

Tecnología energética y medio ambiente - I

Y. Calventus	A. Jaén
R. Carreras	S. Montserrat
M. Casals	A. Oliva
P. Colomer	M. Quera
M. Costa	X. Roca



Tecnología energética y medio ambiente - I

Y. Calventus A. Jaén
R. Carreras S. Montserrat
M. Casals A. Oliva
P. Colomer M. Quera
M. Costa X. Roca

Material elaborat per als Estudis de Segon Cicle
d'Enginyeria en Organització Industrial de l'ETSEIAT, de la UPC

Primera edició: febrer de 2006
Reimpresió: novembre de 2009

Diseño de la cubierta: Ernest Castellort

© los autores, 2006

© Edicions UPC, 2006
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
Jordi Girona Salgado 1-3, 08034 Barcelona
Tel.: 934 137 540 Fax: 934 137 541
Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
E-mail: edicions-upc@upc.edu

ISBN: 978-84-9880-296-2

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org <http://www.cedro.org>) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

Presentación

Esta publicación pretende que el alumno de la asignatura Tecnología Energética y Medio Ambiente disponga de unos apuntes, así como de problemas resueltos, problemas propuestos y bibliografía para poder seguir de forma semipresencial el aprendizaje de la materia.

La publicación, de carácter tecnológico, consta de dos partes claramente diferenciadas: medio ambiente (1,6 créditos) y tecnología energética (4,4 créditos).

Para el correcto seguimiento de esta publicación se requiere un conocimiento de la Termodinámica en sus aspectos básicos y de aplicación. Ello implica un conocimiento de los principios de la Termodinámica y de las magnitudes utilizadas (entalpía, energía interna, entropía,...) y el planteamiento de balances de energía, entropía y exergía en todo tipo de dispositivos. Asimismo, es conveniente el conocimiento de los diagramas termodinámicos y de las tablas de propiedades termodinámicas y su manejo.

Posteriormente se indicarán aquellas fuentes bibliográficas y otros tipos de aportaciones que pueden ser de interés para el repaso de estos conocimientos.

Índice

Presentación	7
--------------------	---

Índice	9
--------------	---

Módulo 1 Medio ambiente

Introducción y objetivos del módulo

1 Introducción a la problemática ambiental

1.1 Referentes históricos	19
1.2 Concepto actual de medio ambiente	22
1.3 Problemática ambiental.....	22
1.3.1 Contexto internacional	22
1.3.2 Unión Europea	24

2 Marco legal de la gestión del medio ambiente

2.1 Directiva IPPC (Integral Pollution and Prevention Control)	31
2.1.1 Antecedentes	31
2.1.2 Objeto.....	31
2.1.3 Ámbito de aplicación	32
2.1.4 Conceptos innovadores de la Directiva IPPC	33
2.2 Política integrada de producto (IPP)	34
2.2.1 Análisis del ciclo de vida	35
2.2.2 Ecodiseño	35
2.2.3 Etiquetas ecológicas.....	36
2.2.4 Sistema de gestión medioambiental	36
2.3 Ley sobre accidentes graves en determinadas actividades industriales	43
2.3.1 Directiva Seveso I.....	43
2.3.2 Directiva Seveso II.....	44

3 Tratamiento y gestión de residuos

3.1 Definición y clasificación de residuos	45
--	----

3.1.1	Clasificación general.....	45
3.1.2	Catálogo de Residuos de Catalunya (CRC)	46
3.1.3	Catálogo Europeo de Residuos (CER).....	47
3.2	Residuos industriales.....	48
3.2.1	Residuos industriales asimilables a urbanos	48
3.2.2	Residuos inertes	48
3.2.3	Residuos no peligrosos o no especiales.....	48
3.2.4	Residuos peligrosos o especiales	48
3.3	Política medioambiental.....	49
3.4	Marco legal	50
3.4.1	Unión Europea	51
3.4.2	Estado Español.....	52
3.4.3	Catalunya	52
3.5	Gestión de residuos industriales.....	54
3.5.1	Principios generales en la gestión de los residuos industriales	54
3.5.2	Gestión de residuos industriales en Catalunya.....	58
4	Legalización de actividades	
4.1	Ley de Intervención Integral de la Administración Ambiental (IIAA).....	61
4.1.1	Antecedentes	61
4.1.2	Explicación de la Ley IIAA	61
4.1.3	Clasificación de las actividades y disposiciones legales.....	64
4.1.4	La evaluación ambiental	70
4.1.5	Mejores técnicas disponibles (MTD).....	71
4.1.6	Entidades ambientales de control.....	71
4.2	Responsabilidades ambientales.....	71
4.2.1	Responsabilidad administrativa	71
4.2.2	Responsabilidad civil	72
4.2.3	Responsabilidad penal.....	72
4.3	Documentos para legalizar actividades.....	72
4.3.1	Autorización ambiental	72
4.3.2	Licencia ambiental	73
4.3.3	Comunicación	73
	Ejercicios	75
	Bibliografía	81

Módulo 2 Fuentes de energía, combustibles y combustión

Introducción y objetivos del módulo

1 Fuentes primarias de energía y recursos energéticos de la Tierra

	Objetivos del capítulo	85
1.1	Fuentes primarias de energía externas e internas.....	85

1.2	Demanda energética y fuentes de energía	86
1.3	Demanda y oferta de energía.....	88
1.4	Interconversiones energéticas	89
1.5	Formas explotables de la energía	92

2 Combustibles

2.1	Conceptos básicos sobre combustibles	97
2.2	Petróleo crudo	98
2.2.1	Derivados manufacturados del crudo de petróleo.....	99
2.2.2	Refino y reformado del petróleo	100
2.3	Gas natural	101
2.4	Carbón.....	102
2.4.1	Derivados manufacturados del carbón	102
2.5	Otros combustibles fósiles	103
2.5.1	Esquistos o pizarras bituminosas	103
2.5.2	Arenas petrolíferas	103
2.6	GLP: propano y butano comercial	104
2.7	Biomasa energética	104
2.8	Combustibles sintéticos y semisintéticos: Razones que justifican su uso.....	106
2.8.1	Hidrógeno.....	106
2.8.2	Otros combustibles de síntesis	106
2.8.3	Combustibles semisintéticos	107
2.8.4	Exigencias de utilización: Combustibles manufacturados	107
2.9	Propiedades generales de los combustibles.....	107
2.9.1	Composición elemental de los combustibles y su expresión	107
2.9.2	Densidad.....	108
2.9.3	Propiedades de tipo general relacionadas con la volatilidad.....	110
2.9.4	Factores de caracterización	111
2.10	Propiedades de utilización de los combustibles para motores	112
2.10.1	Gasolinas auto: Especificaciones de volatilidad y poder antidetonante.....	113
2.10.2	Volatilidad.....	114
2.10.3	Gasóleos y fuelóleos. Especificaciones de viscosidad y de inflamabilidad	115
2.11	Propiedades energéticas	117
2.12	Gases combustibles	117
2.12.1	Familias de gases combustibles	117
2.12.2	Índices de caracterización de gases.....	118

3 Combustión

3.1	Los reactivos: combustible y aire.....	121
3.1.1	Aire atmosférico.....	121
3.1.2	Aire simplificado.....	121
3.2	Estequiometría de la combustión con aire.....	122
3.2.1	Combustión estequiométrica con oxígeno	123
3.2.2	Combustión estequiométrica con aire seco	124
3.2.3	Combustión no estequiométrica.....	125
3.2.4	Nomenclatura y conceptos: Combustiones totales, completas e incompletas.....	126

3.3	Diagramas de combustión	127
3.3.1	Diagrama de Bunte.....	127
3.3.2	Otros diagramas	128
3.4	Termoquímica de la combustión	128
3.4.1	Entalpía de formación estándar.....	128
3.4.2	Entalpía de reacción estándar.....	130
3.4.3	Entalpía de combustión.....	131
3.4.4	Entalpía de reacción y poder calorífico PCS y PCI	131
3.5	Aspectos térmicos de la combustión: Combustión adiabática	132
3.5.1	Temperatura adiabática de combustión total.....	133
3.5.2	Reacciones y disociación de los productos de combustión.....	134
3.5.3	Equilibrio químico	136
3.5.4	Temperatura adiabática de combustión en equilibrio (TACE)	136
	Apéndice. Programas de combustión completa.....	138
	Ejercicios	141
	Bibliografía	149

