabricación de cervezas. De carácter tímido y humilde, recibió clases particulares en su propio hogar de física y matemáticas, siendo su profesor el químico británico John Dalton; compaginaba estas clases con su actividad profesional, trabajando junto a su padre en la destilería, la cual llegó a dirigir. Dalton le alentó hacia la investigación científica y realizó sus primeros experimentos en un laboratorio cercano a la fábrica de cervezas, formándose a la vez en la Universidad de Manchester.

Joule estudió aspectos relativos al magnetismo, especialmente los relativos a la imantación del hierro por la acción de corrientes eléctricas, que le llevaron a la invención del motor eléctrico. Descubrió también el fenómeno de magne-

tostricción, que aparece en los materiales ferromagnéticos, en los que su longitud depende de su estado de magnetización.

Pero el área de investigación más fructífera de Joule es la relativa a las distintas formas de energía: con sus experimentos verifica que al fluir una corriente eléctrica a través de un conductor, éste experimenta un incremento de temperatura; a partir de ahí dedujo que si la fuente de energía eléctrica es una pila electroquímica, la energía habría de proceder de la transformación llevada a cabo por las reacciones químicas, que la convertirían en energía eléctrica y de esta se transformaría en CALOR. Si en el circuito se introduce un nuevo elemento, el motor eléctrico, se origina energía mecánica. Ello le lleva a la enunciación del principio de conservación de la energía, y aunque hubo otros físicos de renombre que contribuyeron al establecimiento de este principio como Mayer, Thomson y Helmholtz, fue Joule quien le proporcionó una mayor solidez.

Introducción

Los primeros estudios del fenómeno del calor fueron realizados por el hombre prehistórico de las cavernas que descubrió como hacer fuego para estar caliente durante los períodos en que el Sol no le proporcionaba el calor suficiente. Su íntima colaboradora, la mujer prehistórica de las cavernas, hizo un importante descubrimiento más: las diferentes sustancias alimenticias mantenidas durante cierto tiempo sobre la llama o en agua hirviendo sabían mucho mejor y eran más digeribles.

Las nociones de “caliente” y “frío” son innatas en el hombre lo mismo que en todos los demás seres vivientes, y la

temperatura del ambiente se registra y señala en el cerebro por millones de nervios que terminan en la superficie de la piel. Pero la respuesta fisiológica a la temperatura se engaña a menudo y un hombre con los ojos vendados no puede decir si su mano ha sido quemada por un hierro al rojo vivo o congelada por un trozo de hielo seco. En ambos casos, las sensaciones son idénticas a causa de que ambas son la respuesta fisiológica al daño sufrido.

Los conceptos fundamentales de temperatura y calor, muchas veces parecen confusos.

¿Qué es el calor? es el grado de temperatura ¿qué es la temperatura? Es el grado de calor. Es un problema diferenciar claramente estos conceptos, sin embargo, la claridad de los mismos es fundamental para comprender otros conceptos más elaborados, como evaporación, calor latente, calor específico, humedad relativa, entre otros.

11.1. Definiciones Fundamentale

11.1.1. Calor

Es la energía cinética ganada o perdida por un cuerpo como resultado de las interacciones con partículas con otros cuerpos mediante colisiones.

Hay que diferenciar, estos conceptos con el concepto de transformación de energía potencial en energía cinética. Una piedra que cae sufre la transformación de su energía potencial en energía cinética. Una molécula orgánica que se oxida (combustión) transforma la energía potencial almacenada en los enlaces atómicos en energía cinética que adquieren los átomos desintegrados y en muchos casos emisión de fotones (por ejemplo al quemar gas, etc.)

Históricamente, primero se midieron las temperaturas, construyéndose diferentes unidades, ^oC, ^oF, etc., mucho después se comprendió que lo que se medía era la energía cinética promedio de las partículas que componen el cuerpo. De ahí que hay la necesidad de convertir unidades de temperatura a unidades de energía que es el Joule. Lo mismo ha ocurrido con el calor, que primero se definieron unidades como caloría y después se comprendió que era energía cinética transferida, lo que nuevamente originó el problema de convertir unidades de calor (caloría) a unidades de energía (Joule).

11.1.2. Temperatura

La Temperatura es una propiedad de la materia que está relacionada con la sensación de calor o frío que se siente en contacto con ella. Cuando tocamos un cuerpo que está a menos temperatura que el nuestro sentimos una sensa-

ción de frío, y al revés de calor. Sin embargo, aunque tengan una estrecha relación, no debemos confundir la temperatura con el calor.

Cuando dos cuerpos, que se encuentran a distinta temperatura, se ponen en contacto, se produce una transferencia de energía, en forma de calor, desde el cuerpo caliente al frío, esto ocurre hasta que las temperaturas de ambos cuerpos se igualan. En este sentido, la temperatura es un indicador de la dirección que toma la energía en su tránsito de unos cuerpos a otros.

Es una medida de la energía cinética en promedio que posee las partículas (átomos, moléculas, etc.) que constituyen un cuerpo. Para transmitir esta energía cinética adicional, generalmente se hace vía colisiones de otras moléculas o átomos externos al cuerpo, que tienen alta energía cinética y que al colisionar con las moléculas del cuerpo reciben éstos últimos energía cinética adicional. Esta energía cinética que puede ser ganada por el cuerpo o también que puede ser perdida por el cuerpo, se denomina calor.

El instrumento utilizado habitualmente para medir la temperatura es el **Termómetro**. Los termómetros de líquido encerrado en vidrio son los más populares; se basan en la propiedad que tiene el mercurio, y otras sustancias, de dilatarse cuando aumenta la temperatura.

11.1.3. Escalas de Temperatura

En la actualidad se emplean diferentes escalas de temperatura; entre ellas está la escala Celsius también conocida como escala centígrada, la escala Fahrenheit, la escala Kelvin, la escala Rankine o la escala termodinámica inter-

nacional. En la escala Celsius, el punto de congelación del agua equivale a 0^oC, y su punto de ebullición a 100 ^oC. Esta escala se utiliza en todo el mundo, en particular en el trabajo científico. La escala Fahrenheit se emplea en los países anglosajones para medidas no científicas y en ella el punto de congelación del agua se define como 32 ^oF y su punto de ebullición como 212 ^oF. En la escala Kelvin, la escala termodinámica de temperaturas más empleada, el cero se define como el cero absoluto de temperatura, es decir, -273,15 ^oC. La magnitud de su unidad, llamada kelvin y simbolizada por K, se define como igual a un grado Celsius. Otra escala que emplea el cero absoluto como punto más bajo es la escala Rankine, en la que cada grado de temperatura equivale a un grado en la escala Fahrenheit. En la escala Rankine, el punto de congelación del agua equivale a 492 ^oR, y su punto de ebullición a 672 ^oR.

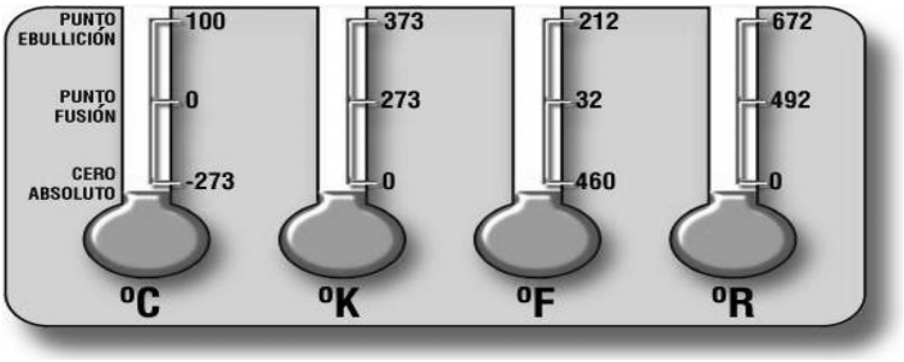


Figura 11.1:

$$\frac{^oC}{5} = \frac{^oF - 32}{9} = \frac{K - 273}{5} \tag{11.1}$$

$$\frac{\Delta T_C}{1} = \frac{\Delta T_K}{1} = \frac{\Delta T_F}{1,8^oF} \tag{11.2}$$

11.1.4. Capacidad Calorífica

La capacidad calorífica, llamada también capacidad térmica, denotada por K, es la magnitud física que indica la cantidad de calor que se necesita dar o extraer a un cuerpo para que su temperatura aumente o disminuya en un grado.

$$K = \frac{Q}{\Delta T}; \qquad \text{Unidades: } K = cal/^oC; \quad Kcal/^oC; \quad J/K \tag{11.3}$$

11.1.5. Calor Específico

El calor específico de una sustancia, llamado también capacidad calorífica específica, se define como la capacidad calorífica por unidad de masa. Su valor nos indica la cantidad de calor que se le debe dar o extraer a la unidad de masa de una sustancia para aumentar o disminuir su temperatura en un grado.

$$C_e = \frac{K}{m}; \qquad C_e = \frac{Q}{m\Delta T} \tag{11.4}$$

11.1.6. Equivalente Mecánico del Calor

Antes que el **calor** fuera concebido como **transferencia de energía**, se habían diseñado maneras prácticas de medirlo. La unidad de calor se determinó con base en las propiedades del agua y se denominó caloría. Esta unidad continúa en uso y se define así:

Una caloría (cal) es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado Celsius (^oC) la temperatura de un gramo de agua (de 14.5 ^oC a 15.5 ^oC a la presión de una atmósfera).

Los métodos para determinar unidades de calor se han perfeccionado al relacionarlos con la energía. En el Sistema Internacional de Unidades se mide la energía por medio del joule (j), el cual se define como: El producto de fuerza por distancia, donde fuerza se mide en newtons y distancia en metros.

A través de experimentos se ha comprobado que para elevar un grado Celsius la temperatura de un gramo de agua, se necesita transferir 4.2 J de energía mediante trabajo mecánico. Por tanto, una caloría produce el mismo incremento de temperatura en un gramo de agua que cuando se realiza en ella un trabajo de 4.2 j, ya que en ambos casos se transfiere la misma cantidad de energía. Esta igualdad se conoce como equivalente mecánico del calor

$$1cal = 4,186J$$

11.1.7. Ecuación Calorimetrica

Cuando en un recipiente térmicamente aislado del medio que lo rodea, se mezclan dos o más sustancias iguales o diferentes, las cuales se encuentran a diferente temperatura, se manifiesta un flujo de calor o corriente calorífica en el cual las sustancias más calientes pierden calor y las más frías absorben calor hasta alcanzar el **equilibrio térmico entre ellas, esto es, cuando la temperatura final de la mezcla es la misma y es cuando cesa el flujo de calor**.

En el equilibrio térmico: calor ganado (Q) es igual al calor perdido (-Q). Es decir:

$$Q = -Q$$

11.1.8. Cambios de estado de agregación de la materia

El estado de agregación de la materia (sólido, líquido, gaseoso) puede variar en función de las condiciones externas (presión y temperatura). Para unas determinadas condiciones, una sustancia concreta sólo se encontrará en un estado de agregación; es decir, en determinadas condiciones una sustancia se encontrará en estado sólido, en estado líquido o en estado gaseoso pero sólo en uno de ellos.

Estados de Agregación	Sólido	Líquido	Gas
Volumen	Definido	Definido	Indefinido
Forma	Definida	Indefinida	Indefinida
Compresibilidad	Incompresible	Incompresible	Compresible
Atracción entre Moléculas	Intensa	Moderada	Despreciable

Cambios de estado

Cambio de estado es el proceso mediante el cual las sustancias pasan de un estado de agregación a otro. El estado físico depende de las fuerzas de cohesión que mantienen unidas a las partículas. La modificación de la temperatura o de la presión modificará dichas fuerzas de cohesión pudiendo provocar un cambio de estado.

El paso de un estado de agregación más **ordenado a otro más desordenado** (donde las partículas se mueven con más libertad entre sí) se denomina cambio de estado progresivo. Cambios de estado progresivos son:

El paso de sólido a líquido que se llama **fusión**. Ejemplo el hielo a agua líquida se funde.

El paso de líquido a gas que se llama **vaporización**. Ejemplo el agua líquida pasa a vapor de agua: evaporándose lentamente .

El paso de sólido a gas que se llama **sublimación**. Ejemplo el azufre o el yodo sólidos al calentarlos pasan directamente a gas.

El paso de un estado de agregación más **desordenado a otro más ordenado** se denomina cambio de estado regresivo. Cambios de estado regresivos son:

El paso de gas a líquido que se llama **condensación**. Ejemplo en los días fríos de invierno el vapor de agua de la atmósfera se condensa en los cristales de la ventana que se encuentran fríos o en el espejo del cuarto de baño.

El paso de líquido a sólido que se llama **solidificación**. Ejemplo el agua de una cubeta dentro del congelador se solidifica formando cubitos de hielo.

El paso de gas a sólido que se denomina **solidificación regresiva**.

Temperatura del cambio de estado

Mientras tiene lugar un cambio de estado, la temperatura no varía se mantiene constante hasta que el cambio de estado se complete.

El cambio de estado de sólido a líquido (fusión) tiene lugar a la temperatura de fusión que coincide con la temperatura de solidificación (cambio de estado de líquido a sólido, soli-

dificación).

El cambio de estado de líquido a gas que ocurre de forma tumultuosa tiene lugar a la temperatura de ebullición y coincide con la temperatura de condensación (gas a líquido).

Mientras dure el cambio de estado, la energía implicada (calentando o enfriando) se utiliza en cambiar el estado de agregación de las partículas, manteniéndose constante la temperatura (la energía cinética media de las partículas no varía).

11.1.9. Calorimetría

Es la parte de la Termología que estudia la medida del calor de los cuerpos. Todos los cálculos de la calorimetría se fundamentan en los siguientes principios:

Cuando se ponen en contacto dos cuerpos a temperaturas distintas el más caliente cede calor al frio hasta que ambos quedan a una temperatura intermedia de las que tenían al principio.

El calor ganado por un cuerpo es exactamente igual al cedido por el otro.

Si tenemos un cuerpo de masa m_1, calor especifico c_1 y que está a una temperatura T_1 y otro de masa m_2, calor especifico c_2 y que está a una temperatura T_2 y suponemos que $T_1 > T_2$ al ponerlos en contacto ambos quedaran a una temperatura intermedia te cumpliéndose que $T_1 > T_e > T_2$.

El calor perdido por el cuerpo caliente será:

$$Q_p = m_1 c_1 (T_1 – Te)$$

El calor ganado por el cuerpo frio será

$$Qg = m_2 c_2 (T_e – T_2)$$

$$Q_p = Q_g$$

Propagación del Calor

La forma de propagarse el calor es de tres formas: conducción, convección y radiación

Conducción del Calor

La conducción es el mecanismo de transmisión del calor posible en los sólidos. Cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura $\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre las moléculas del medio.

La conducción se da en los sólidos, líquidos y gases. Sin embargo, en el caso de los líquidos y gases que puedan estar en circulación, la conducción se encuentra normalmente en combinación con la convección. Por consiguiente, la conducción pura tiene lugar fundamentalmente en los sólidos, en donde el movimiento de masa se encuentra impedido.

Ley de Fourier

Sea J la densidad de corriente de energía (energía por unidad de área y por unidad de tiempo), que se establece en la barra debido a la diferencia de temperaturas entre dos puntos de la misma. La ley de Fourier afirma que hay una

proporcionalidad entre el flujo de energía J y el gradiente de temperatura.

$$J = K\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{11.5}$$

Siendo K una constante característica del material denominada conductividad térmica.

Como J es una densidad de energía entonces la ecuación 15.6 puede escribirse como:
$J = \frac{Q}{S\Delta T}$, entonces: $\frac{Q}{\Delta t} = K\frac{S\Delta T}{\Delta x}$ que es la velocidad con que se transmite el flujo de energía. Es decir:

$$H = KS\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{11.6}$$

donde S es la sección transversal por donde fluye la energía.

Conveción del Calor

La convección tiene lugar cuando áreas de fluido caliente (de menor densidad) ascienden hacia las regiones de fluido frío. Cuando ocurre esto, el fluido frío (de mayor densidad) desciende y ocupa el lugar del fluido caliente que ascendió. Este ciclo da lugar a una continua circulación del calor hacia las regiones frías.

En los líquidos y en los gases la convección es la forma más eficiente de transferir calor.

Un primer caso, Cuando una superficie se pone en contacto con un fluido a distinta temperatura se produce, en los primeros instantes, una transmisión de calor por conducción, pero una vez que el fluido en contacto con la superficie modifica su temperatura sufre una diferencia de densidad respecto al resto del fluido, que hace que sea desplazado por éste al actuar las fuerzas gravitatorias, lo que incrementa

la transferencia del calor en una magnitud muy superior al de la mera conducción. Este fenómeno se denomina convección libre o natural, que es la que se suele considerar en ambientes interiores, ya que se estima que el aire permanece prácticamente en reposo.

Otro caso es aquel en que el aire se mueve fundamentalmente debido a fuerzas exteriores, tales como el viento, en cuyo caso el proceso de transferencia de calor se incrementa notablemente y se denomina convección forzada, que es el que habitualmente se considera en superficies en contacto con el ambiente exterior.

Existe un tercer caso, intermedio entre los anteriores, en que las fuerzas actuantes, debidas a la variación de la densidad y las acciones exteriores (viento), son de magnitud parecida, produciéndose una superposición de los efectos de la convección libre y la forzada, y que se denomina convección mixta. Es el caso más general porque en la práctica siempre hay variación de densidad y además el aire no está en reposo absoluto.

Radiación de Calor

Tanto la conducción como la convección requieren la presencia de materia para transferir calor.

la radiación es un método de transferencia de calor que no precisa de contacto entre la fuente de calor y el receptor. no se produce ningún intercambio de masa y no se necesita ningún medio material para que se transmita.

Por radiación nos llega toda la energía del Sol. Al llegar a la Tierra empieza un complicado ciclo de transformaciones: la

captan las plantas y luego la consumimos nosotros, el agua se evapora, el aire se mueve....

La energía radiante del Sol se transmite a través del espacio vacío en forma de radiación que viaja a la velocidad de la luz. Entre las diferentes ondas que la componen hay radiación visible, ultravioleta, infrarroja etc. La ultravioleta es tan energética que puede ionizar la materia, pero la radiación infrarroja interfiere con los electrones de los átomos promocionándolos a un nivel superior y produce la agitación de los átomos y de las moléculas que se traduce en calor.

11.1.10. Calentamiento Global

El calentamiento global es el incremento continuo de la temperatura promedio global: específicamente la temperatura de la atmósfera y de los mares. Pero eso no quiere decir que todos los lugares se harán más calurosos.

El incremento de la temperatura global causa cambios en los patrones del clima por eso algunos lugares pueden experimentar sequías mientras otros se inundan, los lugares fríos se vuelven más cálidos y, en algunos casos, los lugares calurosos se hacen más frescos. Por eso también se utiliza el término ÇAMBIO CLIMÁTICO"para hablar del calentamiento global; ambos términos refieren al mismo fenómeno.

Causas:

Es cierto que existen ciclos naturales de enfriamiento y calentamiento global, y el planeta ha pasado por varios de estos ciclos a lo largo de su existencia. Sin embargo, esta vez el ciclo natural de calentamiento se ha exagerado a un

nivel peligroso por causa de nuestras acciones en particular, la producción de gases invernaderos, la deforestación y la urbanización.

Si hemos escuchado que falta evidencia para comprobar que nosotros causamos el calentamiento global, tómalo por una mentira: la verdad es que el 98 % de los científicos están completamente seguros que el calentamiento global es un resultado directo de la actividad humana (porcentaje reportado en 2010 por la Academia Nacional de Científicos de los E.U).

¿Cuanto mas se calentará nuestro planeta?

Según el panel intergubernamental de cambio climatico (IPCC), la temperatura promedio del planeta incrementó alrededor de 1.3^oF (0.75^oC) en el siglo XX y va a incrementar de 3 a 7^oF (2 a 4^oC) más en este siglo. Quizás tres grados no parezca mucho, pero en términos globales es el incremento más grande y rápido que ha pasado en los últimos 10,000 años Por eso puede resultar muy peligroso para nosotros un cambio tan dramático.

Efectos del calentamiento global

Primero, los patrones de clima cambian, haciendo más extremos y menos predecibles las temporadas de lluvia, sequía, invierno y verano. Esto resulta en problemas para nosotros: las tormentas y huracanes se hacen más fuertes, las enfermedades transmitidas por insectos se hacen más comunes, pueden haber imprevistos costosos en el sector agrícola, lo cual significa precios más altos en las comidas básicas. Por supuesto, las poblaciones con menos acceso a recursos e infraestructura sufren más, y esto contribuye a

la inestabilidad social y política.

Estos cambios climáticos también hacen la vida más difícil (o imposible, en algunos casos) para las otras especies, reduciendo la biodiversidad y la habilidad de los ecosistemas a sobrevivir. Además, el derretimiento de las placas de hielo causa que suba el nivel del mar, poniendo en peligro las islas y zonas de costa. Muchos de los lugares amenazados sufren el doble afecto de los huracanes y el incremento del nivel del mar. A pesar del desarrollo de nuevas tecnologías, se predice que el consumo de los productos de petróleo seguirá incrementando en el futuro, empeorando todavía más el problema de calentamiento global.

Acciones que debbemos tomar

Es importante reconocer que nuestro estilo de vida contribuye directamente al calentamiento global y que las decisiones que hacemos día tras día son sumamente importantes.

Reducir tu huella de carbono: En pocas palabras, eso significa reducir tu uso de energía. La Secretaria de Protección del Medio Ambiente de los E.U. (EPA) sugiere reciclar/reutilizar y usar focos ahorradores de energía, electrodomésticos con certificación. También puedes acudir a una calculadora de huella de carbono para información más específica sobre tu contribución personal.

Formar vínculos comunitarios: Los efectos del cambio climático, junto con la globalización y las crisis económicas, resultan en un estrés muy fuerte para muchas personas. Pero si nos ayudamos entre compañeros, vecinos, amigos y familias, seremos más resistentes. Habla con las personas en tu

alrededor, pregúntales qué es lo que necesitan y qué pueden ofrecer, y diles lo que tú necesitas y puedes ofrecer; así empiezan los vínculos que nos mantendrán fuertes frente a los desafíos del futuro.

PERU : SEDE DE LA COP 20 EN EL AÑO 2014
LIMA, 18 DE JULIO DE 2013.- El ministro del Ambiente, Manuel Pulgar-Vidal afirmó que la reunión en Lima sea la última oportunidad para que el mundo logre consensos para alcanzar un acuerdo climático vinculante. Fue durante la presentación oficial de la COP 20, la Conferencia de las Partes, un evento que reunirá en diciembre de 2014 en lima y durante dos semanas, a presidentes, ministros y representantes de la sociedad civil y del sector privado de 194 países para debatir sobre uno de los problemas más graves que enfrenta la humanidad: el cambio climático.

El titular del Ambiente dijo que la **Organización de la Cumbre del Cambio Climático**, como también se le conoce a las COP, es un reto y una oportunidad inigualable para el país. “La COP es hoy día el evento internacional más importante del mundo en materia de contenido, en objetivos y en número de participantes que se calculan podrían ser entre los 10 mil a 15 mil”, sostuvo el ministro.

El reto de organización de la COP 20 demanda la participación intersectorial de todo el gobierno, por eso ya ha sido declarada un evento de **“ INTERÉS NACIONAL”**.

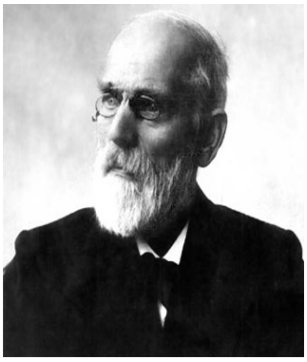
La **COP 20** es clave para alcanzar un acuerdo climático vinculante, pues forma parte de una cadena de negociaciones que empieza en Varsovia, en la **COP 19**, y debe finalizar en la **COP 21**, en París.

Al lanzamiento oficial de la COP asistieron los embajadores de Suiza, Canadá, de la Unión Europea, de Francia y de Polonia, así como representantes de alto nivel de la cooperación internacional, gremios y organizaciones de la sociedad civil.

Sesión 12

Gases Ideales

Johannes Diderik Van der Waals (1837 - 1923)



Físico holandés. Profesor de las universidades de La Haya (1877) y Ámsterdam (1908), es conocido por la ecuación del estado de los gases reales (ecuación de Van der Waals) que permite una mayor aproximación a la realidad física que la ecuación de los gases ideales, al tener en cuenta las fuerzas de interacción existentes entre las moléculas; tal aportación le supuso la concesión, en 1910, del Premio Nobel de Física.

Desarrolló, además, investigaciones sobre la disociación electrolítica, sobre la teoría termodinámica de la capilaridad y sobre estática de fluidos. Estudió así mismo las fuerzas de atracción de naturaleza electrostática (fuerzas de Van der Waals) ejercidas entre las moléculas constitutivas de la materia, que tienen su origen en la distribución de cargas positivas y negativas en la molécula.

Los gases reales no cumplen las leyes de Boyle-Mariotte y Charles-Gay-Lussac con total exactitud; la desviación respecto al comportamiento ideal depende de la presión, la

temperatura y el gas de que se trate. A temperaturas ordinarias, al bajar la presión los gases reales son más compresibles que lo que deberían serlo de acuerdo con la ley de Boyle-Mariotte, hasta llegar a una determinada presión a la que empiezan a comprimirse menos de lo que lo haría un gas ideal.

En 1873 Van der Waals argumentó que, dado el cambio de signo en la desviación del comportamiento real respecto al ideal, esta desviación había de deberse a dos causas opuestas. La primera es la existencia de fuerzas de atracción entre las moléculas, que hacen que la presión observada (medida a partir de los choques de las moléculas de gas contra la pared del recipiente) sea menor que la presión que realmente tiene el gas. Van der Waals razonó que la desviación debe ser inversamente proporcional al cuadrado del número de moléculas por unidad de volumen.

La segunda es que las moléculas no son puntos materiales, sino que ocupan un volumen, por lo que el volumen de que realmente disponen las moléculas es menor que el volumen total ocupado por el gas; esta corrección ya había sido introducida por Clausius. De acuerdo con los términos de corrección introducidos, Van der Waals formuló la ecuación que lleva su nombre, que se ajusta mejor que la de los gases ideales al comportamiento real de los gases, aunque tampoco es rigurosamente exacta, ya que las dos constantes que introdujo en la formulación varían algo en función de la presión y la temperatura.

Introducción

Los fundamentos de la termodinámica ciencia que estudia las transformaciones de la energía fueron sentados en

el siglo XIX, cuando, debido al desarrollo de los motores térmicos, se planteó la necesidad de estudiar las leyes de la transformación del calor en trabajo. Históricamente, la máquina de vapor fue uno de los primeros dispositivos que transforman la energía calorífica en trabajo mecánico.

Las observaciones experimentales sobre el comportamiento de la materia, tanto de físicos como de químicos, llevaron a plantear la hipótesis de que la materia no era continua y que estaba formada por partículas (átomos y moléculas) en constante movimiento. Sólo así resultaba fácil explicar muchos fenómenos desde comienzos del siglo XIX.

Tal hipótesis pasó a constituir una teoría denominada Teoría Cinético Molecular de la Materia. Con ella se explica la temperatura, la transmisión del calor, la fusión, la evaporación entre otros fenómenos. Si la temperatura sólo depende de la energía cinética media de las moléculas, la energía total molecular de un cuerpo depende también del número de moléculas. Esta energía total se denomina su energía interna. Cuando se transmite algo de la energía interna, la energía transmitida se llama calor.

LA TEORÍA CINÉTICO MOLECULAR DE LOS GASES hace una descripción microscópica de los gases, considerando a éstos como colección de moléculas moviéndose de manera aleatoria y a las que se le aplica de manera estadística las leyes del movimiento de Newton para chocar entre sí y con las paredes del recipiente que los contiene.

12.1. Definiciones Fundamentales

12.1.1. Ecuación de Estado del Gas Ideal

Llamamos así a la relación matemática que vincula las tres propiedades termodinámicas que definen un estado: la presión, el volumen y la temperatura. Se demuestra que esta es:

$$PV = nRT \tag{12.1}$$

donde: n es el número de moles del gas y $R = 8,31 J/mol \cdot K$ (constante universal de los gases)

Ecuación general de procesos

Es la relación matemática que vincula las propiedades termodinámicas de un mismo gas cuando éste ha pasado de un estado a otro. Se demuestra que:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \tag{12.2}$$

Leyes fundamentales de los gases

a) **Ley de Boye - Mariotte** Explica el *proceso isotérmico*:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2; \quad \text{n y T= Constantes.} \tag{12.3}$$

b) **Ley de Gay - Lussac**.-Explica el *proceso isobárico*:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}; \quad \text{n y p = Constantes.} \tag{12.4}$$

c) **Ley de Charles**.-Explica el *proceso isovolumétrico*:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}; \quad \text{n y V = Constantes.} \tag{12.5}$$

12.1.2. Teoría Cinético Molecular del Gas Ideal

Un gas ideal o perfecto, desde el punto de vista microscópico, lo conceptuamos en base a las siguientes hipótesis o supuestos del modelo cinético-molecular:

El gas se considera una sustancia pura, compuesta de un número muy grande N de moléculas idénticas que son como esferas sólidas, rígidas, cada una con masa m.

El tamaño de las moléculas es pequeño en comparación con la distancia media entre ellas. El volumen de las moléculas es una fracción despreciable cuando se compara con el volumen V del recipiente que las contiene.

Las moléculas se comportan como partículas puntuales y se mueven con distintas velocidades, en todas direcciones, de manera aleatoria (al azar), obedeciendo las leyes del movimiento de Newton, y chocando contra las paredes del recipiente y entre sí, sin deformarse.

Las fuerzas entre moléculas son despreciables lo que significa considerar que no interactúan a distancia, excepto durante el choque. Las fuerzas entre moléculas son de corto alcance. Una sola molécula se mueve con velocidad constante (MRU) entre dos choques sucesivos.

Las colisiones son elásticas y su duración despreciable. Se conserva la energía cinética y la cantidad de movimiento. La energía cinética total de dos moléculas antes del choque es la misma que después del choque.

El gas se encuentra en equilibrio térmico con las paredes del recipiente. Una pared expulsa tantas moléculas como

las que recibe. Las moléculas expulsadas tienen la misma energía cinética promedio que la que tienen las moléculas incidentes.

12.1.3. Principio de Equipartición de la Energía

Si una molécula es diatómica, podría tener energías cinética adicional asociada a la rotación alrededor de ejes que pasen por su centro de masa, y no solo energía cinética traslacional como en el caso de las moléculas monoatómicas. Además los átomos también podrían tener movimiento vibratorio sobre la línea que los une.

Cuando la temperatura aumenta en la misma cantidad en un gas diatómico o poliatómico, se necesitará energía térmica adicional para aumentar la rotación y vibración molecular.

El Principio de equipartición de energía establece que: cada componente de velocidad tiene, en promedio una energía cinética asociada por molécula de:

$$\frac{1}{2}(K_B T)$$

El número de componentes de velocidad necesarias para describir todo el movimiento de una molécula recibe el nombre de grados de libertad, i. Una molécula monoatómica tiene 3 grados de libertad (para v_x; v_y ; y v_z). Un gas diatómico, además de las tres componentes de velocidad traslacionales, tienen dos posibles ejes de rotación, perpendiculares entre sí y al eje de la molécula En la mayor parte de los gases diatómicos la vibración no contribuye apreciablemente a la energía interna del gas, y se le asignan a las moléculas cinco grados de libertad, ($i = 5$).

A un gas triatómico, sobre la línea que une los átomos, se le considera seis grados de libertad, ($i = 6$).

Lo anterior se puede generalizar como:

$$E = N\frac{i}{2}K_B T \tag{12.6}$$

donde i son los grados de libertad de la molécula de gas;

$$K_B = \frac{R}{N_A}$$

es la constante de Boltzmann, que es la razón de la constante universal de los gases al número de Avogadro, y su valor es

$$K_B = 1,38x10^{-23} J/K$$

12.1.4. Energía Interna del Gas Ideal

Siendo el gas ideal un sistema mecánico, la energía estará dada por la suma de la energía cinética de cada partícula más la energía potencial de interacción mutua entre cada una de las partícula y de la energía potencial de cada partícula con el campo gravitacional. Sin embargo, de acuerdo a las hipótesis planteadas sobre el gas ideal la energía potencial se desprecia y la energía total del gas ideal sólo se debe a la energía cinética de cada una de las partículas.

$$E_k = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 + ... + \frac{1}{2}mv_N^2$$

$$E_k = \frac{1}{2}m\left(v_1^2 + v_2^2 + ... + v_N^2\right)$$

$$E_k = \frac{1}{2}m\left(v_1^2 + v_2^2 + ... + v_N^2\right)\frac{N}{N}$$

$$E_k = N\left(\frac{1}{2}m\overline{v^2}\right) \tag{12.7}$$

El término entre paréntesis es la energía cinética media de las moléculas de gas ideal o la energía cinética traslacional promedio de una sola molécula.

Donde:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + ... + v_N^2}{N} \tag{12.8}$$

es la velocidad raíz cuadrática media.

