FUENTES DE ENERGÍA,

RENOVABLES Y NO RENOVABLES

APLICACIONES

Juan Carlos Vega de Kuyper
Santiago Ramírez Morales



Alfaomega

marcombo
ediciones técnicas

FUENTES DE ENERGÍA,
RENOVABLES Y NO RENOVABLES.
APLICACIONES

JUAN CARLOS VEGA DE KUYPER
SANTIAGO RAMÍREZ MORALES

FUENTES DE ENERGÍA,
RENOVABLES Y NO RENOVABLES.
APLICACIONES

JUAN CARLOS VEGA DE KUYPER
SANTIAGO RAMÍREZ MORALES

Alfaomega

marcombo
ediciones técnicas

Fuentes de energía, renovables y no renovables
Juan Carlos Vega de Kuyper – Santiago Ramírez Morales

Derechos reservados © Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.
Primera edición: Alfaomega Grupo Editor, México, enero 2014

Primera edición: MARCOMBO, S.A. 2014

© 2014 MARCOMBO, S.A.
www.marcombo.com

Diseño de cubierta: Iris Biaggini

«Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra».

ISBN: 978-84-267-2157-0

D.L.: B-12627-2014
Impreso en
Printed in Spain

Roguemos a Dios que los dirigentes de las naciones tomen medidas para emplear todas las formas de energía, de manera eficiente y económica, para no agudizar las consecuencias del calentamiento global que afectará a nuestros descendientes, entre ellos nuestros nietos.

Los autores

LOS AUTORES

Juan Carlos Vega de Kuyper es Profesor Titular de la Facultad de Química de la Pontificia Universidad Católica de Chile, donde imparte actualmente los cursos de "Fuentes y Utilización de las Energías Renovables" y "Química Ambiental". Es autor de numerosos artículos científicos sobre síntesis y reactividad de compuestos orgánicos y patentes de invención para la concentración de minerales cupríferos, así como de los libros "Química Orgánica para Estudiantes de Ingeniería", "Manejo y Gestión de Residuos de la Industria Química y Afín" y "Química del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales". Puesto que la energía es un componente inmaterial del medio ambiente, ahora presentamos esta obra sobre el tema, escrita por él y el destacado profesor Santiago Ramírez.

Santiago Ramírez Morales, Ph.D., actualmente retirado, ha sido Profesor Auxiliar de la Pontificia Universidad Católica de Chile en el área de química orgánica y polímeros. Después de desempeñarse como investigador en el Instituto de Investigaciones Tecnológicas (INTEC-CHILE) fue Profesor Titular de la Universidad de La Frontera (UFRO) en el área de ingeniería química, impartiendo cursos de "Introducción a la Ingeniería", "Fisicoquímica y Termodinámica", "Fenómenos de Transporte", "Diseño y Evaluación de Proyectos", "Estudios de Impacto Ambiental", y "Desarrollo Emprendedor". Fue Director del Departamento de Ingeniería Química, Decano de la Facultad de Ingeniería y Vicerrector Académico de la UFRO y uno de los fundadores del Instituto de Agroindustrias y del Instituto del Medio Ambiente de dicha universidad. En su trayectoria ha publicado en las áreas de Química Orgánica, Química de Polímeros y Tratamiento de Aguas Servidas.

PREFACIO

Este libro constituye un gran aporte a la bibliografía de las materias referidas al tema de las fuentes de energía, en carreras de ingeniería u otras. Se estudian en la obra las fuentes de energía renovable, con la esperanza de que sean las energías de un futuro inmediato y las no renovables, cuyo empleo en el mundo de hoy es tan grande que se hace imposible no considerarlas en un tratamiento integral del tema.

El gran desafío que supone el cambio climático, requiere la reducción urgente de las emisiones de gases de efecto invernadero producidos al utilizar combustibles fósiles para electricidad, transporte e industria. Por otra parte, la demanda mundial de energía está creciendo a un ritmo acelerado. En consecuencia, debe comenzar, a nivel mundial, un cambio profundo en los patrones de producción y consumo de la energía.

El interés de la sociedad actual por los asuntos ambientales, tales como los recursos naturales y las fuentes de energía, es cada vez más creciente, hecho que se manifiesta en las redes sociales; en éstas algunos grupos hablan, discuten y critican acontecimientos ambientales o energéticos sin base consistente y, a veces, en forma dogmática. Tanto la generación como la aplicación de las energías renovables y no renovables y sus consecuencias ambientales, así como el desarrollo sustentable de las fuentes de energía son temas complejos que no tienen respuestas simples. Raramente los hechos naturales son tan simples como aparecen. Al intentar darles respuesta se debe tener un entendimiento claro de cómo funciona el mundo material, de la interrelación entre medio ambiente y energía, de generar eficientemente energía para aprovecharla al máximo dentro del marco del desarrollo sustentable. Entonces, es evidente que el futuro ingeniero y estudiantes vinculados con las energías deben adquirir el mejor conocimiento y comprensión sobre las fuentes renovables y no renovables de energía y sus aplicaciones. Esta obra pretende realizar un aporte a que ello sea posible.

Para lograr este objetivo superior, la obra se enfoca en el origen de la fuente, generación y empleos actuales y potenciales de las energías no solo renovables sino también de las no renovables, entre ellas la energía térmica,

la que más se utiliza en el presente. Tanto unas como otras, son energías primarias que dan origen a la secundaria, energía eléctrica, que se incluye en esta obra por su gran importancia. La expresión común, energía renovable, debe entenderse como que es su fuente la renovable pero no la propia energía puesto que ésta se degrada en un proceso irreversible. Con la base de las energías no renovables y de la energía eléctrica se entrega, a continuación, los fundamentos teóricos y prácticos sobre las fuentes de las energías renovables: solar, biomasa, eólica, hidráulica, marina, geotérmica, sus aplicaciones, principalmente generación de electricidad, impactos ambientales, situación actual y potencial de estas energías en México, Colombia, Argentina y Chile, ejercicios y preguntas. Esta obra permitirá al estudiante tener las bases para diseñar, gestionar, implementar y controlar actividades de instalaciones de energías de fuentes renovables.

La obra, escrita con un estilo conciso y directo, se divide en cinco partes: la Parte I: "Introducción", concierne a los conceptos básicos de energía que se revisan en el capítulo 1, se continúa con una descripción de los recursos naturales con énfasis en los recursos energéticos, capítulo 2, luego se hace otra revisión sobre la energía eléctrica, en el capítulo 3, para tener presente el tema de las máquinas eléctricas, y, a continuación, una exposición sobre le energía electroquímica para conocer cómo se almacena la electricidad en bajos montos. La Parte II: "Fuentes no Renovables de Energía. Aplicaciones", contiene el capítulo 5 de Energía Térmica cuyo principal contenido son los fundamentos, funcionamiento y eficiencia de las máquinas térmicas y de las centrales termoeléctricas. El capítulo 6 de Energía Nuclear presenta principalmente los conceptos de la fisión nuclear y su aplicación en las centrales nucleoeléctricas y su impacto ambiental. Luego de esta entrada, comienza una extensa Parte III: "Fuentes Renovables de Energía. Aplicaciones", en que se tratan sucesivamente el capítulo 7 sobre La Tierra y la biósfera, los capítulos 8 a 11 tratan de Energía solar, Energía de la biomasa, La atmósfera y la energía eólica, La hidrósfera y la energía hidráulica. En este conjunto de energías de fuentes renovables se consideran los fundamentos y tecnologías de la generación y de aprovechamiento de ellas, los impactos ambientales asociados y ejemplos de diseño de instalaciones domésticas e industriales de

estas energías, como así también la situación actual y potencial de cada una de estas de energías en México, Colombia, Argentina y Chile. Sigue a estos temas la Parte IV: "Otras Fuentes Renovables de Energía. Aplicaciones", con el capítulo 12 de Energía del mar, que tiene bajo desarrollo por la limitada aplicación práctica de la energía de olas y mareas. Por su cuenta el capítulo 13 de energía geotérmica, explica el origen, distribución y tipos de recursos geotérmicos, los usos de la energía geotérmica para producir electricidad, climatización de viviendas y obtención de agua caliente sanitaria, el impacto ambiental de la explotación del recurso geotérmico y la situación de esta energía en México, Colombia, Argentina y Chile. Finalmente, la Parte V: "Eficiencia y sustentabilidad energética" trata en su único capítulo 14 estas materias, específicamente sobre la motivación y mejoras en la eficiencia energética, un resumen de esta eficiencia en la generación de energía eléctrica y una descripción de cómo mejorar dicha eficiencia en el transporte, vivienda, artefactos domésticos, iluminación de interiores y exteriores y el desarrollo sustentable de la energía.