Módulo 3 Energía solar y acumulación térmica

Introducción y objetivos del módulo

1 Disponibilidad solar

1.1	La constante solar.....	153
1.2	Atenuación atmosférica de la radiación solar	154
1.3	Medición de la radiación solar	155
1.4	Balance global térmico.....	157
1.5	Inclinación óptima.....	158
1.6	Irradiosidad sobre una superficie inclinada.....	160
1.7	Estimación de la radiación difusa	161

2 Captación solar

2.1	Descripción física.....	163
2.2	Ecuación básica de transferencia de calor.....	164
2.3	Ganancias	166
2.4	Pérdidas.....	166
2.5	Temperatura de estancamiento.....	167
2.6	Radiación crítica	167
2.7	Superficie selectiva	168
2.8	Superficie semitransparente	168

3 Acumulación térmica

3.1	Descripción física de unidades típicas de acumulación	171
-----	---	-----

3.2	Ecuaciones características.....	172
3.3	La estratificación térmica.....	174
3.4	Elementos difusores.....	174
3.5	Materiales de cambio de fase.....	174
4	Instalaciones solares	
4.1	Descripción física de instalaciones de ACS.....	177
4.2	Elementos auxiliares: intercambiadores, bombas, reguladores.....	179
4.3	Fracción solar y rendimiento global.....	180
4.4	Simulación de instalaciones.....	182
4.5	Viabilidad económica.....	182
	Ejercicios	185
	Bibliografía	189

Introducción

Los objetivos generales de esta publicación son dar una visión amplia sobre la energía en cuanto a sus fuentes, transformaciones y aplicaciones tecnológicas.

El objetivo concreto respecto al *medio ambiente* es el conocimiento, no tanto sobre cada cuestión relacionada con el medio ambiente en cuanto preservación, contaminación en sus diversos aspectos y eliminación de fuentes de riesgos, sino sobre aspectos normativos y de legislación estatal y europea. Es en este sentido que se desarrollará este módulo debido a la dificultad de reunir de manera amplia la normativa existente para su aplicación.

En el aspecto de la *tecnología energética*, se pretende dar a conocer las diferentes fuentes de energía, los combustibles, la combustión como fuente de obtención de energía térmica, la utilización de esta energía térmica para la obtención de energía mecánica y eléctrica mediante las máquinas térmicas directas (motores de combustión interna, turbinas de gas y turbinas de vapor), las máquinas inversas o de refrigeración y la obtención conjunta de calor y electricidad mediante la utilización de la cogeneración. Asimismo se introducirán las energías alternativas y, dentro de ellas, la utilización de la energía solar.

Módulo 1

Medio ambiente

Introducción y objetivos del módulo

En general se pretende proporcionar al alumno una información general de las relaciones entre la actividad industrial y el medio ambiente.

Al finalizar el estudio de este módulo el estudiante ha de ser capaz de:

- Conocer las nociones básicas sobre normativa referente al medio ambiente de los distintos niveles de administración pública.
- Conocer los principales tipos de residuos industriales, su tratamiento y gestión.
- Estudiar la Ley IIAA analizando sus implicaciones sobre las actividades industriales.
- Conocer las distintas responsabilidades ambientales derivadas de la actividad industrial.
- Conocer aspectos básicos del proceso de legalización de una actividad industrial.

1 Introducción a la problemática ambiental

1.1 Referentes históricos

A partir de la década de los 60 del siglo XX empieza a aparecer una creciente preocupación social por el medio ambiente. Se estudia la relación entre los sistemas naturales y las sociedades humanas. Ello es debido al extraordinario cambio ambiental que tiene lugar a causa del gran crecimiento económico, el cual empieza a desencadenar alteraciones sobre el entorno natural de la Tierra.

En este apartado se pretende dar una visión muy general de cuáles han sido los hitos medioambientalmente claves (sólo los más importantes) a lo largo de la historia de la humanidad.

El primer hecho histórico destacable relacionado con algún aspecto medioambiental data de 1968, cuando en Roma tuvo lugar un encuentro de 35 personalidades de 30 países, relacionadas con el mundo político, industrial, económico y de las ciencias. Este encuentro, conocido como el Club de Roma, puso de manifiesto la existencia de una creciente preocupación por las modificaciones del entorno ambiental fruto del gran crecimiento económico experimentado. El primer informe de trabajo del Club de Roma, *Los límites del crecimiento*, fue presentado por Dennis Meadows. Este documento tuvo una amplia difusión y una importante repercusión a nivel mundial ya que advertía que en caso de seguir creciendo al mismo ritmo, en 100 años el planeta sería incapaz de sostener la población mundial.

El 22 de abril de 1970 se celebró el primer *Día de la Tierra*. Veinte millones de estadounidenses se unieron en una de las mayores manifestaciones en favor de la defensa del medio ambiente jamás vistas. El apoyo popular que despertó este movimiento obligó a que los Estados Unidos comenzaran a prestar una mayor atención a la degradación del medio ambiente. La respuesta fue inmediata y definitiva, y el presidente Nixon creó la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

En 1973 el Consejo Europeo aprueba el *Primer Programa Comunitario de Acción Ambiental*, a raíz de *La Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente* celebrada en Estocolmo en 1972. En el Primer Programa Comunitario de Acción Ambiental (1973-1977) se establecen los principios generales de la política comunitaria, entre los que destaca el principio de prevención sobre el de corrección y el de “quien contamina paga”. Se establecen tres líneas de acción: reducir y prevenir la contaminación, mejorar el entorno natural e implantar acciones de la Comunidad Europea en el seno de las organizaciones internacionales.

El *Segundo Programa Comunitario de Acción en Medio Ambiente* (1977-81) supuso una continuación del primer programa, asumiendo sus objetivos y principios básicos. En este segundo programa comunitario se ampliaron algunos aspectos, como la protección y la gestión racional del espacio natural, destacando la relación agricultura-medio ambiente, y se potenciaron otros como la protección de la fauna y flora, resultando ser ésta la primera consideración de los aspectos éticos vinculados a la protección de las especies.

En el *Tercer Programa Comunitario de Acción en Medio Ambiente* (1982-1986) se continúan las directrices anteriores, pero se aportan nuevos principios y líneas de actuación. Entre ellas destaca la integración del medio ambiente en el resto de las políticas comunitarias, la evaluación de los efectos ambientales de determinadas actividades productivas, lo que más tarde dará lugar a la aprobación de la Directiva 85/337/CEE de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

En 1987 la *Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas (UNCED)* hace público el *Informe Brundtland* donde se formaliza la idea de desarrollo sostenible. El informe define este último concepto como “el desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las capacidades de las generaciones futuras para hacerse cargo de sus propias necesidades”. Hoy en día la concepción del desarrollo sostenible es básica para cualquier tipo de política medioambiental.

En el *Cuarto Programa Comunitario de Acción en Medio Ambiente* (1987-92) se reafirma y se desarrolla la integración de la política ambiental en el resto de políticas comunitarias (agricultura, industria, política energética, de competencia y mercado interior, transporte, turismo, etc.). Se ponen de relieve los problemas de ejecución y el escaso grado de aplicación práctica que presentan las normas comunitarias ambientales, destacándose la importancia de mejorar el control de la aplicación real y efectiva del derecho comunitario ambiental.

En 1989, Holanda publica el primer *Plan Nacional de Política Medioambiental (NEPP)* conocido como Plan Verde. El NEPP es un plan dinámico que fija objetivos cuantificables de calidad ambiental a largo plazo. Se revisa cada cuatro años y adicionalmente (cada dos años) se presenta un informe de los objetivos cumplidos, los problemas encontrados y sus implicaciones, para responder rápidamente a los cambios observados.

En 1992 se celebra en Río de Janeiro la *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Esta conferencia también es conocida con el nombre de “Cumbre de la Tierra sobre el medio ambiente y el desarrollo”. En ella se debaten profundamente las relaciones entre el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Se da especial importancia a los problemas del cambio climático y de la biodiversidad. Se llega a la conclusión que como puntos clave se tiene que:

- Pasar de una acción reparadora a la prevención.
- Mejorar el cumplimiento de la normativa ambiental.
- Situar el medio ambiente en el contexto del mercado único.