Sesión 13

Primera Ley de la Temperatura

Robert Boyle (1627 - 1691)

Químico inglés nacido en Irlanda. Pionero de la experimentación en el campo de la química, en particular en lo que respecta a las propiedades de los gases, los razonamientos de Robert Boyle sobre el comportamiento de la materia a nivel corpuscular fueron los precursores de la moderna teoría de los elementos químicos. Fue también uno de los miembros fundadores de la Royal Society de Londres.

Nacido en el seno de una familia de la nobleza, Robert Boyle estudió en los mejores colegios ingleses y europeos. De 1656 a 1668 trabajó en la Universidad de Oxford como asistente de Robert Hooke, con cuya colaboración contó en la realización de una serie de experimentos que establecieron las características físicas del aire, así como el papel que éste desempeña en los procesos de combustión, respiración y transmisión del sonido.

Los resultados de estas aportaciones fueron recogidos en su Nuevos Experimentos Físico-Mecánicos acerca de la elasticidad del aire y sus efectos (1660). En la segunda edición

de esta obra (1662) expuso la famosa propiedad de los gases conocida con el nombre de Ley de Boyle-Mariotte, que establece que el volumen ocupado por un gas (hoy se sabe que esta ley se cumple únicamente aceptando un teórico comportamiento ideal del gas), a temperatura constante, es inversamente proporcional a su presión.

En 1661 publicó The Sceptical Chemist, obra en la que ataca la vieja teoría aristotélica de los cuatro elementos (tierra, agua, aire, fuego), así como los tres principios defendidos por Paracelso (sal, azufre y mercurio). Por el contrario, Boyle propuso el concepto de partículas fundamentales que, al combinarse entre sí en diversas proporciones, generan las distintas materias conocidas.

Su trabajo experimental abordó asimismo el estudio de la calcinación de varios metales; también propuso la forma de distinguir las sustancias alcalinas de las ácidas, lo que dio origen al empleo de indicadores químicos.

Introducción

La **Termodinámica** es la ciencia que estudia las leyes de las transformaciones de la energía. Sus fundamentos se establecieron con el desarrollo de los motores térmicos al plantearse la necesidad de estudiar las leyes de la transformación del calor en trabajo.

Estudia las relaciones entre los fenómenos dinámicos y térmicos.

Un sistema podría ser un dispositivo mecánico, un organismo biológico, un poco de vapor de agua, una cantidad de sustancia, etc. desde el cual entra o sale energía. Un sis-

tema puede ser abierto o cerrado. En el primero, la masa puede ser transferida hacia adentro o expulsada hacia fuera. En el segundo, no hay transferencia de masa a través de sus límites, es decir, la masa es constante.

13.1. Definiciones Fundamentales

13.1.1. Trabajo Termodinámico

a) Un pistón móvil comprime un gas, (sistema), contenido en un cilindro;

b) El gas efectúa trabajo positivo sobre el pistón; se expande incrementando su volumen.

c) El sistema realiza un trabajo infinitesimal dW al expandirse un volumen $V = Adx$ que se expresa por: $dW = PAdx$

d) Si el área transversal del cilindro es A y la presión que ejerce el sistema en la base circular del pistón es P, la fuerza total ejercida por el sistema sobre el pistón será: $F = PAdx$. Al moverse el pistón una distancia infinitesimal dx, el trabajo dw realizado por tal fuerza es:

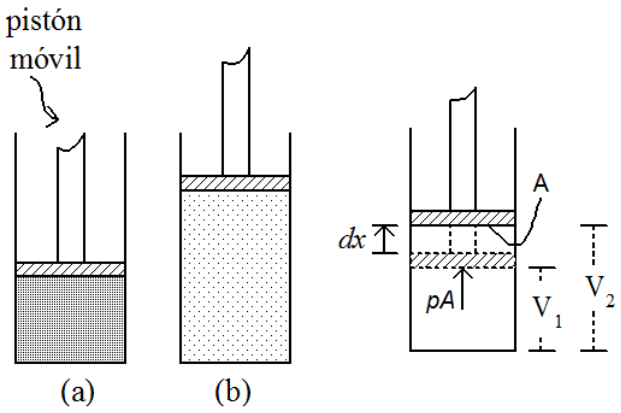


Figura 13.1:

$$dW = Fdz = PAdx = PdV$$

Si el cambio finito de volumen es de V_1 a V_2, entonces el trabajo efectuado en tal cambio de volumen se determina por:

$$W = \int_{V_2}^{V_1} PdV \tag{13.1}$$

En general, en un diagrama $P - V$, el trabajo realizado por un gas o sobre un gas se puede calcular como el trabajo bajo la curva que representa el proceso por el cual se está realizando el trabajo

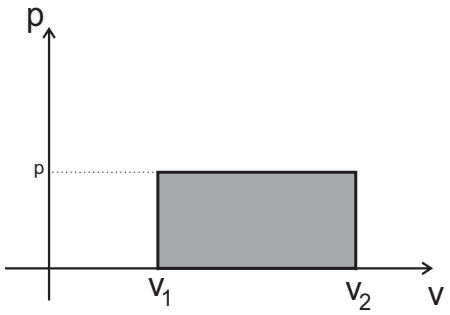


Figura 13.2:

13.1.2. Energía Interna

Definimos la energía interna de un sistema como la suma de las energías cinéticas de todas sus partículas constituyentes, más la suma de todas las energías potenciales de interacción entre ellas.

La energía interna no incluye la energía potencial debida a la interacción entre el sistema y su entorno. El sistema, en este caso, no considera la energía potencial gravitatoria entre él y la Tierra.

Durante un cambio de estado del sistema, la energía interna puede cambiar de un valor U1 a otro U2. . El cambio de energía interna será: $\Delta U = U_2 - U_1$.

Cuando se agrega cierta cantidad de calor Q a un sistema pero éste no realiza ningún trabajo, la energía interna au-

menta una cantidad igual a Q. Si el sistema realiza trabajo W sin agregársele calor, sale energía del sistema y U disminuye; habrá un trabajo positivo y un cambio de energía interna negativo: $\Delta U = -W$.
Si en el proceso se produce transferencia de calor y también trabajo, el cambio total de energía interna será:

$$Q = \Delta U + W \tag{13.2}$$

13.1.3. Trabajo Termodinámico en los Procesos

13.1.4. Proceso Isobárico

$$W = p(V_2 - v_1) = nR(T_2 - T_1) \tag{13.3}$$

$$\Delta U = nc_v(T_2 - T_1) \tag{13.4}$$

$$Q = nc_p(T_2 - T_1) \tag{13.5}$$

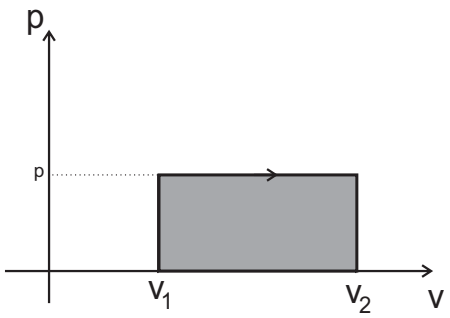


Figura 13.3: Proceso isobárico

13.1.5. Proceso Isotérmico

$$W = nRT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = nRT \ln \frac{p_1}{p_2} \tag{13.6}$$

$$\Delta U = 0 \tag{13.7}$$

$$Q = W \tag{13.8}$$

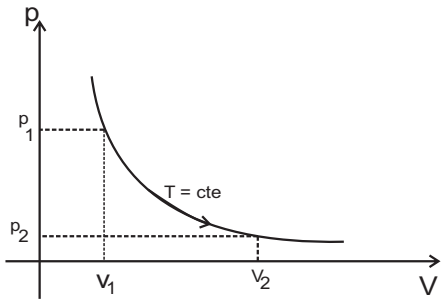


Figura 13.4: Proceso isotérmico

13.1.6. Proceso Isócoro

$$W = 0 \tag{13.9}$$

$$\Delta U = nc_v(T_2 - T_1) \tag{13.10}$$

$$Q = nc_v(T_2 - T_1) \tag{13.11}$$

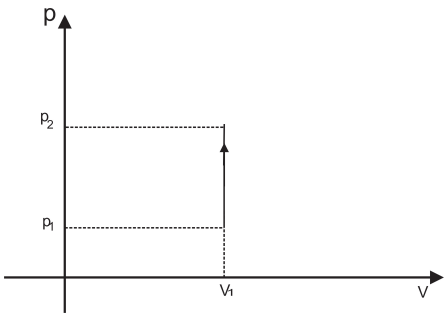


Figura 13.5: Proceso isócoro

13.1.7. Proceso Adiabático

$$W = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-\gamma} = \frac{nR(T_2 - T_1)}{1-\gamma} \tag{13.12}$$

$$Q = 0 \tag{13.13}$$

$$\Delta U = -W \tag{13.14}$$

siendo $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, además $c_p - c_v = R$.

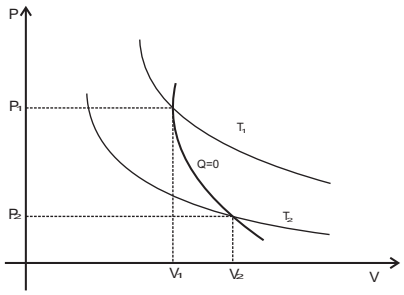


Figura 13.6: Proceso isotérmico

13.1.8. Primera Ley de la Termodinámica

La cantidad de calor comunicada a un sistema se gasta en el incremento de su energía interna y en el trabajo que realizan las fuerzas del sistema aplicadas a cuerpos exteriores. Siempre que desaparece una cantidad de energía calorífica, necesariamente ha aparecido o desaparecido, respectivamente, una cantidad equivalente de otra u otras formas de energía

Para un proceso: $Q_{12} = W_{12} + \Delta U$

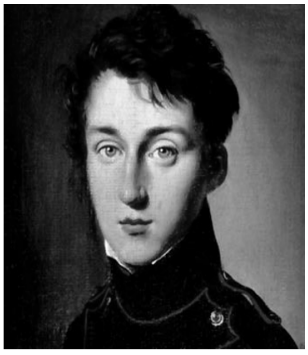
Para un ciclo: $Q_{\text{neto}} = W_{\text{neto}}$

Para un ciclo: $\Delta U = W_{\text{neto}}$

Sesión 14

Segunda Ley de la Termodinámica

Carnot, Nicolas Léonard Sadi (1797 - 1832)



Físico e ingeniero militar francés, estudió en la Escuela Politécnica. En 1824 describió su concepción del motor ideal, el llamado motor de Carnot, en el que se utiliza toda la energía disponible. Descubrió que el calor no puede pasar espontáneamente de un cuerpo más frío a uno más caliente, y que la eficacia de un motor depende de la cantidad de calor que es capaz de utilizar. Este descubrimiento es la base de la segunda ley de la termodinámica.

Describió el ciclo térmico que lleva su nombre (CICLO DE CARNOT), a partir del cual se deduciría el segundo principio de la termodinámica. Hijo del revolucionario Lazare Carnot, en 1812 ingresó en la École Politechnique y se graduó dos años después, en la época en que se iniciaba el declive del imperio napoleónico y los ejércitos extranjeros asediaban París. Muchos estudiantes, entre ellos Carnot, participaron en las escaramuzas que se produjeron en las afueras de la capital francesa.

Tras la guerra con el Reino Unido, Francia tuvo que importar de ese país la maquinaria de vapor más avanzada de la época, lo cual reveló a Carnot lo atrasada que se encontraba Francia con respecto a los demás países industrializados. Este hecho, unido a las inspiradoras conversaciones que mantuvo con el eminente científico e industrial Nicolas Clément-Desormes, lo impulsaron a centrar su actividad en el desarrollo de las máquinas movidas por vapor.

En su ensayo publicado en 1824 bajo el título reflexiones sobre la potencia motriz del fuego, Carnot, sin perderse en detalles técnicos, describió el ciclo energético de una máquina idealizada, cuyo rendimiento depende únicamente de las temperaturas inicial y final de la sustancia que impulsa la máquina (vapor o cualquier otro fluido), con independencia de la naturaleza de la misma.

Este trabajo, aunque no fue mal acogido por la comunidad científica, cayó en el olvido hasta 1934, cuando fue rescatado por el ingeniero ferroviario francés Émile Clapeyron. A partir de entonces influyó de forma definitiva en la labor de desarrollo de la teoría termodinámica encabezada por Rudolf Clausius en Alemania y William Thomson (lord Kelvin) en Reino Unido. Siguió con su labor científica hasta su temprana muerte en el año 1832, víctima de la epidemia de cólera que asoló París en esas fechas.

Introducción

La primera ley de la termodinámica resulta útil para comprender el flujo de energía durante un proceso dado. Sin embargo, no nos dice cuales procesos que conservan la energía son en realidad posibles, ni nos permite predecir en qué estado se hallará un sistema en unas condiciones

determinadas.

La Segunda Ley de la Termodinámica puede utilizarse para responder a estas preguntas.

Pero ejemplo, supóngase que se quema combustible y el calor producido se suministra a una máquina de vapor. La primera ley requiere que el trabajo realizado por la máquina más el calor expulsado al medio ambiente sea igual al calor suministrado a la máquina, ya que la energía interna no varía. Sin embargo la primera ley no nos da cual es la razón del trabajo realizado al calor suministrado, es decir, el rendimiento de la máquina. La segunda ley nos da el rendimiento de la máquina idealizada y nos permite obtener cotas del rendimiento de las máquinas reales.

14.1. Definiciones Fundamentales

14.1.1. Ciclo Termodinámico

Es una sucesión de estados de equilibrio por los cuales pasa el sistema, de tal manera que el estado final coincide con el estado inicial.

La conversión de la energía es un proceso que tiene lugar en la biosfera. Sin embargo, los seres humanos a lo largo de su historia hemos inventado diversos artefactos que posibilitan también la conversión energética. La eficiencia con que esta transformación se produce está directamente relacionada con la proporción entre su forma final y su forma inicial y también depende de las leyes físicas y químicas que gobiernan la conversión.

En los procesos termodinámicos, las máquinas o motores térmicos convierten energía térmica en energía mecánica o viceversa. Según la teoría termodinámica, ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia superior a la del proceso reversible de Carnot, denominado también ciclo de Carnot.

Una serie de ciclos termodinámicos se han implementado en la práctica:

- El ciclo Bryton, que consiste en turbinas de vapor y motores de reacción.
- El ciclo Otto, ampliamente utilizado en el sector de la automoción.
- El ciclo Diesel, muy utilizado en navegación marítima, ferrocarriles y automóviles.

- El ciclo Sterling, muy parecido al ciclo ideal de Carnot, y que suele utilizar aire u otro gas como fluido de trabajo. Este ciclo también se emplea en el bombeo solar de agua.
- El ciclo Ericsson, que utiliza aire caliente como fluido de trabajo y que está específicamente pensado para aplicaciones solares.

14.1.2. Máquinas Térmicas

Son dispositivos que convierten energía térmica en otras formas útiles de energía como la energía eléctrica y mecánica.

Dispositivo diseñado con la finalidad de transformar calor en trabajo, para lo cual la máquina sigue un ciclo termodinámico.

Tiene como función que una sustancia de trabajo recorra un proceso cíclico durante el cual:

1. Se absorbe calor de una fuente a alta temperatura
2. La máquina realiza un trabajo, y
3. Libera calor a una fuente de temperatura más baja.

En una máquina de vapor, como ejemplo de un proceso cíclico, el agua es la sustancia de trabajo.

Toda máquina térmica se puede representar por el esquema:
El trabnajo neto producido por la maquina en un ciclo es igual al calor neto transferido y es una consecuencia de la primera Ley

$$W = Q_1 - Q_2 \tag{14.1}$$

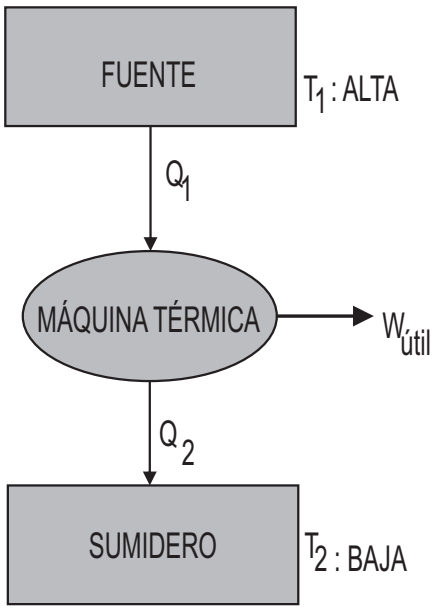


Figura 14.1: Esquema de una Máquina Térmica

14.1.3. Eficiencia o Rendimiento (η)

Como se ha visto, la primera ley es una aplicación de la conservación de la energía, pero no afirma nada respecto al curso que toman los acontecimientos en el universo. Se conserva la energía cuando cae una piedra y su energía potencial gravitatoria se transforma en cinética. Pero al chocar la piedra con el suelo y al llegar al reposo, su energía cinética se transforma en energía térmica.

Sin embargo, una piedra que se encuentra en reposo sobre el suelo nunca cambia la energía térmica de ella y de la vecindad de energía cinética y sale disparada hacia arriba. La primera ley no excluye esta posibilidad ya que este proceso inverso también conserva la energía, pero tal proceso no ocurre.

Hay otros procesos en el universo que no están excluidos por la primera ley que no ocurre. Por ejemplo, en forma es-

pontánea el calor fluye de un cuerpo caliente a otro, frío pero no espontáneamente del cuerpo frío al caliente. Esto nos indica que en la naturaleza los procesos se presentan en una sola dirección en forma espontánea; la segunda ley ha sido formulada en varias formas, todas ellas equivalentes. Una de las más antiguas establece:

"el calor fluye espontáneamente de un objeto caliente a otro frío y no a la inversa". En virtud de esto, es imposible que en un proceso cíclico se transfiera calor de un cuerpo de baja temperatura a un cuerpo de alta temperatura a menos que se efectúe un trabajo externo sobre el sistema que efectúa el ciclo.

Conclusiones de la Segunda Ley de la Termodinámica

1. Es imposible tomar calor de un recipiente y convertido completamente en trabajo sin que efectúen otros cambios en el sistema o en sus alrededores.
2. Es imposible para cualquier proceso tener como único resultado desde un cuerpo frío a uno caliente

14.1.4. Ciclo de Carnot

Una máquina de Carnot es perfecta, es decir, convierte la máxima energía térmica posible en trabajo mecánico. Carnot demostró que la eficiencia máxima de cualquier máquina depende de la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima alcanzadas durante un ciclo. Cuanto mayor es esa diferencia, más eficiente es la máquina. Por ejemplo, un motor de automóvil sería más eficiente si el combustible se quemara a mayor temperatura o los gases de escape salieran a menor temperatura.

- ab y cd: expansión y compresión isotérmicas.

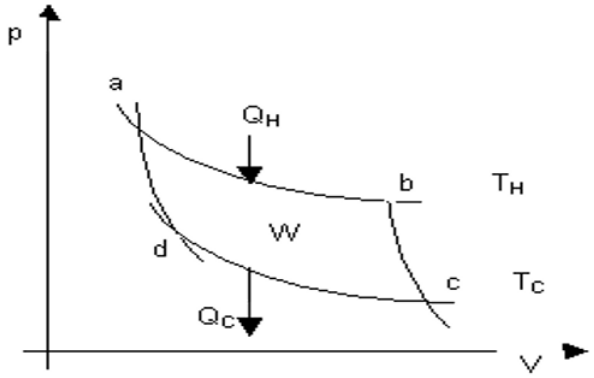


Figura 14.2:

- bc y ad: expansión y compresión adiabáticas.

$$\eta = \frac{W_{\text{útil}}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Sesión 15

Fenómenos Electrostáticos

Benjamin Franklin (1706 - 1790)

Político, científico e inventor estadounidense. Decimoquinto hermano de un total de diecisiete, Benjamin Franklin cursó únicamente estudios elementales, y éstos sólo hasta la edad de diez años. A los doce comenzó a trabajar como impresor en una empresa propiedad de uno de sus hermanos. Más tarde fundó el periódico La Gaceta de Pensilvania, que publicó entre los años 1728 y 1748. Publicó además el Almanaque del pobre Richard (1732-1757) y fue responsable de la emisión de papel moneda en las colonias británicas de América (1727).

El interés de Benjamin Franklin por los temas científicos comenzó a mediados de siglo y coincidió con el inicio de su actividad política, que se centró en diversos viajes a Londres, entre 1757 y 1775, con la misión de defender los intereses de Pensilvania. Participó de forma muy activa en el proceso que conduciría finalmente a la independencia de las colonias británicas de América, intervino en la redacción de la Declaración de Independencia (1776) junto a Jefferson y J. Adams, y se desplazó a Francia en busca de

ayuda para proseguir la campaña contra las tropas británicas.

Finalizada la guerra, Benjamin Franklin fue partícipe en las conversaciones para concluir el tratado de paz que pondría fin al conflicto y contribuyó a la redacción de la Constitución estadounidense.

Por lo que respecta a su actividad científica, durante su estancia en Francia, en 1752, llevó a cabo el famoso experimento de la cometa que le permitió demostrar que las nubes están cargadas de electricidad y que, por lo tanto, los rayos son esencialmente descargas de tipo eléctrico.

Para la realización del experimento, no exento de riesgo, utilizó una cometa dotada de un alambre metálico unido a un hilo de seda que, de acuerdo con su suposición, debía cargarse con la electricidad captada por el alambre. Durante la tormenta, acercó la mano a una llave que pendía del hilo de seda, y observó que, lo mismo que en los experimentos con botellas de Leyden que había realizado con anterioridad, saltaban chispas, lo cual demostraba la presencia de electricidad.

Este descubrimiento le permitió inventar el pararrayos, cuya eficacia dio lugar a que ya en 1782, en la ciudad de Filadelfia, se hubiesen instalado 400 de estos ingenios. SUS trabajos acerca de la electricidad le llevaron a formular conceptos tales como el de la electricidad negativa y positiva, a partir de la observación del comportamiento de las varillas de ámbar, o el de conductor eléctrico, entre otros.

Introducción

Hoy en día nos encontramos rodeados de aparatos eléctricos de toda clase, desde lámparas, pilas de relojes, motores, aparatos de sonido estereofónico, computadoras, celulares de alta tecnología y mucho más. Todo este avance de la tecnología ha sido posible gracias al conocimiento logrado de las fuerzas eléctricas o electromagnéticas; con ello se ha logrado no solo desarrollar la tecnología si no también comprender el comportamiento de átomos y moléculas.

También elaborar una teoría comprensiva de la radiación, estudiar las propiedades de las sustancias conductoras y aislantes, y muchos otros fenómenos.

El estado del mundo ciertamente sería muy primitivo si no se conociera la electricidad (o el electromagnetismo), y las economías de los países más adelantados serían muy distantes de cómo son en la actualidad.

15.1. Nociones Fundamentales

15.1.1. Carga Eléctrica

La carga eléctrica, al igual que la masa, es una propiedad intrínseca de la materia. Es decir todo cuerpo tiene masa y carga eléctrica.

Propiedade de la Carga Eléctrica

Carga elemetal.- Es la carga, en valor absoluto, de dos partículas elementales: el electrón y el protón. El electrón es portador de la carga negativa -e, y el protón es portador de la carga positiva $+e$.

Tipos de carga.- Hay dos tipos de cargas, llamadas convencionalmente positivas y negativas. Un cuerpo posee carga positiva cuando presenta un defecto de electrones y posee una carga negativa cuando presenta un exceso de electrones. En estado natural las partículas portadoras de cargas distintas están presentes en cualquier cuerpo en cantidades iguales y distribuidas con igual densidad de carga. En este caso, la suma algebraica de las cargas, en cualquier volumen elemental del cuerpo, es igual a cero y cada uno de estos volúmenes, y el cuerpo en conjunto, será **neutro**.

Cuantización de la carga eléctrica

Si una magnitud física puede tomar solamente valores discretos, se dice que esta magnitud está cuantizada. Toda carga, denotada por q, está formada por un conjunto de cargas elementales, es entera y múltiplo de la carga del electrón, a quien se considera la unidad natural de carga eléctrica.

$$q = \pm ne$$

En el SI, la unidad de carga eléctrica es el coulomb (C). En esta unidad, la carga del electrón equivale a $1,6x10^{-19}C$.

Principio de coservación de la carga eléctrica

"La carga total de un sistema eléctricamente aislado no puede cambiar". Esto significa que durante un fenómeno eléctrico la carga eléctrica del sistema aislado no se altera, es decir, no aumenta ni disminuye.

Un sistema se llama eléctricamente aislado si a través de la superficie que lo limita no pueden penetrar partículas cargadas.

15.2. Clasificación de los cuerpos según sus propiedades eléctricas

15.2.1. Conductores

Son aquellos cuerpos que tienen la propiedad de transportar las cargas eléctricas sin experimentar cambios en su estructura interna. Los metales son materiales conductores que contienen gran cantidad de portadores de carga libre, esencialmente electrones, que son sensibles a la presencia de campos eléctricos externos.

15.2.2. Aislantes

Llamados también dieléctricos, son sustancias en las que las partículas cargadas están fuertemente ligadas a las moléculas constituyentes de modo que, ante la presencia de campos eléctricos externos, cambian ligeramente sus posiciones en la vecindad de sus moléculas.

15.3. Electrización de los cuerpos

Es el proceso mediante el cual se logran cargar eléctricamente los cuerpos. Entre los más conocidos tenemos:

15.3.1. Por contacto

Consiste en cargar un cuerpo con sólo ponerlo en contacto con otro previamente electrizado. En este caso, ambos quedarán cargados con carga del mismo signo. Si el cuerpo cargado es positivo (le faltan electrones), puesto en contacto con el cuerpo neutro, le sustrae electrones para compensar su defecto. El resultado final es que el cuerpo cargado se hace menos positivo y el neutro adquiere carga eléctrica positiva.

15.3.2. Por frotamiento

Esta forma de electrización se hace frotando un cuerpo flexible como un paño de lana sobre subuna barra de plástico durante el cual el paño libera electrones que los gana la barra y así ambos cuerpos quedan con cargas de igual magnitud pero de signos opuestos.

15.3.3. Por Inducción

Cuando se acerca un cuerpo electrizado a un cuerpo conductor, se establece una interacción eléctrica entre las cargas del primero y las cargas elementales del cuerpo neutro. Como resultado de esta interacción, la distribución inicial se ve alterada: el cuerpo electrizado provoca el desplazamiento de los electrones del cuerpo neutro. En este proceso de redistribución de cargas, la carga neta inicial no ha variado en el cuerpo neutro, pero en algunas zonas se

carga positivamente y en otras negativamente. Se dice entonces que aparecen cargas eléctricas inducidas por parte del cuerpo neutro, a causa del cuerpo electrizado, llamado inductor, siendo ambas de signos opuestos.

15.4. Ley de Coulomb

La ley de Coulomb describe la interacción entre dos cargas eléctricas puntuales del mismo o de distinto signo. La fuerza entre ellas es repulsiva si las cargas son del mismo signo y es atractiva si las cargas son de signo contrario.

15.4.1. Interacción entre cargas

La interacción entre cargas es la acción recíproca entre dos cuerpos que poseen dichas cargas. En general, al tratar el fenómeno de atracción o repulsión entre cargas, nos estamos refiriendo a la interacción que surge entre los cuerpos debido a las cargas que poseen.

15.4.2. Carga Puntual

Se llama carga puntual a la carga de un cuerpo cuyas dimensiones son pequeñas en comparación con el resto de las dimensiones espaciales de su entorno o cuando los efectos derivados de la distribución de la carga ebn un espacio finito se anulan. Por ejemplo, una esfera conductora de radio R, para puntos exteriores, se comporta como si toda la carga estuviese concentrada en el centro de la esfera.

15.4.3. Ley Cualitativa

Cargas del mismo signo se repelen; cargas de signos diferentes se atraen.

15.4.4. Ley Cuantitativa

Dos cargas puntuales se atraen o repelen con fuerzas de igual intensidad pero de sentidos opuestas, cuyo valor es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional con el cuadrado de la distancia que las separa. Además, la fuerza está a lo largo de la línea de acción que une los centros de las cargas(Ver Fig 15.1).

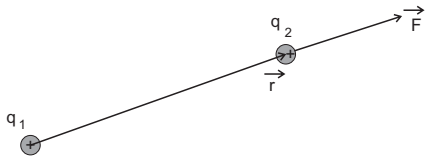


Figura 15.1:

$$F = K_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{15.1}$$

La expresión vectorial es:

$$\vec{F} = K_e \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r} \tag{15.2}$$

donde: $k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_o\epsilon_r}$, constante de proporcionalidad de Coulomb.

En el vacío: $k_e = 9 \times 10^9 \frac{N.m^2}{C^2}$

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} C^2/N.m^2$: perrnitividad eléctrica del vacío;

ϵ_r: permitividad eléctrica del medio o constante dieléctrica ($\epsilon_r \geq 1$)

15.4.5. Líenas de Fuerza Eléctrica - Propiedades

La interacción entre un par de cargas es independiente de la interacción entre una de ellas con una tercera carga. Esto quiere decir que la fuerza eléctrica sobre una carga no se altera por la existencia de otras fuerzas debidas a la interacción entre ésta con otras cargas.

Una **línea de fuerza**, es la curva cuya tangente proporciona la dirección del campo en ese punto. Como resultado, también es perpendicular a las líneas equipotenciales en la dirección convencional de mayor a menor potencial. Suponen una forma útil de esquematizar gráficamente un campo, aunque son imaginarias y no tienen presencia física.

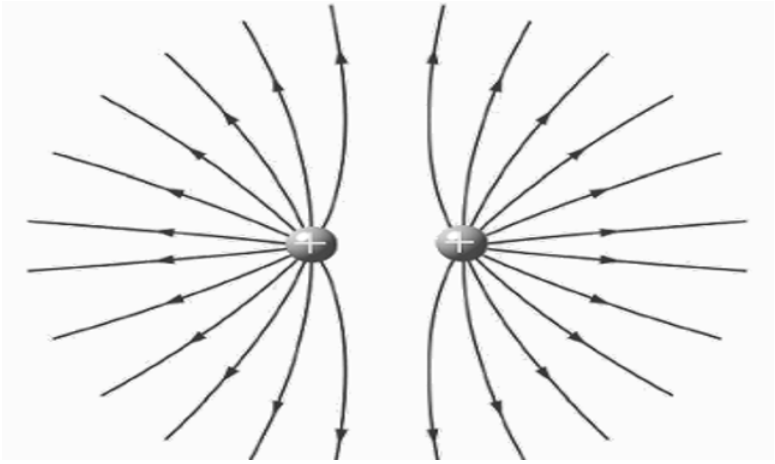


Figura 15.2:

15.5. Campo Eléctrico

Llamamos campo eléctrico a la región de espacio que rodea a toda carga eléctrica y cuyas propiedades han sido alteradas por aquella. El concepto de **campo** surge ante la necesidad de explicar la forma de interacción entre cuerpos en ausencia de contacto físico y sin medios de sustentación para las posibles interacciones, llamadas **acciones a dis-**

tancia, por lo tanto, dos cargas interaccionan a través de sus campos (ver Fig: 15.3). El campo se propaga a través del espacio a la velocidad de la luz.

$$\vec{E} = \left(\frac{\vec{F}}{q_0}\right)_{q_0 \to 0} \tag{15.3}$$

Las unidades de medición son: $[E] = \frac{N}{C}$; si: q(+)

15.5.1. Campo creado por una carga puntual

Toda carga puntual genera a su alrededor un campo radial cuya intensidad es directamente proporcional con la carga pero inversamente proporcional con el cuadrado de la distancia.

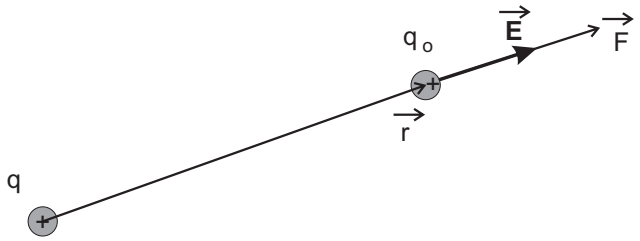


Figura 15.3:

$$E = K_e \frac{q}{r^2} \tag{15.4}$$

La expresión vectorial es la siguiente:

$$\vec{E} = K_e \frac{q}{r^3}\vec{r} \tag{15.5}$$

15.5.2. Principio de superposición de campos

La intensidad del campo de un sistema de cargas en un punto es igual a la suma vectorial de las intensidades de los campos que crearían cada una de las cargas del sistema por separado sobre dicho punto.

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i \tag{15.6}$$

15.5.3. Líneas de Campo Eléctrico

Se llaman líneas de fuerza de campo eléctrico a aquellas líneas imaginarias que son tangentes a la dirección del campo en cada uno de sus puntos.

15.5.4. Propiedades de las líneas de campo

1. El número de líneas que pasa por una superficie unitaria y normal a las líneas (llamada densidad de líneas de fuerza), es proporcional a la intensidad campo eléctrico en dicho lugar.
2. Convencionalmente, las líneas se originan y parten de las cargas positivas, se dirigen y terminan en cargas negativas o en el infinito. Es la propiedad de divergencia dice que el campo eléctrico.
3. Por cada punto del campo pasa solo una línea.