Distinguidos profesores contribuyeron a mejorar el manuscrito original. Nuestro reconocimiento al Profesor Dr. **Deodato Radic Foschino**, Facultad de Química, Pontificia Universidad Católica de Chile, por sus conversaciones enriquecedoras que nos dieron ideas para mejorar el tema sobre Energía Térmica. Nuestro agradecimiento al Profesor Dr. **Juan Dixon Rojas**, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, por su dedicación en la revisión y corrección de aspectos del tema sobre Energía Eléctrica. En cualquier caso los posibles errores son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Los autores

SUMARIO

PARTE I. INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ENERGÍA 3

1.1 Concepto y definición de energía 3
1.2 Formas de la energía 3
1.3 Calidad de la energía 7
1.4 Unidades de medida de la energía 8
1.5 Leyes de conservación y disipación de la energía 9
1.6 Eficiencia de la energía, trabajo y potencia 12
1.7 Principios de la termodinámica 13
1.7.1 Primer principio de la termodinámica 15
1.7.2 Segundo principio de la termodinámica 18

CAPÍTULO 2. RECURSOS NATURALES 21

2.1 Tipos de recursos naturales 21
2.2 El Sol como fuente primaria 22
2.3 Recursos energéticos 23
2.3.1 Petróleo 24
2.3.2 Carbón 27
2.3.3 Gas natural 29
2.4 Reservas y consumo de combustibles fósiles de algunos países latinoamericanos 30
2.5 Impactos ambientales de los hidrocarburos fósiles 31

CAPÍTULO 3. ENERGÍA ELÉCTRICA 37

3.1 Elementos de electrostática 37
3.2 Corriente eléctrica 39

3.3 Magnetismo y electromagnetismo 47
3.3.1 Campo magnético 48
3.3.2 Fuerza electromotriz inducida 55
3.4 Máquinas eléctricas 57
3.4.1 Generador eléctrico 60
3.4.2 Motor eléctrico 64
3.4.3 Transformadores 69
3.5 Transmisión y distribución de la energía eléctrica 71
3.6 Situación de la energía eléctrica en algunos países latinoamericanos 75
3.6.1 México 76
3.6.2 Colombia 77
3.6.3 Argentina 79
3.6.4 Chile 81
Ejercicios y preguntas 83

CAPÍTULO 4. ENERGÍA ELECTROQUÍMICA 85
4.1 Reacciones de oxidación y reducción 85
4.2 Celdas electroquímicas 87
4.3 Potencial estándar de electrodos 90
4.3.1 Potencial estándar del electrodo de hidrógeno 91
4.3.2 Potencial estándar de otros electrodos 92
4.4 Potenciales de electrodos en condiciones no estándar 96
4.5 Pilas, baterías y celda de combustión 99
4.5.1 Baterías o pilas primarias 99
4.5.2 Baterías secundarias 101
4.5.3 Celda de combustible 106
4.6 Usos y características de las pilas y baterías 108
4.7 Impacto ambiental de las pilas y baterías usadas 110
Ejercicios y preguntas 111

2ª PARTE. FUENTES DE ENERGÍAS NO RENOVABLES. APLICACIONES 113

CAPÍTULO 5. ENERGÍA TÉRMICA 115
5.1 Calor latente y calor específico 115
5.1.1 Calor latente 115
5.1.2 Calor específico 117
5.2 Transferencia de calor 118
5.2.1 Conducción del calor 119
5.2.2 Convección del calor 120
5.2.3 Radiación del calor 121
5.2.4 Transferencia general de calor 122
5.3 Termoquímica 122
5.4 Máquinas térmicas 127
5.4.1 Fundamento de las máquinas térmicas 127
5.4.2 Eficiencia energética de la máquina de vapor 132
5.4.3 Eficiencia energética de los motores Otto y Diesel 136
5.4.4 Eficiencia energética de refrigeradores, acondicionadores de aire y bombas de calor 138
5.5 Centrales termoeléctricas 141
5.5.1 Centrales termoeléctricas de un ciclo 142
5.5.1.1 Caldera de vapor 142
5.5.1.2 Turbina de vapor 145
5.5.1.3 Condensador 146
5.5.2 Centrales de ciclo combinado 148
5.6 Impacto ambiental de las centrales termoeléctricas y tecnologías de abatimiento de emisiones 149
Ejercicios y preguntas 152

CAPÍTULO 6. ENERGÍA NUCLEAR 155
6.1 Estructura del átomo 155
6.2 Isótopos 157

6.3 Radiactividad 158
6.4 Fisión nuclear 161
6.5 Reactores nucleares 163
6.5.1 Reactor de agua a presión 163
6.5.2 Otros reactores de fisión nucleaR 166
6.6 Enriquecimient0 del uranio-235 167
6.7 Manejo de los productos de desintegración del uranio-235 168
6.8 Fusión nuclear 172
6.9 Impacto ambiental de las centrales de fisión nuclear 174
6.9.1 Accidentes nucleares más significativos 175
6.9.2 Ventajas del combustible nuclear sobre los combustibles fósiles 177
6.10 Situación de la energía nuclear en algunos países latinoamericanos 178
6.10.1 México 178
6.10.2 Argentina 179
Ejercicios y preguntas 180

3ª PARTE. FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES. APLICACIONES 181

CAPÍTULO 7. LA TIERRA Y LA BIÓSFERA 183
7.1 Origen, dimensiones y movimientos de la Tierra 183
7.2 Líneas divisorias de la Tierra y posicionamiento geográfico 185
7.3 Componentes de la Tierra 188
7.4 Características de los ecosistemas 189
7.5 Factores bióticos y abióticos de los ecosistemas 190
7.5.1 Factores bióticos 190
7.5.2 Factores abióticos 191
7.6 Flujo de energía en los ecosistemas 192
7.7 Estructura trófica de los ecosistemas 192
7.8 Impacto ambiental por empleo de energía 195
7.8.1 Impacto en la atmósfera 195

7.8.2 Impacto en la hidrósfera 197
7.8.3 Impacto en el suelo 197
7.8.4 Impacto sobre la biósfera 198
7.9 Consumo de energía en la sociedad actual 199
7.10 Huella ecológica 201
Ejercicios y preguntas 203

CAPÍTULO 8. ENERGÍA SOLAR 205
8.1 El Sol: principal fuente de energía de la Tierra 205
8.2 Características de la radiación solar 206
8.3 Flujo y balance de energía en la Tierra 211
8.4 Energía solar como regulador del clima y la biota 217
8.5 Radiación solar en algunos países latinoamericanos 223
8.5.1 México 224
8.5.2 Colombia 227
8.5.3 Argentina 228
8.5.4 Chile 229
8.6 Estimación y medición de la radiación solar 230
8.7 Captación de la energía solar térmica 238
8.8 Utilización de la energía solar térmica 240
8.8.1 Fundamento de la utilización de la energía solar térmica en colectores solares planos 241
8.8.2 Tecnologías de la energía solar térmica para calentar agua y para calefacción 243
8.8.3 Diseño de un sistema solar térmico con colectores planos para obtener agua caliente sanitaria 249
8.8.3.1 Características de la vivienda y cálculo de su consumo energético 249
8.8.3.2 Dimensionamiento de la instalación 253
8.8.3.3 Componentes y características del sistema solar térmico 258
8.8.3.4 Viabilidad económica del proyecto 264

8.8.3.5 Beneficio ambiental del sistema solar térmico 267
8.8.4 Tecnologías para la conversión de energía solar térmica en energía eléctrica..... 267
8.8.4.1 Concentradores Cilindros Parabólicos (CCP) 268
8.8.4.2 Concentradores discos parabólicos 270
8.8.4.3 Concentradores de torre central con campo de helióstatos 271
8.8.4.4 Almacenamiento de calor mediante sales fundidas . 273
8.9 Energía solar fotovoltaica..... 276
8.9.1 Fundamento de la energía solar fotovoltaica..... 276
8.9.2 Tecnologías para la utilización de la energía solar fotovoltaica 281
8.9.3 Diseño de una planta de energía solar fotovoltaica aislada.... 286
8.9.3.1 Definición del tipo de planta..... 286
8.9.3.2 Determinación del consumo 289
8.9.3.3 Caracterización de la localización..... 290
8.9.3.4 Caracterización y dimensionado de los componentes 292
8.10 Impactos ambientales de la energía solar térmica y solar fotovoltaica 301
8.11 Aprovechamiento de la energía solar en algunos países latinoamericanos 302
8.11.1 México 303
8.11.2 Colombia..... 303
8.11.3 Argentina 304
8.11.4 Chile..... 305
Ejercicios y preguntas..... 306