Los resultados de la Conferencia de Río de Janeiro se recogen en una Declaración de principios (27 principios) y en la Agenda 21, aunque a nivel de acuerdos sobre temas importantes es un fracaso por falta de consenso.

La Agenda 21 constituye un plan de acción medioambiental para los años 90 y para la primera parte del siglo XXI. Este documento estratégico consta de 40 capítulos divididos en cuatro secciones:

- Dimensiones sociales y económicas (capítulos 2 al 8).
- Conservación y gestión de los recursos para el desarrollo (capítulos 9 al 22).
- Fortalecimiento del papel de los grupos principales (capítulos 23 al 32).
- Medios de ejecución (capítulos 32 al 40).

El desarrollo de estas cuatro secciones comprende diferentes actuaciones a nivel mundial que deben permitir corregir los efectos de la degradación ambiental. La Agenda 21 pretende promover un nue-

2 Marco legal de la gestión del medio ambiente

La legislación medioambiental de la Unión Europea tiene unos orígenes relativamente recientes. Aun así, desde la adhesión del Estado Español a la UE en 1986, el marco legislativo europeo en materia de medio ambiente ha determinado el derecho interno o la legislación del Estado Español y de sus Comunidades Autónomas.

La organización legislativa y administrativa de que se dota la UE para dar respuesta a las políticas y programas en materia de medio ambiente es:

- Comisión Europea

La Comisión Europea desempeña un papel de gran importancia en el proceso político de la UE. Entre otras funciones, tiene capacidad de iniciativa para presentar propuestas legislativas (propuestas de reglamento o de directiva que deben ajustarse a lo dispuesto en los tratados), sobre las que posteriormente influirán las dos instituciones decisorias: el Parlamento Europeo y el Consejo de Ministros.

- Consejo de la Unión Europea, también denominado Consejo de Ministros

Es la principal institución decisoria de la Unión Europea y última autoridad legislativa. En el marco del tratado constitutivo de la UE, el derecho comunitario adoptado por el Consejo de Ministros puede presentar las siguientes formas: reglamentos, directivas, decisiones, recomendaciones y dictámenes. El Consejo también puede adoptar conclusiones de índole política u otros tipos de actos, como declaraciones o resoluciones.

- Parlamento Europeo

El Parlamento Europeo es la institución oficial que representa a los 370 millones de ciudadanos de la Unión Europea. Una de las atribuciones más importantes del Parlamento Europeo es su poder legislativo, pues examinan las propuestas de la Comisión Europea y colaboran con el Consejo de Ministros en el proceso legislativo.

- Comisión parlamentaria de “Medio Ambiente, Sanidad Pública y Defensa de los consumidores”

Las comisiones parlamentarias han sido creadas con la finalidad de organizar y agilizar las tareas del Parlamento Europeo. Actualmente, existen diecisiete comisiones permanentes especializadas, en las que se discuten las propuestas legislativas transmitidas por la Comisión Europea y se redactan informes de iniciativa.

- Dirección General de Medio Ambiente, Seguridad Nuclear y Protección Civil

- La Dirección General de Medio Ambiente, Seguridad Nuclear y Protección Civil es una de las 36 direcciones generales y servicios especializados que integran la Comisión Europea. Su tarea principal es elaborar y definir la nueva normativa de medio ambiente y cerciorarse de que los estados miembros pongan realmente en práctica las medidas acordadas.
- Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA)

La Agencia Europea de Medio Ambiente constituye un organismo de Derecho público europeo, distinto de las instituciones comunitarias (Consejo, Parlamento, Comisión, etc.) y que posee una personalidad jurídica propia. Creada mediante un acto comunitario de derecho derivado, tiene la finalidad de reunir y difundir, a su debido tiempo, información específica, pertinente y fiable sobre el estado y la evolución del medio ambiente a nivel europeo.

En general, el derecho de la UE se compone de tres tipos de legislación distintos, pero dependientes unos de otros: el derecho primario, el derecho derivado y el derecho complementario.

El *derecho primario* está constituido por los convenios y tratados constitutivos de la UE. El *derecho derivado*, basado en los tratados constitutivos de la UE, incluye las disposiciones emitidas por el Consejo de Ministros y la Comisión. El derecho derivado puede tener carácter vinculante o no, adoptando las siguientes formas:

- Instrumentos jurídicos vinculantes (obligatorios para sus destinatarios)
 - Reglamento
El reglamento es directamente aplicable y obligatorio en todos los estados miembros de la UE sin necesidad de que se adopten disposiciones de ejecución en la legislación nacional.
 - Directiva
Las directivas son vinculantes en cuanto al resultado que debe conseguirse en un determinado plazo de tiempo, dejando a las instancias estatales la elección de la forma y de los medios de aplicación. Su incorporación a los distintos ordenamientos jurídicos nacionales es obligatoria, llevándose a cabo mediante el mecanismo de la transposición. De esta forma se requiere la intervención normativa de cada estado miembro.
 - Decisión
La decisión tiene carácter individualizado y es obligatoria para sus destinatarios en todos los aspectos. La decisión puede estar dirigida a uno, varios o todos los estados miembros, a empresas o a particulares. Las decisiones no requieren legislación nacional para su ejecución.

Los reglamentos, directivas y decisiones, todos ellos vinculantes y, por tanto, de obligado cumplimiento, se publican en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas (DOCE) actualmente *Diario Oficial* (DO). La publicación es de periodicidad diaria y existen dos series, la serie L de legislación y la serie C de comunicados.

- Instrumentos jurídicos no vinculantes (no obligatorios para sus destinatarios)
 - Recomendaciones.
Son documentos oficiales que simplemente contienen una invitación a actuar.
 - Dictámenes
Son documentos que se limitan a expresar una opinión de un equipo de personas.

El *derecho complementario* está formado por aquellas disposiciones adoptadas por el Consejo de Ministros o la Comisión Europea no vinculantes, de contenido vario y de diversa nomenclatura: resolución, conclusión o declaración.

2.1 Directiva IPPC (Integral Pollution and Prevention Control)

La Directiva IPPC (Directiva 96/61/CE del Consejo de 24 de septiembre de 1996 relativa a la Prevención y al Control Integrados de la Contaminación) es uno de los elementos fundamentales de la legislación medioambiental comunitaria reciente. La directiva se aplica a un número significativo de actividades industriales potencialmente contaminantes, por la cual cosa se considera que es un instrumento jurídico horizontal. Su objeto es prevenir o reducir la contaminación del aire, el agua y el suelo mediante la creación de un sistema de permisos exhaustivo que tiene en cuenta todos estos factores ambientales en su conjunto. Además, cubre la generación de residuos y el uso de la energía en estas industrias. Este planteamiento contrasta con el de la legislación ambiental más antigua, que intentaba regular los diversos medios ambientales por separado.

2.1.1 Antecedentes

Los criterios que inspiraron la intervención administrativa son:

- Aspectos relacionados con los objetivos y principios de la política comunitaria en medio ambiente: la obtención de una garantía en la gestión prudente de los recursos naturales, la prevención de la contaminación previa a la implantación de la actividad, la reducción y, en la medida de lo posible, su eliminación, actuando preferentemente en la fuente misma.
- La Directiva IPPC se basa también en el *Quinto Programa de Acción en Medio Ambiente*, cuyo planteamiento considera prioritario el control integrado de la contaminación, ya que contribuye considerablemente a avanzar hacia un equilibrio más sostenible entre, por una parte, la actividad humana y el desarrollo socioeconómico y, por otra, los recursos y la capacidad de regeneración de la naturaleza.
- La exigencia de una actuación a nivel comunitario que permita poner en práctica un enfoque integrado orientado a prevenir, disminuir y controlar la contaminación procedente de las instalaciones industriales.
- Una plena coordinación del procedimiento y de las condiciones de autorización entre las autoridades competentes deberá permitir alcanzar el máximo nivel de protección del medio ambiente en su conjunto.

En el Anexo 1 de este módulo 1 se encuentra un listado más extenso de los criterios en los que se basa la Directiva IPPC.