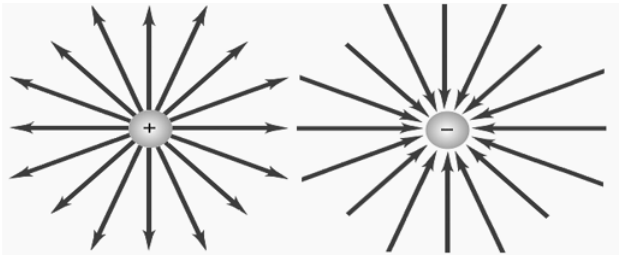


Figura 15.4:

15.5.5. Esfera conductora cargada

En una esfera conductora las cargas se distribuyen uniformemente sobre la superficie externa debido a una repulsión entre todas, hasta alcanzar el equilibrio.

Se verifica que el campo eléctrico en su interior es nulo y éste solo existe desde su superficie externa hacia afuera pero cuya dirección pasa por el centro de la esfera. Si una esfera conductora de radio R, está aislada, la carga Q puede suponerse concentrada en su centro geométrico y la intensidad del campo en cualquier punto está dada por:

$$\vec{E} = K_e \frac{q}{r^2}\vec{u}; \qquad r \geq R; \qquad E_{int} = 0$$

15.6. Potencial Eléctrico

Llamamos potencial eléctrico de un punto a la característica escalar del campo eléctrico en dicho lugar, asociado a un nivel de energía característico. El potencial de un punto no depende de la carga a colocar en dicho lugar, sino, de la carga que creó el campo.

El potencial eléctrico es una propiedad de cada punto del espacio que rodea a una carga y su valor solo depende de esta y expresa la cantidad de energía que posee la carga de prueba unitaria, puntal y positiva colocada en dicho punto.

15.6.1. Potencial eléctrico creado por una carga puntual

El potencial eléctrico en un punto (A) del campo creado por una Q carga puntual Q (Ver Fig: 15.5), se define como el trabajo (W_A) que debe realizar un agente externo para

trasladar una carga (q) puntual y positiva desde el infinito hasta dicho punto.

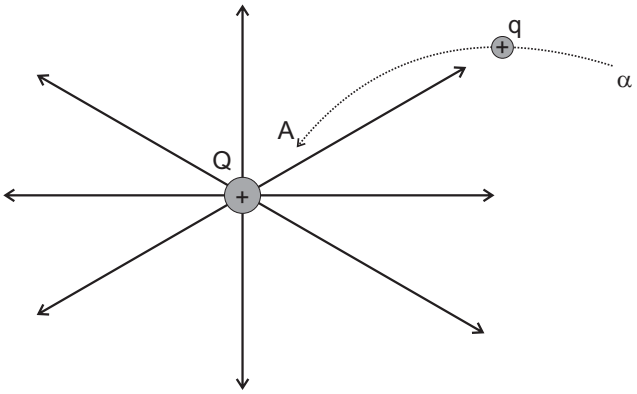


Figura 15.5:

$$V = \frac{W_{\infty \to A}}{q}; \qquad V = K_e \frac{Q}{r} \tag{15.7}$$

Unidades: voltio(V)=$\frac{\text{Joule(J)}}{coulomb(C)}$

15.6.2. Principio de superposición de potenciales

El potencial del campo creado por un sistema de cargas en un punto del campo es igual a la suma algebraica de los potenciales creados por cada una de las cargas por separado.

15.6.3. Diferencia de potencial eléctrico

Dos puntos B y A de un campo presentan una diferencia de potencial, o tensión, calculada por $V_B - V_A$, se define como el trabajo necesario $W_{A \to B}$ que debe realizar un agente externo por unidad de carga de prueba, para moverlo contra las fuerzas del campo desde A hasta B.

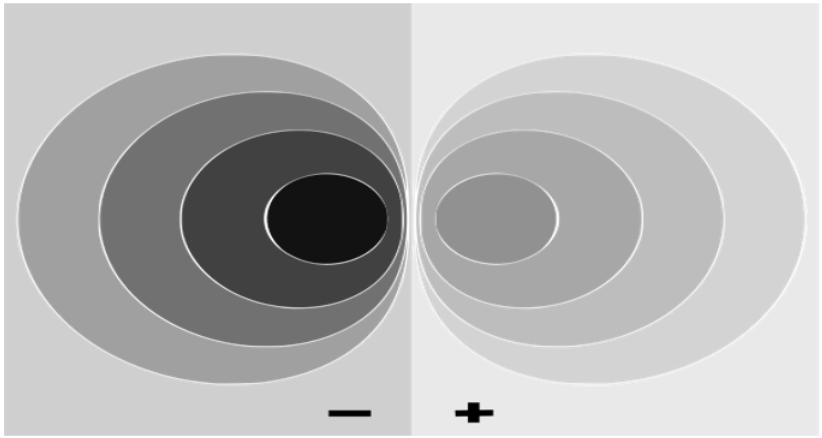
$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{W_{A \to B}}{q}$$

donde $W_{A\to B}$ es el trabajo realizado por el agente externo para transportar la carga q desde A hasta B. En un proceso cuasiestático (lento y en equilibrio) se cumple que el trabajo realizado por el agente externo es igual pero de signo contrario al trabajo realizado por el campo.

15.6.4. Líneas y superficies equipotenciales

Se llaman superficies equipotenciales a las superficies imaginarias constituidas por puntos que tienen el mismo potencial eléctrico.

La característica de estas superficies es que son perpendiculares a las líneas del campo eléctrico.



15.6.5. Potencial creado por una esfera conductora cargada

Cuando una esfera conductora se electriza, el potencial eléctrico en su interior es uniforme y su valor es el mismo que presenta en su superficie externa, convirtiéndose de este modo en un volumen equipotencial.

$$V_A = V_B = V_C = \text{constante}$$

.

Esfera aislada

En este caso el potencial creado por la esfera se determina considerando que toda la carga está ubicada en el centro de la esfera.

$$V = K_e \frac{Q}{r}; \qquad r \geq R \tag{15.8}$$

15.6.6. Esfera en el interior de un campo

Cuando una esfera cargada se coloca en un campo eléctrico externo, el potencial eléctrico en su centro O viene dado por la suma de dos potenciales: El propio y el que posee el punto O de dicho campo.

$$V_{\text{sup}} = K_e \frac{Q}{q} + V_{\text{región ocupada}} \tag{15.9}$$

15.6.7. Energía Potencial Eléctrica

La energía potencial entre dos cargas puntuales, U, es la energía que almacena el sistema de cargas debido a las fuerzas eléctricas que existen entre ellas. Su valor se determina por el trabajo que debe realizar un agente externo para constituir dicho sistema.

$$U = W_{\infty \to A} = K_e \frac{qQ}{r} \tag{15.10}$$

15.6.8. Trabajo Realizado por el Campo Eléctrico

El trabajo que realiza el campo eléctrico sobre una carga q cuando se mueve desde una posición en el que el potencial es V_A a otro lugar en el que el potencial es V_B es

$$W = E_{pA} - E_{pB} = q\,(V_A - V_B)$$

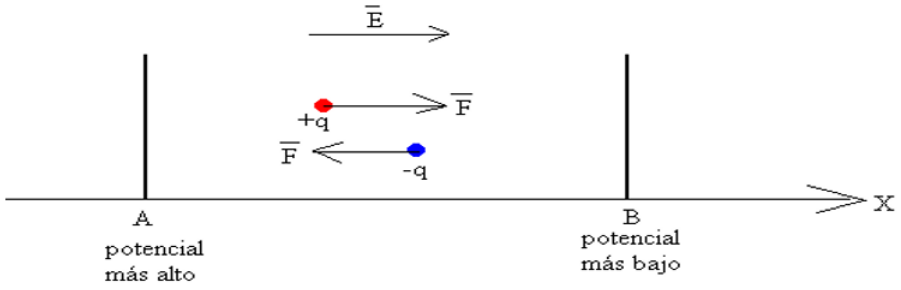


Figura 15.6:

El campo eléctrico realiza un trabajo W cuando una carga positiva q se mueve desde un lugar A en el que el potencial es alto a otro B en el que el potencial es más bajo. Si $q > 0$ y $V_A > V_B$ entonces $W > 0$.

El campo eléctrico realiza un trabajo cuando una carga negativa q se mueve desde un lugar B en el que el potencial es más bajo a otro A en el que el potencial es más alto.

Una fuerza externa tendrá que realizar un trabajo para trasladar una carga positiva q desde un lugar B en el que el potencial es más bajo hacia otro lugar A en el que el potencial más alto.

Una fuerza externa tendrá que realizar un trabajo para trasladar una carga negativa q desde un lugar A en el que el potencial es más alto hacia otro lugar B en el que el potencial más bajo.

Sesión 16

Electrodinámica

16.1. Georg Simon Ohm (1789 - 1854)

Físico alemán. Descubridor de la ley de la electricidad que lleva su nombre, según la cual la intensidad de una corriente a través de un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre los extremos del conductor e inversamente proporcional a la resistencia que éste opone al paso de la corriente.

Hijo de un herrero, alternó en los años de adolescencia el trabajo con los estudios, en los que demostró preferencia por los de carácter científico. En 1803 empezó a asistir a la Universidad de Erlangen, donde hizo rápidos progresos. Primero enseñó como maestro en Bamberg; pero en 1817 fue nombrado profesor de Matemáticas y Física en el instituto de Colonia.

Dedicado desde el principio a los estudios de galvanoelectricidad, en 1827 publicó aspectos más detallados de su ley en un artículo titulado Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet (El circuito galvánico investigado matemáticamente), que, paradójicamente, recibió una acogida

tan fría que lo impulsó a presentar la renuncia a su cargo en el colegio jesuita. Finalmente, en 1833 aceptó una plaza en la Escuela Politécnica de Nuremberg.

Posteriormente su labor comenzó a ser justamente valorada. En 1844, Pouillet resaltaba la importancia de sus intuiciones y al año siguiente Ohm recibía la medalla Copley de la Royal Society de Londres. En 1849 se le confería la cátedra de Física de Munich, donde fue también asesor de la Administración de telégrafos. En honor a su labor, la unidad de resistencia eléctrica del sistema internacional lleva su nombre (ohmio).

Introducción

La electrodinámica es la rama del electromagnetismo que se encarga de estudiar las cargas eléctricas en movimiento. Trata de la evolución temporal en sistemas donde interactúan campos eléctricos y magnéticos con cargas en movimiento.

La electrodinámica consiste en el movimiento de un flujo de cargas eléctricas que pasan de una molécula a otra, utilizando como medio de desplazamiento un material conductor como, por ejemplo, un metal.

Para poner en movimiento las cargas eléctricas o de electrones, podemos utilizar cualquier fuente de fuerza electromotriz (FEM), ya sea de naturaleza química (como una batería) o magnética (como la producida por un generador de corriente eléctrica), aunque existen otras formas de poner en movimiento las cargas eléctricas.

Cuando aplicamos a cualquier circuito eléctrico una dife-

rencia de potencial, tensión o voltaje, suministrado por una fuente de fuerza electromotriz, las cargas eléctricas o electrones comienzan a moverse a través del circuito eléctrico debido a la presión que ejerce la tensión o voltaje sobre esas cargas, estableciéndose así la circulación de una corriente eléctrica cuya intensidad de flujo se mide en Amperios (A).

En otras palabras al contrario de lo que ocurre con la electrostática, la electrodinámica se caracteriza porque las cargas eléctricas se encuentran en constante movimiento. La electrodinámica se fundamenta, precisamente, en el movimiento de los electrones o cargas eléctricas que emplean como soporte un material conductor de la corriente eléctrica para desplazarse.

16.2. Materiales Eléctricos

16.2.1. Conductores

Los materiales conductores son aquellos materiales cuya resistencia al paso de la corriente es muy baja. Los metales son los mejores conductores porque tiene muchos electrones libres. Algunos ejemplos de materiales conductores son el oro, la plata y el cobre.

16.2.2. Semiconductores

Los materiales semiconductores son aquellos capaces de conducir la electricidad mejor que un aislante, pero peor que un metal. Algunos ejemplos de materiales semiconductores son el silicio y el germanio.

16.2.3. Aislantes

Los materiales aislantes son aquellos cuya resistencia al paso de la corriente es muy alta. Algunos ejemplos de materiales aislantes son el diamante, el vidrio, los plásticos y las cerámicas.

La diferencia entre estos materiales es que los conductores son todos aquellos que poseen menos de 4 electrones en la capa de valencia, el semiconductor es aquel que posee 4 electrones en la capa de valencia y el aislante es el que posee más de 4 electrones en la capa de valencia.

16.3. Densidad de Electrones Libres

Es el número de electrones libres por unidad de volumen y se designa por la letra n. Por ejemplo, en el cobre hay, al

menos, $8,45 \times 10^{22}$ electrones libres por centímetro cúbico que es una cantidad inmensamente grande.

$$n = \frac{\text{número de electrones}}{\text{volumen}}$$

16.4. Intensidad de Corriente Electrica (I)

La intensidad de corriente eléctrica es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que pasa por la sección transversal de un medio. En el sistema internacional de unidades se expresa en C/s (coulombs sobre segundo), unidad que se denomina amperio (A).

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{16.1}$$

Donde:

ΔQ es la carga eléctrica que atraviesa la sección transversal del conductor.
Δt es el tiempo que emplea la carga eléctrica en atravesar la sección transversal del conductor.

Por convención la corriente eléctrica está definida en dirección contraria al desplazamiento de los electrones tal como se muestra en la figura.

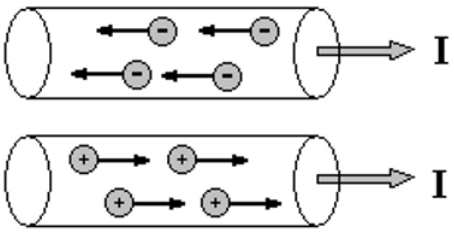


Figura 16.1:

Es útil relacionar la intensidad de corriente eléctrica con

el movimiento de partículas cargadas. Para esto considere la corrientre eléctrica en un conductor de área de sección uniforme A, tal como se muestra en la figura.

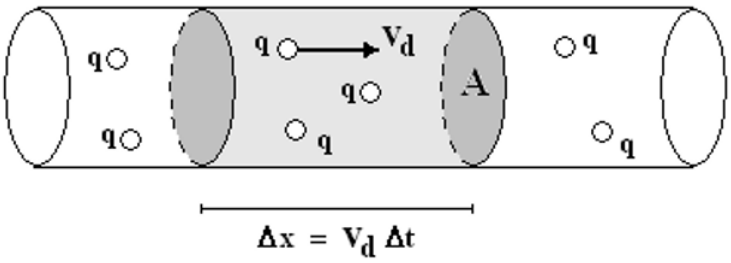


Figura 16.2:

El volumen de un elemento del conductor es $\Delta V = A\Delta x$. Si n es el número de portadores de carga móvil por unidad de volumen, entonces el número de portadores de carga móvil en el elemento de volumen es $nA\Delta x$. Por lo tanto la carga ΔQ en este elemento es el número de cargas por la carga de cada portador, es decir:

$$\Delta Q = (nA\Delta x)q \tag{16.2}$$

Si los portadores de carga se mueven con una velocidad v_d, la distancia que se mueven en un tiempo Δt es $\Delta x = v_d\Delta t$ en consecuencia podemos expresar $\Delta Q = (nAvd\Delta t)q$.

Por lo tanto la intensidad de corriente eléctrica también la podemos expresar de la siguiente manera:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nAv_dq \tag{16.3}$$

Donde:
n es el número de portadores de carga móvil por unidad de volumen.
A es la sección transversal del conductor.
q es la carga eléctrica que tiene cada portador de carga móvil.

v_d es la velocidad promedio de los portadores de carga eléctrica, también conocida como velocidad de arrastre.

16.5. Velocidad de Arrastre (v_d)

El movimiento de los electrones libres en un hilo conductor es los electrones se mueven aleatoriamente en todas direcciones. Como los vectores velocidad de los electrones están orientados al azar, la velocidad media debido a la agitación térmica es nula. Cuando se aplica un campo eléctrico al hilo conductor, sus electrones libres son acelerados por el campo, aunque esta energía cinética es inmediatamente disipada por los choques que experimenta con los iones positivos (núcleos) del sistema cristalino. Los electrones son continuamente acelerados y frenados en un movimiento similar al del esquema mostrado. El resultado neto de esta aceleración y frenado es una velocidad media muy baja denominada velocidad de arrastre.
El cálculo de una corriente de intensidad ordinaria en un hilo de cobre demuestra que la velocidad de arrastre de los electrones es del orden de 0,1 mm/s, es una velocidad realmente pequeña. El transporte de una carga importante por un hilo no se logra con unas pocas cargas que se muevan rápidamente a lo largo de él sino por un gran número de cargas que se arrastran lentamente por el hilo.

$$v_d = \frac{I}{nAq} \tag{16.4}$$

16.6. Densidad de Corriente Eléctrica(J)

La densidad de corriente eléctrica se define como una magnitud vectorial que tiene unidades de corriente eléctrica (I)

por unidad de superficie (A). Matemáticamente, la corriente y la densidad de corriente se relacionan como:

$$J = \frac{I}{A} = nv_d q \tag{16.5}$$

16.7. Resistencia Eléctrica (R)

Es una propiedad que tienen los materiales de oponerse al paso de la corriente eléctrica. Los conductores tienen baja resistencia eléctrica, mientras que en los aisladores este valor es alto. La resistencia eléctrica se mide en Ohm (Ω). En el caso de materiales conductores, a una temperatura, la resistencia eléctrica depende de su geometría, según:

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{16.6}$$

Donde:
ρ es la resistividad eléctrica (depende del material). $\boldsymbol{l}$ es la longitud del conductor. **A** es el área de la sección transversal del conductor

16.8. Diferencia de Potencial Eléctrico (V)

También denominada voltaje es el trabajo realizado por el campo sobre la unidad de carga positiva para desplazarla desde un punto de referencia a otro determinado. El voltaje se mide en voltios (V).

$$V_a - V_b = \frac{W}{q} \tag{16.7}$$

Donde:

W es el trabajo que realiza el campo. **q** es la carga eléctrica.

16.9. Fuerza Electromotriz (Fem)

Es la energía proveniente de cualquier fuente, medio o dispositivo que suministre corriente eléctrica y mantiene una diferencia de potencial entre los terminales de una fuente eléctrica.

16.10. Ley de Ohm

Esta ley establece que:
La densidad de corriente eléctrica que circula por un conductor es directamente proporcional al campo eléctrico establecido en dicho conductor.

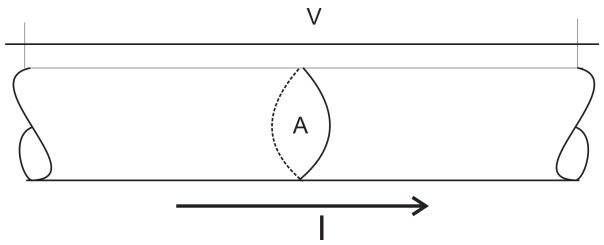


Figura 16.3:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{16.8}$$

O también en su versión más conocida

$$V = IR \tag{16.9}$$

16.11. Potencia Eléctrica (P)

La potencia eléctrica en un circuito eléctrico es la energía generada, consumida o transportada cada segundo, y es igual al producto de intensidad de corriente eléctrica por el voltaje.

$$P = IV \tag{16.10}$$

Usando la ley de Ohm también se puede expresar de las siguientes maneras:

$$P = \frac{V^2}{R} = IR^2 \tag{16.11}$$

Parte III

SUMATIVO III

Sesión 17

Circuitos Eléctricos

Gustav Robert Kirchhoff (1824 - 1887)

Físico alemán. Estrecho colaborador del químico Robert Bunsen, aplicó métodos de análisis espectrográfico (basados en el análisis de la radiación emitida por un cuerpo excitado energéticamente) para determinar la composición del Sol. En 1845 enunció las denominadas leyes de Kirchhoff aplicables al cálculo de tensiones, intensidades y resistencias en el sí de una malla eléctrica, entendidas como una extensión de la ley de la conservación de la energía, basándose en la teoría del físico Georg Simon Ohm, según la cual la tensión que origina el paso de una corriente eléctrica es proporcional a la intensidad de la corriente.

En 1847 ejerció como Privatdozent (profesor no asalariado) en la Universidad de Berlín, y al cabo de tres años aceptó el puesto de profesor de física en la Universidad de Breslau. En 1854 fue nombrado profesor en la Universidad de Heidelberg, donde entabló amistad con Bunsen. Merced a la colaboración entre los dos científicos se desarrollaron las primeras técnicas de análisis espectrográfico, que condujeron al descubrimiento de dos nuevos elementos, el cesio

(1860) y el rubidio (1861).

En su intento por determinar la composición del Sol, Kirchhoff averiguó que cuando la luz pasa a través de un gas, éste absorbe las longitudes de onda que emitiría en el caso de ser calentado previamente. Aplicó con éxito este principio para explicar a las numerosas líneas oscuras que aparecen en el espectro solar, conocidas como líneas de Fraunhofer. Este descubrimiento marcó el inicio de una nueva era en el ámbito de la astronomía. En 1875 fue nombrado catedrático de física matemática en la Universidad de Berlín.

Introducción

La electricidad es una de las formas de energía más empleada por el hombre, hasta tal punto que hoy en día es difícil pensar en nuestra sociedad sin la electricidad. Con ella iluminamos nuestras viviendas, hacemos funcionar nuestros electrodomésticos, medios de transporte, sistemas de comunicación, máquinas, procesos industriales, etc. La electricidad se encuentra presente en nuestra vida cotidiana desde que suena el despertador hasta que apagamos la luz al acostarnos.

El amplio uso y el desarrollo creciente que ha experimentado la electricidad en nuestra sociedad puede explicarse atendiendo a dos razones fundamentales la primera razón es que la electricidad constituye el medio más eficaz para transmitir otras formas de energía (mecánica, química, térmica, etc.) a grandes distancias y de forma casi instantánea. Y la segunda razón es que la electricidad puede utilizarse en cantidades pequeñas muy controladas. De esta forma las señales eléctricas nos sirven para codificar,

intercambiar y procesar información.

La historia de la electricidad es relativamente corta y, en realidad, las aplicaciones más interesantes de los grandes descubrimientos eléctricos se han empezado a desarrollar tan solo desde finales del siglo XIX. Estas aplicaciones, que han ido apareciendo conforme se han hecho progresos en la ciencia eléctrica, pueden dividirse en dos grandes grupos: los sistemas de energía y los sistemas de información.

El éxito de la electricidad como fuente de energía se encuentra en la facilidad para obtenerla, trasportarla y transformarla en otros tipos de energía. Por eso el estudio de los circuitos eléctricos ha sido de primordial importancia para el desarrollo de la humanidad. Su uso en los circuitos integrados ha traído al mercado productos cada vez más pequeños, más eficientes, baratos y multifuncionales, de ahí la importancia de comprender los principios de su funcionamiento.

17.1. Circuito Eléctrico

Es el trayecto o ruta que recorre una corriente eléctrica por un conductor. Un circuito de este tipo se denomina circuito cerrado, y aquéllos en los que el trayecto no es continuo se denominan abiertos.

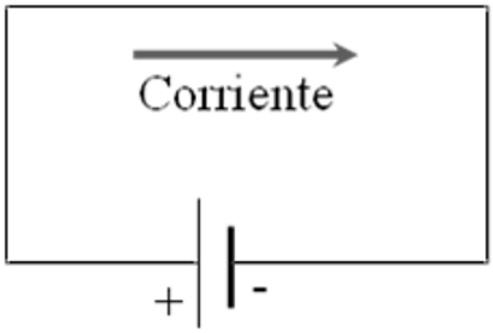


Figura 17.1:

17.2. Asociación de Resistencias

Los resistores o resistencias pueden combinarse entre ellos y sustituirse por una sola resistencia equivalente, las resistencias se pueden combinar en:

17.2.1. En Serie

Se dice que dos resistencias están conectadas en serie cuando el final de una está conectado al principio de la otra, como muestra la figura **??**.

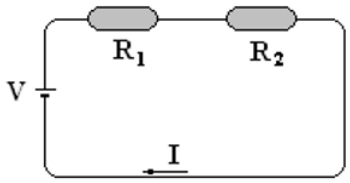


Figura 17.2: Arreglo de resistencias en serie

En una asociación de resistencias en serie se cumplen las siguientes características:

- La intensidad de corriente que circula por cada una de las resistencias es igual a la intensidad total que circula por el circuito.

$$I = I_1 = I_2$$

- La tensión total en los extremos del acoplamiento es igual a la suma de caídas de tensión en todas las resistencias de la asociación.

$$V = V_1 + V_2$$

Empleando la ley de Ohm se deduce que la resistencia total equivalente es la suma algebraica de las resistencias de la asociación.

$$R_eq = R_1 + R_2$$

Generalizando para n resistencias, acopladas en serie, tenemos:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \tag{17.1}$$

17.2.2. Asociación en Paralelo

Se dice que dos resistencias están conectadas en paralelo cuando todos elementos están bajo la misma diferencia de potencial.

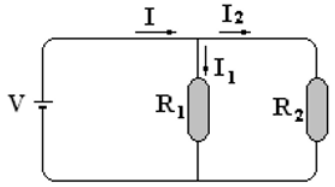


Figura 17.3: Arreglo de resistencias en paralelo

En una asociación de resistencias en paralelo como en la figura anterior se cumplen las siguientes características:

- La intensidad de corriente total del acoplamiento es igual a la suma de las intensidades de corriente que circulan por cada resistencia.

$$I = I_1 + I_2$$

- La tensión eléctrica entre los dos puntos comunes de las resistencias es igual para todas ellas.

$$V = V_1 = V_2$$

Empleando la ley de Ohm se deduce que la inversa de la resistencia total equivalente es la suma de las inversas de cada una de las resistencias de la asociación.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Generalizando para n resistencias, acopladas en paralelo, tenemos:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \tag{17.2}$$

17.3. Leyes de Kirchhoff

17.3.1. Conceptos Básicos

1. **Nodo**: Punto de un circuito en el que se unen tres o más conductores
2. **Rama**: Parte del circuito unida por dos nodos.
3. **Malla**: Recorrido cerrado dentro de un circuito.

17.3.2. Primera Ley de Kirchhof

También llamada ley de los nodos, esta ley establece que:

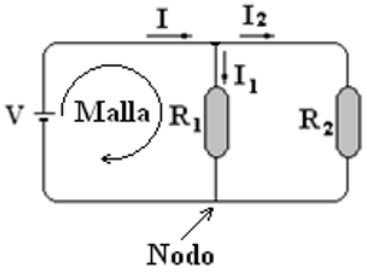


Figura 17.4:

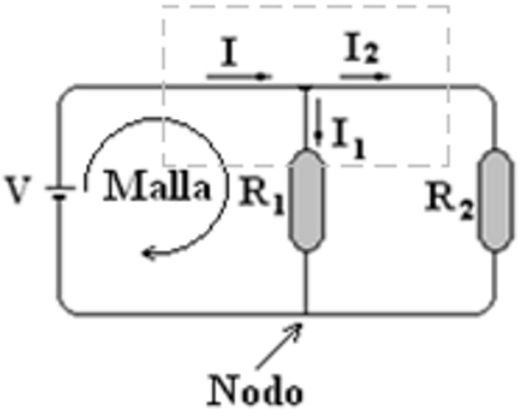


Figura 17.5:

"La suma algebraica de las corrientes que entran y salen de un nodo es igual a cero en todo instante"

$$\sum I = 0 \tag{17.3}$$

$$\sum I_{\text{llegan}} = \sum I_{\text{salen}} \tag{17.4}$$

En la figura.

$$I - I_1 - I_2 = 0$$

Esto es una consecuencia de la conservación de la carga eléctrica.

17.3.3. Segunda Ley de Kirchhof

También llamada ley de las mallas; establece:
"La suma algebraica de los voltajes alrededor de cualquier lazo (camino cerrado) en un circuito, es igual a

cero en todo instante"

$$\sum V = 0 \tag{17.5}$$

En la figura:

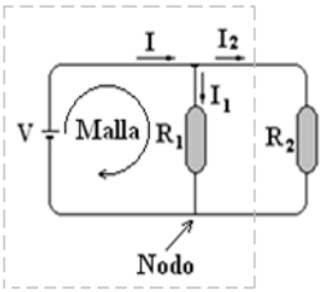


Figura 17.6:

$$V - I_1 R_1 = 0$$

17.4. Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un circuito diseñado para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida.

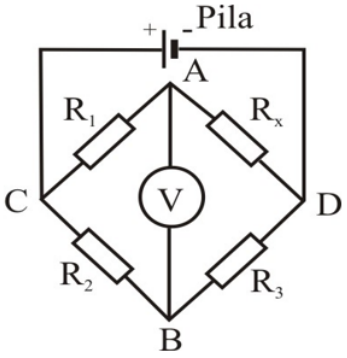


Figura 17.7:

si $V = 0$, se cumple que.

$$R_1 R_3 = R_2 R_x \tag{17.6}$$

17.5. Instrumentos de Medición

Son dispositivos que sirven para medir diferentes magnitudes eléctricas. Uno de los principales instrumentos de medición es el multímetro o multitester que es un instrumento eléctrico portátil para medir directamente magnitudes eléctricas activas como corrientes y voltajes (tensión) o pasivas como resistencias, capacidades y otras. Entre los principales modos de uso que tiene son:

17.5.1. Voltímetro

Es un instrumento que sirve para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico. Se conecta en paralelo (ver Fig: 17.8) y se tiene en cuenta la polaridad cuando el voltaje es directo.

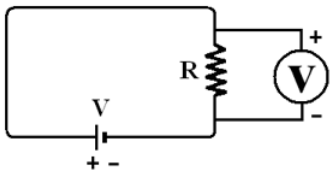


Figura 17.8: Instalación del voltímetro en un circuito eléctrico

17.5.2. Amperímetro

Es un instrumento que sirve para medir la intensidad de corriente que está circulando por un circuito eléctrico. Se conecta en serie y se tiene en cuenta la polaridad (ver Fig: 17.9)
.

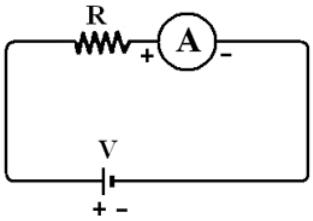


Figura 17.9: Instalación del amperímetro en un circuito eléctrico

17.5.3. Ohmetro

Es un instrumento que sirve para medir la resistencia eléctrica. Se conecta en paralelo teniéndose en cuenta la polaridad. Si la corriente es alterna, no es necesario tener en cuenta la polaridad.

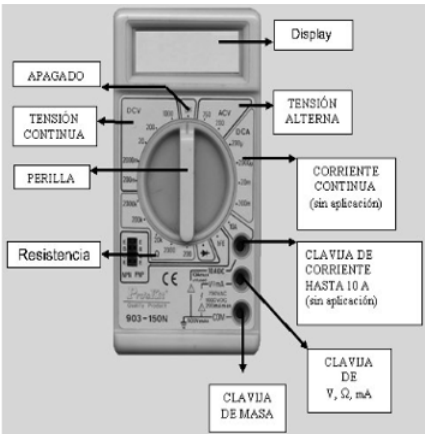


Figura 17.10: Ohmetro

Sesión 18

Fuentes de Campo Magnético

Andre-Marie Ampere (1775 - 1876)

André Marie Ampére fue un matemático, químico y filósofo francés que fundó la ciencia de la electrodinámica. La unidad de medida para la corriente eléctrica (amperio) recibió su nombre en su honor.

El genio de Ampére, particularmente en matemáticas, se hizo evidente desde los primeros años de su vida, a los 12 años de la edad dominaba las matemáticas avanzadas.

Ampére presentó una serie de artículos que exponían la teoría y las leyes básicas del electromagnetismo, la que él llamó electrodinámica, para diferenciarla del estudio de fuerzas eléctricas estacionarias, que denominó electrostáticas.

La culminación de los estudios de Ampére ocurrió en 1827 cuando publicó su Teoría matemática de fenómenos electrodinámicos deducida exclusivamente a partir de experimentos, en la cual dedujo formulaciones matemáticas pre-

cisas del electromagnetismo, principalmente la ley de Ampére.

La vida personal de Ampére estuvo llena de tragedias. Su padre, un adinerado funcionario de la ciudad, fue guillotinado durante la Revolución Francesa, y la muerte de su esposa en 1803 fue una gran desgracia. Ampére murió de neumonía a la edad de 61 años. El juicio de su vida es claro a partir del epitafio que eligió para su lápida: Tándem félix (Al fin feliz).

Introducción

Los primeros fenómenos magnéticos observados son aquellos relacionados con los imanes naturales. Se cuenta que cerca de una ciudad llamada Magnesia (Asia Menor) se encontraron unas piedras que tenían la propiedad de atraer al hierro. El mineral es la magnetita (Fe3O4) y el fenómeno recibió el nombre de magnetismo.