CAPÍTULO 9. ENERGÍA DE LA BIOMASA..... 309
9.1 Ciclo biológico del carbono 309
9.2 Producción y productividad de biomasa..... 312
9.3 Clasificación de la biomasa 314
9.4 Características de la biomasa aprovechable 316

9.5 Composición y combustión de la madera 318
9.6 Características de los biocombustibles líquidos 322
9.6.1 Biometanol 323
9.6.2 Bioetanol 324
9.6.3 Biobutanol 324
9.6.4 Biodiesel 325
9.7 Características de los biocombustibles gaseosos 326
9.7.1 Biogás 326
9.7.2 Biohidrógeno 326
9.8 Tecnologías para el aprovechamiento de los biocombustibles 327
9.8.1 Combustión directa 329
9.8.1.1 Combustión en hornos para secado 329
9.8.1.2 Combustión en calderas para generar electricidad ... 330
9.8.1.3 Combustión mixta 331
9.8.1.4 Combustión de residuos forestales para centrales termoeléctricas 331
9.8.2 Procesos termoquímicos 333
9.8.2.1 Pirólisis 334
9.8.2.2 Gasificación 334
9.8.2.2.1 Biometanol vía gas de síntesis 340
9.8.2.2.2 Biohidrógeno vía gas de síntesis 340
9.8.2.2.3 Biodiesel vía gas de síntesis 341
9.8.3 Diseño de planta piloto para generar electricidad vía gas de síntesis 341
9.8.3.1 Descripción del sistema 342
9.8.3.2 Cálculo del gasificador de flujo descendente 345
9.8.3.3 Dimensionamiento de los equipos principales 351
9.8.3.4 Balances de materia y energía 353
9.8.4 Procesos bioquímicos 357
9.8.4.1 Bioetanol 358
9.8.4.2 Biobutanol 362
9.8.4.3 Biodiesel 363
9.8.4.4 Biogás 365

9.9 Producción y aprovechamiento de biocombustibles en algunos países latinoamericanos 370
9.9.1 México 370
9.9.2 Colombia 371
9.9.3 Argentina 372
9.9.4 Chile 374
9.10 Impacto ambiental de los biocombustibles 375
Ejercicios y preguntas 376

CAPÍTULO 10. LA ATMÓSFERA Y LA ENERGÍA EÓLICA 379
10.1 Atmósfera: estructura, composición y propiedades 379
10.1.1 Estructura 380
10.1.2 Composición 381
10.1.3 Propiedades 383
10.2 Clima y tiempo atmosférico 385
10.2.1 Factores que determinan el clima y el tiempo atmosférico 385
10.2.2 Contaminación del aire 388
10.3 Cambio climático 391
10.3.1 Gases de efecto invernadero 393
10.3.2 Cambio climático producido por los GEI 399
10.3.3 Impactos globales producidos por el cambio climático 400
10.3.4 Energía y cambio climático 401
10.4 Clasificación y distribución de los climas en algunos países latinoamericanos 403
10.4.1 México 403
10.4.2 Colombia 404
10.4.3 Argentina 406
10.4.4 Chile 408
10.5 Antecedentes históricos del uso del viento 409
10.6 Circulación general de la atmósfera 412
10.7 Dirección y velocidad del viento 418
10.8 Tipos de vientos inmediatos a la superficie 422

10.8.1 Vientos o brisas costeras 423
10.8.2 Vientos de montaña 424
10.8.3 Vientos originados por una barrera orográfica 425
10.8.4 Vientos en valles encajonados 425
10.9 Principios de la conversión de energía eólica en eléctrica 426
10.10 Características técnicas de los aerogeneradores 430
10.10.1 Aerogeneradores de eje horizontal 431
10.10.2 Aerogeneradores de eje vertical 438
10.10.3 Aerogeneradores de tracción directa 439
10.11 Parques eólicos 439
10.12 Impactos ambientales de los parques eólicos 441
10.13 Potencial y estado actual de la energía eólica en países latinoamericanos 445
10.13.1 México 445
10.13.2 Colombia 446
10.13.3 Argentina 447
10.13.4 Chile 449
Ejercicios y preguntas 451

CAPÍTULO 11. LA HIDRÓSFERA Y LA ENERGÍA HIDRÁULICA 453
11.1 La hidrósfera 453
11.1.1 Propiedades del agua y su importancia en la naturaleza 454
11.1.1.1 Estructura del agua 454
11.1.1.2 Propiedades físicas del agua 457
11.1.2 Ciclo hidrológico y precipitaciones 463
11.1.2.1 Ciclo hidrológico externo e interno 463
11.1.2.2 Fases del ciclo hidrológico 464
11.1.2.3 Alteraciones del ciclo hidrológico 466
11.1.2.4 Precipitaciones 467
11.1.2.5 Balance hídrico 468
11.1.3 Distribución y calidad del agua en la hidrósfera 470
11.2 Cuencas hidrográficas 471

11.2.1 Aguas superficiales 472
11.2.1.1 Ríos 472
11.2.1.2 Lagos 474
11.2.1.3 Glaciares 477
11.2.2 Aguas subterráneas 478
11.3 Gestión integrada del recurso hídrico. Huella hídrica 481
11.3.1 Gestión integrada del agua 481
11.3.2 Huella hídrica 485
11.4 Aprovechamiento del agua para generación de energía eléctrica 491
11.4.1 Principios de la conversión de energía hidráulica en eléctrica 492
11.4.2 Centrales hidroeléctricas 493
11.4.2.1 Centrales hidroeléctricas de embalse 493
11.4.2.2 Impactos ambientales de las centrales hidroeléctricas de embalse 498
11.4.2.3 Centrales hidroeléctricas de pasada 499
11.4.2.4 Bases para el diseño de una central minihidroeléctrica 504
11.5 Potencial y estado actual de la energía hidroeléctrica en algunos países latinoamericanos 507
11.5.1 México 507
11.5.2 Colombia 508
11.5.3 Argentina 510
11.5.4 Chile 511
Ejercicios y preguntas 512

4ª PARTE. OTRAS FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES. APLICACIONES 515

CAPÍTULO 12. ENERGÍA DEL MAR 517
12.1 Distribución geográfica y características de las aguas oceánicas 517
12.2 Movimientos de las aguas marinas 519
12.3 Energía térmica oceánica 526

12.4 Energía de las mareas 527
12.4.1 Tipos y características de las mareas 528
12.4.2 Aprovechamiento de la energía de las mareas para producir electricidad 530
12.5 Energía de las olas 537
12.5.1 Tipos y características de las olas 537
12.5.2 Aprovechamiento de la energía de las olas para producir electricidad 539
12.5.2.1 Convertidores instalados en la costa 541
12.5.2.2 Convertidores instalados en el mar 543
12.6 Potencial de la energía del mar en algunos países latinoamericanos 547
12.6.1 México 548
12.6.2 Colombia 548
12.6.3 Argentina 549
12.6.4 Chile 549
Ejercicios y preguntas 550

CAPÍTULO 13. ENERGÍA GEOTÉRMICA 551
13.1 Estructura interna de la Tierra 551
13.2 Origen y distribución de los recursos geotérmicos 556
13.3 Estructura de los recursos geotérmicos 558
13.4 Tipos de recursos geotérmicos según su naturaleza y aplicación 559
13.4.1 Recursos de alta temperatura 561
13.4.2 Recursos de temperatura media 562
13.4.3 Recursos de baja temperatura 562
13.5 Usos de la energía geotérmica 563
13.6 Exploración de reservorios geotérmicos para ejecutar un proyecto eléctrico 564
13.6.1 Estudios previos a la perforación exploratoria 564
13.6.2 Perforaciones de pozos exploratorios 566
13.7 Generación de electricidad mediante energía geotérmica 567
13.8 Tipos de centrales geotermoeléctricas 569