2.1.2 Objeto

La presente directiva tiene por objeto la prevención y la reducción integradas de la contaminación procedente de determinadas actividades. En ella se establecen medidas para evitar o, cuando ello no sea posible, reducir las emisiones de las citadas actividades en la atmósfera, el agua y el suelo, incluidas las medidas relativas a los residuos, con el fin de alcanzar un nivel elevado de protección del medio ambiente. El fundamento jurídico de la directiva se refiere a la protección medioambiental; aun así, su aplicación deberá tener en cuenta otros objetivos comunitarios, como la competitividad de la industria comunitaria, contribuyendo así al fomento del desarrollo sostenible.

3 Tratamiento y gestión de residuos

Antiguamente, los residuos se integraban en la naturaleza y mantenían un equilibrio ecológico: muchos eran reutilizados como abono orgánico en los campos, comida para los animales o como combustible en las antiguas cocinas caseras de carbón. A lo largo del tiempo, el equilibrio ecológico se ha roto por la acumulación de una serie de factores, entre los cuales hay que destacar:

- El rápido crecimiento demográfico y la concentración de la población en las grandes ciudades, lo que ha originado la producción de grandes cantidades de residuos en poco espacio.
- El aumento en la calidad de vida y el escaso grado de concienciación medioambiental.
- El aumento de la producción y el consumismo. La sociedad, en su afán de producir más y más barato, ha promovido la utilización de nuevos productos, mejores y más baratos, aunque en general menos biodegradables y de más rápido envejecimiento, llegando, entre otras cosas, a ser más económica la utilización de nuevos envases que el uso de envases retornables.
- Una inadecuada gestión, ya sea por falta de conocimiento real del problema, por falta de planificación o por carencia de un marco legislativo adecuado.

Actualmente, el nivel general de producción de residuos y su composición varía considerablemente de unos países a otros, y es función básicamente del grado de desarrollo del país de que se trate. Puede oscilar, en general, entre 0,3 kg/persona/día en países muy poco avanzados, y 45 kg/persona/día en los más desarrollados. La UE genera cada año prácticamente 2000 millones de toneladas de residuos, de los cuales más de cuarenta millones están clasificados como peligrosos. En los últimos seis años, la cantidad de residuos generados aumentó un 10% cada año. Es evidente que hay que detener e invertir esta tendencia. Los factores que pueden influir positivamente en el cambio son:

- El mayor y mejor conocimiento de los residuos.
- La utilización de sistemas operativos de gestión más modernos y avanzados.
- La mayor concienciación medioambiental.
- Las políticas de reducción, reutilización y reciclaje de los residuos.
- La crisis económica, con la consiguiente necesidad de aprovechar los recursos ofrecidos por los residuos.

3.1 Definición y clasificación de residuos

3.1.1 Clasificación general

La legislación española define residuo como cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u la obligación de desprenderse. En todo caso, serán considerados

residuos las sustancias que, incluidas en el Catálogo Europeo de Residuos, establecido por decisión de la Comisión de 20 de diciembre de 1993 (94/3/CE), se ajusten a la definición legal anterior. De manera global, y de acuerdo con su origen, los residuos pueden clasificarse en:

- Residuos sólidos urbanos
 - Domésticos
 - Escombros
 - Lodos de depuradora
 - ...
- Residuos de industrias extractivas
- Residuos industriales
- Residuos hospitalarios
- Residuos radiactivos
- Residuos agrarios
 - Agrícolas
 - Forestales
 - Ganaderos
- Residuos especiales

Atendiendo a la forma que presentan los residuos, pueden clasificarse como:

- Sólidos
- Pastosos
- Líquidos

Dentro de esta categoría, no se consideran los vertidos a los cauces públicos y al alcantarillado, que están regulados por la Ley de Aguas y los reglamentos que la desarrollan.
- Gaseosos

Se considera residuo gaseoso siempre que la sustancia se encuentre contenida en recipientes. Las emisiones a la atmósfera cuentan con normativa específica.
- Mezclas de diferentes estados

En función de sus efectos, los residuos pueden clasificarse en:

- Inertes
- Peligrosos
- Tóxicos
- Radiactivos
- Infecciosos

3.1.2 Catálogo de Residuos de Catalunya (CRC)

El Catálogo de Residuos de Catalunya (CRC) se estructura en 19 grupos que corresponden a procesos o actividades que generan los residuos, o bien a familias importantes de residuos. Cada grupo se divide en un subgrupo o más, que incluyen los residuos según sus afinidades. Para cada residuo consignado en el CRC, se indican de forma genérica cuál es su origen, la clasificación y las opciones de valorización, tratamiento y disposición.

4 Legalización de actividades

4.1 Ley de Intervención Integral de la Administración Ambiental (IIAA)

4.1.1 Antecedentes

A raíz de la preocupación de los estados miembros de la UE por la protección del medio ambiente, la UE ha dictado muchas disposiciones y actos de contenido diverso, entre los cuales destaca la Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (IPPC).

Los estados miembros de la UE tenían que adaptar las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas internas al contenido de dicha directiva en el término de tres años, contados a partir de su entrada en vigor. Este término finalizaba el 29 de octubre de 1999.

Directiva 96/61/CEE (IPPC)

La Directiva IPPC (explicada más ampliamente en el capítulo 2) surge de la necesidad de armonizar la regulación de los estados miembros sobre la instalación de industrias en el territorio de la UE, e impone a los estados miembros unos principios generales y uniformes que éstos han de tener en cuenta al conceder permisos y licencias para la implantación y desarrollo de las actividades e industrias. No obstante, los principios de la directiva se basan en el desarrollo sostenible para evitar la emigración de industrias a aquellos países más permisivos medioambientalmente así como para establecer un clima de competencia justa entre todos los estados miembros.

La Directiva IPPC establece que aquellas industrias que quieran establecerse en cualquier Estado de la Unión Europea tendrán que respetar sus disposiciones. En cambio aquellas instalaciones ya existentes dispondrán de un término de 8 años después de la incorporación de la Directiva a los ordenamientos internos de los Estados miembros para adaptarse a sus disposiciones.

El Parlament de Catalunya, consciente de la necesidad de adaptar al derecho catalán dicha normativa, aprobó la Ley 3/98 de 27 de febrero, de la Intervención Integral de la Administración Ambiental (IIAA) y deja sin aplicación en Catalunya el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas del año 1961. La entrada en vigor de esta ley se produjo el día 30 de junio de 1999.

4.1.2 Explicación de la Ley IIAA

La nueva ley IIAA es un instrumento del que se dota la Generalitat de Catalunya para regular las intervenciones en las actividades de incidencia ambiental y desplaza el antiguo reglamento de actividades clasificadas RAC (Decreto 2414/61, Reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas). La nueva ley lleva a cabo la transposición de la directiva comunicativa conocida como IPPC (Di-

rectiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados en la contaminación).

Con la Ley IIAA, Catalunya ha sido pionera en el Estado Español y una de las primeras regiones de Europa en transponer a su legislación los preceptos de la Directiva europea 96/61 CE sobre prevención y control integrados de la contaminación.

La nueva Ley IIAA tiene como objetivos:

- Alcanzar un nivel alto en la protección de las personas y del medio mediante: el establecimiento de un sistema de intervención administrativa de las actividades susceptibles de afectar al medio ambiente, la seguridad y la salud de las personas.
- Este sistema de intervención se basa en la simplificación administrativa de los procedimientos para otorgar la autorización o licencia ambiental, según convenga, corresponsabilizando las diferentes administraciones implicadas en la concesión de autorizaciones.
- Integrar en una única autorización las que existen actualmente sobre vertidos, residuos y aire y las decisiones de prevención de incendios, accidentes graves y protección de la salud.
- Garantizar el acceso del ciudadano a la información ambiental.

Cabe saber qué aporta y por qué se ha elaborado la Ley de la Intervención Integral de la Administración Ambiental.

Situación de partida

Cada año, en Catalunya, se inician 9.000 expedientes para nuevas actividades industriales y empresariales de las que la mayoría, más de 7.000, corresponden a actividades de bajo impacto ambiental.

El interesado podría esperar, para estas actividades, una tramitación sencilla y rápida; y, en cambio, en la actualidad, la autorización de nuevas actividades se ha caracterizado más por ser compleja y pesada (muchos papeles y ventanillas diferentes) y lenta (unos 16 meses de promedio que pueden llegar, en algunos casos, hasta los dos años).