En 1819 Oersted descubrió que, cuando colocaba una brújula cerca de un alambre conductor, la aguja se desviaba cuando pasaba una corriente eléctrica por el alambre. De esta forma se supo que la corriente eléctrica era la fuente de un campo magnético capaz de producir un torque sobre la aguja de una brújula.

Esta observación de Oersted era la primera experiencia que indicaba una conexión entre la electricidad y el magnetismo, que antes de esta experiencia se habían considerados como eventos separados, sin ninguna relación.

Inmediatamente después de que Oersted descubriese que la corriente eléctrica es una fuente de campo magnético, los experimentos que llevaron a cabo André Marie Ampére

(1775-1836), Jean Baptiste Biot (1774-1862) y Félix Savart (1791-1841) dieron lugar a lo que en la actualidad se conoce como la ley de Biot-Savart, que determina el campo magnético creado en un punto del espacio por una corriente eléctrica o por distribuciones de corrientes eléctricas.

En este capítulo con el formalismo de Biot-Savart y el principio de superposición se calculan diversos campos magnéticos para diferentes geometrías. Luego, se muestra como determinar la fuerza entre dos conductores y por último llegar a la ley de Ampére y aplicarla a diferentes configuraciones simétricas de corriente.

18.1. Los Imanes

Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro (también puede atraer al cobalto y al níquel). Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales, como la magnetita (Fe3O4) o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes metales. Podemos decir que un imán permanente es aquel que conserva el magnetismo después de haber sido imantado. Un imán temporal no conserva su magnetismo tras haber sido imantado. En un imán la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos. Estos polos se denominan norte y sur, debido a que tienden a orientarse según los polos geográficos de la Tierra, que es un gigantesco imán natural y como los polos opuestos se atraen, significa que el polo norte geográfico de la tierra es en realidad el polo sur magnético y viceversa (en realidad no coinciden exactamente, están separados unos 1800 km). Las líneas de campo magnético terrestre salen entonces del polo sur geográfico y entran por el polo norte, y la intensidad del campo es en promedio de 50 μ T (30 μT en el ecuador y 70 μT en los polos).

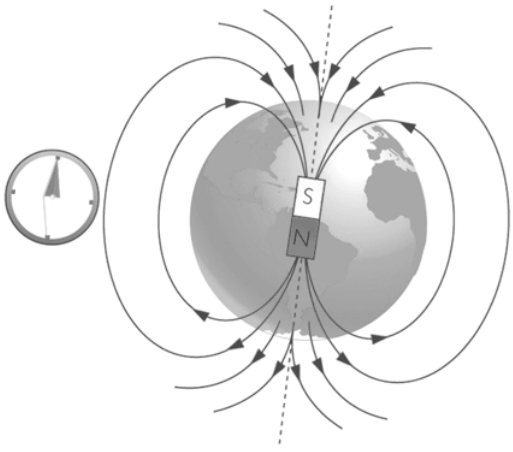


Figura 18.1:

Los polos de un imán son los dos extremos del imán donde

las fuerzas de atracción son más intensas. Estos polos son, el polo norte y el polo sur; (no deben confundirse con positivo y negativo) los polos iguales se repelen y los diferentes se atraen.

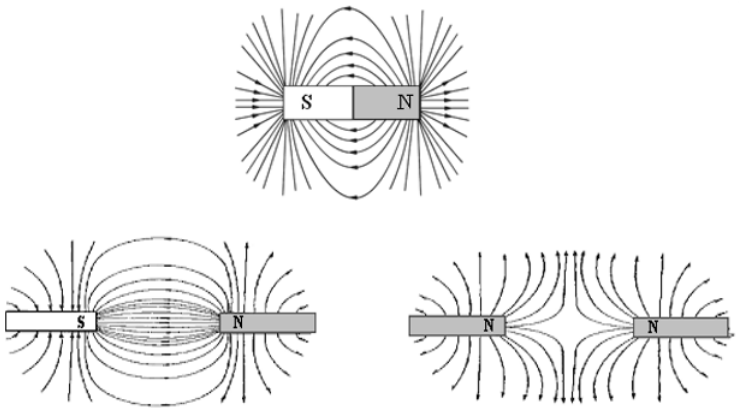


Figura 18.2:

18.2. Campo Magnético

La región del espacio donde se pone de manifiesto la acción de un imán o de un cable que transporta una corriente eléctrica se llama campo magnético. Este campo se representa mediante líneas de fuerza, que son unas líneas imaginarias, cerradas; convencionalmente van del polo norte magnético al polo sur magnético, por fuera del imán y en sentido contrario en el interior de éste. En cualquier punto, la dirección del campo magnético es igual a la dirección de las líneas de fuerza, y la intensidad del campo es inversamente proporcional al espacio entre las líneas; se representa con la letra B.

18.3. Ley de Biot - Savart - Laplace

Esta ley establece que:
El módulo del vector inducción magnética ($\vec{B}$) es dependiente

del medio que circunda al conductor (μ), la corriente circulante por el conductor (I), la geometría del conductor y del alejamiento del punto de inducción (r):

18.3.1. Conductor finito rectilíneo

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a}\cos\theta_1 - \cos\theta_2 \tag{18.1}$$

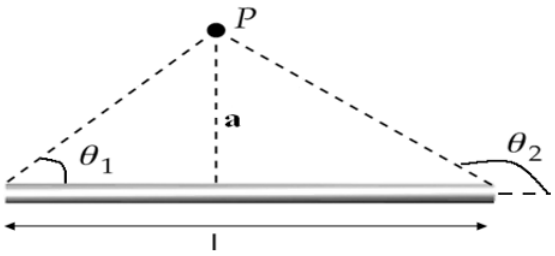


Figura 18.3:

18.3.2. Espira

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \tag{18.2}$$

Campo magnético en el eje de una espira

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2 + r^2)^{3/2}} \tag{18.3}$$

18.3.3. Sector Circular

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}\left(\frac{\theta}{2\pi}\right) \tag{18.4}$$

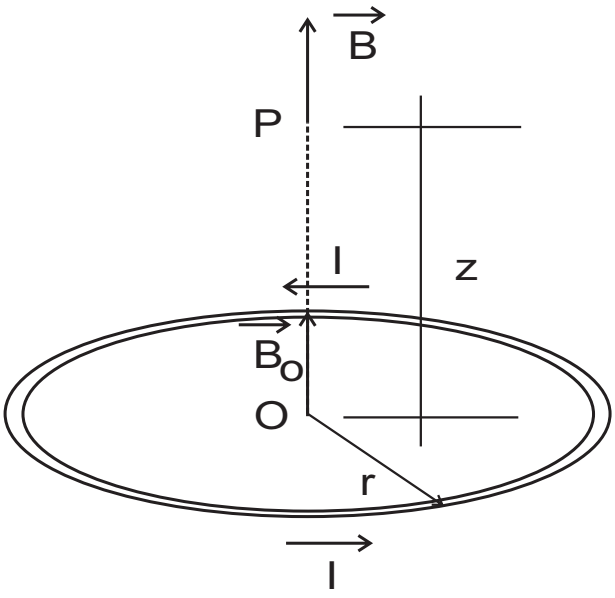


Figura 18.4:

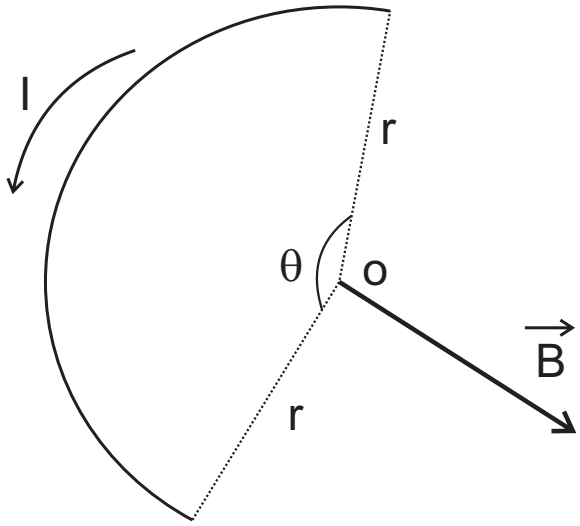


Figura 18.5:

18.3.4. Fuerza entre Conductores

Dos conductores paralelos por los cuales circula una corriente eléctrica ejercen fuerzas magnéticas entre si.

$$F = \frac{\mu_0 L I_1 I_2}{2\pi d} \tag{18.5}$$

- Si las corrientes eléctricas circulan en el mismo sentido la fuerza entre los conductores será atractiva.
- Si las corrientes eléctricas circulan en sentidos opuestos la fuerza entre los conductores será repulsiva.

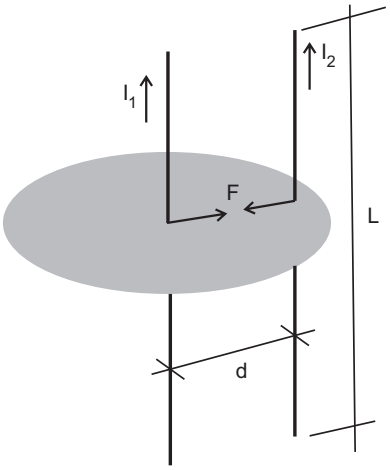


Figura 18.6:

Nota. Un amperio es la intensidad de corriente que, circulando en el mismo sentido por dos conductores paralelos muy largos separados por un metro (R =1 m), producen una fuerza atractiva mutua de $2 \cdot 10^{-7} N$ por cada metro de conductor.

18.3.5. El Solenoide

Es una bobina formada por N vueltas de alambre arrolladas y aisladas, que con el paso de una corriente eléctrica origina en su interior un campo magnético uniforme.
Campo magnético en el centro de un Selenoide.

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L} \tag{18.6}$$

Campo magnético en uno de los extremos del Selenoide.

$$B = \frac{1}{2}\frac{\mu_o N I}{L} \tag{18.7}$$

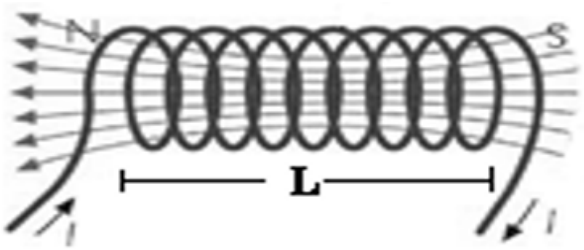


Figura 18.7:

18.3.6. El Toroide

Es un selenoide de N vueltas doblado circularmente y de tal manera que se unan sus extremos.

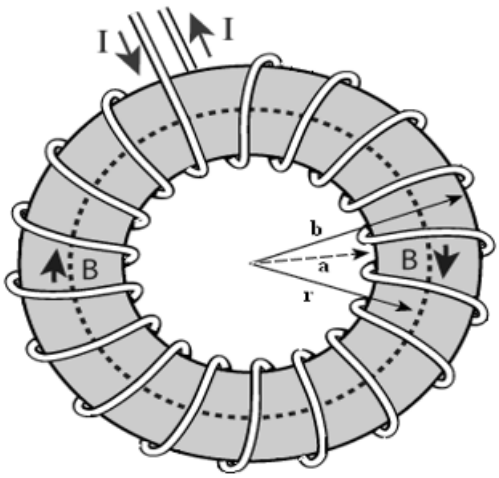


Figura 18.8:

Campo magnético en el interior de un Toroide.

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r} \tag{18.8}$$

Sesión 19

Fuerza y Torque Magnético

Hans Christian Oersted (1777-1851)

Físico y químico danés que descubrió la acción magnética de las corrientes eléctricas. Estudió Física y Farmacia en la Universidad de Copenhague. Terminados sus estudios, en 1794 fue nombrado adjunto de la Facultad de Medicina.

A comienzos de 1820, Oersted advirtió de forma casual, mientras realizaba observaciones sobre el fenómeno eléctrico con una pila análoga a la construida por Volta en 1800, que la aguja de una brújula colocada en las proximidades de un hilo conductor por el que circulaba una corriente eléctrica se desviaba. Repitió incesantemente estos experimentos con pilas más potentes y observó que la aguja oscilaba hasta formar un ángulo recto con el hilo y con la línea que unía la brújula y el hilo.

Oersted demostró poco después que el efecto era simétrico. No sólo el cable recorrido por una corriente ejercía fuerzas sobre un imán (la aguja de la brújula): también el imán desarrollaba una fuerza sobre la bobina (carrete forma-

do por hilo conductor) por donde circulaba una corriente eléctrica, actuando un extremo de la bobina como el polo norte de un imán y el otro como el polo sur. Se establecía así la conexión entre los fenómenos eléctrico y magnético.

Sus resultados se publicaron el 21 de julio de 1820 en un folleto de cuatro hojas escrito en latín, difundido con celeridad a las academias científicas de toda Europa. El 11 de septiembre de 1820 Arago comunicó al Instituto de Francia los resultados de Oersted. Entre la audiencia se encontraba Ampère, a la sazón catedrático de Matemáticas en la École Polytechnique, quien poco tiempo después presentaría una memoria considerada la fundación del electromagnetismo.

Sus resultados se publicaron el 21 de julio de 1820 en un folleto de cuatro hojas escrito en latín, difundido con celeridad a las academias científicas de toda Europa. El 11 de septiembre de 1820 Arago comunicó al Instituto de Francia los resultados de Oersted. Entre la audiencia se encontraba Ampère, a la sazón catedrático de Matemáticas en la École Polytechnique, quien poco tiempo después presentaría una memoria considerada la fundación del electromagnetismo.

Introducción

Esta sesión, se analizan los efectos que produce un campo magnético cuando actúa sobre distintos elementos.

Las fuerzas características de los imanes se denominan fuerzas magnéticas. El desarrollo de la física amplió el tipo de objetos que sufren y ejercen fuerzas magnéticas. Las corrientes eléctricas y, en general, las cargas en movimiento se comportan como imanes, es decir, producen campos magnéticos. Siendo las cargas móviles las últimas en llegar

al panorama del magnetismo han permitido, sin embargo, explicar el comportamiento de los imanes, esos primeros objetos magnéticos conocidos desde la antiguedad.

Una aplicación muy importante consiste en controlar el movimiento de partículas cargadas en el seno de campos eléctricos y magnéticos. Este efecto resulta de gran utilidad en multitud de aplicaciones que van desde la astrofísica hasta los reactores de física nuclear, pasando por dispositivos que emplean haces de partículas cargadas, como los televisores.

Los fenómenos magnéticos habían permanecido durante mucho tiempo en la historia de la ciencia como independientes de los eléctricos. Pero el avance de la electricidad por un lado y del magnetismo por otro, preparó la síntesis de ambas partes de la física en una sola, el electromagnetismo, que reúne las relaciones mutuas existentes entre los campos magnéticos y las corrientes eléctricas.

James Clark Maxwell fue el científico que cerró ese sistema de relaciones al elaborar su teoría electromagnética.

19.1. Movimiento de una Partícula Cargada dentro de un Campo Magnético

Sobre una carga eléctrica en movimiento que atraviese un campo magnético aparece una fuerza denominada fuerza magnética. Ésta modifica la dirección de la velocidad, sin modificar su módulo; el sentido de tal fuerza se obtiene por la regla de la mano derecha. La regla es para cargas positivas. Si las cargas son negativas el sentido es el opuesto al obtenido con cargas positivas.

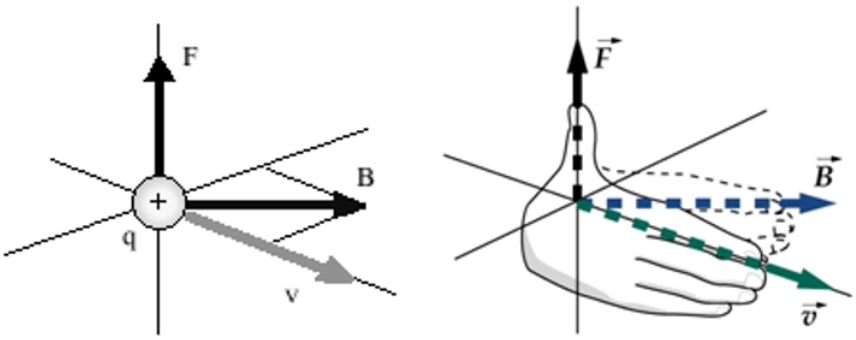


Figura 19.1:

Al observar experimentalmente cómo es la fuerza que un campo B ejerce sobre una carga eléctrica q se cumple que:

- Si la carga está en reposo, el campo B no ejerce ninguna fuerza sobre ella.
- La fuerza es máxima cuando la velocidad de la carga v y el campo B son perpendiculares y es nula cuando son paralelos.
- La fuerza es perpendicular al plano formado por v y B.
- La fuerza es proporcional al valor de la carga, q, y a la Velocidad, v.
- Si la carga cambia de signo, la fuerza cambia de sentido

Resumiendo todos estos hechos, se concluye que la fuerza que un campo magnético B ejerce sobre una carga eléctri-

ca q que se mueve con una velocidad v viene dada por la expresión:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \tag{19.1}$$

Si la carga q se encuentra además bajo la acción de un campo eléctrico E, la fuerza resultante que actúa sobre ella es:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}) \tag{19.2}$$

Conocida como la **fuerza de Lorentz**.
Nota. La regla de la mano derecha para determinar la dirección de la fuerza magnética ejercida sobre una carga que se mueve en un campo magnético consiste en hacer que los dedos de la mano derecha señalen la dirección de v de tal modo que pueden curvarse hacia B, el pulgar señala la dirección de F.

19.2. Alambre Conductor en un Campo Magnético Uniforme

Cuando por un alambre situado en el interior de un campo magnético circula una corriente eléctrica, existe una fuerza que se ejerce sobre el conductor que es simplemente la suma de las fuerzas magnéticas sobre las partículas cargadas cuyo movimiento producen la corriente eléctrica (ver Fig 19.2).

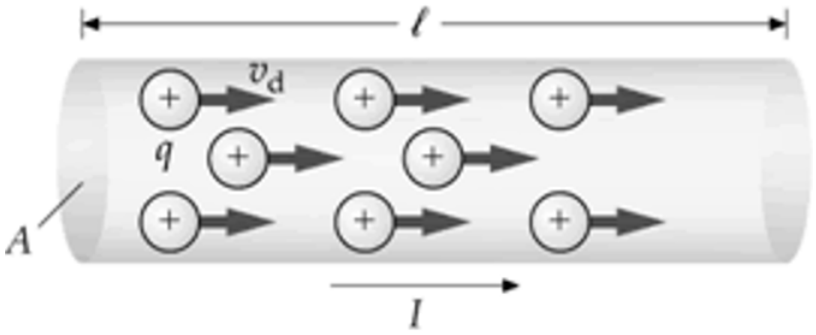


Figura 19.2:

La figura muestra un segmento de alambre corto de área de sección recta A y de longitud L por el cual circula la corriente I. Si el alambre esta en el interior de un campo magnético B, la fuerza magnética sobre cada una de las cargas q es $qv_d \times B$, siendo v_d la velocidad de desplazamiento de los portadores de carga, que es la misma que su velocidad media.La resultante de éstas fuerzas, sobre cada una de las cargas, dan lugar a la fuerza resultante sobre el conductor.

En la figura 19.3 se muestra la deflexión que experimenta un alambre conductor, que conduce una corriente eléctrica, dentro de un campo magnético uniforme.

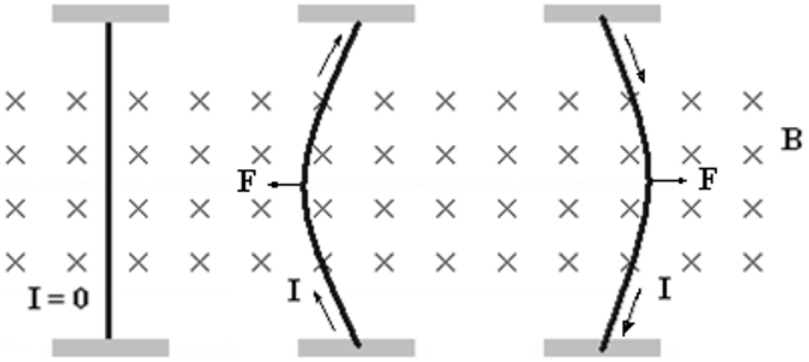


Figura 19.3:

La fuerza puede escribirse de la siguiente manera:

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B} \tag{19.3}$$

Donde L es un vector cuyo módulo es la longitud del hilo y cuya dirección es paralela a la de la corriente eléctrica.

Nota. Cuando las líneas de campo magnético uniforme son perpendicularmente entrantes a la página se simboliza por "x" y cuando éstas líneas son salientes de la página se simboliza por "$\otimes$"

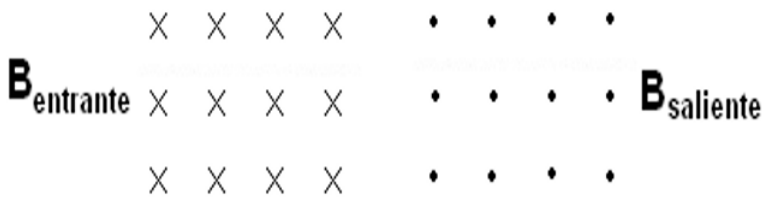


Figura 19.4: Representación de las líenas de inducción magnética cuando son entrantes o salientes a la hoja que usted está leyendo

19.3. Torque Magnético

Cuando una espira de alambre que porta una corriente eléctrica se coloca dentro de un campo magnético, puede experimentar un momento de torsión que la hacer girar alrededor de un eje en particular; este eje suele pasar por el centro de masa de la espira y justamente este torque es el principio de funcionamiento de los motores eléctricos.

En la sección anterior vimos cómo se ejerce una fuerza sobre un conductor que transporta una corriente eléctrica cuando éste está inmerso en un campo magnético. Tomando esto como punto de partida considere una espira rectangular de área A que transporta la corriente I colocada en un campo magnético uniforme, cuya dirección forma un ángulo de 90^o con la normal al plano (Fig 19.5) de la espira como se muestra en la figura que nos da una vista frontal de la espira.
La fuerza sobre los lados de longitud a es nula debido a que estos conductores están paralelos al campo magnético, sin embargo la magnitud de las fuerzas para los lados de longitud b es $F = IbB$.

Debido a que la corriente eléctrica tiene un sentido en uno de los lados b y sentido opuesto en el otro, las fuerzas sobre estos lados también son opuestas, y suponiendo que estos lados tienen un pivote en el punto O, se producirá

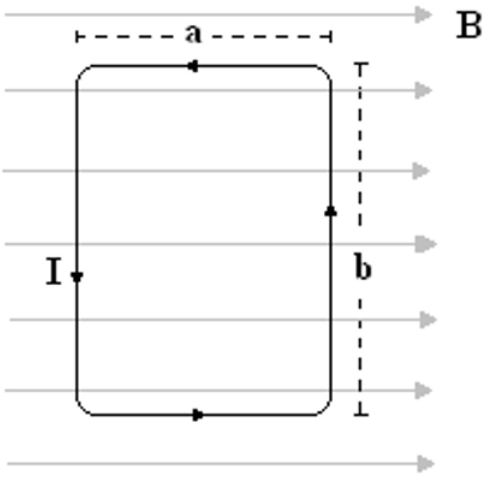


Figura 19.5:

un torque debido a estas fuerzas tal como se muestra en la figura 19.6 que nos da una vista inferior de la espira.

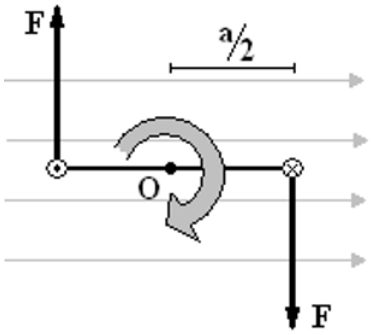


Figura 19.6:

Este momento de torsión es:

$$\tau = F\left(\frac{a}{2}\right) + F\left(\frac{a}{2}\right) = IbBF\left(\frac{a}{2}\right) + IbBF\left(\frac{a}{2}\right) = IabB$$

Puesto que el área de la espira es $A = ab$, entonces el torque máximo en la espira es:

$$\tau = IAB \tag{19.4}$$

Recuerde que este resultado solo es válido cuando el campo magnético es paralelo al plano de la espira.

Supongamos ahora que el campo magnético forma un ángulo θ con la línea perpendicular al plano de la espira, tal como lo muestra la figura 19.7.

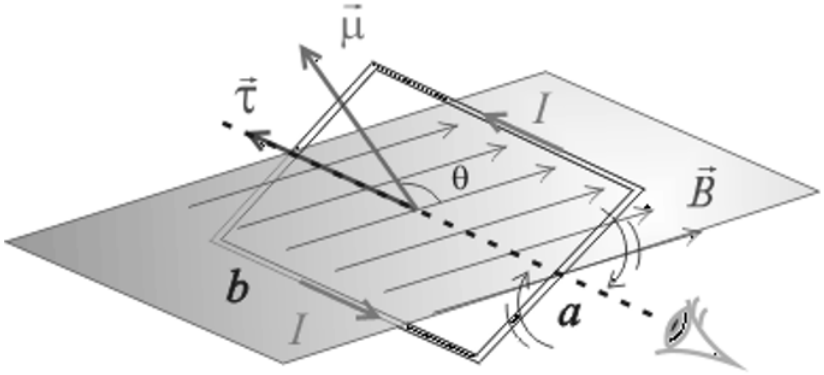


Figura 19.7:

Viendo la espira desde otro punto de vista (figura 19.8).

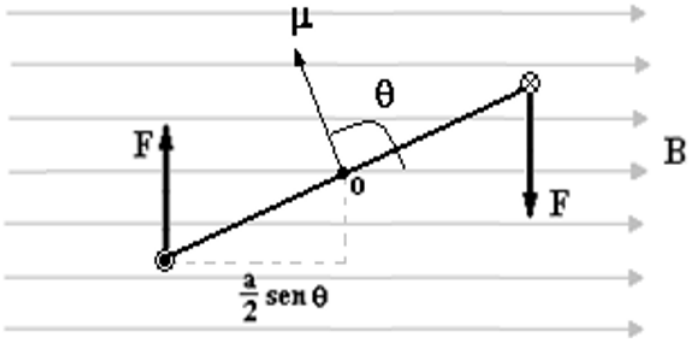


Figura 19.8:

Entonces el torque es:

$$\tau = F\left(\frac{a}{2}\operatorname{sen}\theta\right) + F\left(\frac{a}{2}\operatorname{sen}\theta\right)$$
$$\tau = IabB\operatorname{sen}\theta$$

Luego el torque en la espira se puede expresar de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{\tau = IA \times B} \tag{19.5}$$

Donde **A** es el vector perpendicular al plano de la espira y tiene una magnitud igual al área de la espira.

El producto **IA** se define como el momento magnético μ, es decir:

$$\mu = IA \tag{19.6}$$

Con esta definición el torque magnético se puede expresar como:

$$\tau = \mu \times B \tag{19.7}$$

19.4. Principio del Motor Eléctrico

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias. Transforman una energía eléctrica en energía mecánica. Tienen múltiples ventajas, entre las que cabe citar su economía, limpieza, comodidad y seguridad de funcionamiento, el motor eléctrico ha reemplazado en gran parte a otras fuentes de energía, tanto en la industria como en el transporte, las minas, el comercio, o el hogar.

Su funcionamiento se basa en la interacción entre campos magnéticos producidos por corrientes o imanes o sólo por corrientes. Para construir un motor pequeño basta con una bobina (espiras con un principio y un final) un imán y una pila (para hacer pasar la corriente eléctrica por las espiras) para construir un motor eléctrico.

Si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de un campo magnético (el de un imán), el conductor se desplaza perpendicularmente al campo magnético (se mueve). Si el campo magnético es horizontal, el conductor sube o baja (depende del sentido de la corriente por el conductor), ya que por un lado la corriente entra y por el otro lado de la espira la corriente sale, produciéndose un giro de la espira. ¡Ya tenemos nuestro motor eléctrico!

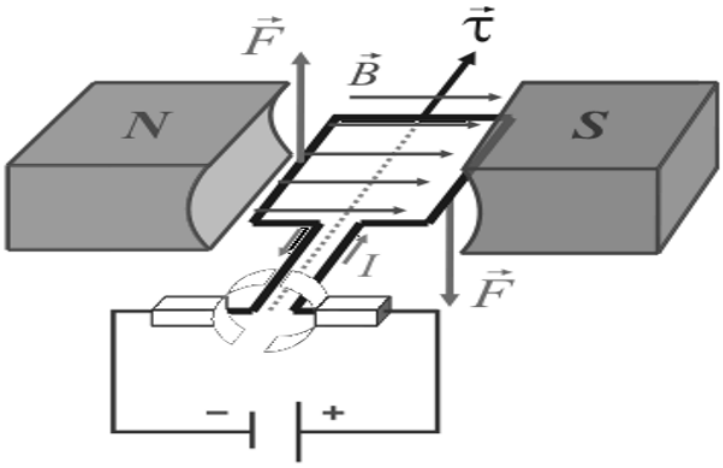
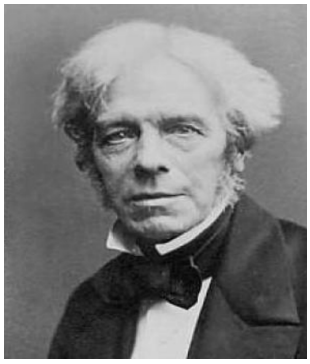


Figura 19.9: Esquema de un motor eléctrico

Sesión 20

Inducción Magnética

Michael Faraday (1791 - 1867)



Físico y químico británico nació el 22 de septiembre de 1791 en Newington (Surrey). Hijo de un herrero, trabajó de aprendiz con un encuadernador de Londres, y fue por entonces que se interesó por temas científicos.

En el año 1812 asistió a una serie de conferencias impartidas por el químico sir Humphry Davy y le solicitó empleo. Davy le contrató como ayudante en su laboratorio químico de la Institución Real. Entró en la sociedad real en 1824 y al año siguiente fue nombrado director del laboratorio de la institución real.

Descubrió dos nuevos cloruros de carbono además del benceno. En el año 1821 trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica. En 1831 descubrió la inducción electromagnética y demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra. Investigó los fenómenos de la electrólisis y descubrió dos leyes fundamentales: que la masa de una sustancia depositada por

una corriente eléctrica en una electrólisis es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por el electrólito, y que las cantidades de sustancias electrolíticas depositadas por la acción de una misma cantidad de electricidad son proporcionales a las masas equivalentes de las sustancias. Descubrió la existencia del diamagnetismo y comprobó que un campo magnético tiene fuerza para girar el plano de luz polarizada que pasa a través de ciertos tipos de cristal.

Escribió Manipulación química (1827), Investigaciones experimentales en electricidad (1844-1855) e Investigaciones experimentales en física y química (1859).

Michael Faraday falleció el 25 de agosto de 1867 en Londres.

Introducción

El descubrimiento, debido a Oersted, de que una corriente eléctrica produce un campo magnético estimuló la imaginación de los físicos de la época y multiplicó el número de experimentos en busca de relaciones nuevas entre la electricidad y el magnetismo. En ese ambiente científico pronto surgiría la idea inversa de producir corrientes eléctricas mediante campos magnéticos. Los científicos de la época se preguntaron si era posible el fenómeno inverso, es decir, la posibilidad de originar una corriente a partir de un campo magnético.

Las experiencias llevadas a cabo por el inglés Michael Faraday (1791-1867), el norteamericano Joseph Henry (1797-1878) y el ruso Heinrich Lenz (1804-1865) fueron determinantes en la obtención de corrientes inducidas a partir de campos magnéticos variables, fenómeno que se conoce co-

mo inducción electromagnética.

Faraday no fue el primero en producir electricidad a partir del magnetismo; Henry se le adelantó en algunos meses, aunque no publicó su trabajo hasta un año más tarde, después de que lo hiciera Faraday. Sin embargo, Faraday ha pasado a la historia como el descubridor de la inducción electromagnética no porque publicara antes sus resultados sino porque fue capaz de analizarlos y de encontrar el principio general que guía toda esta clase de fenómenos.

La inducción electromagnética constituye una pieza destacada en ese sistema de relaciones mutuas entre electricidad y magnetismo que se conoce con el nombre de electromagnetismo. Pero, además, se han desarrollado un sin número de aplicaciones prácticas de este fenómeno físico. El transformador, la dinamo de una bicicleta o el alternador de una gran central hidroeléctrica son sólo algunos ejemplos que muestran la deuda que la sociedad actual tiene contraída con ese modesto encuadernador convertido, más tarde, en físico experimental que fue Michael Faraday.

20.1. Flujo Magnético

El flujo magnético es una magnitud escalar, que se interpreta intuitivamente como el número de líneas de inducción magnética que atraviesan el área de una superficie tal como se muestra en la figura 20.1.