13.8.1 Centrales de *flash* simple 569
13.8.2 Centrales de *flash* doble 571
13.8.3 Centrales de ciclo binario 572
13.8.4 Centrales de rocas calientes secas 572
13.9 Uso directo del calor interno de la Tierra 573
13.9.1 Funcionamiento y eficiencia de la bomba de calor geotérmica 574
13.9.2 Tecnología del sistema bomba de calor geotérmica 578
13.9.2.1 Características de los captadores 579
13.9.2.2. Variables del intercambio de calor en los captadores. Material de fabricación 582
13.10 Diseño de un sistema de climatización geotérmico de una casa 584
13.10.1 Características de la casa 584
13.10.2 Determinación de cargas térmicas para climatización 585
13.10.2.1 Cálculo de la transmitancia térmica de los cerramientos 587
13.10.2.2 Cálculo de la transmitancia térmica de fachadas 589
13.10.3 Determinación de cargas térmicas de refrigeración 591
13.10.3.1 Cálculo de la carga térmica externa de refrigeración 592
13.10.3.2 Cálculo de la carga térmica interna de refrigeración 594
13.10.4 Determinación de cargas térmicas de calefacción 595
13.10.5 Resultados del cálculo de climatización 598
13.10.6 Elección de la bomba de calor geotérmica y del sistema interior de refrigeración y calefacción 601
13.11 Diseño de un sistema geotérmico de agua caliente sanitaria 601
13.11.1 Cálculo para instalar un sistema geotérmico de agua caliente sanitaria 602
13.11.2 Diseño del intercambiador de calor enterrado de la bomba de calor geotérmica 603
13.12 Impacto ambiental de la explotación de la energía geotérmica 605

13.13 Situación de la energía geotérmica en algunos países latinoamericanos 608
13.13.1 México 608
13.13.2 Colombia 610
13.13.3 Argentina 611
13.13.4 Chile 612
Ejercicios y preguntas 615

CAPÍTULO 14. EMPLEO EFICIENTE Y SUSTENTABLE DE LA ENERGÍA . 619
14.1 Motivación para la eficiencia energética 619
14.2 Mejoras en la eficiencia energética de la industria 621
14.3 Eficiencia en la generación y distribución de la energía eléctrica 623
14.4 Eficiencia energética en el transporte 625
14.5 Eficiencia energética en la vivienda 626
14.6 Eficiencia energética en los artefactos domésticos 628
14.7 Eficiencia energética en la iluminación de interiores y exteriores 629
14.8 Origen del concepto de desarrollo sustentable 631
14.9 Desarrollo sustentable de la energía 633

1ª PARTE

INTRODUCCIÓN

El tema de esta obra concierne a las fuentes de energía renovables y no renovables, cuyas aplicaciones la humanidad utiliza para sus múltiples necesidades: calor, vivienda, alimentos, transporte, comunicación, salud, educación, entretención y otras.

La energía, en este mundo en desarrollo, es la base que sustenta e integra a todas las formas de vida que existen en el planeta Tierra y produce el bienestar de su población. Por esta razón resulta muy importante conocer previamente los recursos naturales, qué son las fuentes renovables y no renovables de la energía y comprender las leyes que gobiernan su uso. Estos temas son el objetivo de los capítulos 1 y 2. El capítulo 3 trata sobre la energía eléctrica: energía secundaria porque su fuente son las energías primarias, tanto no renovables como el petróleo, y renovables como el sol y el viento, motivo por el cual sus principios y aplicaciones se revisan en esta primera parte. Como la energía electroquímica es una manera de almacenar energía eléctrica en pequeños montos, también se trata a continuación en el capítulo 4.

01 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ENERGÍA

1.1 CONCEPTO Y DEFINICIÓN DE ENERGÍA

La energía es algo inmaterial y fundamental del universo. En la Tierra ilumina las ciudades, moviliza los automóviles, camiones, buses, trenes, buques y aviones para el transporte de las personas y bienes; climatiza las viviendas, proporciona calor para cocinar y agua caliente en los hogares; permite emplear los aparatos electrónicos de visión, audición y entretención; acciona máquinas en la industria y tractores en la agricultura. El sol irradia luz y calor y hace crecer las plantas. Todo lo que ocurre está vinculado, de una u otra manera, con la energía. Cabe entonces preguntarse: ¿qué sucedería si en algún momento se interrumpe la entrega de la energía durante 24 h en una ciudad?

Está claro que este ente, desprovisto de materia, es vital para la existencia de nuestra civilización. La palabra energía proviene del griego *energeia*, que significa actividad o fuerza. La energía se define como "la capacidad de efectuar un trabajo". Las tareas de este trabajo pueden ser mecánicas, físicas, químicas o eléctricas. Por su cuenta, **el trabajo** es el "producto de una fuerza por la distancia", lo que implica que esta última definición se está empleando en un sentido físico. Cuando la gasolina se quema en un motor se realiza el trabajo de impulsar un pistón y, a su vez, este combustible proporciona la energía. En general, el trabajo significa acciones que producen movimiento, calentamiento, iluminación y otras, todas ellas diferentes formas de trabajo.

1.2 FORMAS DE LA ENERGÍA

La energía se dispone de diferentes formas. En la mecánica se puede manifestar de dos maneras: energía cinética y energía potencial. La **energía**

cinética es una energía presente asociada con el movimiento y la segunda es una energía en potencia asociada con la posición o con la forma. Un cuerpo en movimiento posee energía cinética (E_c) que depende de su masa (m) y de su velocidad (v):

$$\mathbf{E_c = ½ \cdot m \cdot v^2} \qquad [1.1]$$

La **energía potencial** es la energía que adquiere un cuerpo cuando se lleva a una determinada posición en contra de una fuerza. Normalmente, esta fuerza es la atracción de la gravedad. Para elevar un cuerpo se debe realizar un trabajo; este trabajo se almacena en el cuerpo en forma de energía potencial. Si después de elevarlo se deja caer, el cuerpo adquirirá energía cinética y llegará al suelo con la capacidad de efectuar un trabajo: por ejemplo, desplazar una piedra que estaba en su camino. De acuerdo con esta definición, la energía tiene las mismas dimensiones que el trabajo y se medirá en las mismas unidades que éste.

En Física se estudia que la fuerza (F) es "toda causa capaz de modificar el estado de reposo o de movimiento de un cuerpo" y es el producto de la masa (m) por la aceleración (a), donde F y a son magnitudes vectoriales porque tienen dirección y sentido. Los vectores se representarán de aquí en adelante mediante letra cursiva.

$$\boldsymbol{F = m \cdot a} \qquad [1.2]$$

La expresión [1.2] corresponde a la segunda ley de Newton. La energía potencial (E_p) es "el trabajo (W) realizado por una fuerza (F) mediante el cual se eleva un cuerpo de masa (m) desde el suelo a una altura (h), venciendo la gravedad (g), que es aceleración". Puesto que la fuerza aplicada tiene la misma intensidad que el peso del cuerpo ($F = m \cdot g$), entonces es directamente proporcional a la fuerza, masa y gravedad:

$$\boldsymbol{E_p = W = F \cdot h = m \cdot g \cdot h} \qquad [1.3]$$

Aparte de las dos formas mecánicas de la energía existen los siguientes tipos de energía:

– Energía térmica

- Energía química
- Energía bioquímica
- Energía metabólica
- Energía eléctrica
- Energía eólica
- Energía geotérmica
- Energía radiante
- Energía del mar
- Energía acústica
- Energía electromagnética
- Energía nuclear

La **energía térmica** es la "energía asociada al movimiento de los átomos y moléculas". Se puede evaluar mediante medición de la temperatura. Cuanto más intenso es el movimiento de átomos o moléculas, más caliente estará la materia y mayor será su energía térmica. Sin embargo, es preciso distinguir correctamente la diferencia entre energía térmica y temperatura. Un matraz pequeño de 250 ml y un tambor de 200 l llenos con agua a 25°C tienen la misma temperatura, pero el tambor tiene mucha más energía térmica que el matraz; hay más masa de agua y mayor movimiento molecular en el tambor. La temperatura es, entonces, una medida de la velocidad media del movimiento de átomos y moléculas de la materia en un momento dado. Es importante tener en cuenta la diferencia entre energía térmica y calor. "**Calor** es la transferencia de energía térmica entre dos cuerpos que están a diferente temperatura". A pesar que esta definición de calor implica transferencia de energía, el término "calor" se emplea para describir los cambios energéticos que ocurren durante un proceso.