En buena parte, ha sido así porque la autorización de estas nuevas actividades se ha regido hasta ahora por un ya obsoleto reglamento de actividades clasificadas (¡vigente desde 1961!) que trataba con el mismo rigor y complejidad un bar-restaurante que una industria química o una refinería, y que no dejaba de ser un freno innecesario a la implantación de nuevas actividades.

También ha sido así por la existencia de múltiples registros, procedimientos, autorizaciones y administraciones concurrentes en materia de medio ambiente.

La nueva Ley 3/1998 de 27 de febrero, de intervención integral de la administración ambiental, que entró en vigor el mes de abril de 1999, sustituye al antiguo reglamento y comporta una serie de novedades y ventajas:

- Una tramitación más rápida y con plazos máximos fijos: 1, 4 o 6 meses. Es más rápida porque es proporcional al potencial impacto sobre el medio de cada actividad, porque no da un tratamiento uniforme sino diferencial a cada actividad, garantizando siempre la protección del medio ambiente. Es decir, si el impacto ambiental potencial de la actividad es menor, la tramitación es más sencilla y rápida. De esta forma, el 80% de los expedientes (7.200 expedientes

Ejercicios

Ejercicio 1: Autotest. Introducción a la problemática actual. Referentes históricos

1. Marca la afirmación correcta: El medio ambiente...

- a) afecta sólo a nuestro entorno físico (aire, agua, suelo, vegetación, etc.).
- b) se debe integrar en las políticas económicas y sociales de los países.
- c) es un problema de cada país por separado.
- d) necesita que se vuelva a una tecnología antigua para contaminar menos.

2. Marca la frase que sea falsa:

- a) El desarrollo sostenible influye en el patrimonio que dejaremos a nuestros hijos.
- b) Las compañías y organizaciones empresariales líderes ya están integrando consideraciones de desarrollo sostenible en sus estrategias centrales.
- c) El desarrollo sostenible significa sólo tener un medio ambiente limpio.
- d) Se debe tender a una producción y unos modelos de consumo más sostenibles.

3. Dentro de las cuatro áreas de actuación prioritarias en cuestiones medioambientales, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?

- a) Se está provocando un cambio climático debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero.
- b) Es necesario proteger la naturaleza y biodiversidad porque la buena salud y el equilibrio de los sistemas naturales son fundamentales para sostener la vida y el funcionamiento de la sociedad.
- c) Los problemas medioambientales vinculados a la contaminación afectan a la salud humana.
- d) Una utilización sostenible de los recursos naturales significa que no se puede superar la capacidad de carga del medioambiente para nuestra generación.

4. ¿Cuándo empieza a aparecer una creciente preocupación social respecto al medio ambiente?

- a) En el siglo XX.
- b) En la primera mitad del siglo XX.

Módulo 2
Fuentes de energía, combustibles y combustión

Ramon Carreras
Manel Quera
Antoni Jaén

Introducción y objetivos del módulo

Al finalizar el estudio de este módulo el estudiante ha de ser capaz de:

- Conocer las fuentes más importantes de energía.
- Conocer, aunque de forma somera, algunas de las tecnologías asociadas a cada una de estas fuentes.
- Conocer algunas de sus aplicaciones más inmediatas, actuales y futuras.
- Conocer los tipos de combustibles, sus orígenes y sus propiedades más importantes.
- Conocer aquellos parámetros más significativos y que representan el índice de cetano, índice de octano, etc.
- Conocer los procesos de combustión en condiciones teóricas y reales.
- Saber determinar numéricamente la potencia calorífica de un combustible.
- Saber determinar una temperatura teórica de llama y el mecanismo de cálculo de una temperatura real.

1 Fuentes primarias de energía y recursos energéticos de la Tierra

Objetivos del capítulo

Tener una idea clara de los diferentes tipos de energías primarias (fósil, eólica, hidráulica, etc.) de que dispone nuestro planeta y de las interconversiones que hemos de realizar antes de ser consumida por el ser humano, normalmente en una forma distinta a la forma en que se nos presenta (mecánica, eléctrica).

Conocer las tecnologías asociadas a las interconversiones de energías primarias, tanto las que se encuentran implantadas como tecnologías aún en fase de desarrollo.

1.1 Fuentes primarias de energía externas e internas

El origen de los recursos energéticos disponibles en la Tierra proporciona un primer criterio de clasificación: fuentes primarias de energía externas y fuentes primarias de energía internas.

Las *FEP externas* tienen mayoritariamente su origen en el Sol (que actúa como fuente de energía) y se deben a las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en dicho astro y alcanzan la Tierra en forma de radiación electromagnética. Fuera de la atmósfera terrestre una superficie plana orientada en dirección normal al Sol recibe un promedio anual de $1343 \text{ J/m}^2\text{s}$, valor que se conoce como constante solar. Esta radiación solar al pasar por la atmósfera sufre una absorción parcial que depende del ángulo de incidencia respecto al suelo y de las condiciones atmosféricas, por lo que la energía disponible a nivel del suelo es menor (en promedio del orden de los $630 \text{ J/m}^2\text{s}$). La dinámica del sistema Tierra-Luna-Sol también crea unas interacciones gravitatorias sobre las masas oceánicas creando unos ascensos y descensos periódicos y locales del nivel del mar y constituyendo, por tanto, una fuente de energía potencial.

Las *FEP internas*, son las fuentes de energía inherentes a la constitución del planeta Tierra. La Tierra tiene una temperatura superficial media de unos 290K. Conforme nos adentramos hacia su interior la temperatura aumenta y en algunos lugares lo hace con un gradiente mucho más elevado; la energía que se puede aprovechar de estos focos calientes se conoce como energía geotérmica. Otra modalidad de energía interna de la Tierra es la asociada a determinados elementos (uranio y torio), susceptibles de sufrir reacciones de fisión y de suministrar calor explotable en centrales termonucleares. La radiactividad natural de algunos elementos existentes en la corteza terrestre se cree que es la fuente de calor generadora del magma y, en última instancia, de la energía geotérmica.

La radiación solar incidente en la Tierra (insolación) interacciona física y químicamente con la materia. Actúa sobre las masas de aire y de agua provocando fenómenos de transporte (evaporación, convección, gradientes de presión, condensación, etc.) que se manifiestan como corrientes fluviales, vientos, corrientes marinas y oleaje, constituyendo formas de energía cinética y/o potencial susceptibles de ser explotadas.

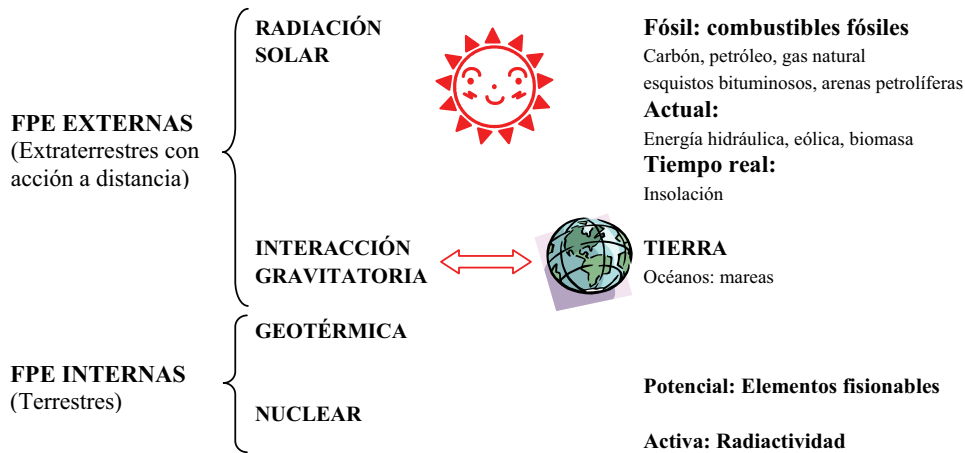


Fig. 2.1 Fuentes primarias de energía externas e internas

Una pequeña fracción del orden del 0,1% de la energía solar interceptada por la Tierra es aprovechada por vegetales, que son capaces de utilizarla en la síntesis de materia orgánica mediante reacciones fotoquímicas (fotosíntesis) y dan lugar a la biomasa.