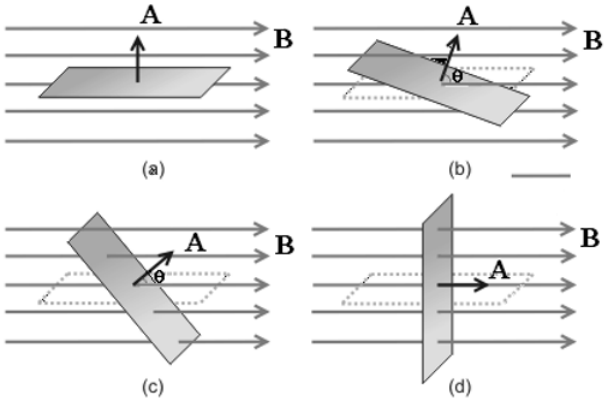


Figura 20.1:

Como se aprecia en la figura anterior, el número de líneas de campo que atraviesan una determinada superficie depende de la orientación de ésta última con respecto a las líneas de campo. Por tanto, el flujo del campo eléctrico debe ser definido de tal modo que tenga en cuenta este hecho. Para campos magnéticos uniformes, el flujo magnético es:

$$\phi = B \cdot A = BA\cos\theta \tag{20.1}$$

Donde **B** es la inducción magnética, **A** es el vector área de la superficie y θ es el ángulo que forma la normal a la superficie y la dirección de B.

Nota. La unidad de medida del flujo de inducción magnética en el SI es el Weber ($Wb = Vs$); Otra unidad, en el Sistema Cegesimal, es el Maxwell ($Mx = 10^{-8}Wb$). Se toma por convenio que el flujo es negativo cuando las líneas entran a la superficie y positivo cuando ellas salen de la misma.

20.1.1. Ley de Inducción de Faraday

La ley de inducción de Faraday establece que la fuerza electromotriz inducida(Fig 20.2) en un circuito es proporcional a la rapidez con la que varía el flujo magnético que lo atraviesa, y directamente proporcional al número de espiras del inducido.

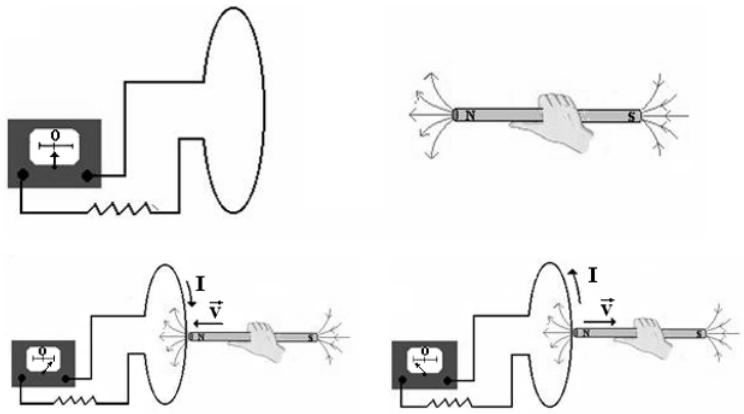


Figura 20.2:

La ecuación que define la ley de inducción de Faraday la podemos expresar como:

$$\varepsilon = -N\left(\frac{\Delta\phi}{\Delta t}\right) \tag{20.2}$$

Hay otras formas de inducir una fem en una espira, sin variar el campo magnético(Fig 20.3). Una de ellas consiste en cambiar el área interior de la espira y otra en cambiar la orientación de la espira respecto del campo magnético rotándola.

20.2. Ley de Lenz

La Ley de Lenz es una ley cualitativa que explica que el sentido de la corriente inducida es tal que su contribución

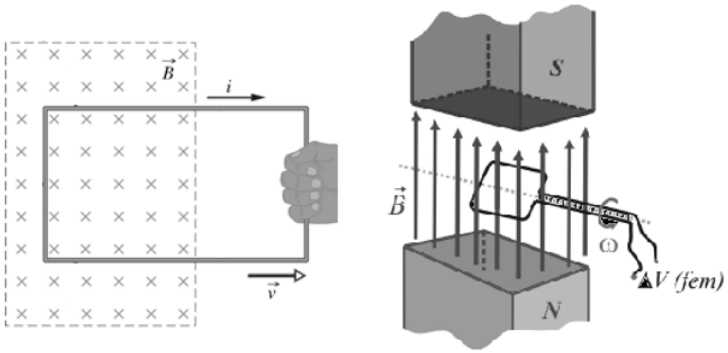


Figura 20.3:

al campo magnético total se opone a la variación del flujo de campo magnético que produce la corriente inducida(Fig 20.4). Su enunciado es:

" *"El sentido de la corriente inducida sería tal que su flujo se opone a la causa que la produce*"

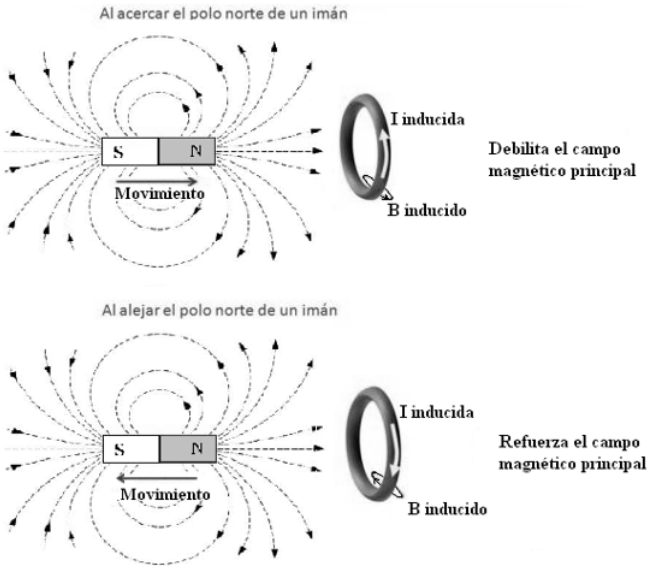


Figura 20.4:

Podemos decir que el fenómeno de inducción electromagnética se rige por dos leyes:

a) La ley de Lenz: cualitativa, que nos da el sentido de la corriente inducida.

b) La ley de Faraday: cuantitativa, que nos da el valor de la

tension inducida.

20.3. Movimiento de Conducotores en Presencia de un Campo Magnético

En esta sección describiremos la llamada fem de movimiento, la cual es la fem inducida en un conductor que se mueve a través de un campo magnético. A continuación veremos dos casos:

20.3.1. Fem Inducida en una Barra que se Mueve a través de un Campo

Cuando la barra se mueve perpendicularmente al campo magnético como se muestra en la figura 20.5, los electrones en el conductor experimentan una fuerza a lo largo del mismo dada por $\boldsymbol{F = qv \times B}$. Bajo la influencia de esta fuerza los electrones se moverán al extremo inferior y se acumularán ahí, dejando una carga positiva neta en el extremo superior. Por tanto un campo eléctrico se produce dentro del conductor como resultado de esta separación de carga, la carga se acumulara hasta que la fuerza magnética q v B se iguale con la fuerza eléctrica qE. En este punto la carga deja de fluir, es decir: $qvB = qE$ y como el campo eléctrico es constante $E = V/L$, de este modo la fem inducida es:

$$\varepsilon = V = BLv \tag{20.3}$$

20.3.2. Fem inducida en una barra que gira alrrededor, en presencia de un campo magnético

Consideremos un segmento de la barra de longitud dr, cuya velocidad es v, como se muestra en la figura 20.6, entonces la fem inducida en ese segmento es $d\varepsilon = Bvdr$. Cada segmento de la barra se mueve perpendicular a B, de modo

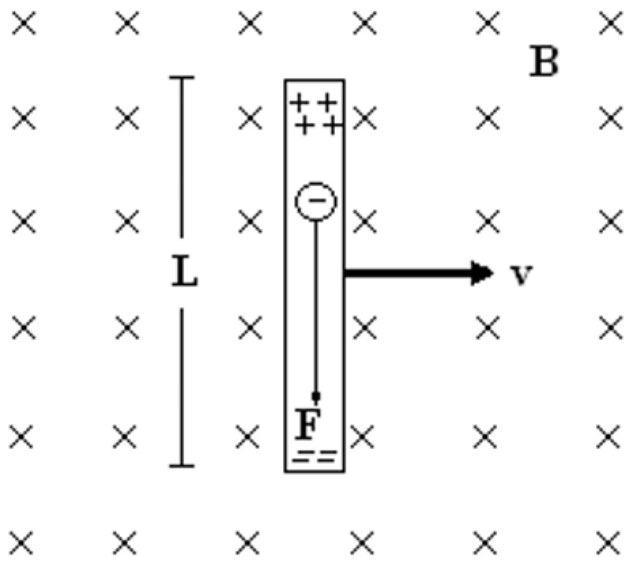


Figura 20.5: Fem (ε_{in}) en una alambre conductor

que cada segmento genera una fem inducida y al sumar las fem inducida de todos los segmentos de la barra se obtiene la fem total entre los extremos de la barra, es decir:

$$\epsilon = \int Bvdr = B\int vdr = B\int \omega r dr = B\omega \int_0^L Bvdr$$

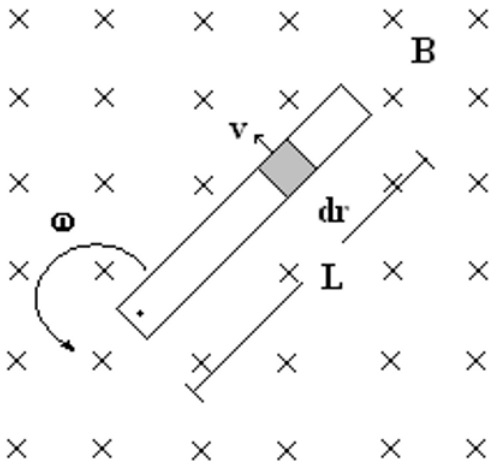


Figura 20.6:

Por tanto:

$$\varepsilon = \frac{B\omega L^2}{2} \tag{20.4}$$

20.4. El Transformador

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Está constituido por dos o más bobinas de material conductor(ver fig 20.7, devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aisladas entre sí eléctricamente. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo. El núcleo, generalmente, es fabricado bien sea de hierro o de láminas apiladas de acero eléctrico, aleación apropiada para optimizar el flujo magnético. Las bobinas o devanados se denominan primario y secundario según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente.

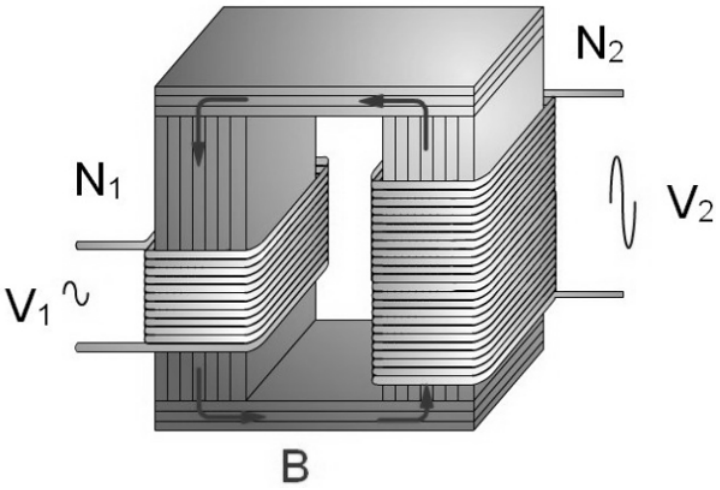


Figura 20.7:

La bobina primaria recibe un voltaje alterno que hará circular, por ella, una corriente alterna. Esta corriente inducirá un flujo magnético en el núcleo de hierro. Como el bobinado secundario está arrollado sobre el mismo núcleo de hierro, el flujo magnético circulará a través de las espiras de éste. Al haber un flujo magnético que atraviesa las espiras del

"Secundario", se generará por el alambre del secundario un voltaje (ley de Faraday). En este bobinado secundario habría una corriente si hay una carga conectada (por ejemplo a una resistencia, una bombilla, un motor, etc.)

La relación de transformación del voltaje entre el bobinado "Primario" y el "Secundario" depende del número de vueltas que tenga cada uno. Si el número de vueltas del secundario es el triple del primario, en el secundario habrá el triple de voltaje. La fórmula que relaciona voltajes con número de vueltas es:

$$\frac{\text{Número de espiras del primario}}{\text{Número de espiras del secundario}} = \frac{\text{Tensión del primario}}{\text{Tensión del secundario}}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \tag{20.5}$$

20.5. Generadores Eléctricos

Un generador eléctrico(fig 20.8) es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en eléctrica. Esto permite poder transportar la energía a largas distancias, desde donde se genera hasta donde se usa.

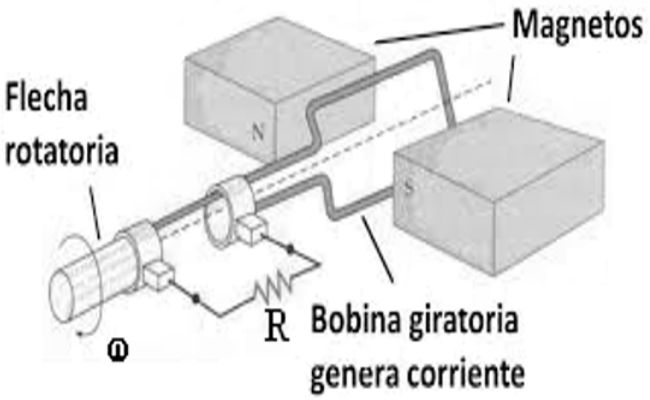
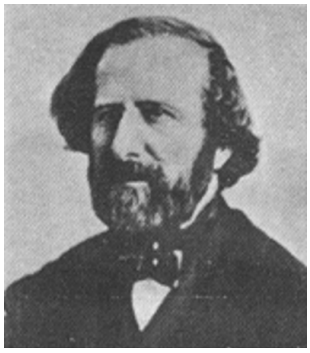


Figura 20.8:

Sesión 21

Reflexión de la Luz y Espejos

Armand H. Louis Fizeau



Físico francés. Perteneció a una adinerada familia francesa, por lo que tuvo independencia financiera y libertad para seguir su afición favorita: la velocidad de la luz. Su trabajo más notable constituyó el determinar, con muy buena precisión, el valor de la velocidad de la luz, realizando experimentos en la superficie de la Tierra (no astronómicos). Su idea básica fue medir el tiempo total que tarda la luz en viajar de un punto a un espejo distante y regresar. Para ello hizo que un haz luminoso recorriera una distancia relativamente pequeña (17,34 km) sobre la superficie de la Tierra, empleando como dispositivo una lámina de vidrio, un espejo reflector, lentes y una rueda dentada (de 720 dientes) en rotación y de velocidad angular ajustable hasta alcanzar 25 rev/s. El dispositivo experimental le permitió medir el intervalo de tiempo muy pequeño que la luz tardó en recorrer esa distancia.

En 1 849, divulgó los resultados de sus experimentos, y dio el valor $3,13 \times 10^8 m/s$ para la velocidad de la luz. Mediciones similares hechas después por otros investigadores produ-

jeron valores más precisos de c, como $c = 2,9977x10^8 m/s$.

Introducción

La luz es uno de los ingredientes fundamentales en la naturaleza e imprescindible en la vida de los seres. Su importancia para la visión humana y en el fenómeno de fotosíntesis en las plantas así lo muestran. No cabe la menor duda de que la luz es el principal mecanismo con el cual podemos transmitir y recibir información de los objetos que nos rodean e incluso de los que se encuentren distantes de nosotros.

La Óptica trata el comportamiento de la luz, su naturaleza y explica el porqué de los fenómenos luminosos. La luz visible y sus distintos fenómenos son aspectos inherentes a la vida de los seres y de los cuales disfrutamos mediante el sentido de la vista. Estudiamos Óptica para apreciar e interpretar mejor el mundo visible. El conocimiento de las propiedades de la luz nos permite comprender, por ejemplo, qué son los arcoiris, los "espejismos", el azul del cielo, así como el diseño de dispositivos ópticos como las cámaras fotográficas, microscopios, telescopios, lentes y el ojo humano. Los principios básicos de la Óptica están también en dispositivos modernos como el rayo láser, las fibras ópticas, los hologramas, los computadores ópticos, y los empleados en las técnicas de formación de imágenes con fines médicos.

Hoy se conoce que la luz tiene un comportamiento dual: en algunos experimentos la luz se comporta como partícula y en otros presenta las propiedades ondulatorias. Según ello diferenciamos el estudio de la luz en Óptica Geométrica y Óptica Física. En la presente sesión describimos la

luz como partícula y la representamos como rayos, que se desvían en una superficie reflectora o refractora; y estudiamos-empleando como elementos geométricos a las rectas y ángulos-las leyes de la reflexión y la refracción. El concepto de rayo de luz es importante para entender el funcionamiento de los espejos y las lentes, tan útiles en la vida del hombre así como al combinarse, por ejemplo, en microscopios y telescopios.

21.1. Principios Fundamentales

21.1.1. Naturaleza de la Luz

A partir del siglo XVII con el surgimiento de la ciencia moderna, es cuando el problema de la naturaleza de la luz cobra una importancia singular como objeto del conocimiento científico.

Fueron dos las primeras hipótesis que se formularon para explicar la naturaleza de los fenómenos luminosos: la hipótesis corpuscular, o de Newton, y la ondulatoria, sostenida por el holandés Christiaan Huygens.

Según Newton, la luz estaba constituida por numerosos corpúsculos que emitían los cuerpos luminosos y que, al chocar con nuestra retina, la impresionaban, produciéndonos la sensación luminosa.

Huygens, por el contrario, opinaba que la luz no era otra cosa sino un fenómeno ondulatorio semejante al sonido y que su propagación era de la misma naturaleza que la de un frente de onda.

La rama que trata específicamente el comportamiento ondulatorio de la luz se denomina **Óptica Física**, que será motivo de estudio en la siguiente unidad.

La rama de **Óptica Geométrica** describe la luz desde su concepción corpuscular empleando elementos geométricos como líneas rectas y ángulos para estudiar reflexión y refracción de la luz.

21.1.2. Frente de Onda y Rayos

Se denomina frente de onda al lugar geométrico en que los puntos del medio son alcanzados en un mismo instante por una determinada onda. Dada una onda propagándose en el espacio o sobre una superficie, los frentes de onda pueden visualizarse como superficies que se expanden a lo largo del tiempo alejándose de la fuente que genera las ondas sin tocarse entre sí. En la figura 21.1 se muestra un frente de onda plano y uno esférico.

Una recta perpendicular a una serie de frentes de onda, que apunta en la dirección de propagación de la onda, es un rayo de onda.

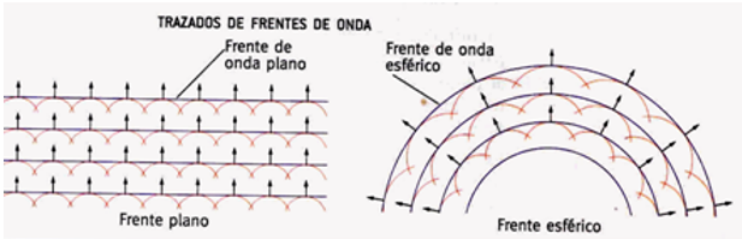


Figura 21.1:

21.2. Reflexión de la Luz

La reflexión de la luz es un fenómeno óptico de gran importancia; si los objetos no reflejaran la luz hacia nuestros ojos, no podríamos verlos.

La reflexión implica absorción y reemisión de la luz por medio de complejas vibraciones electrónicas en los átomos del cuerpo reflejante. Sin embargo, se puede describir la reflexión empleando el concepto de rayo de luz.

La reflexión de la luz puede efectuarse de dos maneras

(Fig 21.2), a las que se les conoce con los nombres de: reflexión irregular o difusa, y reflexión regular o especular. Estas varían de acuerdo con las características de la superficie reflectora.

La **reflexión difusa** se da sobre los cuerpos de superficies más o menos rugosas. Este tipo de reflexión es muy importante porque hace posible que se vean los objetos que nos rodean, ya que, para que se vea algo, es necesario que se tengan rayos de luz entre el cuerpo de que se trate y el ojo que observa; así debido a la reflexión irregular, de todos los puntos luminosos e iluminados salen rayos en todas direcciones, algunos de los cuales van de dichos puntos a los ojos.

La **reflexión regular** tiene lugar cuando la superficie es perfectamente lisa. Un espejo o una lámina metálica pulimentada reflejan ordenadamente un haz de rayos conservando la forma del haz. La superficie reflectora se denomina superficie especular o espejo y se caracteriza porque los rayos que llegan en una dirección determinada se reflejan en otra dirección, también determinada. Claro está que las superficies especulares o espejos, en realidad no se ven; lo que se ve son las imágenes que producen.

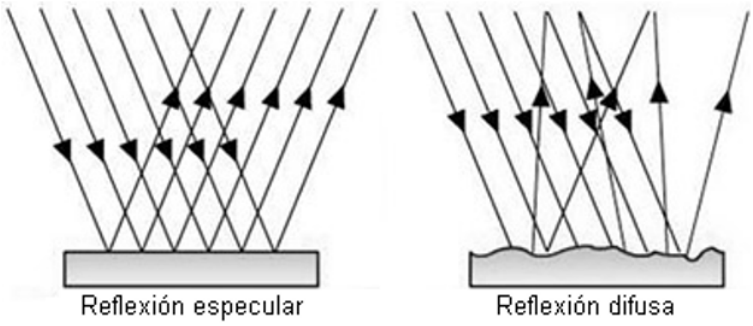


Figura 21.2:

21.2.1. Ley de Reflexión

Esta ley de la reflexión de la luz cuyo conocimiento es muy antiguo, casi tanto como las más antiguas leyes de la humanidad se puede enunciar en la forma:

- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal, se encuentran en un mismo plano.
- El ángulo de incidencia (θ_i) es igual al ángulo de reflexión (θ_r), es decir: $\theta_i = \theta_r$

En la figura 21.3 se muestra los elementos de una reflexión.

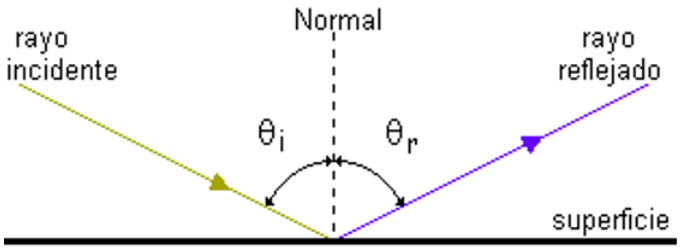


Figura 21.3:

21.3. Espejos

Un espejo es una superficie pulida en la que al incidir la luz, se refleja siguiendo las leyes de la reflexión. Dependiendo de su geometría pueden ser planos, esféricos, parabólicos, hiperbólicos, etc.

21.3.1. Espejos Planos

Un espejo plano es una superficie plana, pulida y debidamente acondicionada para reflejar bien la luz. En general se utilizan láminas de vidrio delgadas, paralelas y bien pulidas. Con el propósito de lograr una correcta reflexión, es común que se cubra la cara posterior con una fina capa de plata que es la que cumple la función del espejo.

Formación de imágenes en espejos planos

Para formar la imagen I que produce un espejo plano de un objeto O, utilizamos una construcción geométrica como la que muestra la Figura **??** Del objeto O ubicado a una distancia p frente al espejo plano, esta distancia se le denomina distancia al objeto, se trazan dos rayos, uno paralelo al eje óptico (1), el cual se refleja también paralelamente y el otro (2) que pasa por el vértice (v) del espejo, formando un ángulo y se refleja con el mismo ángulo.

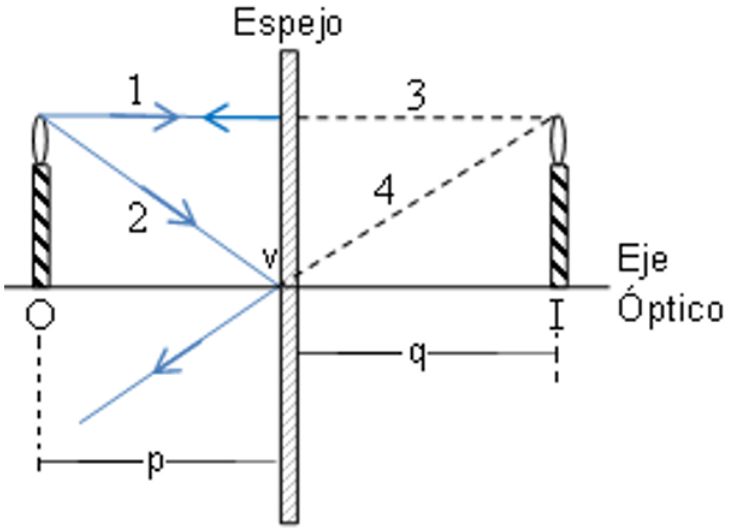


Figura 21.4:

Los rayos reflejados divergen y sus proyecciones (3) y (4) se intersectan detrás del espejo formando la imagen I, localizada a una distancia q o distancia a la imagen.

Las imágenes se forman ya sea en el punto donde los rayos de luz convergen en realidad (imagen real) o en el punto desde el cual parece que se originan (imagen virtual). Las imágenes reales pueden exhibirse sobre una pantalla; las virtuales, no. Una característica de la imagen es su tamaño comparada con la del objeto; esto se expresa en términos de la magnificación lateral M que se define:

$$M = \frac{\text{altura de la imagén}}{\text{altura del objeto}} = \frac{h\prime}{h} \tag{21.1}$$

Las imágenes formadas por espejos planos tienen las siguientes propiedades:

- La imagen está atrás del espejo. La distancia del objeto al espejo (p) es la misma que la distancia de la imagen al espejo (q).
- La imagen se invierte de atrás hacia delante.
- La imagen no está magnificada, es virtual y está de pie. (Por de pie entendemos que, si la flecha del objeto O apunta hacia arriba, la flecha de la imagen apunta en el mismo sentido, como en la Figura 21.4).

21.3.2. Espejos Esféricos

Los espejos esféricos(Fig 21.5) tienen la forma de la superficie que resulta cuando una esfera es cortada por un plano. Si la superficie reflectora está situada en la cara interior de la esfera se dice que el espejo es **cóncavo**. Si está situada en la cara exterior se denomina **convexo**.

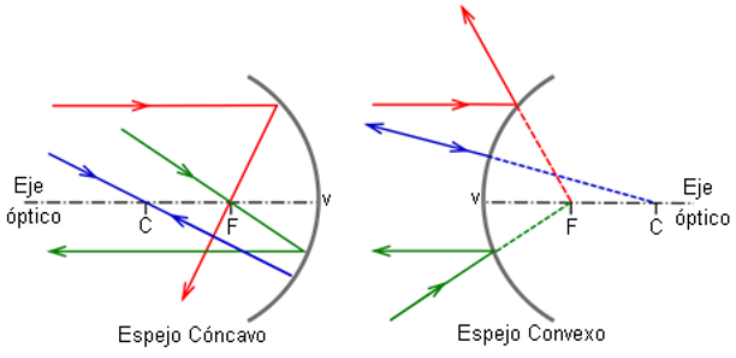


Figura 21.5:

En la figura 21.5 se muestra los dos tipos de espejos esféricos y sus respectivos elementos: Centro de curvatura (C),

es el centro de la esfera imaginaria que constituye el espejo, Eje óptico, es la recta horizontal que pasa por el centro de la curvatura, Foco (F), es el punto del eje óptico por el que pasan reflejados los rayos paralelos. Está situado en el punto medio de la línea que une el centro de curvatura con el espejo, y Vértice (v): es el punto de intersección del eje óptico con el espejo.

Imágenes formadas por espejos esféricos

Espejo convexo

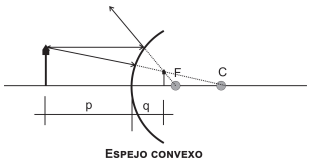


Figura 21.6:

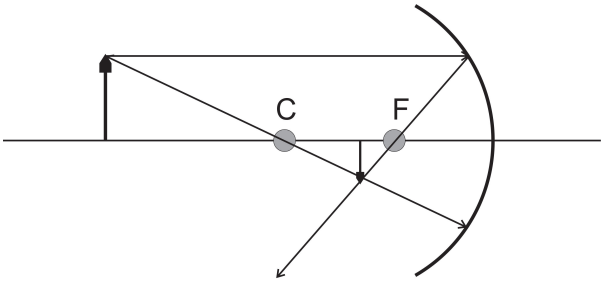
Para formar la imagen I que produce un espejo convexo de un objeto O, utilizamos una construcción geométrica como la que muestra la Figura 25.6 Del objeto O ubicado a una distancia p frente al espejo convexo, se trazan dos rayos, uno paralelo al eje óptico (1), el cual se refleja por el foco y el otro (2) que pasa por el foco (F) del espejo, el cual se refleja paralelamente al eje óptico. Los rayos reflejados divergen y sus proyecciones (3) y (4) se intersectan detrás del espejo formando la imagen I, localizada a una distancia q. Las imágenes formadas por espejos convexos tienen las siguientes propiedades:

- La imagen está atrás del espejo. La distancia del objeto al espejo (p) es mayor que la distancia de la imagen al espejo (q).
- La imagen se invierte de atrás hacia delante.
- La imagen es de menor tamaño que el objeto, es virtual y está de pie. (Por de pie entendemos que, si la flecha del objeto O apunta hacia arriba, la flecha de la imagen apunta en el mismo sentido, como en la Figura 21.6).

Espejo cóncavo

En el caso del espejo cóncavo las imágenes que forma, depende de la ubicación del objeto respecto del espejo.

- **Caso I**
  Cuando el objeto se encuentra atrás del centro de curvatura. También usaremos el mismo criterio que el usado en el espejo convexo. En la figura 24.7 se muestra la imagen formada para este caso, la cual es real, invertida y de menor tamaño que el objeto.



ESPEJO CÓNCAVO

Figura 21.7:

- **Caso II**
  Cuando el objeto se encuentra en el centro de curvatura. También usaremos el mismo criterio que el usado en el espejo convexo. En la figura 24.8 se muestra la imagen formada para este caso, la cual es real, invertida y de igual tamaño que el objeto.

- **Caso III**
  Cuando el objeto se encuentra entre el centro de curvatura y el foco. También usaremos el mismo criterio que el usado en el espejo convexo. En la figura 24.9 se muestra la imagen formada para este caso, la cual es real, invertida y de mayor tamaño que el objeto.

- **Caso IV**
  Cuando el objeto se encuentra en el foco. También usa-

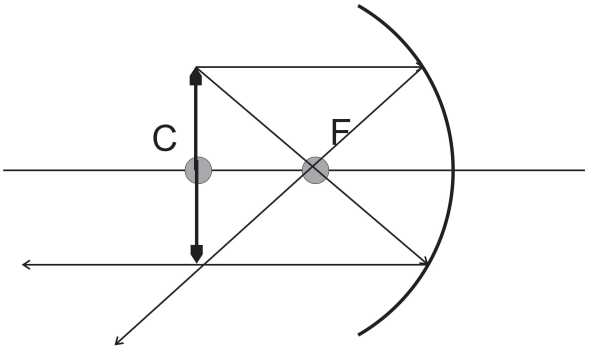


Figura 21.8:

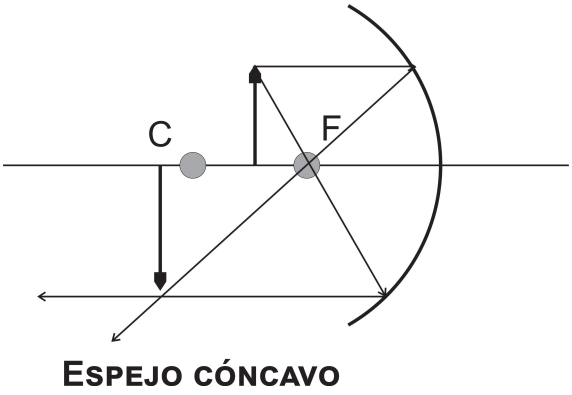


Figura 21.9:

remos el mismo criterio que el usado en los casos analizados anteriormente. En la figura 24.10 se muestra la imagen formada para este caso, la cual se forma en el infinito, es decir la imagen no se observa.

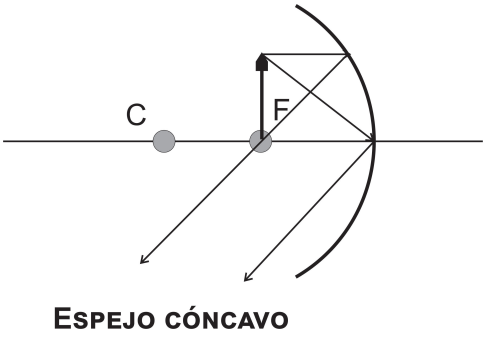


Figura 21.10:

- **Caso V**
  Cuando el objeto se encuentra entre el foco y el vértice.

También usaremos el mismo criterio que el usado en los casos analizados anteriormente. En la figura 24.11 se muestra la imagen formada para este caso, la cual es virtual, de pie y de mayor tamaño que el objeto.