La **energía química** es la energía que se almacena en el interior de las unidades estructurales (átomos, moléculas, iones) de la materia. Cuando esta materia reacciona, la energía química se libera, se almacena o se convierte en otra forma de energía. Por ejemplo, se libera energía química, en forma de calor, al quemar el carbón. La energía química se puede considerar como una forma de energía potencial porque está relacionada con la posición relativa de los átomos en una molécula.

La **energía bioquímica** es energía química que está presente en el desarrollo de los seres vivos.

La **energía metabólica** se genera por los organismos vivos gracias a procesos químicos de oxidación como consecuencia de los alimentos que ingieren. Es un tipo de energía bioquímica.

La **energía eléctrica** es el movimiento de electrones que constituye la corriente eléctrica, partículas que se mueven en un conductor por la fuerza ejercida sobre ellas por un campo eléctrico.

La **energía radiante** o **solar** viene del Sol y es la principal fuente de energía del planeta Tierra. Es la energía de la luz (ver energía electromagnética). Según Einstein, la luz es una corriente de partículas que hoy se conoce como **fotones**. Esta energía calienta la atmósfera, la superficie de continentes y mares, estimula el crecimiento de las plantas (fotosíntesis) y condiciona el clima, entre otras acciones.

La **energía del mar** es la energía que tienen las olas, mareas, corrientes y gradientes de temperatura del agua.

La **energía eólica** es la energía del viento que se debe al movimiento del aire ocasionado por el desigual calentamiento de la superficie terrestre.

La **energía geotérmica** es el calor contenido en los materiales que componen el núcleo y el manto de la Tierra que se transmite paulatinamente a la corteza, generando un flujo ascendente de calor.

La **energía acústica** se manifiesta en los fenómenos sonoros.

La **energía electromagnética** se refiere a la energía que se mueve a la velocidad de la luz en un patrón de ondas armónicas. Se genera por campos electrostáticos, por campos magnéticos o por corrientes eléctricas. Las ondas de radio, de televisión y las de hornos de microondas son ejemplos de energía electromagnética que difieren en su longitud de onda.

La **energía nuclear** es la energía que une a los nucleones (neutrones y protones) en el núcleo de un átomo. Posee tres modalidades:

- Energía de fisión nuclear: se libera cuando un núcleo muy pesado se divide.
- Energía de fusión nuclear: se libera cuando dos núcleos muy ligeros se unen.

– Energía de decaimiento radiactivo: se libera cuando un núcleo atómico inestable emite partículas (alfa, beta o gamma) para convertirse en un núcleo atómico más estable.

1.3 CALIDAD DE LA ENERGÍA

La calidad de la energía es una medida de su utilidad o de su capacidad para ejecutar un trabajo. La **energía de alta calidad** está organizada, concentrada, ordenada para lograr un trabajo útil. Ejemplos de sustancias que poseen energía de alta calidad son los combustibles fósiles: petróleo, carbón, gas natural.

La **energía de baja calidad** está desorganizada, dispersa, desordenada. Ejemplos de sustancias que poseen baja calidad es el agua de mar porque sus moléculas en movimiento tienen el calor dispersado en una gran masa de agua. La atmósfera posee también una gran masa de aire cuyo calor está disperso, por lo que la energía térmica del aire es de baja calidad. En ambos casos es imposible calentar objetos a altas temperaturas. La Tabla 1.1 presenta la calidad de diferentes formas de energía.

TABLA 1.1. CALIDAD Y FORMAS DE LA ENERGÍA

Calidad de la energía	Formas de la energía
Muy alta	– Electricidad: arco eléctrico a 2500 °C – Fisión nuclear de uranio 235 – Luz solar muy concentrada
Alta	– Calor de alta temperatura (1000-2500 °C) – Hidrógeno – Gas natural (metano) – Gasolina – Carbón – Alimentos
Mediana	– Luz solar normal – Viento con velocidad moderada – Flujo hidráulico de alta velocidad – Energía geotérmica concentrada (>100 °C) – Madera
Baja	– Energía geotérmica dispersa (< 100 °C)

1.4 UNIDADES DE MEDIDA DE LA ENERGÍA

En el Sistema Internacional (SI) de medidas se utilizan las siguientes definiciones energéticas:

Newton (N) es "la fuerza que, ejercida sobre un cuerpo de masa de 1 Kg, le comunica una aceleración de 1 m/s^2".

Julio (J) es la unidad de energía y trabajo que se define como "el trabajo que realiza una fuerza de 1 N sobre un cuerpo que se desplaza 1 m en la dirección y sentido de la fuerza".

Vatio (W) es la unidad de potencia que, como se ha visto, es "la energía desarrollada por unidad de tiempo", en este caso el segundo (s).

$$\mathbf{1\ W = 1\ J\ /s}$$

Según esta ecuación, la potencia es "la energía multiplicada por el tiempo en el que se produce la energía". Si esta energía es la eléctrica el consumo de ella se mide en kilovatio·hora (KW·h)

$$\mathbf{1\ KW{\cdot}h = (1000\ J/s) \cdot (3600\ s/h) = 3\,600\,000\ J}$$

Electronvoltio (eV) es "la energía que adquiere un electrón al pasar de un punto a otro entre los que hay una diferencia de potencial de 1 voltio".

$$\mathbf{1\ eV = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ J}$$

En Química se emplea corrientemente la caloría como unidad de energía térmica en vez del Joule (Julio).

Caloría (cal) es "la energía necesaria para elevar 1 °C la temperatura de 1 gramo de agua de 14,5 °C a 15,5 °C".

$$\mathbf{1\ cal = 4{,}18\ J}$$

En el sistema británico de medidas todavía se emplea la **British Termal Unit (BTU)**, que es la cantidad de energía necesaria para calentar una libra (0,454 Kg) de agua en un 1 °F (0,556 C°). Es igual a 1055 J, en números redondos.

$$\mathbf{1\ BTU = 1055\ J}$$

Las equivalencias entre estas unidades del SI de la energía térmica y la eléctrica se reúnen en la Tabla 1.2.

TABLA 1.2. EQUIVALENCIAS ENTRE UNIDADES DE LAS ENERGÍAS TÉRMICA Y ELÉCTRICA

Tipo	Unidad	Equivalencia Julio	Equivalencia KW•h
Térmica	Julio	1	$2{,}724 \cdot 10^{-6}$
Eléctrica	KW•h	$3{,}6 \cdot 10^{6}$	1

Para poder evaluar la calidad energética de los distintos combustibles se han establecido unidades basadas en el poder calorífico (ver sección 2.3) de cada uno de ellos. Las más utilizadas en economía energética son Kcal/Kg, tec y tep.

Kcal/Kg indica el número de kilocalorías que se obtienen en la combustión de 1 Kg de combustible.

tec: toneladas equivalentes de carbón. Representa la energía liberada por la combustión de una tonelada de carbón.

$$\mathbf{1\ tec = 29{,}3 \cdot 10^{9}\ J}$$

tep: tonelada equivalente de petróleo. Equivale a la energía liberada en la combustión de una tonelada de petróleo crudo.

$$\mathbf{1\ tep = 41{,}84 \cdot 10^{9}\ J}$$

$$\mathbf{1\ tep = 1{,}428\ tec}$$

1.5 LEYES DE CONSERVACIÓN Y DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA

Todas las formas de energía son intercambiables. Cuando el sol incide sobre la arena la calienta, transformando la energía radiante en térmica. También, el calentamiento desigual de masas de aire produce un desplazamiento de

éstas que constituye el viento; se ha transformado energía térmica —calor— en energía eólica. El agua que cae desde un embalse se puede aprovechar para producir movimiento, con lo cual se transforma energía potencial en cinética.

Los científicos han deducido de éstos y muchos otros ejemplos que, a pesar que la energía posee muchas formas, ésta no se puede crear o destruir, es decir, cuando aparece una forma de energía debe desaparecer otra de igual magnitud. Si se considera la energía cinética y potencial, ya definidas y cuantificadas, entonces cuando se ha convertido totalmente una de ellas en la otra significa que la magnitud de la que aparece es igual a la de la que desapareció y en un punto intermedio de este intercambio se cumple:

$$\mathbf{E_c + E_p = cte.} \qquad [1.4]$$

Esta deducción y su expresión matemática es la **ley de conservación de la energía**, según la mecánica clásica, que se puede enunciar así: "la energía total del universo permanece constante". Por lo tanto, en los cambios físicos o químicos no existe un monto de energía que desaparezca o aparezca, sino que en estos procesos de cambio el monto total de energía es el mismo.