La existencia de vegetales (seres autótrofos) y seres que se nutren de ellos más o menos directamente (seres heterótrofos) ha provocado al lo largo del tiempo la acumulación de sus restos (necromasa). Esta materia orgánica muerta no es químicamente estable y se descompone diferentemente según las condiciones ambientales.

En presencia de oxígeno atmosférico (o disuelto en el agua) sufre procesos de oxidación más o menos complejos que la reconvertirán en dióxido de carbono y agua.

En ausencia de aire (condiciones anaeróbicas), y según cuál sea la biomasa original y cuáles sean las condiciones de confinamiento (presión, temperatura, tiempo) dará lugar productos combustibles de tipo hidrocarbonado en estado sólido (carbones), líquido (petróleo crudo) o gas (gas natural), conjunto conocido genéricamente como combustibles fósiles.

Según se indica en la figura 2.1, la energía procedente de la radiación solar, según sea el tiempo de retraso que media entre su llegada y su explotación, puede ser: fósil (es decir, la que llegó a la Tierra hace millones de años dando lugar a los combustibles que explotamos en la actualidad); actual: la de los vientos y lluvias (con ciclos naturales que tienen una duración del orden de horas o días); y en tiempo real (por ejemplo, panel solar térmico o fotovoltaico).

En un apartado posterior se describirá someramente cada uno de los tipos de energía aquí apuntados, cómo se explotan y su importancia.

1.2 Demanda energética y fuentes de energía

El ser humano necesita un consumo mínimo energético vital para cubrir sus necesidades (actividad mecánica, regulación térmica, renovación de tejidos) que se puede establecer en unos 10000 kJ/día, y de este orden era el consumo de energía primaria per cápita en la remota prehistoria. Sin embargo, con-

2 Combustibles

2.1 Conceptos básicos sobre combustibles

En el contexto de una aplicación termoenergética se definirá el término *combustible* como “sustancia química con carácter reductor, capaz de reaccionar con el oxígeno (o con otro oxidante) de forma rápida y exotérmica”. Los productos de la reacción alcanzan temperaturas lo suficientemente elevadas para emitir radiación visible. Este tipo de reacción se denomina combustión. Para iniciar la combustión se requiere normalmente una considerable energía de activación (energía de ignición o de encendido). Una vez iniciada la reacción, la propia energía liberada se encarga de ir activando la mezcla reaccionante hasta alcanzar un régimen autotérmico. La apreciación visual de su desarrollo constituye la llama. En el caso que la fracción de energía liberada disponible llegue a ser insuficiente para seguir activando reactivos se colapsará la reacción y se producirá la extinción de la llama. También se extinguirá si la concentración de alguno de los reactivos se aparta de unos determinados límites, y en un extremo si uno de ellos se agota.

Desde un punto de vista termoenergético, los combustibles son contenedores de energía química asociada a su constitución. La liberación de esta energía exige que se produzca una reacción química (combustión), en el transcurso de la cual, tras romperse unos enlaces químicos débiles (los del combustible) se forman unos más fuertes (los de los productos de combustión). La diferencia entre las energías de enlace en productos y en reactivos será la que aparecerá como calor de combustión.

La inmensa mayoría de los combustibles utilizados tienen un *origen natural*. Atendiendo a su origen, los combustibles naturales pueden ser considerados como energía solar fósil. Estos combustibles son el resultado del ulterior metamorfismo (p, T, t) de los compuestos de origen fotosintético producidos por vegetales a lo largo de los tiempos. Dichos vegetales, a partir de H₂O, CO₂ y luz solar sintetizaron principalmente compuestos de fórmula general (CH₂O)₂⁶ que, juntamente con los animales que más o menos directamente se alimentaban de éstos, han dado lugar posteriormente al *petróleo crudo*, al *carbón* o al *gas natural*.

Los combustibles fósiles están compuestos por mezclas de compuestos orgánicos con moléculas que pueden ser muy sencillas, como en el caso del metano, constituyente principal del gas natural, o muy complejas, como las que aparecen en los carbones, cuyas moléculas pueden estar constituidas por casi un millar de átomos. Ahora bien, como consecuencia de un origen común, todos ellos están constituidos esencialmente por *carbono e hidrógeno*; en un segundo orden de magnitud: *oxígeno* (en determinados carbones puede constituir una fracción importante), nitrógeno, azufre y fósforo, y como componentes minoritarios: sodio, potasio, vanadio, calcio, magnesio, etc. De estos elementos constituyentes, unos tienen valor energético: C, H; otros diluyente o inerte O, N; otros dificultarán su utilización ya sea por generar contaminantes: S, N o bien por inducir corrosión en los equipos: V. Las impurezas minerales

⁶ La fórmula empírica de la materia viviente es C₁₄₂₈ H₂₉₆₀ O₁₄₂₈ N₁₆ P₁₈ S, según Criswell D.R. “Human Roles in Future Space Operations”, *Astronáutica Acta* 8, p. 1169-71, (1981).

pueden estar presentes también como consecuencia de hallarse dispersas en él y no ser rentable su separación del combustible, tal es el caso del FeS_2 que puede acompañar el carbón. Otro componente que acompaña los combustibles es el agua (combinada o como humedad). Ahora bien, aunque se trate de un mismo tipo de combustible fósil, su composición varía de un yacimiento a otro.

Según la naturaleza de la materia orgánica original y en función de las condiciones a que ha estado sometido el sedimento orgánico, se encuentran yacimientos de combustibles sólidos (carbón), líquidos (petróleo crudo) y gaseosos (gas natural).

Los combustibles naturales, especialmente en el caso del crudo de petróleo y en menor proporción en el caso del gas natural y del carbón, se someten a una serie de procesos físicos o químicos con el fin de obtener productos adecuados a cada tipo de uso. Estos combustibles derivados de los naturales los denominamos manufacturados. En el caso del petróleo crudo el proceso de separación de los componentes que lo integran, la modificación de éstos se denomina refino.

Estas operaciones pueden tener por objeto incrementar la fracción de gasolinas producidas o aumentar el número de octano de éstas con el fin de valorizar un producto y atender un mercado. En el caso del carbón, el mineral bruto se lava, se clasifica y frecuentemente las hullas se coquizan para atender las necesidades metalúrgicas.

Los llamados *combustibles sintéticos*, en rigor y desde un punto de vista energético global, sólo deberían comprender aquellas sustancias en las que para su obtención o síntesis únicamente se hubiese recurrido a materias primas ya oxidadas, tales como H_2O , CO_2 , carbonatos, hidróxidos, etc. Y, además, que la energía aportada en su síntesis se hubiese obtenido por una vía que no implique la combustión de combustibles naturales. Un ejemplo de combustible sintético, que podría tener importancia en un futuro, sería el hidrógeno obtenido por electrólisis del agua con energía eléctrica, generada por vía nuclear, hidráulica, solar, geotérmica, eólica, o por termólisis concentrando energía de insolación. Otro ejemplo lo constituye el metanol de síntesis (hidrogenación del dióxido de carbono). Sin embargo, es frecuente el uso del término *sintético* para la designación de combustibles altamente manufacturados, ya sea de tipo líquido procedentes del carbón hidrogenado a través de complicadas síntesis sinfuels o gaseosos: gasificación del carbón, gas natural de síntesis,...

El uso de combustibles puramente sintéticos en la actualidad sólo tiene justificación en aplicaciones muy concretas, en las que sus cualidades de actuación predominen sobre su coste (por ejemplo el hidrógeno o la hidracina y sus derivados en alimentación de cohetes espaciales).

Según el tipo de aplicación es más idóneo un combustible u otro. Así, es evidente que para la alimentación de un motor de combustión interna -en los que se hace necesario disponer de gran capacidad de su regulación- son más adecuados los combustibles líquidos o gaseosos por ser más fácil regular y controlar la alimentación y la dosificación de un fluido que no de un sólido. En la combustión en calderas la exigencia de que el combustible sea fluido no es tan marcada porque es frecuente hallar hogares alimentados con combustibles sólidos como carbón. Si la aplicación no es estacionaria (transporte), no será práctico el uso de combustibles gaseosos a causa de la poca masa almacenable en un depósito a presión y el elevado peso del citado contenedor, hechos que van en detrimento de la autonomía del vehículo. Ahora bien, en un caso de un motor estacionario, será conveniente contemplar la posible ventaja de alimentarlo con gas de red.