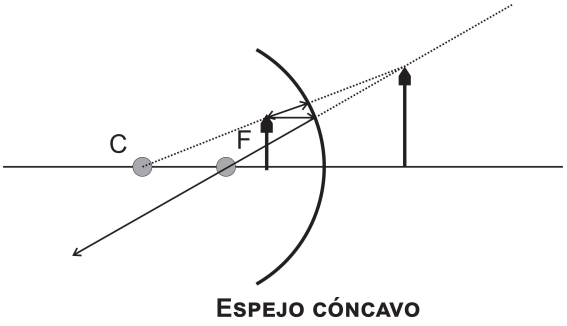


Figura 21.11:

La distancia desde el vértice v hasta el punto focal F se llama distancia o longitud focal, f, donde:

$$f = \frac{R}{2} \tag{21.2}$$

Donde R es el radio de curvatura del espejo.

Ecuación del espejo

La relación entre las distancias objeto e imagen, por lo general se expresa en términos de la longitud focal en la forma:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \tag{21.3}$$

donde p: distancia del objeto al espejo y q: distancia de la imagen al espejo.

21.3.3. Convención de Signos para Espejos Esféricos

Si q es positiva la imagen es real (objeto e imagen están del mismo lado del espejo). Si q es negativa, la imagen es

Espejo	f	p	q	Imagen
Plano	∞	$+$	$-$	Virtual
Convexo	$-$	$+$	$-$	Virtual
Cóncavo	$+$	$+$	$-$	Virtual
Cóncavo	$+$	$+$	$+$	Real

Tabla 21.1:

virtual (el objeto está frente al espejo y la imagen detrás del mismo). Los espejos convexos sólo producen imágenes virtuales, de pie y más pequeñas que el objeto.

21.3.4. Aumento o Magnificación del espejo (M)

La relación entre el tamaño de la imagen h' y el tamaño del objeto h, define el aumento del espejo o magnificación. El aumento de un espejo esférico se define por:

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \tag{21.4}$$

Convención de signos para la magnificación

- $(+)$, imagen de pie(derecha)
- $(-)$, imagen invertida

Sesión 22

Refracción de la Luz y Lentes

Al Haitham (965 - 1039)

Físico iraquí, conocido en occidente como Alhazen. Nació en Basora en el año 965 y murió en el Cairo en el año 1039. Es considerado el padre de la óptica moderna. Fue uno de los físicos más eminentes y sus aportaciones al sistema óptico y a los métodos científicos fueron enormes. Hizo importantes adelantos en la óptica de lentes y de espejos, realizó numerosos estudios (sombras, eclipses, naturaleza de la luz) y experimentos, y descubrió las leyes de la refracción. Realizó también las primeras experiencias de la dispersión de la luz en sus colores. Fabricó lentes, construyó equipos parabólicos como los que ahora se usan en los modernos telescopios y estudió las propiedades del enfoque que producen. Fue el primero en describir exactamente las partes del ojo y dar una explicación científica del proceso de la visión. Contradiciendo la teoría de Tolomeo y de Euclides de que el ojo emite los rayos visuales a los objetos, él considera que son los rayos luminosos los que van de los objetos al ojo. Sus experimentos se aproximaron mucho al descubrimiento de las propiedades ópticas de las lentes. Fue el primero

en analizar correctamente los principios de la cámara oscura. Este aparato es el antecesor de la moderna cámara fotográfica.

Introducción

Cuando se mira al fondo de una piscina de agua limpia en un día de sol y con un viento suave sobre la superficie del líquido, se observa una figura de líneas brillantes móviles. Algo le sucede a la luz solar en la superficie del fluido. Este fenómeno se llama **refracción**. Este fenómeno explica también la apariencia quebrada de un lápiz que se sumerge en un vaso de agua. Es la refracción en nuestros ojos lo que nos permite ver los objetos.

El fenómeno de refracción ocasionado por los lentes forma imágenes como las que observamos en microscopios, en binoculares. Con la refracción se posibilita plasmar imágenes en las cámaras fotográficas, así como la proyección de imágenes en salas de cine.

Los principios que corresponden a la refracción explican las propiedades de las lentes (como las que se utilizan en los anteojos), la razón por la que un prisma de vidrio separa la luz en un espectro de colores. Explica también la técnica fundamental de refracción en la fibra óptica.

Como aplicación concreta de la refracción en lentes, se trata descriptivamente los instrumentos ópticos comunes: ojo humano, microscopio y telescopio.

Estudiaremos la refracción y su papel en el funcionamiento de las lentes.

22.1. Refracción de la Luz

Si un rayo de luz que viaja a través de un medio transparente encuentra una interface que lleva a otro medio transparente, (ver figura 25.1), parte del rayo se refleja y parte se propaga en el segundo medio, pero en una dirección diferente de la del rayo incidente. El rayo ha sufrido una refracción.

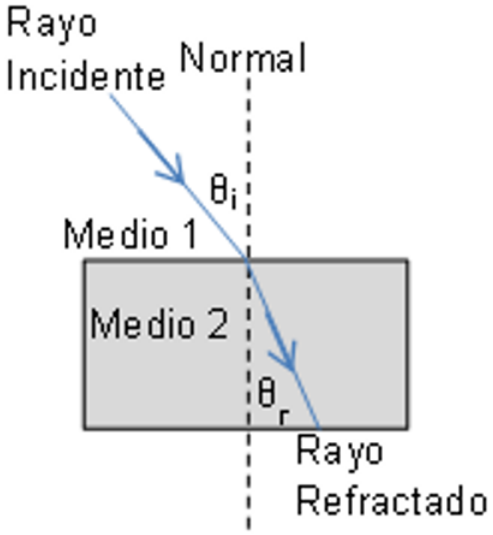


Figura 22.1:

En general, la refracción se produce cuando la luz pasa de un medio a otro, y en los cuales se propaga con velocidades distintas.

En la figura 25.1 se muestra los elementos de la refracción de la luz.

22.1.1. Índice de refracción

La luz se refracta cuando pasa de un medio a otro debido a que la velocidad de la luz es diferente en los dos medios. La velocidad de la luz, c, es máximo en el vacío. En cualquier material, la velocidad de la luz, v, es menor que c.
Definimos índice de refracción:

$$n = \frac{\text{velocidad de la luz en el vacío}}{\text{velocidad de la luz en un medio}} = \frac{c}{v} \tag{22.1}$$

En general, n varía con la longitud de onda de la luz, y, relacionando longitudes de onda en el vacío o en el aire, (λ_0) y en el medio (λ), el índice de refracción está dado por:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \tag{22.2}$$

Observe que n es un número adimensional. Para el vacío, o el aire, $n = 1$, para cualquier material siempre es mayor que la unidad. La Tabla 25.1 muestra el valor de n para algunos materiales.

Tabla 22.1: Índice de refracción para diversas sustancias medido con luz de longitud de onda en el vacío $\lambda_o = 589nm$.

Sustancia	**Índice de refreacción**	**Sustancia**	**Índice de refreacción**
Sólidos a 20^oC		Líquidos a 20^oC	
Diamante	2,419	Benceno	1,501
Fluorita	1,434	Bisulfuro de carbono	1,628
Hielo	1,309	Tetracloruro de carbono	1,461
Poliestireno	1,49	Glicerina	1,473
Cloruro de sodio	1,544	Agua	1,333
Vidrios		Trementina (aguarrás)	1,472
Crown	1,52	Gases a 0^oC, 1 atm	
Flint lantano	1,80	Aire	1,000293
		Dióxido de carbono	1,00045

22.1.2. Leyes de la refración

1. El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano.
2. Para la luz monocromática y para dos medios materiales 1 y 2 (separados por una interface como se indica en la Figura 25.1), el cociente de los senos de los ángulos

de incidencia y de refracción, es igual al cociente de las velocidades respectivas de la luz en dichos medios.

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_i}{\operatorname{sen}\theta_r} = \frac{v_1}{v_2} = \text{constante} \tag{22.3}$$

El descubrimiento experimental de la relación anterior se atribuye al holandés Willebrord Snell (1591- 1 627), por lo que a dicha relación se le conoce como **ley de Snell**.
Además, si la frecuencia, f, de la luz es la misma en ambos medios, se tiene que:

$$v_1 = f\lambda_1 \qquad \text{y} \qquad v_2 = f\lambda_2$$

entonces:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \tag{22.4}$$

con ello la Ley de Snell, se expresa:

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_i}{\operatorname{sen}\theta_r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Entonces,

$$n_1 \cdot \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \operatorname{sen}\theta_2 \tag{22.5}$$

Si la superficie refractora es esférica, con radio R, las distancias objeto e imagen (p y q) están relacionadas por:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \tag{22.6}$$

Si la superficie refractora es la superficie plana entre dos materiales ópticos, el radio R tiende al infinito; y, de la ecuación (25.6), las distancias p y q se relacionan por:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = 0 \tag{22.7}$$

En la figura 25.2 se muestra los dos casos que se deducen de la ley de Snell.

a) El rayo pasa de un medio 1 (donde su velocidad es mayor) a otro medio 2 (donde tiene menor velocidad). El rayo refractado se acerca a la normal.

b) El rayo pasa de un medio donde tiene menor velocidad a otro donde su velocidad es mayor. El rayo refractado se aleja de la normal.

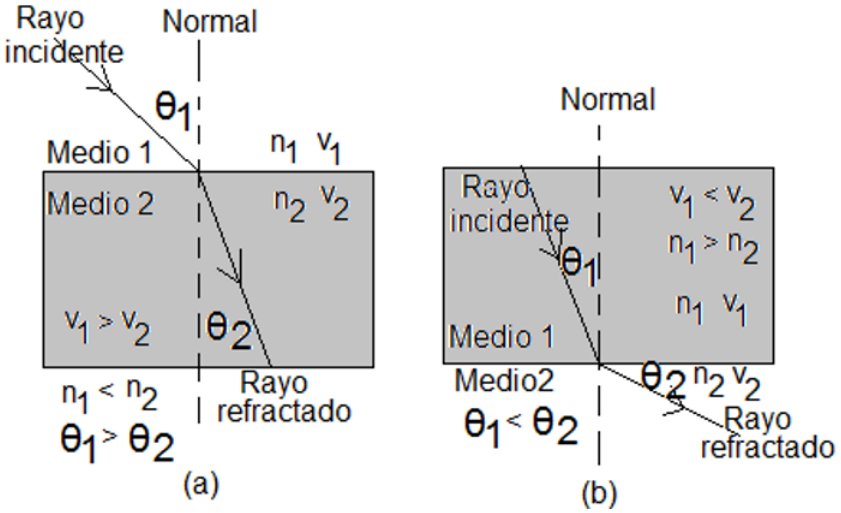


Figura 22.2:

22.1.3. Reflexión interna total

Cuando el rayo de luz pasa de un medio donde tiene menor velocidad a otro donde su velocidad es mayor. El rayo refractado se aleja de la normal.
Por la ley de Snell, mientras mayor sea el ángulo de incidencia, mayor será el ángulo de refracción. Sin embargo, existe un límite. Para cierto ángulo de incidencia o ángulo crítico (θ_c), el ángulo de refracción es 90^o, y el rayo refractado se dirige a lo largo de la frontera o interface. Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, la luz no se transmite al segundo medio, sino que se refleja internamente, como se muestra en la figura 25.3. A este fenómeno se denomina reflexión interna total.

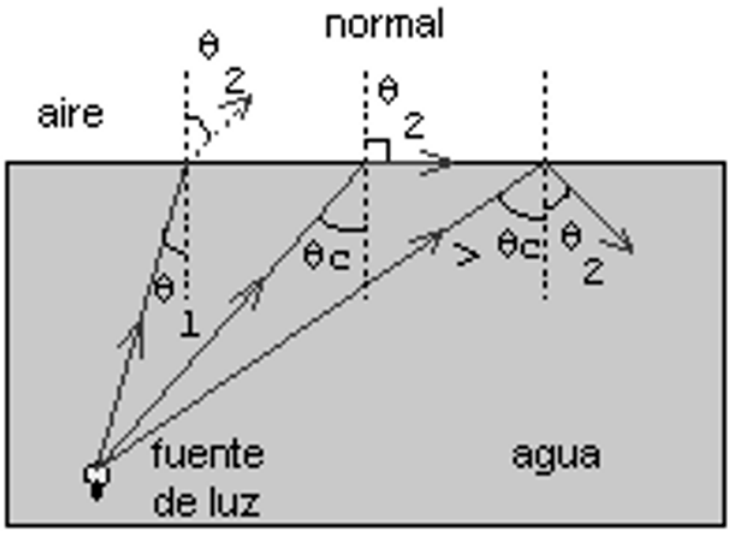


Figura 22.3:

Aplicando la ecuación (25.5), tenemos:

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \frac{\operatorname{sen}\theta_c}{\operatorname{sen}90^o} = \frac{n_2}{n_1}$$

Por lo que:

$$\operatorname{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad \text{donde} \qquad n_1 > n_2 \tag{22.8}$$

La reflexión interna total forma la base de las fibras ópticas. Varias reflexiones internas permiten "entubar" la luz a lo largo de una varilla transparente, sin afectarse cuando ésta se curva. Con ellas la luz se puede transmitir a grandes distancias. Las fibras están hechas de ciertos plásticos y un vidrio especial para maximizar la transmisión. Una mayor eficiencias se logra empleando radiación infrarroja, para la que hay menos dispersión.

22.2. Las Lentes Delgadas

Las lentes ópticas están formadas por material transparente, siendo el más común el vidrio, aunque a veces es

plástico o cristal. Tienen dos superficies esféricas, cercanas entre sí. Se emplean para formar imágenes por medio de la refracción en instrumentos ópticos como cámaras, telescopios y microscopios.

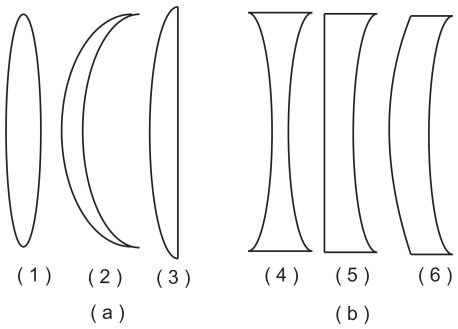


Figura 22.4: Clases de lentes

a) **Convergentes**: 1: biconvexa, 2: convexa- cóncava; 3: plano convexa.

b) **Divergentes**: 4, bicóncava; 5,convexo-cóncava; 6 plano cóncava.

Convención de signos para lentes delgadas

- p (+): el objeto está enfrente de la lente.
- p (−): el objeto está detrás de la lente.
- q (+): la imagen está detrás de la lente.
- q (−): la imagen está enfrente de la lente.
- R_1 y R_2 (+): si el centro de curvatura está detrás de la lente
- R_1 y R_2 (−): si el centro de curvatura está enfrene de la lente.

22.2.1. Ecuación del fabricante de lentes

El inverso de la longitud focal para una lente delgada, puede expresarse:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_{\text{lente}}}{n_{\text{medio}}} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \tag{22.9}$$

a la que se le denomina ecuación del fabricante de lentes. Los valores R_1 y R_2 son las medidas de los radios de curvatura de las superficies esféricas de la lente (Ver convención de signos para radios en Figura 25.5); Si una de las superficies es plana, su radio se aproxima al infinito; n es el índice de refracción de la sustancia refractora.

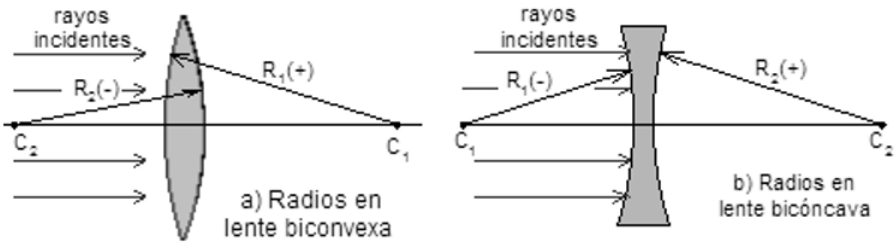


Figura 22.5:

Además, la relación objeto-imagen para una lente delgada es la misma que para un espejo esférico. Es decir:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \tag{22.10}$$

22.2.2. Potencia de una lente

Es el inverso de la distancia focal,

$$P = \frac{1}{f} \tag{22.11}$$

Se expresa en dioptrías (om^{-1})

22.2.3. Aumento lateral

El aumento lateral de una lente delgada, (similar al caso de espejos) se define:

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \tag{22.12}$$

Si M es positiva, la imagen está de pie y la imagen está del mismo lado que el objeto. Si M es negativa, la imagen está invertida y en el lado del lente opuesto al objeto.

22.2.4. Diagramas de rayos para lentes delgadas.

Estos diagramas nos ayudan a localizar la imagen formada por una lente. Para ello se sugiere como estrategia, trazar los siguientes tres rayos desde la parte superior del objeto.

- **Rayo 1**: paralelo al eje óptico. Después de ser refractado por el lente, este rayo se dirige a uno de los puntos focales (o parece provenir de uno de ellos)
- **Rayo 2**: se dibuja a través del centro de la lente y continúa en línea recta.
- **Rayo 3**: se traza a través del punto focal del objeto y emerge de la lente paralela al eje óptico.

La figura 25.6 muestra tres casos de diagramas de rayos para localizar imágenes con lentes delgados.

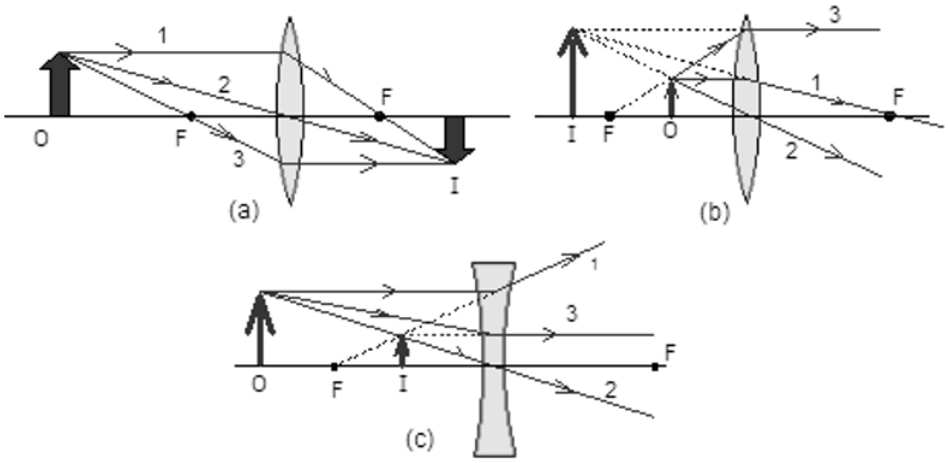


Figura 22.6: Diagramas de rayos para localizar imágenes formadas por lentes delgados. (a) Lente biconvexa, con imagen real e invertida. (b) Lente biconvexa, con imagen virtual y de pie. (c) Lente bicóncava, con imagen siempre virtual y de pie.

22.3. Instrumentos Ópticos

Los fundamentos de la formación de imágenes por espejos y lentes se aplican a algunos dispositivos ópticos de uso común como la cámara fotográfica, el microscopio, el telescopio. El ojo humano es el instrumento óptico más fundamental. A continuación se describen en sus aspectos más generales el ojo humano, el microscopio y el telescopio.

22.3.1. El ojo humano

El mecanismo como sistema es el siguiente:
El párpado se abre para una continua exposición a la luz. El iris es un diafragma circular que se abre y se cierra para ajustar la cantidad de luz que entra al ojo. El cristalino que está detrás del iris es una lente convergente compuesta por fibras vidriosas microscópicas.

El ojo enfoca un objeto determinado variando la forma del cristalino mediante un asombroso proceso de adaptación en el cual el músculo ciliar juega un papel fundamental.

Si el objeto está muy distante, el músculo ciliar se relaja y el cristalino adopta una forma más delgada y una potencia cercana a las 20 dioptrías. Para una distancia infinita, la longitud focal del ojo (distancia entre el lente y la retina) es de aproximadamente 1,7 cm. Cuando el ojo enfoca objetos más cercanos, la lente se vuelve más gruesa y el radio de curvatura y la longitud focal disminuyen. La potencia de la lente puede aumentar hasta 30 dioptrías (incluso más en niños pequeños). La imagen es enfocada sobre la retina Hay un límite para la adaptación debido a que los objetos que están muy cercanos al ojo producen imágenes borrosas. El punto cercano representa la distancia más cercana

para la cual la lente del ojo relajado puede enfocar luz sobre la retina. Tiene un valor promedio de 25 cm (aumenta con la edad de la persona). El punto más lejano es la máxima distancia a la que el ojo normal puede ver los objetos muy distantes (como la luna) con claridad, y se considera infinito.

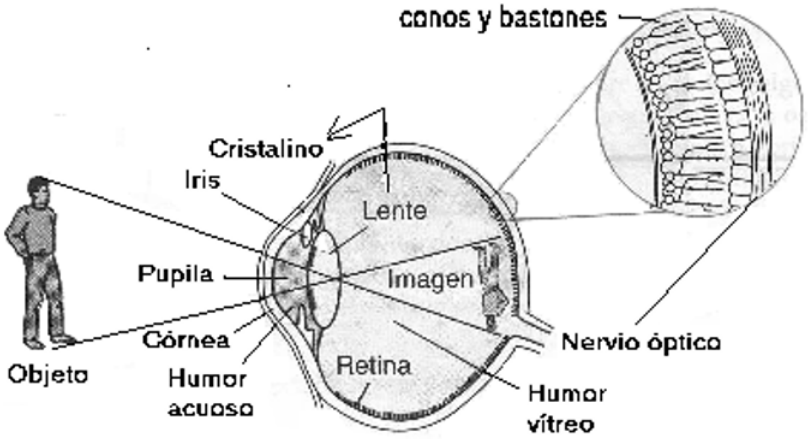


Figura 22.7: El ojo humano. La imagen invertida se forma en la retina

La luz que pasa por el globo ocular atraviesa cinco medios distintos: aire, córnea, humor acuoso, cristalino y humor vítreo. La luz se refracta en todos ellos antes de enfocarse en la retina para formar las imágenes. Desde la retina y a través del nervio óptico se envían las señales al cerebro. La retina está formada por células fotosensibles: a) bastones, que permiten distinguir la luz de la oscuridad (visión de penumbra); b) conos, menos sensibles a la luz pero la descomponen en sus diferentes longitudes de onda, lo que nos permite ver los colores.

Defectos de visión

a) **Visión corta o miopía**. Condición de ver con claridad los objetos cercanos pero no los objetos distantes. Los rayos se enfocan “delante” de la retina, y la imagen aparece difusa o fuera de foco. La miopía surge debido a que el globo ocular es demasiado grande o tal vez a que la

curvatura de la córnea es muy pronunciada. Se corrige mediante una lente divergente adecuada.

b) **Presbicia o hipermetropía**. Condición de ver los objetos distantes con claridad, pero no los objetos cercanos. El punto más cercano no está en la posición normal sino en algún punto más lejano al ojo. La imagen de un objeto que está más cerca del ojo que el punto más cercano se forma "detrás" de la retina. La presbicia surge debido a que el globo ocular es demasiado pequeño o tal vez a una curvatura insuficiente de la córnea. Se corrige, por lo general, mediante una lente convergente.

c) **Astigmatismo**. Por lo general se debe a que la superficie refractiva no es perfectamente esférica, que usualmente es la córnea o el cristalino. La luz de una fuente puntual produce una imagen lineal sobre la retina. El astigmatismo puede corregirse con lentes que tienen diferentes curvaturas en dos direcciones mutuamente perpendiculares.

22.3.2. Microscópio

Es un instrumento óptico que permite una visión aumentada del tamaño de los objetos. Así se aprecian mejor los detalles y características de los objetos.
Microscopio simple o lupa: Es una lente convergente que forma una imagen virtual mayor y más alejada del ojo que el objto mismo (Ver Figura 25.8).
Sea un objeto se encuentra en el punto más cercano del ojo (25 cm), en donde subtiende un ángulo θ_0 con el ojo. Una lupa colocada frente al ojo forma una imagen en el infinito y el ángulo subtendido en la lupa es Se define el aumento angular o magnificación angular M_θ al cociente del ángulo (con lupa) entre el ángulo θ_0 (sin lupa).

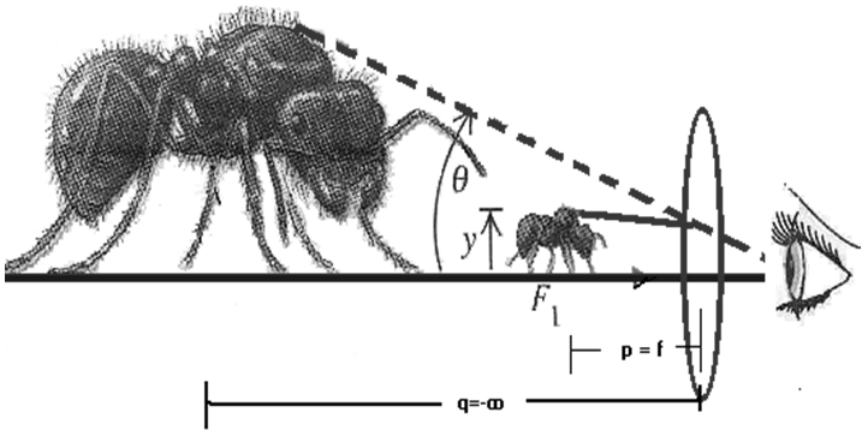


Figura 22.8: Microscopio simple o lupa

$$M_\theta = \frac{\theta}{\theta_0} \tag{22.13}$$

El aumento angular es un máximo cuando la imagen está en el punto más cercano del ojo ($q = -25cm$). En este caso, la magnificación angular está dada por:

$$M_\theta = 1 + \frac{25cm}{f} \tag{22.14}$$

donde f es la longitud focal de la lupa.
Para que la imagen aparezca en el infinito, el objeto tiene que estar en el punto focal de la lente. En este caso, la magnificación angular M_θ es da por:

$$M_\theta = \frac{\theta}{\theta_0} = M_\theta = 1 + \frac{25cm}{f} \tag{22.15}$$

22.3.3. Microscopio Compuesto

Produce un aumento mayor que la lupa. Está formado por dos lentes convergentes: objetivo y ocular. La Figura 25.9 muestra el diagrama de rayos y el instrumento óptico respectivo.
El objetivo de longitud focal muy corta $f_{ob} < 1cm$. El ocular tiene una longitud focal foc de unos cuantos centímetros.

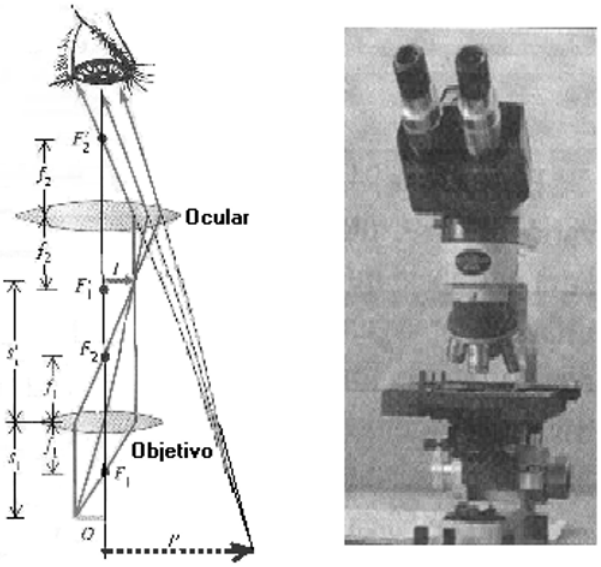


Figura 22.9:

Ambas lentes están separadas por una distancia L. (L es mucho más grande que f_{ob} y f_{oc}).
El objetivo forma una imagen real, aumentada e invertida I_1 la cual está en o cerca del punto focal del ocular. Éste produce una imagen I_2 de I_1, que es virtual e invertida.
El aumento lateral, M_L, de la lente objetivo es aproximadamente igual a $-L/f_{ob}$.
El aumento angular del ocular par un objeto (que no es sino I_1), situado en el punto focal del ocular, es $25cm/f_{oc}$.
El aumento total M del microscopio compuesto se define como el producto de los aumentos lateral y angular:

$$M = M_L M_\theta = -\frac{L}{f_{ob}}\frac{25cm}{f_{oc}} \tag{22.16}$$

El signo negativo indica que la imagen está invertida.
La capacidad de un microscopio óptico de observar un objeto depende del tamaño del objeto en relación con la longitud de onda de la luz empleada para observarlo. Si un átomo tiene dimensiones pequeñas próximas a 0,1 nm y la longitud de onda de la luz es, por ejemplo, 500 nm, no se podrá observar átomos o moléculas con un microscopio

compuesto.

22.3.4. Telescopio

Su sistema óptico es parecido al de un microscopio compuesto. Se utiliza para ver objetos grandes muy lejanos, como los planetas en nuestro sistema solar.

Pueden ser:

a) **telescopios refractores**, que utilizan una combinación de lentes (objetivo y ocular) para formar una imagen; y

b) **telescopios reflectores**, que utilizan un espejo curvo y una lente.

22.3.5. Telescopios refractores

El telescopio astronómico de refracción tiene dos lentes convergentes; el objetivo de mayor distancia focal; el ocular es lente convergente móvil de longitud focal relativamente corta. Los rayos provenientes del objeto distante son esencialmente paralelos y forman una imagen real y reducida I_o en el punto focal del ocular. Esta imagen es el objeto para el ocular que forma una imagen final, virtual, aumentada de I_o y que está en el infinito (para ser observada cómodamente por un ojo normal). La distancia entre el objetivo y ocular, que es la longitud del telescopio, es la suma de las longitudes focales del objetivo y del ocular ($f_{ob} + f_{oc}$).
El aumento angular M del telescopio de refracción es:

$$M = -\frac{f_{ob}}{f_{oc}} \tag{22.17}$$

El signo negativo indica que la imagen final está invertida.

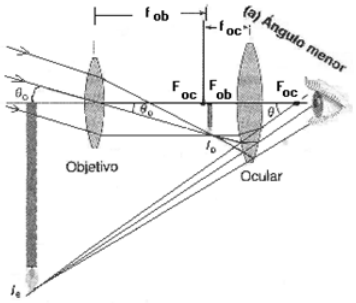


Figura 22.10: Diagrama del telescopio astronómico de refracción

Otro tipo de telescopio refractor es el telescopio terrestre. Un telescopio donde la imagen final está de pie. Para ello utiliza una tercera lente convergente (o rectificante), ubicada entre el objetivo y el ocular. Para este telescopio, la longitud L está dada por:

$$L = f_{ob} + f_{oc} + 4f_{rect}$$

donde f_{rect} es la longitud focal de la lente rectificante. Su magnificación angular está dada por la misma ecuación (25.17)

22.3.6. Telescopios reflectores

Utiliza un espejo parabólico de gran tamaño, cóncavo. El telescopio del observatorio Hale de Monte Palomar en California, tiene un espejo con un diámetro de 5,1 m.

La luz que llega del objeto distante se refleja en el espejo y luego converge hacia su foco, dentro del mismo telescopio. A veces se agrega un pequeño espejo plano para dirigir los rayos convergentes a una posición de visión más cómoda donde la imagen se enfoca “fuera” del telescopio.

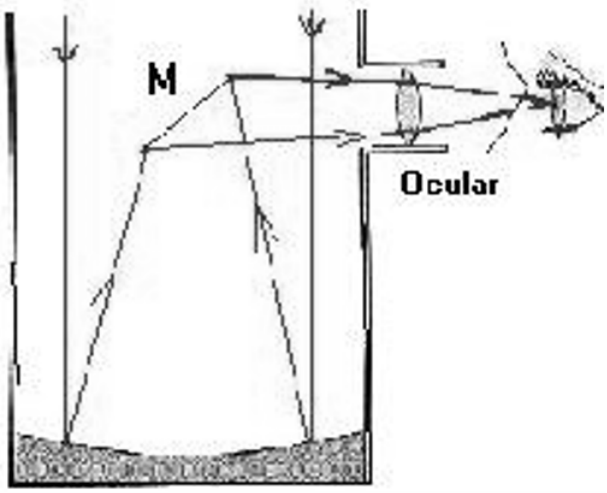


Figura 22.11: Telescopio de reflexión con un espejo M y una lente para enfocar la imagen fuera del telescopio.

Sesión 23

Propiedades Corpusculares de las Ondas

Louis Victor de Broglie (1892 - 1987)

Físico y premio Nobel francés, que contribuyó de manera fundamental al desarrollo de la teoría cuántica. De Broglie nació en Dieppe y estudió en la Universidad de París. Trató de racionalizar la doble naturaleza de la materia y la energía, comprobando que las dos están compuestas de corpúsculos y tienen propiedades ondulatorias. Por su descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones (1924), recibió el Premio Nobel de Física en 1929.

Fue elegido miembro de la Academia de Ciencias (1933) y de la Academia Francesa (1943). Fue nombrado profesor de física teórica en la Universidad de París (1928), secretario permanente de la Academia de Ciencias (1942) y consejero de la Comisión de Energía Atómica Francesa (1945). Entre sus obras destacan La física nueva y los cuantos (1937), Continuidad y discontinuidad en física moderna (1941) y Física y microfísica (1947).