Un motor eléctrico que se encuentra conectado a la red sufre un calentamiento al transformar energía eléctrica en mecánica. Así, en el ejemplo de la Figura 1.1 el motor recibe 1000 J de energía eléctrica pero sólo entrega 900 J de energía mecánica porque el resto se perdió en energía térmica. Sin embargo, el total de la energía, la suma de la energía mecánica más el calor, es igual a la energía eléctrica entregada al motor.

Puesto que la primera ley de la energía dice que no puede aparecer o desaparecer energía, podría deducirse que siempre habrá energía suficiente. La vida diaria, sin embargo, demuestra que una pila —como el combustible— se agota. No es que haya desaparecido la energía; sólo ha ocurrido una disminución de la calidad de ésta, o también se puede decir que ha disminuido la cantidad de energía útil, o bien que una parte se ha liberado y por lo tanto se ha transferido, por ejemplo, al ambiente.

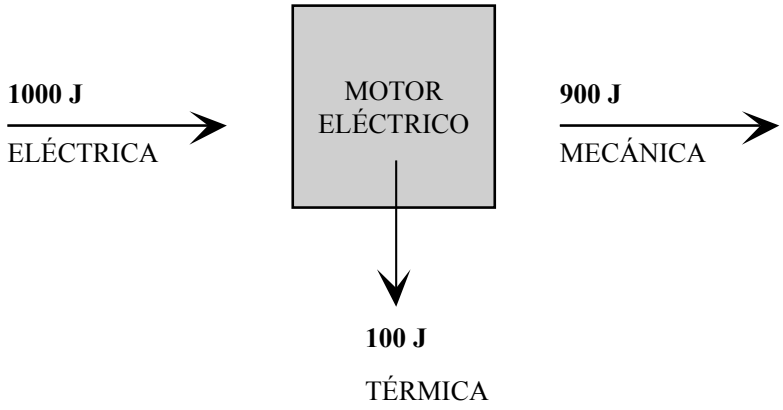


Figura 1.1. Transformaciones de la energía en un motor eléctrico

Al igual que con la ley anterior los científicos han demostrado que en cualquier conversión de una energía ocurre una degradación de ella. La **ley de disipación de la energía** se suele expresar así: "cuando la energía cambia de una forma a otra, parte de la energía útil siempre se disipa a una de calidad inferior". Esta energía liberada es menos útil, está más dispersa o si se quiere está más desordenada. Se dice que ha aumentado la entropía, que es una forma de medir el desorden, concepto que se ampliará posteriormente. Generalmente esta energía se ha liberado en forma de calor que se entrega al ambiente y que se dispersa en él. Cuanta más energía se emplee, tanto más energía desordenada, en forma de calor, recibe el ambiente.

Algunos ejemplos ilustran este concepto. La gasolina, que posee energía química de alta calidad, al inflamarse se convierte en energía mecánica en el motor de un vehículo; no obstante, solamente alrededor de un 10% de la energía química se convierte en energía mecánica. El 90% restante se transforma a energía térmica de baja calidad que se entrega al ambiente. Cuando se enciende una ampolleta incandescente, el filamento que conduce la energía eléctrica produce luz debido a la incandescencia del filamento; la luz producida es sólo un 5% de energía radiante y el resto es calor de baja energía. Los seres vivos, al ingerir alimentos, contienen energía química de alta

calidad, pueden realizan múltiples actividades propias de su existencia con esta energía, pero a la vez disipan calor de baja calidad que capta el ambiente.

La segunda ley de disipación implica también que nunca se puede reutilizar energía de alta calidad para efectuar un trabajo útil.

1.6 EFICIENCIA DE LA ENERGÍA, TRABAJO Y POTENCIA

En la sección anterior se vio que cuando se produce un proceso de transformación de energía, la cantidad lograda de esta, es decir, la energía útil (E_u), es menor a la cantidad inicial (energía total); el resto lo absorbe el ambiente: es energía perdida (E_p). Por ejemplo, la que pierde el motor eléctrico de la Figura 1.1.

Energía total (E_t) = Energía útil (E_u) + Energía perdida (E_p). Por lo tanto, la eficiencia o rendimiento (η) en esta conversión de energía es:

$$\eta = E_u / E_t = 1 - E_p / E_t \qquad [1.5]$$

Como consecuencia de la ecuación anterior, se deduce que la eficiencia será siempre un valor inferior a uno y que no podrá obtenerse el valor 1 (< 100%) por ser contrario a la ley de disipación de la energía.

El rendimiento más bajo ocurre cuando la energía térmica sufre una transformación en otra forma de energía. En cambio, los rendimientos más elevados se logran al transformar la energía eléctrica en otra forma energética.

En la sección 1.2 se afirmó que la energía tiene las mismas dimensiones que el trabajo y se mide en las mismas unidades que el trabajo. En consecuencia, la eficiencia (η) del trabajo (W) es:

η = Trabajo útil (W_u) / Trabajo total (W_t)

η = 1 – [Trabajo perdido (W_p) / Trabajo total (W_t)]

$$\eta = W_u / W_t = 1 - W_p / W_t \qquad [1.6]$$

El trabajo perdido puede originarse por pérdida de energía mecánica en la máquina (roce) o de energía térmica (calor). Las fuerzas de roce que

siempre están presentes son disipativas y constituyen la principal fuente de pérdida de energía en cualquier proceso.

La **potencia (P)** se define como la energía desarrollada por unidad de tiempo o el trabajo realizado por unidad de tiempo; por lo tanto, la eficiencia o rendimiento (η) expresado en función de la potencia es:

$$\eta = P_u/P_t = 1 - P_p/P_t \qquad [1.7]$$

1.7 PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA

La termodinámica es la ciencia que estudia el calor y otras formas de energía, así como la relación entre ellas. Antes de presentar sus principios, se requiere conocer previamente algunos conceptos utilizados en esta ciencia.

Un sistema (también denominado sustancia de trabajo) se define como la parte del universo objeto de estudio, o bien, como una porción del espacio delimitado por una superficie que se denomina pared y por el exterior. Un sistema puede ser el vapor de una máquina de vapor, la mezcla de gasolina y aire en un motor térmico, la atmósfera terrestre, etcétera. El sistema puede estar separado del resto del universo (denominado medio ambiente del sistema) por paredes reales o imaginarias. En este último caso, el sistema objeto de estudio sería, por ejemplo, una parte de un sistema más grande. Las paredes que separan un sistema de su medio ambiente pueden ser térmicamente aislantes (paredes adiabáticas).

Una ecuación de estado es una ecuación que relaciona, para un sistema en equilibrio, las variables presión (P), volumen (V) y temperatura absoluta (T) que lo describen. Un sistema está en equilibrio cuando se observa que las variables que describen su estado no cambian.

No existe una única ecuación de estado que describa el comportamiento de todas las sustancias para todas las condiciones de presión y temperatura. La ecuación de estado más sencilla es aquella que describe el comportamiento de un gas cuando éste se encuentra a una presión baja y a una temperatura alta. En estas condiciones la densidad del gas es muy baja, por

lo que pueden hacerse las siguientes aproximaciones: a) no hay interacciones entre las moléculas del gas; b) el volumen de las moléculas es nulo. La ecuación de estado que describe un gas en estas condiciones se llama ecuación de estado de un gas ideal.

Las variables de estado son las magnitudes que se emplean para describir el estado de un sistema. Dependiendo de la naturaleza del sistema, objeto de estudio, pueden elegirse distintos conjuntos de variables termodinámicas para describirlo. En el caso de un gas, estas variables son: masa, P, V y T.

Una **función de estado** es una propiedad de un sistema que depende sólo del estado del sistema, y no de la forma en que llegó a dicho estado. Por ejemplo, la energía interna y la entropía son funciones de estado. El calor y el trabajo no son funciones de estado, ya que su valor depende del tipo de transformación que experimenta un sistema desde su estado inicial a su estado final.