2.2 Petróleo crudo

El petróleo, del latín *petra oleum* es un combustible fósil de origen orgánico resultante del metamorfismo geológico y biológico de microflora y microfauna del tipo plancton que se acumuló junto con otros

sedimentos en el fondo del mar. El proceso se inició en el cámbrico hace 500 ó 600 millones de años. Si bien al petróleo se le conoce desde la edad antigua, el primer pozo (perforación) destinado a su explotación comercial como combustible fue el del coronel Drake quien, en 1823, en Titusville (EEUU), extrajo del orden de 1600 l/día de crudo de 23 m de profundidad. Desde entonces la explotación de yacimientos de petróleo ha crecido vertiginosamente 1000 t en 1859,...700.000 t en 1870,... 1,504·10⁹ t en 1965,... y 4,19·10⁹ t en 1994.

El petróleo crudo es una mezcla de miles de compuestos predominantemente de tipo hidrocarburo. Su composición varía según la ubicación del yacimiento; en general: C 83 ÷ 87 %, H 11 ÷ 14 %, . Incorpora, además, otros componentes minoritarios tales como S, N, O, P, Na, K, V, etc. Su aspecto físico también es muy variable, desde el de un líquido casi incoloro y de baja viscosidad (4 ÷ 10 cS) como el de Sumatra, al de un fluido altamente viscoso (1200 cS) y de color pardo-negruzco como el que se extrae en Venezuela. La tradicional característica principal que define la calidad de un crudo es su densidad ya que en cierta medida es un indicativo de la fracción de componentes más preciados que puede suministrar por destilación. Tal como se verá, todavía es frecuente expresar la densidad de los crudos en °API, unidad tecnológica de medida que es función de la inversa de la densidad; y por tanto, cuantos más grados API más valor tiene el crudo.

Existen yacimientos de petróleo en muchos lugares del mundo pero la mayoría (95%) se concentran en el hemisferio norte.

Para efectuar una primera clasificación de los crudos se determina el contenido en tres tipos de hidrocarburos:

- Parafinas e isoparafinas = hidrocarburos saturados lineales o ramificados
- Naftenos = hidrocarburos saturados cíclicos o policíclicos
- Aromáticos = hidrocarburos bencénicos, naftalénicos, etc

2.2.1 Derivados manufacturados del crudo de petróleo.

Al ser el crudo de petróleo una mezcla de un gran número de productos químicos de estructuras y pesos moleculares muy distintos, se procede a procesos de refinó que tienen como objetivo satisfacer al menor coste la demanda de productos petrolíferos (GLP, gasolina, petróleo, gasóleo, fuelóleo ligero, fuelóleo pesado, asfaltos, y productos intermedios para la industria de plásticos entre otras).

La operación clásica se fundamenta en una serie de procesos físicos: el crudo, tras ser sometido a un desgasificado, lavado y secado, se somete a una destilación fraccionada primero a presión atmosférica y seguidamente al vacío. El intervalo de temperaturas a la que destila una fracción (corte) define un tipo de combustible. En orden de punto de ebullición creciente los productos típicos de la destilación fraccionada son:

Gas combustible (metano + etano + eventual exceso de propano)
 Gas húmedo, *wet gas* (propano + butano para GLP)
 Gasolina directa ligera (LSR) (32-90°C)
 Nafta o gasolina directa pesada (HSR) (90-190°C)
 Éter de petróleo (*white spirit*)
 Queroseno para aviación y turbinas de gas (190-270°C)
 Petróleo lampante (de lámpara)
 Gasóleos diésel (270 - 430°C - vacío: 570°C)
 Fuelóleos (calefacción)
 Residuo (parafinas, asfaltos)

3 Combustión

3.1 Los reactivos: combustible y aire

La mayoría de procesos de combustión de interés energético tienen lugar empleando el aire como comburente: el sistema reaccionante está constituido por *combustible + aire* que da unos *productos de combustión*. Es por ello que a modo de introducción, y una vez estudiadas las características y propiedades de los combustibles, se incluye a continuación una breve descripción de la naturaleza, composición y propiedades del aire que tendrán más incidencia en la combustión técnica.

3.1.1 Aire atmosférico

El aire atmosférico es una mezcla de gases, cuya composición en la homósfera (altitud 0-100 km) es prácticamente constante, a excepción del contenido en humedad, que varía entre el 0,1 al 10 % en volumen, y del contenido en dióxido de carbono que, debido a la intensiva explotación de los combustibles fósiles, ha ido aumentando en estas últimas décadas.

La composición del aire de referencia que hemos adoptado en los cálculos aproximados de combustión se ha establecido reduciendo la composición del aire atmosférico real a sus dos componentes principales: N_2 y O_2 . Para que la suma de las fracciones molares de cada componente sea la unidad, al contenido original de N_2 se le han sumado el resto de componentes. La composición de partida y la resultante es la que se incluye en la tabla 2.9.

3.1.2 Aire simplificado

Tal como se ha indicado, para aplicaciones de combustión técnica es normalmente suficiente considerar el aire comburente constituido únicamente por sus dos componentes principales: 21 % en volumen de oxígeno O_2 y 79 % en volumen de “nitrógeno atmosférico” N^*_2 .

Ello corresponde a la proporción molar:

$$21/21 O_2 + 79/21 N^*_2 \cong O_2 + 3,76 N^*_2$$

relación que expresada en base másica es:

$$1 \text{ mol} \times 32 \text{ g/mol } O_2 + 3,76 \text{ mol} \times 28,174 \text{ g/mol } N^*_2 \cong 32 \text{ g } O_2 + 105,9 \text{ g } N^*_2$$

$$1 \text{ kg } O_2 + 3,31 \text{ kg } N^*_2$$



El llamado nitrógeno atmosférico viene a ser un elemento aparente que incluye todos los componentes que no son oxígeno.

El peso molecular aparente de este N_2^* , calculado con los componentes mayoritarios distintos al oxígeno es:

$$M_{N_2^*} = (0,78085 * M_{N_2} + 0,00934 * M_{Ar} + 0,00035 * M_{CO_2}) / 0,79 \approx 28,174 \text{ g/mol}$$

Tabla 2.9 Composición del aire atmosférico seco. Fracciones molares x_i y fracciones másicas y_i reducidas a los dos componentes mayoritarios.

Componente	Masa molar [g/mol]	% volumen	ppm (volumen)	x_i adoptada en combustión simple	y_i adoptada en combustión simple
N ₂	28,0135	78,083±0,004		0,79	0,77
O ₂	31,9988	20,945±0,002		0,21	0,23
Ar	39,948	0,934±0,001			
CO ₂	44,098	0,035±0,001			
Ne	20,1797	ppm × 10 ⁻⁴	18,18±0,04		
He	4,0026	ppm × 10 ⁻⁴	5,24±0,004		
Kr	83,8	ppm × 10 ⁻⁴	1,14±0,001		
H ₂	2,016	ppm × 10 ⁻⁴	0,50		
NO	30,0061	ppm × 10 ⁻⁴	0,31		
CO	28,0104	ppm × 10 ⁻⁴	0,12		
NH ₃	17,031	ppm × 10 ⁻⁴	0,10		
Xe	131,29	ppm × 10 ⁻⁴	0,087	Σ = 1,00	Σ = 1,00

La masa molar aparente del aire seco de esta composición resulta

$$\overline{M}_A = 28,965 \text{ g/mol}$$

Expresiones de la composición del aire

Seco: $O_2 + 3,728 N_2 + 0,0045 Ar + 0,0017 CO_2$

Simplificado: $O_2 + 3,76 N_2^*$ (N_2^* : nitrogeno aparente $M = 28,174 \text{ g/mol}$)
 $1 \text{ kg } O_2 + 3,31 \text{ kg } N_2 = 4,31 \text{ kg Aire}$
 $1 \text{ kg Aire} = 0,232 \text{ kg } O_2 + 0,768 \text{ kg } N_2$

3.2 Estequiometría de la combustión con aire

La gran mayoría de las combustiones técnicas de aplicación energética, si se exceptúan las empleadas en sopletes oxiacetilénicos, motores de cohete, etc., se efectúan con aire como comburente. Con el fin de abordar el tratamiento analítico-numérico de la combustión, es habitual referirse a unos procesos hipotéticos idealizados. Idealizados, en el sentido de que suponemos que sólo dependen de unos parámetros y de unas variables seleccionadas.