También recibió la Legión de Honor, en 1961 fue nombrado Caballero de la Gran Cruz de la Legión de Honor.

Introducción

En nuestra experiencia diaria no hay nada misterioso o ambiguo sobre el concepto de partícula y de onda. Una piedra que cae en un lago y la ondulación que se extiende desde el punto de impacto tienen en común, en apariencia, solamente la de capacidad para transportar energía y cantidad de movimiento de un lugar a otro. La física clásica, que refleja la "realidad física" de nuestras sensaciones sensoriales, trata de las partículas y de las ondas como componentes separados de la realidad. La mecánica de las partículas y de las ondas han sido tradicionalmente disciplinas separadas, cada una de ellas con un tipo propio de experiencias e hipótesis. Pero la realidad física que nosotros percibimos proviene del mundo microscópico de los átomos y las moléculas, de los electrones y los núcleos. La realidad es que en este mundo no hay partículas u ondas en el sentido que se ha venido hablando. Si los electrones se consideran como partículas es porque tienen carga y masa y se comportan de acuerdo a las leyes de la mecánica, por ejemplo en un tubo de televisión. Sin embargo, hay tanta evidencia experimental que los electrones también se comportan como ondas, porque bajo circunstancias adecuadas sufren interferencia y difracción. Es por ello que preguntase si un electrón es una partícula o una onda carece de sentido. En esta sección se estudian algunos hechos experimentales que pusieron de manifiesto la naturaleza corpuscular de las ondas electromagnéticas.

23.1. Efecto Fotoélctrico

Heinrich Hertz, entre 1886 y 1887, realiza las experiencias que confirman la existencia de las ondas electromagnéticas y, por tanto, la "bondad" de la Teoría de Maxwell. En esos experimentos observa, además, que la descarga eléctrica entre dos electrodos se produce más fácilmente si sobre uno de ellos se hace incidir luz ultravioleta.

Lenard en 1900, demuestra que el fenómeno observado por Hertz es debido a que la radiación ultravioleta arranca electrones de la superficie metálica del cátodo. A esta emisión de electrones se le conoce como Efecto Fotoeléctrico, y a los electrones arrancados como Fotoelectrones.
En la Figura 26. 1 se muestra un aparato utilizado para estudiar el efecto fotoeléctrico. Una envoltura de vidrio encierra al aparato en un espacio al vacío; la luz incidente, que es monocromática, penetra a través de una ventana de cuarzo, incide sobre la placa de metal A y libera electrones (llamados fotoelectrones). Los fotoelectrones, si son atraídos a la copa de metal B mediante una diferencia de potencial V aplicada entre A y B, se podrán detectar como una corriente. El amperímetro G sirve para medir esta corriente fotoeléctrica. El voltaje V se puede variar en magnitud de manera contínua y también es posible, mediante el interruptor, invertir el signo.
La curva a de la Figura 26.2 es una gráfica de la corriente fotoeléctrica como función de la diferencia de potencial V para un aparato como el de la Figura 26.1. Si V se hace lo suficientemente grande, la corriente fotoeléctrica alcanza cierto valor límite (valor de saturación), para el cual todos los fotoelectrones emitidos desde A son recogidos por la copa B.

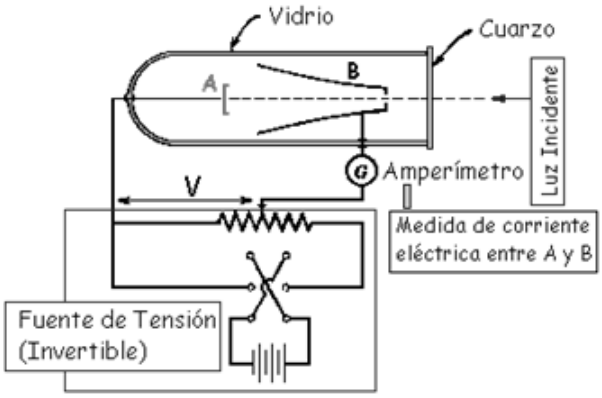


Figura 23.1: Aparato para estudiar el efecto fotoeléctrico. El Voltaje V se puede variar en magnitud de manera continúa y también es posible, mediante el interruptor invertir el signo.

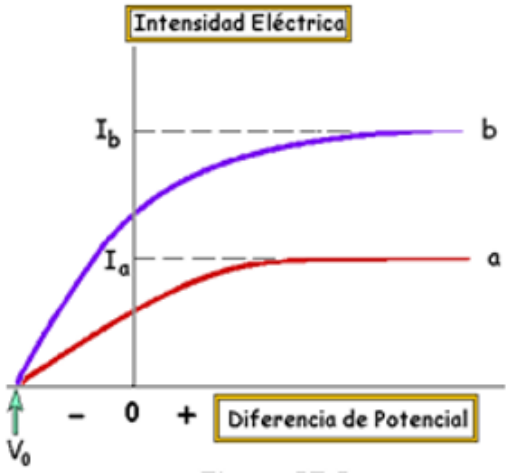


Figura 23.2:

Si se invierte el signo de V, la corriente fotoeléctrica no cae inmediatamente a cero, lo cual sugiere que los electrones son emitidos desde A con energía cinética; algunos alcanzarán el punto B sin importar que el campo eléctrico se oponga a su movimiento. Sin embargo, si esta diferencia de potencial se hace lo suficientemente grande se alcanzará un valor V_0, para el cual la corriente fotoeléctrica se hace igual a cero, a este valor se le llama potencial de frenado. Esta diferencia de potencial multiplicada por la carga del electrón es una medida de la energía cinética de los fotoelectrones más rápidos. Es decir

$$E_{k\text{máx}} = eV_0 \tag{23.1}$$

En la curva b la intensidad de la luz incidente se ha reducido a la mitad de la de la curva a. El potencial de frenado V, es independiente de la intensidad de la luz pero las corrientes de saturación I_a e I_b son directamente proporcionales a ella. En 1913 Millikan (figura 26.3), midió cuidadosamente el potencial de frenado a distintas frecuencia incidentes, comprobando la validez de la teoría de Einstein. Existe completa concordancia entre la teoría del fotón y el experimento.

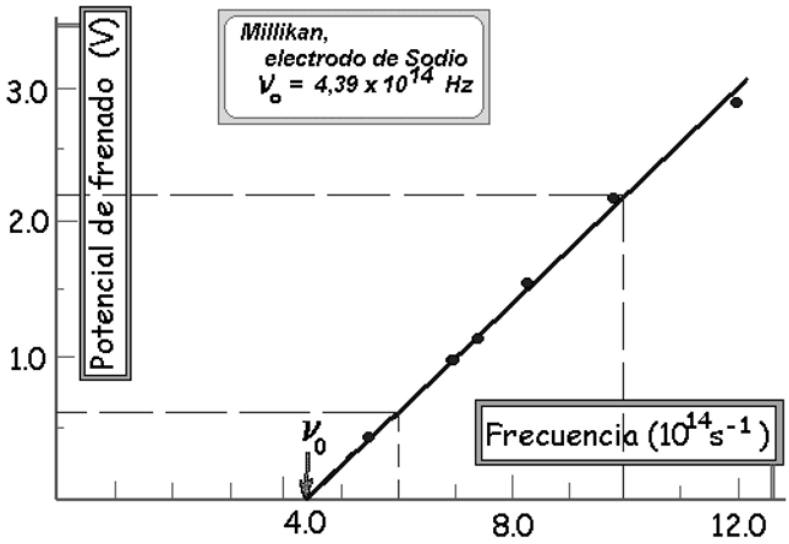


Figura 23.3: Gráficas de las medidas de Millikan para el Sodio

1. La existencia de una frecuencia de corte: un fotón de frecuencia ν_0 tiene justamente la energía suficiente para extraer los fotoelectrones y nada extra que aparezca como energía cinética. Si la frecuencia se reduce por debajo de ν_0 los fotoelectrones individuales, sin importar cuántos haya, tendrán individualmente energía suficiente para extraer fotoelectrones.

2. La ausencia de un tiempo de retraso: debido a que la energía necesaria se suministra en paquetes concentra-

dos. Si existe cualquier iluminación incidiendo sobre el cátodo, este fotón será absorbido inmediatamente por algún átomo resultando de inmediato en la emisión de un fotoelectrón.

3. La teoría de Einstein predice una relación lineal entre el potencial de frenado V_0, y la frecuencia ν en completa concordancia con los resultados experimentales. La pendiente de la curva experimental debe ser h/e.

$$h\nu = h\nu_0 + eV_0 \longrightarrow V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{h}{e}\nu_0 \tag{23.2}$$

La Figura 26.3 muestra el potencial de frenado V0 como función de la frecuencia de la luz que incide sobre el sodio. Obsérvese que existe una frecuencia de corte bien definida y la relación lineal antes mencionada.

23.1.1. Interpretación de los resultados

Existen tres hechos fundamentales del efecto fotoeléctrico que no pueden ser explicados por la teoría clásica ondulatoria de la luz:

1. El efecto fotoeléctrico es instantáneo. Según la teoría clásica, si la luz es extremadamente débil debe existir un intervalo de tiempo mensurable entre el instante en que la luz empieza a incidir en el metal y la emisión del electrón. Nunca se ha medido un tiempo de retraso.

2. La energía cinética de los electrones no depende de la intensidad de la luz. Según la teoría clásica, al aumentar la intensidad de la luz, aumentaría la energía.

3. Existencia de una frecuencia de corte o frecuencia umbral. Para cada superficie metálica existe una frecuencia de corte característica, tal que para frecuencias menores el efecto fotoeléctrico no ocurre, sin importar qué

intensa sea la iluminación. La teoría clásica dice que se dará efecto fotoeléctrico para cualquier frecuencia.

23.2. Hipótesis de Planck

Max Planck formuló en 1900 una hipótesis que consiguió explicar la radiación del cuerpo negro.

Todos los sólidos y los líquidos, cuando se calientan, emiten radiación cuya intensidad y color dependen de la temperatura. La radiación emitida corresponde a un espectro continuo, igual que el espectro solar.

Para estudiar la radiación elegimos un cuerpo negro, que es capaz de absorber todas las radiaciones, para posteriormente emitirlas.

La energía emitida depende de la temperatura y tiene un máximo para una longitud de onda determinada; este máximo se desplaza hacia longitudes de onda mayores a medida que disminuye la temperatura.

No obstante, según la física clásica, la energía radiada debería ser igual para todas las longitudes de onda, y al aumentar la temperatura, la radiación debería ser uniformemente más intensa.

Para explicar esto, Planck supuso que cada una de las partículas que constituyen la materia, está oscilando y emitiendo energía en forma de radiación electromagnética; esta energía emitida no puede tomar un valor cualquiera, sino que debe ser múltiplo entero de un valor mínimo llamado cuanto o paquete de energía.

La energía de un cuanto viene dada por la expresión:

$$E = h\nu \tag{23.3}$$

donde: ν (nu) es la frecuencia de la radiación emitida; y h es una constante llamada constante de acción de Planck, cuyo valor es:

$$h = 6,626x10^{-34} J.s$$

La hipótesis de Planck introduce el concepto de discontinuidad en la energía, igual que hay discontinuidad en la materia.

23.3. Einstein y la Explicación del Efecto Fotoeléctrico

En 1905 Einstein puso en duda la teoría clásica de la luz, propuso una nueva teoría y citó el efecto fotoeléctrico como una de las aplicaciones que podría probar cuál teoría era la correcta.

Originalmente Planck restringió su concepto de cuantización de la energía al electrón radiante en las paredes de una cavidad de cuerpo negro; Planck pensaba que la energía electromagnética una vez radiada se esparcía en el espacio de la misma manera que las ondas de agua se esparcen en ella. En vez de esto, Einstein propuso que la energía radiante estaba cuantizada en paquetes concentrados a los cuales posteriormente se les llamó fotones.

Einstein supuso que dicho paquete de energía está localizado inicialmente en un volumen de espacio pequeño y que se mantiene localizado mientras se mueve apartándose de la fuente con velocidad c. Supuso que la cantidad de energía E del paquete o fotón está relacionada con su frecuencia v

mediante la ecuación $E = h\nu$

También supuso que en el proceso fotoeléctrico un fotón es completamente absorbido por un electrón del fotocátodo. Si la energía incidente es mayor que la energía necesaria para arrancar el electrón, W, llamada función trabajo de extracción, se producirá efecto fotoeléctrico; en caso contrario, no.

Cuando se emite un electrón desde la superficie del metal, su energía cinética es

$$E_C = h\nu - W \tag{23.4}$$

donde $h\nu$ es la energía del fotón incidente absorbido y W es el trabajo necesario para sacar al electrón del metal o función de trabajo (ϕ).

23.4. El Efecto Compton

El Efecto Compton fue estudiado por el físico Arthur Compton en 1923, quién pudo explicarlo utilizando la noción cuántica de la radiación electromagnética como cuantos de energía y la mecánica relativista de Einstein. El efecto Compton constituyó la demostración final de la naturaleza cuántica de la luz tras los estudios de Planck sobre el cuerpo negro y la explicación de Albert Einstein del efecto fotoeléctrico. Como consecuencia de estos estudios Compton ganó el Premio Nobel de Física en 1927.
Compton propone generalizar la hipótesis de Einstein. Argumenta que un paquete de energía localizado en el espacio debe de ser considerado como una partícula - el fotón -. De acuerdo con la Relatividad Especial esa partícula debe de tener masa en reposo nula, y se le debe asignar un momento lineal - Energía cinética y momento lineal son las

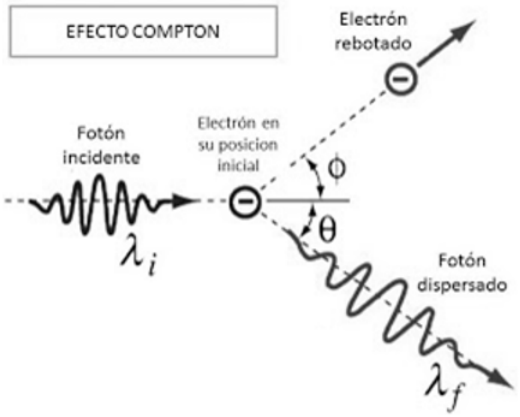


Figura 23.4:

variables básicas de la mecánica -. En ese supuesto, considera la dispersión como una colisión entre un fotón y un electrón libre, obteniendo una predicción para el desplazamiento de la longitud de onda en concordancia con sus resultados experimentales. Si un fotón con longitud de onda λ_i choca con una partícula de masa m y se deflecta un ángulo θ, entonces su longitud de onda cambia a λ_f, donde

$$\lambda_i - \lambda_f = \frac{h}{mC}(1 - \cos\theta) \tag{23.5}$$

Sesión 24

Propiedades Ondulatorias de las Partículas

Thomas Young (1773 - 1829)

Thomas Young nació en Milvertone, Inglaterra, en junio de 1773; y vivió la revolución intelectual de fines del siglo XIX. A los diecinueve años, Young decidió hacer su carrera en medicina. Perteneció a la Royal Society en la cual presentó un trabajo en el que atribuía la posición correcta del ojo a su estructura muscular. Completó sus estudios médicos en Edimburgh y Gotingen, regresó a Londres a practicar la medicina, continuando su interés en el College Emmanuel en Cambridge. En 1798 realizó investigaciones sobre la luz y sonido, lo cual le dio su punto de partida para su teoría de interferencia presentada varios años después. Sus contribuciones a la ciencia y a la literatura fueron muy numerosas.

En 1800 publicó Experimentos sobre luz y sonido y presentó una consideración detallada de su teoría de interferencia en sus Clases Backerianas, “Sobre la Teoría de la Luz y los Colores”, y otra en noviembre de 1803 intitulada “Experimentos y Cálculos Relacionados con la Óptica

Física", Young hizo un sumario de sus observaciones sobre interferencia y añadió varios fenómenos nuevos. La importancia de su trabajo no fue considerada por sus contemporáneos, y el principio de la interferencia permaneció más o menos oscuro durante catorce años, hasta que Fresnel lo redescubrió. Continúo trabajando, hasta su muerte en 1829.

Introducción

En la Naturaleza observamos innumerables ejemplos de sistemas físicos en donde se observa el fenómeno de interferencia (ondas de agua, ondas sonoras, ondas de luz, ondas electromagnéticas, etc.). Todos ellos, constituyen manifestaciones de un fenómeno ondulatorio subyacente.

La historia del desarrollo de la teoría física de la luz, ha sido signada por la lucha entre dos modelos distintos, y en principio, incompatibles para la física clásica. Esos dos modelos son el modelo corpuscular (Newton) y el modelo ondulatorio de la luz (Huygens). La observación de fenómenos de interferencia asociados a la luz, fue determinante para el triunfo de la teoría ondulatoria, pero ese no fue el final de la historia.

La aparente incompatibilidad entre una teoría corpuscular y una ondulatoria, desaparece con el advenimiento de la teoría cuántica. La teoría cuántica introduce un nuevo objeto físico, que no existía en la teoría clásica, la onda-partícula, no es ni onda ni partícula sino una manifestación compleja de ambos elementos clásicos. Es más, las ondas y las partículas dejan de ser objetos válidos para describir los fenómenos físicos. Como ejemplo, un electrón, en física clásica, era asociado a una partícula, pero en física cuánti-

ca el electrón es una onda-partícula, por lo cual, esta teoría predice que es posible observar fenómenos de interferencia asociados al electrón. El experimento, juez implacable para la física, ha determinado que la cuántica tiene (hasta el momento) la razón, se han observado innumerables experiencias en donde el electrón manifiesta sus características ondulatorias y corpusculares, tales como la aparición de fenómenos de interferencia del electrón-onda consigo mismo.

La luz, no escapa a la descripción cuántica. Según esta teoría, la luz se halla formada por ondas-partículas (o cuantos de luz) llamados fotones. Los fotones se distinguen de otros objetos físicos por el hecho de no tener masa inercial. Luego estudiaremos que por esta razón se mueven a la velocidad de la luz en todos los sistemas de referencia (Teoría de la Relatividad).

24.1. Hipótesis de De Broglie

El primer paso audaz hacia una nueva mecánica de los sistemas atómicos fue dado por, el físico francés, Louis Victor De Broglie (1892 – 1987), en 1923. En su disertación doctoral postuló que:

Debido a que los fotones poseen características ondulatorias y corpusculares, quizá todas las formas de la materia también tengan propiedades ondulatorias y corpusculares.

Esta era una idea radical sin confirmación experimental en esa época. Según De Broglie, los electrones poseen una naturaleza dual partícula-onda. Acompañando a cada electrón había una onda (¡no una onda electromagnética!) que "guiaba" o "piloteaba" al electrón a través del espacio. Explico el origen de esta aseveración en su discurso de aceptación del premio Nobel en 1929.

Consideremos la idea de De Broglie con más detalle. Él concluyo que la longitud de onda y frecuencia de una onda de materia, asociada a cualquier objeto en movimiento, estaban dadas por:

$$\lambda = \frac{h}{p} \tag{24.1}$$

y

$$f = \frac{E}{h} \tag{24.2}$$

Donde h es la constante de Planck, p es la cantidad de movimiento relativista y E es la energía total relativista del objeto. De la ecuación (27.1) se aprecia fácilmente, que a medida que la masa del cuerpo o su velocidad aumentan,

disminuye considerablemente la longitud de onda.

Esta hipótesis se confirmó tres años después para los electrones, con la observación de los resultados del experimento de la doble rendija de Young en la difracción de electrones en dos investigaciones independientes. En la Universidad de Aberdeen, George Paget Thomson (hijo) pasó un haz de electrones a través de una delgada placa de metal y observó los diferentes esquemas predichos. En los Laboratorios Bell, Clinton Joseph Davisson y Lester Halbert Germer guiaron su haz a través de una celda cristalina.

La ecuación de De Broglie se puede aplicar a toda la materia. Los cuerpos macroscópicos, también tendrían asociada una onda, pero, dado que su masa es muy grande, la longitud de onda resulta tan pequeña que en ellos se hace imposible apreciar sus características ondulatorias.

Por la comprobación experimental de la hipótesis de De Broglie, Thomson y Davisson compartieron el Nobel de 1937.

24.2. El experimento de Young de la doble rendija

En el año 1801 el físico y médico Thomas Young ideó un dispositivo que le permitió demostrar concluyentemente la naturaleza ondulatoria de la luz (luego en el siglo XX, la teoría cuántica “le dio la razón a ambos grupos”).

Young hizo pasar luz monocromática (plana) a través de dos pequeños orificios muy juntos (figura 27.1), se comportaba como una nueva fuente de ondas “esféricas”, coherentes entre sí. Las ondas provenientes de cada orificio se superponían sobre una pantalla formando un patrón de zonas brillantes y oscuras, propio de un fenómeno de interferen-

cia ondulatorio.

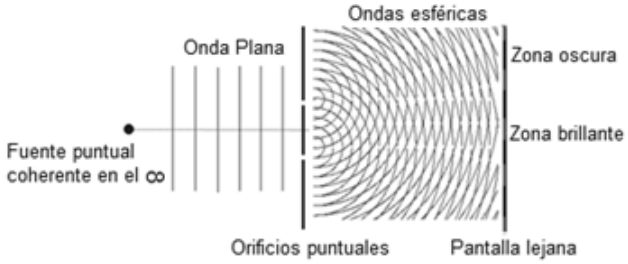


Figura 24.1: Experimento de Young de la doble rendija, n franjas brillantes

Ubicación de las franjas sobre una pantalla (lejana): En la figura 27.2, se muestra el patrón de interferencia (franjas brillantes y oscuras) que se forma sobre una pantalla, ubicada a una gran distancia del arreglo, cuando se ilumina con una onda plana, monocromática de longitud de onda λ, un arreglo de dos rendijas puntuales (espesor infinitesimal), separadas entre sí una distancia d (del orden de λ).

Hallemos ahora la ubicación de las franjas. Dado un punto P cualquiera sobre la pantalla, debemos determinar la diferencia de camino recorrido por las ondas, provenientes de cada rendija, ver figura 27.3.

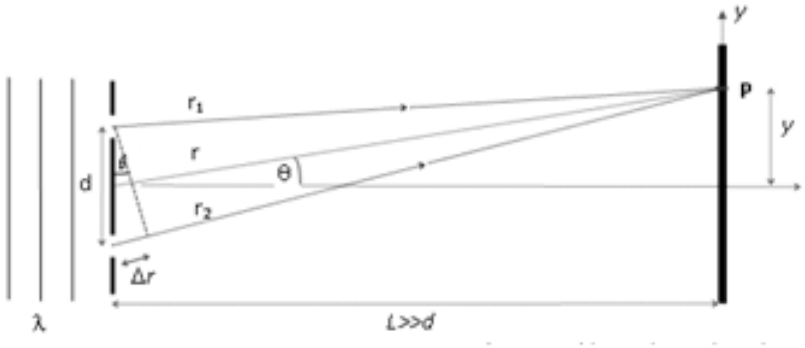


Figura 24.2: Experimento de Young. Diferencia de camino recorrido por las ondas, al llegar a un punto P genérico

En la figura 27.3 se identifica la diferencia de camino Δr en función del ángulo θ, que determina el punto P sobre la pantalla. Si la pantalla se halla muy lejos de las rendijas

($L >> d$), entonces, resulta una buena aproximación considerar que las rectas que unen las rendijas al punto P son paralelas. En base a esta aproximación, podemos calcular la diferencia de camino como,

$$\Delta r \cong d \operatorname{sen}\theta \tag{24.3}$$

Las franjas brillantes se hallan ubicadas en aquellos lugares, de la pantalla, en donde se satisface que la diferencia de camino Δr es un múltiplo de la longitud de onda λ, es decir,

$$\Delta r = m\lambda \tag{24.4}$$

con $m \in \mathbf{Z}$

A partir de (27.3) y (27.4) obtenemos la ubicación angular de los máximos de interferencia,

$$\operatorname{sen}\theta \cong m\frac{\lambda}{d} \tag{24.5}$$

con $m \in \mathbf{Z}$.
Los mínimos de interferencia se hallan ubicadas en aquellos lugares, en donde se satisface que la diferencia de camino Δr es un múltiplo impar de media longitud de onda λ, es decir,

$$\Delta r = (2n+1)\frac{\lambda}{2} \tag{24.6}$$

con $n \in \mathbf{Z}$.

A partir de (27.3) y (27.6) obtenemos la ubicación angular de los mínimos de interferencia,

$$\operatorname{sen}\theta \cong \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d} \tag{24.7}$$

con $n \in \mathbf{Z}$.
El coeficiente entero m numera a las franjas, por ejemplo, $m = 0$ corresponde a la franja central ($\theta = 0$), llamado orden cero, mientras que los valores $m = \pm 1$ corresponden a las primeras franjas, a los costados de la central, llamados orden 1. Dándole otros valores a la constante m, obtenemos los órdenes superiores.

La posición (coordenada y) sobre la pantalla de los diferentes órdenes, en la aproximación de ángulos pequeños, resulta (ver figura 27.3),

$$y_m = L\,\mathrm{tg}\,(\theta_m) \approx L\,\mathrm{sen}\,(\theta_m) m\lambda\frac{L}{d} \tag{24.8}$$

De aquí podemos hallar la distancia que separa dos máximos, u órdenes consecutivos, simplemente restando,

$$\Delta y = y_(m+1) - y_m \approx (m+1)\lambda\frac{L}{d} - m\lambda\frac{L}{d} = \lambda\frac{L}{d} \tag{24.9}$$

La ecuación (27.8) nos dice algo aún más importante, que la ubicación de los máximos de intensidad no resulta igual para los diferentes colores. Esto resulta evidente ya que su posición sobre la pantalla es proporcional a la longitud de onda (color). Es decir que, si iluminamos las rendijas con luz coherente blanca, observamos sobre la pantalla la formación de un patrón de franjas para cada color. El centro, orden cero ($m = 0$), permanece blanco ya que todos los colores tienen su orden cero en $y = 0$, pero ya en el orden 1 ($m = 1$) comienzan a separarse. El violeta y el azul (de menor longitud de onda) se hallan más cerca del centro, mientras que el rojo, de mayor longitud de onda, se halla más alejado.

24.3. Difracción

En general, la difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de pequeñas aberturas, alrededor de obstáculos o por bordes afilados.

Los fenómenos de difracción suelen clasificarse en dos tipos. La difracción de Fraunhofer ocurre cuando los rayos que llegan a la pantalla de observación son aproximadamente paralelos. La difracción de Fresnel ocurre cuando la pantalla de observación se pone a una distancia finita de la rendija y no se utiliza una lente para enfocar rayos paralelos.

Debido a que la difracción de Fresnel es difícil de tratar cuantitativamente, solo se analizara la difracción de Fraunhofer.

24.3.1. Difracción por una ranura

Para analizar el patrón de difracción es conveniente dividir la rendija en dos mitades, como en la figura 27.4.

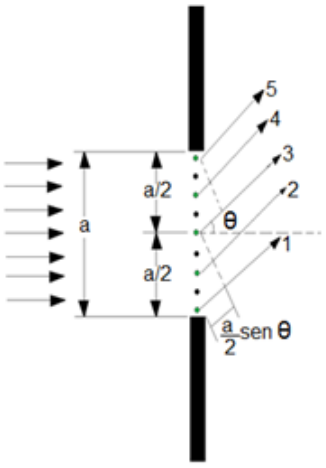


Figura 24.3: Difracción de la luz por medio de una estrecha rendija de ancho a. Cada porción de la rendija actúa como una fuente puntual de ondas. La diferencia de trayectoria entre los rayo 1 y 3 o entre 3 y 4 es de $\frac{a}{2}\operatorname{sen}\theta$

Todas las ondas que se originan desde la rendija están en fase. Considere las ondas 1 y 3, que se originan de un segmento justo arriba de la parte inferior y justo arriba del centro de la rendija, respectivamente. La onda 1 viaja más lejos que la onda 3 en una cantidad igual a la diferencia de recorrido $(a/2)\,\text{sen}\,\theta$, donde a es el ancho de la rendija. De manera similar, la diferencia de recorrido entre las ondas 2 y 4 también es $(a/2)\,\text{sen}\,\theta$. Si esta diferencia de recorrido es exactamente la mitad de la longitud de onda (lo que corresponde a una diferencia de fase de 180^o), las dos ondas se cancelan entre sí y se produce interferencia destructiva. Esto es cierto, de hecho, para dos ondas cualesquiera que se originan en puntos separados por la mitad del ancho de la rendija debido a que la diferencia de fase entre dos de dichos puntos es 180^o. En consecuencia, las ondas provenientes de la mitad superior de la rendija interfieren destructivamente con ondas provenientes de la mitad inferior de la rendija cuando:

$$\frac{a}{2}\,\text{sen}\,\theta = \frac{\lambda}{2} \tag{24.10}$$

O cuando

$$\text{sen}\,\theta = \frac{\lambda}{a} \tag{24.11}$$

Si dividimos la rendija en cuatro partes en vez de dos y usamos un razonamiento similar, encontramos que la pantalla también esta oscuro cuando

$$\text{sen}\,\theta = \frac{2\lambda}{a} \tag{24.12}$$

De igual modo, podemos dividir la rendija en seis partes y mostrar que la pantalla se oscurece cuando

$$\text{sen}\,\theta = \frac{3\lambda}{a} \tag{24.13}$$

Por lo tanto, la condición general para la interferencia destructiva es:

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{m\lambda}{a} \qquad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots \tag{24.14}$$

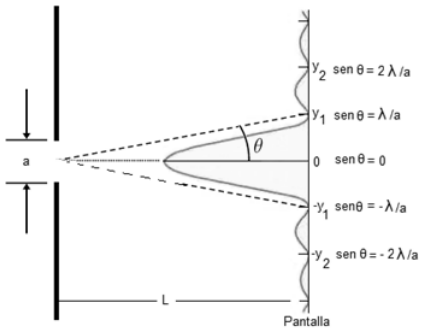


Figura 24.4: Posiciones de los mínimos para el patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija de ancho a. El patron se obtiene si $L >> a$

Las características generales de la distribución de intensidad se muestran en la figura 27.5. Se observa una ancha franja brillante central, flanqueada por franjas brillantes mucho más débiles que se alternan con franjas oscuras. Las diversas franjas oscuras (puntos de intensidad cero) ocurren en los valores de θ que satisfacen la ecuación 27.13. La posición de los puntos de interferencia constructiva se encuentra aproximadamente a la mitad entre las franjas oscuras. Advierta que la franja brillante central es dos veces más ancha que los máximos más débiles, es decir:

$$\Delta y = 2\lambda\frac{L}{a} \tag{24.15}$$

24.3.2. Difracción de una rejilla

La rejilla de difracción, es un útil dispositivo para analizar fuentes luminosas, se compone de un gran número de rendijas paralelas igualmente espaciadas.

Una rejilla puede hacerse cortando líneas rectas paralelas sobre una placa de vidrio con una máquina de rayado de precisión. En una rejilla de transmisión, el espacio entre dos líneas cualesquiera es transparente a la luz y en consecuencia actúa como una rendija individual. Las rejillas con muchas líneas muy cercanas entre sí pueden tener espaciamientos de rendija muy pequeños. Por ejemplo, una rejilla rayada con 5 000 líneas/cm tiene un espaciamiento de rendija $d = (1/5000)cm = (2{,}00x10^{-4}cm)$.

Una sección de una rejilla de difracción se ilustra en la figura 27.6. Una onda plana incide desde la izquierda, normal al plano de la rejilla. El patrón observado sobre la pantalla es el resultado de los efectos combinados de interferencia y difracción. Cada rendija produce difracción, los rayos difractados interfieren entre sí para producir el patrón final. Además, cada rendija actúa como una fuente de ondas, donde todas éstas empiezan en las rendijas en fase. Sin embargo, para alguna dirección arbitraria θ medida desde la horizontal, las ondas deben recorrer diferentes longitudes de trayectoria antes de llegar al punto de interferencia en la pantalla. Observe en la figura 27.6 que la diferencia de trayectoria entre ondas de dos rendijas adyacentes cualesquiera es igual $a \operatorname{sen}\theta$. Si esta diferencia de trayectoria es igual a una longitud de onda o a algún múltiplo entero de una longitud de onda, las ondas provenientes de todas las rendijas están en fase en el punto de interferencia y se observa una línea brillante. Por consiguiente, la condición para máximos en el patrón de interferencia al ángulo θ es

$$d \operatorname{sen}\theta = m\lambda \qquad (m = 0, 1, 2, 3, ...) \tag{24.16}$$

La expresión 27.15, puede emplearse para calcular la longitud de onda a partir del conocimiento del espaciamiento de la rejilla y del ángulo de desviación θ. Si la radiación in-

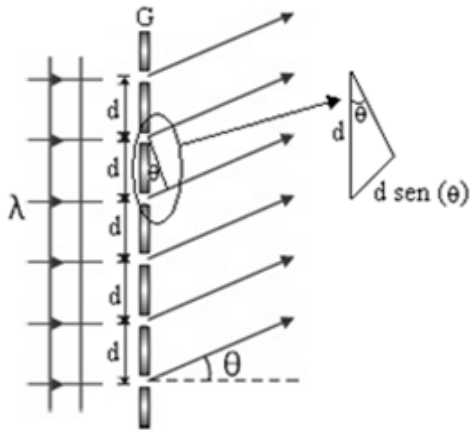


Figura 24.5: Muestra a una rejilla de difracción con la diferencia de camino, entre dos ondas

cidente contiene varias longitudes de onda, el máximo de orden rapara cada longitud de onda ocurre a un ángulo específico. Todas las longitudes de onda se ven en $\theta = 0$ lo que corresponde a $m = 0$, el máximo de orden cero. El máximo de primer orden ($m = 1$) se observa a un ángulo que satisface la relación $\operatorname{sen}\theta = \frac{\lambda}{d}$; el máximo de segundo orden ($m = 2$) se observa a un ángulo más grande θ, etc.