Energía interna (U) es la suma de la energía cinética (movimiento de moléculas y átomos) y la energía potencial (fuerzas de atracción y repulsión de partículas atómicas y de moléculas) de un sistema que está estacionario. Es imposible determinar esta suma por lo que se recurre a conocer los cambios que ella experimente, que sí son posibles de evaluar.

Por lo tanto, el cambio de energía interna (ΔU) de un sistema entre su estado inicial (U_i) y su estado final (U_f) es:

$$\mathbf{\Delta U = U_f - U_i} \qquad [1.8]$$

El concepto de sistema se refiere a una parte específica del espacio donde ocurre un fenómeno; en el caso de una reacción química, el sistema son los reactivos y el equipo (por ejemplo un matraz o un reactor) en cuyo interior ocurre la reacción.

Por simplificación muchas veces se omiten las expresiones U_f y U_i para referirse al cambio en si mismo (ΔU).

Para medir el cambio de calor absorbido o liberado por un sistema químico durante un proceso a presión constante, situación en la que se produce la mayoría de las reacciones químicas, la Química utiliza una propiedad denominada **entalpía (H)**, que se define de la siguiente manera:

$$\mathbf{H = U + P \cdot V}$$

Donde P es la presión invariable a la que se encuentra el sistema y V, el volumen variable.

Como esta expresión comprende la energía interna, la entalpía se expresa como una diferencia entre dos estados:

$$\mathbf{\Delta H = \Delta U + P \cdot (\Delta V)} \qquad [1.9]$$

Puesto que U y P·V tienen unidades de energía y son funciones de estado, porque dependen sólo del estado inicial y del final, H también tiene unidades de energía y es una función de estado.

1.7.1 PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Este principio, que algunos autores llaman ley, se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{\Delta U = Q + W} \qquad [1.10]$$

Esta relación dice que "el cambio de energía interna de un sistema es la suma del intercambio de calor (Q) entre el sistema, su medio ambiente y el trabajo (W) realizado por el sistema o sobre el sistema". Recuérdese que el calor Q es la transferencia de energía térmica entre dos cuerpos que están a diferente temperatura (sección 1.2). La relación entre estas tres magnitudes se ilustra en la Figura 1.2.

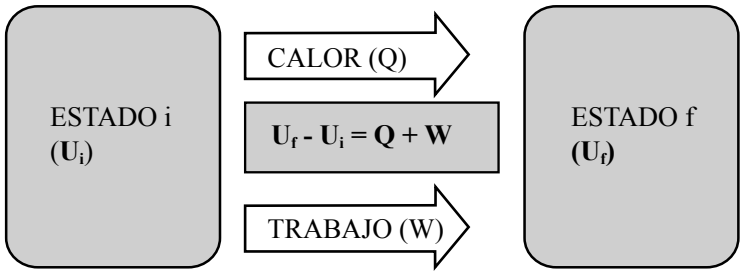


Figura 1.2. Relación entre energía interna (U), calor (Q) y trabajo (W)

El calor intercambiado entre el sistema y el medio ambiente, así como el trabajo ejecutado por el sistema o desde fuera del sistema, puede ser positivo o negativo. Entonces, el calor Q será negativo si el sistema pierde calor, por lo que en el caso de reacciones químicas se tratará de una reacción exotérmica, o será positivo si el sistema gana calor y la reacción será endotérmica. En cuanto al trabajo, se considera que W será negativo cuando el exterior ejerza trabajo sobre el sistema y positivo cuando el sistema entregue trabajo al exterior.

La ley de conservación de la energía dice que ésta se puede convertir de una forma en otra pero que no se crea ni se destruye; en otras palabras, la energía permanece constante. Si un sistema pierde calor hacia el medio ambiente o ejecuta un trabajo sobre el medio ambiente, su energía interna disminuirá porque ambos procesos consumen energía, pero la energía total intercambiada será la misma. Por lo tanto, la ley de conservación de la energía y el primer principio de la termodinámica expresan de distinta manera un mismo concepto.

En un proceso a presión constante la expansión de un gas debe ejercer un trabajo contra la presión atmosférica, por lo tanto el trabajo W realizado por el gas es negativo:

$$\mathbf{W = - P \cdot \Delta V}$$

Para este proceso el cambio de energía interna ($\Delta U = Q + W$) será:

$$\mathbf{\Delta U = Q - P \cdot \Delta V} \text{ y por lo tanto } \mathbf{Q = \Delta U + P \cdot \Delta V} \qquad [1.11]$$

Como la entalpía a presión contante es: $\Delta H = \Delta U + P \cdot (\Delta V)$, entonces:

$$\mathbf{\Delta H = Q} \qquad [1.12]$$

La **entalpía**, o mejor, el cambio de la entalpía, es equivalente al calor para los procesos que ocurren a presión constante, procesos que son la mayoría.

Además de conocer la termodinámica de la entalpía, para poder expresar el segundo principio de la termodinámica es preciso introducir el concepto de entropía. La **entropía** es una "medida del grado de desorden de un sistema". Cuando aumenta el desorden de un sistema, mayor será la entropía.

Si por el contrario disminuye el desorden, que implica un aumento del orden, la entropía también disminuye.

Un ejemplo de estas situaciones lo da el agua. En el hielo las moléculas de agua forman una inmensa estructura sólida donde las moléculas se disponen de una manera fija y precisa. La entropía de esta disposición, muy ordenada, corresponde a una baja entropía. Cuando el hielo se transforma en un líquido, se pierde esta estructura ordenada porque las moléculas de agua tienen más energía y ya no ocupan espacios fijos: son móviles, están desordenadas; en definitiva, tienen mayor entropía. Si a continuación se entrega calor al agua líquida ésta se evapora, el movimiento de ellas es caótico y su entropía aumenta respecto del agua líquida. En general, las moléculas de los sólidos (s) están más ordenadas que las de los líquidos (l) y éstas están más ordenadas que las de los gases (g). Las correspondientes entropías han aumentado: $S_g > S_l > S_s$.

La entropía, análogamente a la entalpía, es una función de estado, es decir, su cambio depende sólo del estado inicial (i) y del final (f):

$$\Delta S = S_f - S_i$$

Un clavo abandonado se oxida, un objeto caliente transfiere calor a quien lo toque, un huevo que cae se rompe. Todos estos **procesos**, que suceden sin intervención externa, se denominan **espontáneos**. Los procesos inversos a éstos son no espontáneos.

En los procesos espontáneos la energía se conserva, como debe ser según la ley de conservación de la energía. El sentido en el cual un proceso es espontáneo puede depender en gran medida de la temperatura. Por ejemplo, cuando la temperatura es mayor que 0, el hielo se funde. Por su cuenta, las moléculas de agua líquida están más desordenadas que en el hielo. De lo anterior se desprende que la espontaneidad se asocia con el grado de desorden de un sistema, su entropía.

Cuando la energía cambia de una forma a otra, parte de la energía útil se disipa a una energía de calidad interior (ley de disipación de la energía), que está más desordenada. Esta energía disipada o no útil equivale a que se desperdicia entalpía en la transformación. Esta energía es entropía disipada como productos residuales y calor.

1.7.2 SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Con estas ideas se puede entender el significado del segundo principio de la termodinámica: "en un proceso espontáneo la entropía del universo (uni) aumenta". El universo debe entenderse como la suma del sistema (sis) y su medio ambiente (amb), por lo tanto la expresión matemática del segundo principio es:

$$\mathbf{\Delta S_{uni} = \Delta S_{sis} + \Delta S_{amb} > 0} \qquad [1.13]$$

La entropía aumenta en cualquier transformación de energía desde una zona de mayor concentración de energía hasta otra de menor concentración de ella. Este aumento de la entropía está acompañado de una pérdida de energía que puede ser el calor que, como se sabe, fluye de manera espontánea desde un cuerpo más caliente a otro más frío.

Para calcular el cambio de la entropía, conviene referirse a un proceso exotérmico del sistema. En este tipo de proceso el calor producido se entrega a las moléculas del medio ambiente y éstas experimentan un aumento de sus movimientos y, como consecuencia, se da un aumento de la entropía del medio ambiente. En otras palabras, un proceso exotérmico transfiere calor desde el sistema al medio ambiente (ambiente o espacio en torno al sistema), produciendo un aumento de la entropía de los alrededores. Alternativamente, un proceso endotérmico absorbe calor de los alrededores con una disminución de entropía de los alrededores.