24.3.3. difracción de electrones

Una manera de cristalizar nuestras ideas acerca de la dualidad onda - partícula es considerar la difracción de electrones que pasan a través de una doble rendija. Este experimento muestra la imposibilidad de medir simultáneamente tanto las propiedades de onda como de partícula e ilustra el empleo de la función de onda en la determinación de efectos de interferencia. Considere un haz de electrones mono energéticos que incide sobre una doble rendija, como se muestra en la figura 27.7. Debido a que las aberturas de rendija son mucho más pequeñas que la longitud de onda de los electrones, no se espera una estructura a partir de la difracción de una sola rendija. Un detector de electrones se coloca alejado de las rendijas a una distancia mucho mayor

que D. Si el detector recoge electrones en diferentes posiciones por un tiempo suficientemente largo, se encuentra un patrón de interferencia que representa el número de electrones que llegan en cualquier posición a lo largo de la línea del detector. Tal patrón de interferencia no se esperaría si los electrones se comportaran como partículas clásicas.

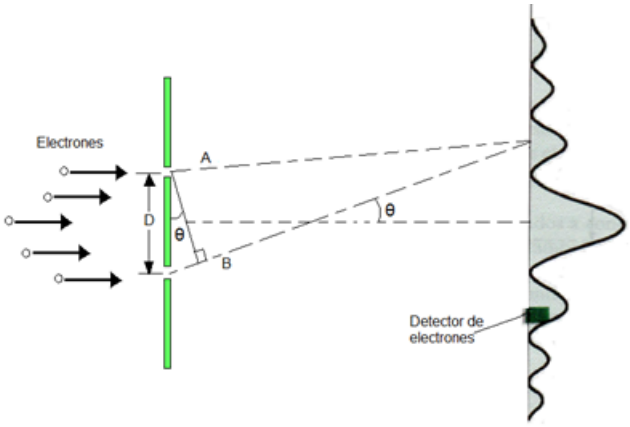


Figura 24.6: Difracción de electrones. La separación de las rendijas D es mucho mayor que sus anchos individuales y mucho menor que la distancia de las rendijas a la pantalla

Si el experimento se efectúa a intensidades más bajas del haz, sigue observándose el patrón de interferencia si el tiempo de medición es bastante largo. El patrón de interferencia se vuelve más claro cuando el número de electrones que llegan a la pantalla aumenta.

Si se imagina un solo electrón que produce "ondas secundarias" en fase cuando llega a una de las rendijas, la teoría ondulatoria estándar puede emplearse para determinar la separación angular, θ, entre el máximo de probabilidad central y su mínimo vecino. El mínimo ocurre cuando la diferencia de longitud de la trayectoria entre A y B es la mitad de una longitud de onda, o

$$D \operatorname{sen} \theta = m\frac{\lambda}{2} \tag{24.17}$$

Sesión 25

Física Atómica

Niels Bohr (1 885 - 1 962)

En 1922, el científico danés Niels Bohr recibió el Premio Nobel de Física por sus investigaciones sobre la Física Atómica. La mayoría de sus investigaciones las había realizado en la Universidad de Manchester, junto con el reputado físico Ernest Rutherford. Allí se rodeó de grandes científicos, a los que sorprendió por su inteligencia y dedicación. Sus aportaciones revolucionaron el campo de la física nuclear y el de la estructura atómica e impulsaron las investigaciones en este campo En 1939, reconociendo el significado de los experimentos de la fisión de los científicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann, Bohr convenció a los físicos en una conferencia en Estados Unidos de la importancia de estos experimentos. Más tarde, demostró que el uranio 235 es el isótopo del uranio que experimenta la fisión nuclear. Bohr regresó posteriormente a Dinamarca, donde fue obligado a permanecer después de la ocupación alemana del país en 1940. Sin embargo, consiguió llegar a Suecia con gran peligro de su vida y de la de su familia. Desde Suecia, la familia Bohr viajó a Inglaterra y por último a los Estados

Unidos, donde Bohr se incorporó al equipo que trabajaba en la construcción de la primera bomba atómica en Los Álamos (Nuevo México), hasta su explosión en 1945. Bohr se opuso, sin embargo, a que el proyecto se llevara a cabo en total secreto, y temía las consecuencias de este siniestro nuevo invento. Deseaba un control internacional. En 1945, Bohr regresó a la Universidad de Copenhague donde, inmediatamente, comenzó a desarrollar usos pacifistas para la energía atómica. Organizó la primera conferencia 'Átomos para la paz' en Ginebra, celebrada en 1955, y dos años más tarde recibió el primer premio 'Átomos para la paz'. Bohr murió el 18 de diciembre de 1962 en Copenhague.

Introducción

Desde la antigüedad se sospechaba que la materia, a pesar de su aparente continuidad, presentaba una estructura definida a nivel microscópico, más allá del alcance de nuestros sentidos. Esta sospecha fue afirmándose debido a los resultados de diversas experiencias, tales como: las de Faraday, sobre todo las relacionadas con la electrólisis, las investigaciones sobre la periodicidad en las propiedades de las sustancias simples, las experiencias de Crookes en tubos de descarga con gases a baja presión, el descubrimiento de los rayos catódicos, etc. Desde entonces se ha demostrado plenamente la existencia de partículas constitutivas de la materia, en sus formas comunes: los átomos y las moléculas. Sus constituyentes últimos, electrones, protones, han sido identificados plenamente. En la presente unidad se estudiara la estructura del átomo, así como de la estructura de sus constituyentes.

25.1. Modelos Atómicos

25.1.1. Jhon Dalton

Introduce la idea de la discontinuidad de la materia, es decir, ésta es la primera teoría científica que considera que la materia está dividida en átomos, ver fig 25.1, (dejando aparte a precursores de la Antigüedad como Demócrito y Leucipo, cuyas afirmaciones no se apoyaban en ningún experimento riguroso).

Figura 25.1: Modelo del átomo propuesto por Dalton

Los postulados básicos de esta teoría atómica son:

1. La materia está dividida en unas partículas indivisibles e inalterables, que se denominan átomos.
2. Todos los átomos de un mismo elemento son idénticos entre sí (presentan igual masa e iguales propiedades).
3. Los átomos de distintos elementos tienen distinta masa y distintas propiedades.
4. Los compuestos se forman cuando los átomos se unen entre sí, en una relación constante y sencilla.

Las insuficiencias del modelo son las siguientes:

1. Se sabe que los átomos sí pueden dividirse y alterarse.
2. Las Experiencias de Thomson.

25.1.2. J. J. Thomson

Introduce la idea de que el átomo puede dividirse en las llamadas partículas fundamentales:

- Electrones, con carga eléctrica negativa
- Protones, con carga eléctrica positiva
- Neutrones, sin carga eléctrica y con una masa mucho mayor que la de electrones y protones.

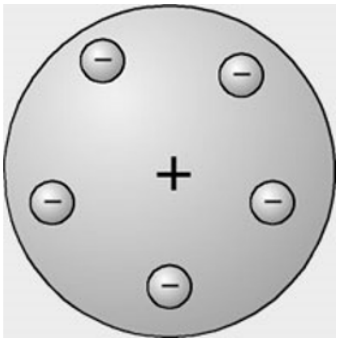


Figura 25.2: Modelo atómico de Thomson

Thomson considera al átomo como una gran esfera con carga eléctrica positiva, en la cual se distribuyen los electrones como pequeños granitos (de forma similar a las pepitas de una sandía).
Las insuficiencias del modelo son las siguientes:

- El átomo no es macizo ni compacto como suponía Thomson, es prácticamente hueco y el núcleo es muy pequeño comparado con el tamaño del átomo, según demostró E. Rutherford en sus experiencias.

25.1.3. E. Rutherford

En 1911, Rutherford introduce el modelo planetario, que es el más utilizado aún hoy en día. Considera que el átomo se divide en:

- Un núcleo central, que contiene los protones y neutrones (y por tanto allí se concentra toda la carga positiva y casi toda la masa del átomo).
- Una corteza, formada por los electrones, que giran alrededor del núcleo en órbitas circulares, de forma similar a como los planetas giran alrededor del Sol

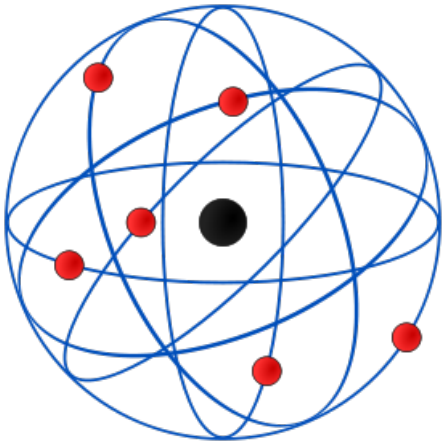


Figura 25.3: Modelo atómico de Rutherford

Los experimentos de Rutherford demostraron que el núcleo es muy pequeño comparado con el tamaño de todo el átomo: el átomo está prácticamente hueco.

Insuficiencias del modelo de Rutherford:

- Se contradecía con las leyes del electromagnetismo de Maxwell, las cuales estaban ampliamente comprobadas mediante numerosos datos experimentales. Según las leyes de Maxwell, una carga eléctrica en movimiento (como es el electrón) debería emitir energía continuamente en forma de radiación, con lo que llegaría un momento en que el electrón caería sobre el núcleo y la materia se destruiría; esto debería ocurrir en un tiempo muy breve.
- No explicaba los espectros atómicos.

25.1.4. Niels Bohr

El modelo atómico de Bohr o de Bohr-Rutherford es un modelo clásico del átomo, pero fue el primer modelo atómico en el que se introduce una cuantización a partir de ciertos postulados. Fue propuesto en 1913 por el físico danés Niels Bohr, para explicar cómo los electrones pueden tener órbitas estables alrededor del núcleo y por qué los átomos presentaban espectros de emisión característicos (dos problemas que eran ignorados en el modelo previo de Rutherford). Además el modelo de Bohr incorporaba ideas tomadas del efecto fotoeléctrico, explicado por Albert Einstein en 1905.

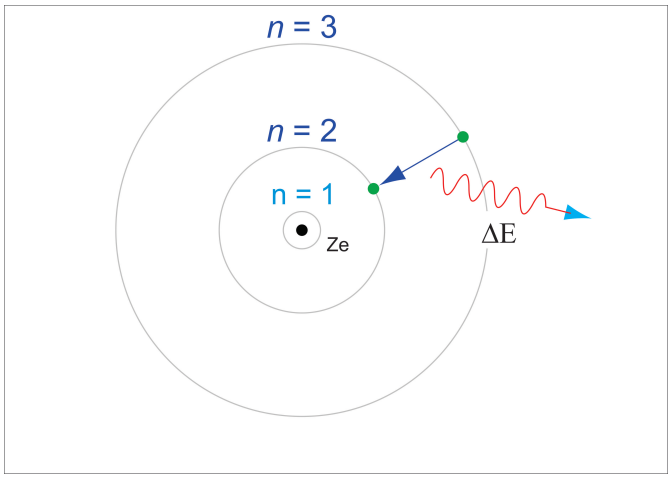


Figura 25.4: Modelo atómico de Bohr

Modelos de bohr para el átomo de hidrógeno A pesar de constituir un gran avance y de predecir hechos reales, el modelo nuclear de Rutherford presentaba dos graves inconvenientes:

- Contradecía las leyes electromagnéticas de Maxwell, según las cuales, una partícula cargada, cuando posee aceleración, emite energía electromagnética.
- Según el enunciado anterior los espectros atómicos deberían ser continuos, ocurriendo que éstos son discon-

tinuos, formados por líneas de una frecuencia determinada.

Bohr presentó en 1.913 el primer modelo de un átomo basado en la cuantización de la energía. Superó las dificultades del modelo de Rutherford suponiendo simplemente que la Física clásica no se podía aplicar al universo atómico. No hay ninguna razón, decidió Bohr, para esperar que los electrones en los átomos radien energía mientras no se les proporcione ninguna energía adicional. Igualmente los espectros atómicos de absorción y emisión de líneas eran indicativos de que los átomos, y más concretamente los electrones, eran capaces de absorber o emitir cuantos de energía en determinadas condiciones.

La teoría de los cuantos de Planck le aportó a Bohr dos ideas:

a) Las oscilaciones eléctricas del átomo sólo pueden poseer cantidades discretas de energía (están cuantizados)

b) Sólo se emite radiación cuando el oscilador pasa de un estado cuantizado a otro de mayor energía.

Bohr aplicó estas ideas al átomo de hidrógeno y enunció los tres postulados siguientes:
Primer Postulado.-En el átomo de hidrógeno el movimiento del electrón alrededor del núcleo está restringido a un número discreto de órbitas circulares.

Segundo Postulado.-El momento angular del electrón en una órbita está cuantizado; es un número entero de $h/2\pi$, siendo h la constante de Planck.

$$L = mvr = n\hbar \qquad \text{n=1, 2, 3, ...} \qquad (25.1)$$

Tercer Postulado.- EL electrón no radia energía mientras permanece en una de las órbitas permitidas, teniendo en

cada órbita una energía característica constante. Cuando el electrón cae de un estado de energía superior a otro de energía inferior, se emite una cantidad de energía definida en forma de un fotón de radiación.

$$E_{\text{superior}} - E_{\text{inferior}} = h\nu \tag{25.2}$$

Utilizando los postulados de Bohr, se pueden calcular los estados de energía permitidos y las longitudes de onda de emisión para el átomo de hidrógeno.

Del segundo postulado de Bohr, se obtiene los radios de las orbitas de Bohr en el hidrogeno.

$$r_n = a_o n^2 \qquad \text{n=1, 2, 3, ...} \tag{25.3}$$

a_0: radio de Bohr, cuyo valor es: 0.0529 nm.

Para la energía se tiene:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} eV \tag{25.4}$$

Del tercer postulado y la ecuación (30.4) se tiene obtiene la ecuación empírica, de los espectros de emisión, descubierta por Balmer y otros.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \tag{25.5}$$

R_H: constante de Rydberg, cuyo valor es: $1,097 \times 107 m^{-1}$
Series Espectrales:

Tabla 25.1: Diagramas de las series espectrales.

n_f	n_i	Serie
1	2,3,4,5, ...	Lyman
2	3,4,5,6, ...	Balmer
3	4,5,6,7, ...	Paschen
4	5,6,7,8, ...	Brackett
5	6,7,8,9, ...	Pfund
6	7,8,9,10, ...	Humphreys

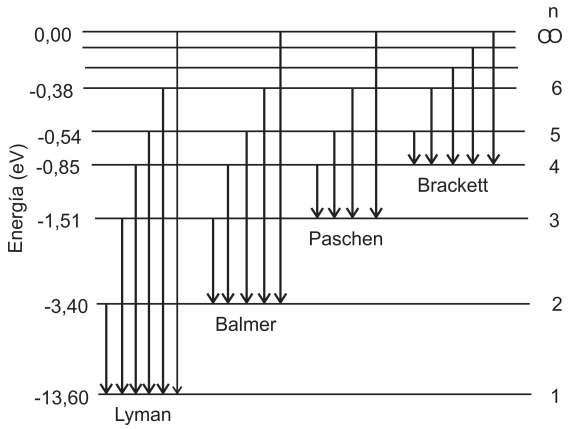


Figura 25.5: Origen de las cinco series espectrales conocidas del átomo de hidrógeno de acuerdo con la teoría de Bohr.

25.1.5. Modelo Mecano Cuántico del Átomo

En este nuevo modelo, los electrones también se encuentran distribuidos en diferentes niveles de energía, pero estos no se representan como una órbita perfectamente delimitada como en el modelo anterior. Se introduce la idea de probabilidad de encontrar un electrón a cierta distancia del núcleo dependiendo de su energía, es decir que también es posible encontrarlo en otro lugar.

Si se representa la región del espacio donde es probable encontrar un electrón de determinada energía, se obtienen gráficos en tres dimensiones (en los tres ejes cartesianos), que pueden describirse como “una nube electrónica”. A estas regiones del espacio se las denomina orbitales.

25.1.6. La ecuación de Schrödinger y la Función de Onda

En 1925 Schrödinger (1887-1961), modificó la ecuación general de los movimientos ondulatorios usando la relación de De Broglie, para que reflejase también las propiedades corpusculares. La ecua-ción obtenida permite calcular una función de onda, ψ, que depende de la posición y el tiempo, $\psi(x,t)$. Un año después, en 1926, Born (1882-1970), que había trabajado junto con Heisenberg, apreció que en la ecuación de Schrödinger, el cuadrado de la función de onda ψ^2 [formalmente, $\mid \psi \mid^2 = \psi * \psi$] se podía interpretar como una densidad de probabilidad. Después de aplicar la ecuación (a un electrón, a un bloque de madera,..), el cuadrado de la función de onda obtenida como solución de dicha ecuación, representa la probabilidad de que el objeto sea detectado en un lugar y en un instante determinados.

Esto es coherente con el carácter dual de la materia y con el concepto de deslocalización exigido por el principio de incertidumbre de Heisemberg. Schrödinger recibió el premio Nóbel de Física en 1933 por haber desarrollado su ecuación y Born recibió el mismo galardón en 1954 por la interpretación probabilística de la función de ondas de dicha ecuación

25.1.7. Los Números Cuánticos

En el modelo original de Böhr, se precisa un único parámetro (el número cuántico principal, n), que se relaciona con el radio de la órbita circular que el electrón realiza alrededor del núcleo, y también con la energía total del electrón. Los valores que puede tomar este número cuántico son los enteros positivos: 1, 2, 3... Sin embargo, pronto fue necesario modificar el modelo para adaptarlo a los nuevos datos experimentales, con lo que se introdujeron otros tres

números cuánticos para caracterizar al electrón:

1. número cuántico secundario o azimutal (l=0,1,2,.., n-1)
2. número cuántico magnético (m= $-l$,. . . ,0,. . . ,$+l$)
3. número cuántico de espín (s)

25.1.8. El espín del electrón y el principio de exclusión de Pauli

La idea de que el electrón tiene un movimiento de rotación fue propuesta en 1926 por G. Uhlenbeck y S. Goudsmit para explicar las características de los espectros de átomos con un solo electrón. La existencia del espín (rotación) del electrón está confirmada por muchos resultados experimentales, y se manifiesta de forma muy directa en el experimento de Stern-Gerlach, realizado en 1924. Para el electrón el spin es: $+1/2$ o $-1/2$.

El principio de exclusión de Pauli es un principio cuántico enunciado por Wolfgang Ernst Pauli en 1925. Establece que no puede haber dos fermiones con todos sus números cuánticos idénticos (esto es, en el mismo estado cuántico de partícula individual) en el mismo sistema cuántico ligado. Formulado inicialmente como principio, posteriormente se comprobó que era derivable de supuestos más generales: de hecho, es una consecuencia del teorema de la estadística del spin.

25.1.9. Principio de Indeterminación de Heisemberg

El sentido físico de la longitud de onda de una partícula es señalar la existencia de una cierta deslocalización o, lo que es igual, de una indeterminación en el movimiento que puede seguir la partícula. Significa que la partícula carece de una trayectoria absolutamente determinada y como

consecuencia se tiene una imposibilidad, al contrario de lo que suponía la mecánica clásica, de determinar de forma simultánea con precisión absoluta su posición y su velocidad. El formalismo matemático de la mecánica cuántica permite deducir los límites de dicha imprecisión, mediante las siguientes relaciones:

$$\Delta x \cdot \Delta(mvx) \geq \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta y \cdot \Delta(mvy) \geq \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta z \cdot \Delta(mvz) \geq \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Estas relaciones son expresión del **principio de incertidumbre**, planteado en 1927 por Heisemberg (1901-1976). Es uno de los principios fundamentales de la mecánica cuántica. Indica que existe un límite en la precisión con la que podemos medir simultáneamente la posición y la velocidad de un objeto, límite que viene dado por el valor de la constante de Planck, h, y por la masa, m, del objeto.

Sesión 26

Física Nuclear

Antoine - Henri Becquerel (1 852 - 1 982)

Físico francés, descubridor de la radiactividad. Nació el 15 de diciembre de 1852 en París, hijo de Alexandre Becquerel (que estudió la luz y la fosforescencia e inventó la fosforoscopia) y nieto de Antoine César Becquerel, uno de los fundadores de la electroquímica.

Estudió y se doctoró en Ciencias en la Escuela Politécnica de la capital francesa. Fue profesor del Museo de Historia Natural en 1892 y de la École Polytechnique en 1895.

En el año 1896 descubrió accidentalmente el fenómeno de la radiactividad durante su investigación sobre la fluorescencia. Las sales de uranio emitían una radiación capaz de atravesar papeles negros y otras sustancias opacas a la luz ordinaria. Estos rayos se denominaron en un principio rayos B en honor de su descubridor. Además realizó investigaciones sobre la fosforescencia, espectroscopia y la absorción de la luz.

Pierre y Marie Curie bautizaron este fenómeno con el nombre de radiactividad, tras el descubrimiento por parte del matrimonio Curie de nuevos elementos como el torio, el polonio y el radio, materiales que muestran un comportamiento análogo al del uranio. En 1903 compartió el Premio Nobel de Física con el matrimonio Curie.

Entre sus obras destacan Investigación sobre la fosforescencia (1882-1897) y Descubrimiento de la radiación invisible emitida por el uranio(1896-1897).

Henri Becquerel falleció en Le Croisic el 25 de agosto de 1908.

Introducción

Puede considerarse que la física nuclear comenzó hace aproximadamente un siglo, durante la "década milagrosa", entre 1895 y 1905, cuando se establecieron los fundamentos de prácticamente toda la física moderna.

Como resultado de los estudios realizados y las teorías propuestas, hoy en día poseemos un entendimiento bastante razonable de la estructura y propiedades de los núcleos; pero además, las técnicas matemáticas y las experimentales empleadas en física nuclear han tenido repercusiones importantes en muchas otras áreas de la física, entre las que podemos citar física atómica o física de la materia condensada, física de partículas, astrofísica, etc.

En las reacciones físicas ordinarias, los átomos de las moléculas reaccionantes se agrupan para formar las moléculas del producto. Los electrones exteriores de los átomos sufren un reajuste al ser transferidos todos, o parte de ellos, de unos

a otros. Los núcleos, sin embargo, cambian de posición relativa, pero no sufren modificación alguna.

Existen reacciones en las que los núcleos se escinden o rompen y en las que los productos de la reacción no contienen los mismos elementos que las sustancias reaccionantes. Estas reacciones nucleares constituyen el objeto de la física nuclear. Algunos fenómenos nucleares, como el de la radiactividad, consisten en desintegraciones espontáneas de núcleos individuales. Estas reacciones se verifican a una velocidad tal, que no son afectadas por las condiciones del laboratorio como la presión y la temperatura. La mayoría de las reacciones nucleares conocidas, sin embargo, se originan en la interacción de dos núcleos o en la acción de una partícula con un núcleo. Las reacciones de este último tipo son muy sensibles a las variaciones de energía y a la posición relativa de las partículas reaccionantes.

26.1. Primeros Descubrimientos en la Física Nuclear

- Becquerel descubre en 1896 la radiactividad en sales de uranio.
- Los esposos Curie (Marie y Pierre) en 1898 dos elementos radiactivos de mayor actividad: el radio y el polonio.
- En 1911, Rutherford expresa la idea de que los átomos poseen un núcleo.
- En 1913, Bohr publica su modelo de átomo, consistente en un núcleo central compuesto por partículas que concentran la mayoría de la masa del átomo (neutrones y protones), rodeado por varias capas de partículas cargadas casi sin masa (electrones).
- En 1932, Chadwick descubre el neutrón.

26.2. Constitución del Núcleo

El núcleo está constituido por nucleones (Protones y Neutrones)

$$\text{Núcleo} = \text{Protones} + \text{Neutrones}$$

carga del protón $+e$, el neutrón no tiene carga

$$A = Z + N$$

donde A: Número másico, Z: Número de protones; N Número de neutrones.

26.2.1. El Núclido (Nucleído)

Es una especie nuclear caracterizada por A y Z. un nucleído se expresa como:

- **Isótopos**:Son núcleos con igual numero de protones (Z) y distinto número de neutrones (N).
- **Isóbaros**: Son núcleos con igual numero másico (A) y distinto numero atómico (Z).
- **Isótonos**: Son núcleos con igual numero de neutrones (N) y distinto número atómico (Z).

26.2.2. Radio Nuclear

Las dimensiones del núcleo depende del número másico (A).

$$r = r_o A^{1/3} \tag{26.1}$$

Donde: r es el radio del núcleo, $r_0 = 1,2 \times 10^{-15} m$, A es el número másico

26.3. Energía de Enlace

Los núcleos están formados por protones y neutrones, pero la masa de un núcleo es siempre menor que la suma de las masas individuales de los protones y neutrones que lo constituyen. La diferencia es una medida de la energía de enlace nuclear que mantiene unido el núcleo. Esta energía de enlace se puede calcular a partir de la fórmula de Einstein:

$$\text{Enería de Enlace Nuclear} = \Delta m c^2 \tag{26.2}$$

donde.

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - M_{\text{núcleo}} \tag{26.3}$$

La energía de enlace nuclear es la energía que debemos suministrar al núcleo para que se divida en sus partículas constituyentes

$$B = \Delta m c^2 \qquad \Longrightarrow \qquad \Delta m = \frac{M}{c^2} \tag{26.4}$$

Donde podemos expresar la masa en MeV/c^2

$$1u = 931,5\frac{MeV}{c^2}$$

Nota. $m_p = 0,007276u$. $m_n = 0,008665u$. $m_e = 0,000549u$

26.4. Radiactividad

Es la capacidad que tienen algunas sustancias de emitir partículas y energía en forma de radiación cuando se desintegran sus núcleos inestables.

Cuando la radiación de una muestra se somete a campos eléctricos y magnéticos se comprueba que hay tres tipos de radiación: alfa, beta y gama.

26.4.1. Radiación Alfa o Decaimiento Alfa (α)

Es una variante de desintegración radiactiva por la cual un núcleo atómico emite una partícula alfa y se convierte en un núcleo con cuatro unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico.

La secuencia de este fenómeno de desintegración se representa mediante la ecuación:

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He^{2+} = ^{A-4}_{Z-2}Y + \alpha \tag{26.5}$$

26.4.2. Radiación o Decaimiento Beta (β)

Es un proceso mediante el cual un nucleído o núclido inestable emite una partícula beta (un electrón o positrón) para

compensar la relación de neutrones y protones del núcleo atómico.

a) **Desintegración** β^-

$$n \longrightarrow p^+ + e^- + \overline{\nu_e} \tag{26.6}$$

b) **Desintegración (β^+)**

$$p^+ \longrightarrow n + e^+ + \nu_e \tag{26.7}$$

26.4.3. Radiación o Decaimiento Gama (γ)

Es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto constituida por fotones, producida generalmente por elementos radiactivos o por procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. También se genera en fenómenos astrofísicos de gran violencia (Ver fig: 26.1).

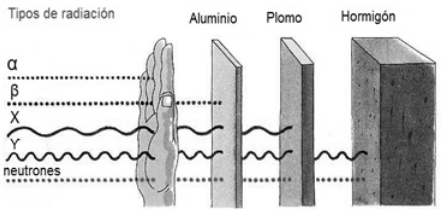


Figura 26.1:

26.5. Ley de Decaimiento

Esta ley nos permite calcular al número de átomos presentes en un tiempo t (N) a partir del número de átomos radiactivos inicialmente N_o

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \tag{26.8}$$

Donde:

- λ es la constante de desintegración
- t es el tiempo
- N_0 es el número inicial de átomos radiactivos
- N el número final de átomos radiactivos

26.5.1. Tiempo de Vida Media o Semivida

Representa el promedio de vida de un núcleo atómico de una muestra radiactiva.

El tiempo de vida media es inversamente proporcional a la constante de desintegración.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \tag{26.9}$$

26.5.2. Periodo de Semidesintegración

Es el tiempo que tiene que transcurrir para que una muestra radiactiva se reduzca a la mitad.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \tag{26.10}$$

26.6. Centrales Nucleares

Una central o planta nuclear es una instalación industrial empleada para la generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear. Se caracteriza por el empleo de combustible nuclear fisionable que mediante reacciones nucleares proporciona calor que a su vez es empleado, a través de un ciclo termodinámico convencional, para producir el movimiento de alternadores que transforman el trabajo mecánico en energía eléctrica.

26.7. Fuentes de radiación

Los núcleos pueden transformarse unos en otros, o pasar de un estado energético a otro, mediante la emisión de radiaciones. Se dice entonces que los núcleos son radiactivos;

el proceso que sufren se denomina decaimiento radiactivo o desintegración radiactiva.

26.8. Reactores Nucleares y Producción de Radioisótopos

Las Reacciones Nucleares son aquellas donde se altera la composición de los núcleos atómicos liberándose enormes cantidades de energía. Se pueden clasificar 4 tipos de reacciones nucleares en función del proceso por el que se llevan a cabo: fisión del núcleo, fusión de dos núcleos ligeros, radioactividad natural y desintegración nuclear por bombardeo.

Un radioisótopo es aquel isótopo que es radiactivo.

26.9. Usos en Medicima

Aquí algunos usos de Isótopos radiactivos:

- ^{60}Co Es un emisor de rayos gamma; estos rayos se usan para destruir células cancerígenas. El haz de rayos gamma se dirige al centro del tumor para que no dañe a tejidos sanos.
- ^{131}I Con él se puede obtener una imagen que muestra el tamaño, la forma y actividad de la glándula tiroides.
- ^{123}I Es una fuente intensa de rayos gamma que no emite partículas betas dañinas; muy eficaces para obtener imágenes de la glándula tiroides.
- ^{99}Tc Emisor de rayos gamma; se inyecta en el paciente y este isótopo se concentra en los huesos, de ahí que sea usado en radiodiagnóstico de huesos.

- ^{182}Ta Se utiliza en inyecciones, los médicos los usan para llegar hasta los tumores cancerosos como los que se producen en la vejiga.
- ^{153}Ga Se utiliza para diagnosticar osteoporosis.

26.10. Nociones de Protección Radiológica

La protección radiológica es la disciplina que estudia los efectos de las dosis producidas por las radiaciones ionizantes y los procedimientos para proteger a los seres vivos de sus efectos nocivos, siendo su objetivo principal los seres humanos. Las tres reglas fundamentales de protección contra toda fuente de radiación son:

- **Distancia**: Alejarse de la fuente de radiación, puesto que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia.
- **Blindaje**: Poner pantallas protectoras (blindaje biológico) entre la fuente radiactiva y las personas. Por ejemplo, en las industrias nucleares, pantallas múltiples protegen a los trabajadores. Las pantallas utilizadas habitualmente son muros de hormigón, láminas de plomo o acero y cristales especiales enriquecidos con plomo.
- **Tiempo**: Disminuir la duración de la exposición a las radiaciones.

Referencias Bibliográficas

Alonso, M. and Finn, E. (1976). Física volumen iii. *Fundamentos Cuánticos y Estadísticos*.

Alonso, M. and Finn, E. J. (1998). Física, vol. ii. *Edición Revisada y Aumentada, Mecánica, Fondo*.

Alonso, M. and Finn, E. J. (2000). Física, vol. i. *Fondo educativo interamericano*.

Feynman, R., Leighton, R., and Sands, M. (1987). Física volumen iii mecánica cuántica.

Kane, J. and Sternheim, M. (1991). Física (segunda edición). *Barcelona. Ed. Reverté*.

Sears, F. W., Zemansky, M. W., and y García, H. J. E. (2004). *Física universitaria. Vol. 2* . Pearson Educación.

SERWAY, R. A. (1993). Física, vol ii. edit.

Serway, R. A., Jewett, J. W., and González, S. R. C. (2015). *Física para ciencias e ingeniería. Vol. 1* . CENGAGE Learning.

Serway, R. A., Moses, C. J., and Moyer, C. A. (2010). *Física moderna*. Number 539.1 SER.

Tarasov, L. and Tarasova, A. (1972). Preguntas y problemas de física. Technical report.

Tipler, P. (1985). Física, vol. i. *I Reverté SA Barcelona*.

Tipler, P. A. and Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología*, volume 2. Reverté.

WILSON, J. D. and Buffa, A. J. (1996). Física (2ª edición). *Editorial Prentice-Hall. México*.

Young, H., Freedman, R., Sears, F., and Zemansky, M. (2009). Física universitaria, vol. 1. *Naucalpan de Juárez-Mexico: Pearson Educación de México, SA*.