Si un proceso exotérmico ocurre a presión constante, el cambio de calor (Q) es igual al cambio de entalpía (Q = ΔH). Por lo tanto, el cambio de entropía (ΔS_{amb}) será proporcional al cambio de entalpía del sistema (ΔH_{sis}) con signo negativo porque se trata de un proceso exotérmico en el cual el sistema pierde calor:

$$\mathbf{\Delta S_{amb}} \textit{ es proporcional a } \mathbf{-\Delta H_{sis}}$$

El cambio de entropía depende también de la temperatura, porque a alta temperatura, mayor es el movimiento de las moléculas de los alrededores o ambiente; por lo tanto, la absorción de calor por parte del sistema será poco importante en los movimientos de las moléculas del sistema, por lo que el cambio de entropía del sistema será poco significativo. En el caso de que la

temperatura del ambiente sea baja, siempre en un proceso exotérmico, entonces la entrega de la misma cantidad de calor al ambiente producirá un aumento más significativo en los movimientos moleculares y por ende un mayor aumento de la entropía. En resumen, existe una relación inversa entre la temperatura Kelvin y la entropía del medio ambiente. Esta relación permite evaluar la entropía del ambiente en función de la entalpía del sistema y la temperatura Kelvin:

$$\mathbf{\Delta S_{amb} = -\Delta H_{sis} / T} \qquad [1.14]$$

En esta ecuación la temperatura Kelvin es tanto del sistema como del medio ambiente.

Ya se ha visto que la diferencia de entalpía en un proceso a presión constante es igual al calor ($\Delta H = Q$), por lo que la ecuación anterior se transforma en la siguiente igualdad:

$$\mathbf{\Delta S = Q/T} \qquad [1.15]$$

Como recién se ha expresado, el segundo principio establece que en un proceso espontáneo la entropía del universo aumenta o, lo que es equivalente, el grado de desorden del universo aumenta. También se afirmó que la entropía aumenta en cualquier transformación de energía desde una región de mayor concentración a otra de menor concentración. Esta transformación de la energía significa una menor utilidad de ella. Así, la eficiencia de cualquier proceso de transformación de la energía, que ocurre con aumento de entropía, será siempre menor que el 100%.

La ecuación $\Delta S = Q/T$ establece que una misma cantidad de energía calorífica (Q) produce mayor desorden en una porción de agua fría (menor T_f) que en otra caliente (mayor T_c), porque para una misma cantidad de calor entregada al agua, el agua fría experimenta mayor desorden que la caliente.

Si la cantidad de calor transferida es Q_t, entonces:

$$\mathbf{Q_t / T_c < Q_t / T_f} \qquad [1.16]$$

donde T_c = temperatura absoluta caliente; T_f = temperatura absoluta fría.

02 RECURSOS NATURALES

2.1 TIPOS DE RECURSOS NATURALES

Los recursos naturales son todos aquellos bienes materiales y servicios que proporciona la naturaleza para satisfacer las necesidades o deseos humanos. Estos recursos son valiosos para los seres humanos porque contribuyen a su bienestar y desarrollo de manera directa. Por ejemplo: las materias primas, los minerales y los alimentos.

Según su disponibilidad en el tiempo, su tasa de recuperación y rapidez de uso o consumo, se clasifican en renovables y no renovables. Los **recursos naturales renovables** son los propios del suelo y del mar, donde se encuentran los principales productos bióticos como los animales, peces, bosques y plantas, de los cuales proceden los alimentos y la madera. Este tipo de recursos son renovables si su tasa de recuperación es superior a la de su extracción. Es renovable también la energía solar, la cual es inagotable. Los recursos geotérmicos se consideran renovables por la inmensa cantidad de ellos; sin embargo, los depósitos geotérmicos en particular pueden agotarse si la tasa de extracción del calor en ellos es mayor que la de su renovación.

El origen de todos estos recursos renovables se encuentra en el Sol, la principal fuente de energía del planeta Tierra, energía que a su vez activa en la Tierra los recursos de flujo, viento y agua, que transita por los ríos y los mares. El contenido energético de la radiación solar recogida anualmente sobre un metro cuadrado equivale al calor desprendido por 190 Kg de carbón bituminoso (sección 2.3.2). La energía solar satisface todos los requerimientos energéticos básicos del hombre y, empleada eficazmente, entregaría más energía que la que se necesita. Cabe preguntarse el motivo por el cual no se ha difundido su empleo. La respuesta está en el hecho de que es una energía difusa e intermitente (sección 8.2), por lo que su almacenamiento es costoso;

sigue siendo más barato la extracción y consumo de combustibles fósiles. Obviamente, si tuviese que pagarse el costo ambiental que estos combustibles ocasionan la situación cambiaría.

Los **recursos naturales no renovables** son aquellos que se pueden agotar porque proceden de depósitos limitados o tienen ciclos de regeneración muy por debajo de la tasa de extracción o de explotación, como son los hidrocarburos fósiles (petróleo, carbón, gas natural), algunos minerales (uranio, cobre, oro) y el agua contenida en acuíferos sin recarga.

Además, existen los **recursos naturales de flujo**, que son aquellos cuya disponibilidad no se ve afectada, independientemente de que se les use o se les deje fluir. Ejemplos son el agua y el viento. Sobre el agua es menester precisar que, aunque su disponibilidad no sea afectada, sí se afecta su calidad.

Los recursos energéticos son todas aquellas sustancias sólidas, líquidas o gaseosas de las cuales se puede obtener energía a través de diversos procesos. Estas sustancias forman parte de los recién descritos recursos renovables o de los que no son renovables.

2.2 EL SOL COMO FUENTE PRIMARIA

En la sección precedente se afirmó que el Sol es la fuente primaria de energía del planeta Tierra. El Sol es una estrella formada por una masa gaseosa de hidrógeno (H) y helio (He), cuyo diámetro es $1{,}4 \cdot 10^6$ Km, situada a $1{,}5 \cdot 10^8$ Km de la Tierra. Esta estrella emite energía electromagnética en forma de luz hacia la Tierra y en todas las direcciones.

El Sol es un gigantesco cuerpo compuesto de H (72%) y He (28%) cuya presión y temperatura elevadísimas permiten que los núcleos de hidrógeno que chocan experimenten **fusión nuclear** (unión de dos núcleos que forman otro núcleo más pesado) para generar helio, con liberación de un neutrón y de una inmensa cantidad de energía. Un ejemplo de reacción:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + \mathrm{E}$$

deuterio **helio** **neutrón** **energía**

En esta ecuación nuclear el superíndice denota el número de masa atómica (número total de protones y neutrones) y el subíndice, el número atómico (el número de protones). El número de masa del neutrón es 1 pero su número atómico es 0 porque no hay protones.

Como se aprecia en esta ecuación y varias más que representan las reacciones de fusión, ocurre una pérdida de masa, esto es, el total de hidrógeno consumido pesa más que el helio producido. Esa diferencia de masa se transforma en energía según la ecuación de Einstein ($E = mc^2$), donde E es la energía, m, la masa y c, la velocidad de la luz. Estas reacciones nucleares transforman el 0,7% de la masa afectada en fotones, partículas componentes de la luz, con una longitud de onda muy corta y, por lo tanto, muy energéticas y penetrantes. La energía producida mantiene el equilibrio térmico del núcleo solar a temperaturas aproximadamente de 15 millones de K.

La Tierra sólo recibe un mil millonésimo de la energía radiante emitida. Este flujo de energía que es luz incide sobre el planeta; está formado por cantidades aproximadamente iguales de luz visible (E_{vis}) y de luz ultravioleta (E_{uv}), más una pequeña cantidad de luz infrarroja (E_{ir}).

La mayor parte de la energía utilizada por los seres vivos procede del Sol; las plantas la absorben directamente y realizan la fotosíntesis (sección 9.1), los herbívoros absorben indirectamente una pequeña cantidad de esta energía y los carnívoros absorben indirectamente una cantidad más pequeña comiendo a los herbívoros. La mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del sol (secciones 2.2 y 8.1).

Los hidrocarburos fósiles preservan energía solar capturada hace millones de años mediante fotosíntesis y la energía hidroeléctrica usa la energía potencial de agua que se condensó en altura después de haberse evaporado por el calor del sol.

2.3 RECURSOS ENERGÉTICOS

Los hidrocarburos fósiles —restos mineralizados de organismos que están en el interior de la corteza terrestre— son, en la actualidad, la principal fuente de