Se pueden efectuar hipótesis respecto a las reacciones químicas que tienen lugar, al desprendimiento de energía, a la velocidad con que transcurren, al intercambio de calor con el ambiente, etc. En este apartado se tratarán los procesos en los que las hipótesis se refieren a las reacciones químicas que tienen lugar y de ellas se deducirán las relaciones entre las masas del combustible, del aire y de los productos.

La llamada *estequiometría de la combustión* se ocupa del estudio de las relaciones másicas (o volumétricas) entre reactivos (combustible + comburente) y los productos formados. La aplicación de balances de masa y de elementos, juntamente con unas hipótesis relativas a las reacciones que tienen lugar, permite establecer modelos de cálculo de combustión que posibilitan resolver problemas de interés tecnológico.

Se presentan dos tipos de problemas fundamentales: la *predicción* y el *diagnóstico*.

En el caso de la predicción (*a priori*), dado un combustible se trata de determinar el aire mínimo necesario para poder alcanzar la combustión total y los correspondientes productos que se forman en función de la dosificación. Será también un primer paso para abordar problemas de combustión mediante modelos más complejos.

En el caso de diagnóstico (*a posteriori*), partiendo de unos datos analíticos de la composición de los productos de combustión (normalmente % CO_2 y % O_2) y conociendo la composición del combustible empleado, se trata de averiguar la dosificación (exceso o defecto de aire). Dicho conocimiento resulta de interés en áreas tales como: la verificación del rendimiento de operación de un quemador acoplado a una caldera, el dosado de combustible en un motor de combustión interna, la puesta a punto de un sistema de carburación, etc.

3.2.1 Combustión estequiométrica con oxígeno

Denominamos *combustión estequiométrica o neutra* al proceso de combinación de todos los elementos reductores que constituyen el combustible con el oxígeno estrictamente necesario para dar unos productos oxidados a su grado más estable de oxidación en las condiciones ambientales (25 °C y 0,1 MPa = 1 bar).

Así, los elementos, típicamente constituyentes de los combustibles darán los siguientes productos:

C	→	CO_2
H	→	HO
N	→	N_2 (Se considera no oxidable)
S	→	SO_2
O		Caso de existir contribuirá a la oxidación de los anteriores.

De ello se deduce que la reacción de combustión estequiométrica de un combustible con fórmula general $\text{C}_a \text{H}_b \text{O}_c \text{N}_d \text{S}_e$ será:



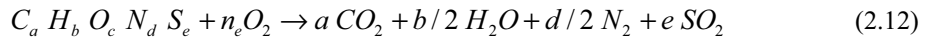
El número de átomos de oxígeno para totalizar la citada combustión, expresada en moles de O por mol de combustible, constituye el número estequiométrico de moles de oxígeno atómico (n_{eO})

Tal como se deduce de la reacción, dicho número estequiométrico de moles de O toma el valor

$$n_{eO} = (2a + b/2 + 2e) - c$$

que en el caso de referirse a oxígeno molecular (O_2) será:

$$n_{eO_2} = n_{eO} / 2$$



Las reacciones totales estequiométricas constituyen los procesos de referencia utilizados en la definición de los poderes caloríficos de los combustibles, puesto que en cierta medida indican el máximo calor generable por combustión.



Ejercicio de repaso conceptual

Escribir las reacciones de combustión estequiométrica con oxígeno O_2 de los siguientes combustibles:

1. Gas natural (supuesto metano = CH_4)
2. Gas butano puro C_4H_{10}
3. Etanol C_2H_5OH

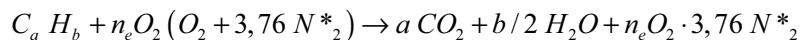
3.2.2 Combustión estequiométrica con aire seco

En el caso de que en la combustión de referencia se emplee el aire como comburente, para totalizar la combustión se requerirá de un número estequiométrico de moles de aire que deberá contener el citado número estequiométrico de moles de oxígeno determinado anteriormente: $n_e O_2$.

Haciendo uso de la composición molar aproximada del aire y teniendo en cuenta que cada mol de O_2 irá acompañado de 3,76 mol de N_2 aparente:



la ecuación estequiométrica de combustión del hidrocarburo genérico $C_a H_b$ se puede escribir como:



Para obtener la relación estequiométrica expresada en masa de (aire/combustible), bastará pasar de moles a kilogramos, o sea:

$$r_{eA} = \frac{n_{eO_2} \times (32 + 3,76 \times 28,174)}{n \times 12 + m \times 1} \quad (2.14)$$

Dicho r_{eA} representa por tanto, la mínima cantidad de aire seco necesario para conseguir la combustión total de 1 kg de combustible.

Esta masa estequiométrica dividida por la densidad del aire normal en $[kg/m^3 N]$ nos dará el *volumen estequiométrico de aire*¹⁴, llamado especialmente en técnica gasística *poder comburívoro* del combustible:

$$V_{eA} = \frac{r_{eA}}{\rho_{A,N}} [m^3_{A,N} / kg_{comb}] \quad (2.15)$$

¹⁴ Aquí se ha expresado en relación de una unidad de masa de combustible, pero en el caso de que este fuese gaseoso se expresa en m^3/m^3 .

Módulo 3

Energía solar y acumulación térmica

Introducción y objetivos del módulo

En general se pretende proporcionar al alumno una información sólida aunque no exhaustiva sobre la energía solar, la acumulación de energía y sus aplicaciones.

Al finalizar este módulo, el alumno debe estar en condiciones de:

- Poder calcular la disponibilidad solar instantánea para cualquier superficie terrestre.
- Conocer la problemática del diseño de colectores, puntos críticos y mejoras en estudio.
- Conocer los sistemas de acumulación de energía por calor sensible y por calor latente, sus ventajas y desventajas, y las condiciones de diseño.
- Conocer todos los principales elementos y su conexión en una instalación solar completa destinada a agua caliente sanitaria (ACS).
- Conocer las principales variables de diseño y los valores típicos que se alcanzan.
- Conocer en estas instalaciones los diferentes niveles de simulación existentes y cuándo acudir a uno u otro nivel.

1 Disponibilidad solar

1.1 La constante solar

Se define como constante solar el valor de la irradiación solar en la órbita terrestre integrada para todas las longitudes de onda. Corresponde al valor medido fuera de la atmósfera terrestre (valor exoatmosférico) para una superficie colocada perpendicularmente a los rayos solares. Su valor es de $I_0=1368 \text{ W/m}^2$, aunque fluctúa a lo largo del año al no ser la órbita terrestre exactamente circular sino elíptica; así, es máxima en el perihelio (mínima distancia Sol-Tierra) y mínima en el afelio. También varía la constante solar debido a las variaciones en la actividad solar. En este último caso son del orden del 0.1 % del valor de la constante solar entre el máximo y el mínimo de actividad solar (ciclos de aproximadamente 11 años provocados por actividad magnética y caracterizados por las llamadas manchas solares - zonas oscuras - y las fáculas - zonas brillantes -) y afectan sobre todo a la zona ultravioleta. Estas variaciones aunque son oscilaciones pequeñas de irradiación solar, parecen ser las responsables de alteraciones importantes en el clima terrestre.

A partir del valor de la constante solar se puede evaluar inmediatamente, sin más que atender a la distancia Sol-Tierra, el flujo total de radiación en la superficie solar (I_{sol}), teniendo en cuenta que el vacío actúa como medio transparente perfecto y que por tanto la energía total se debe conservar,

$$I_{sol} = \frac{I_0 4\pi R_{sol-tierra}^2}{4\pi R_{sol}^2} \quad (3.1)$$

Aproximando el Sol a un cuerpo negro ($\epsilon=1$) y aplicando la ley de Stefan Boltzmann ($I=\epsilon\sigma T^4$) obtenemos una temperatura efectiva de la superficie solar de 5777 K.

Para determinar la temperatura efectiva de un planeta, considerándolo como negro, efectuamos un balance general de energía sobre el planeta. Si consideramos despreciable el flujo calorífico generado en el planeta (energía geotérmica, tanto la conductiva -a través del manto terrestre-, como la convectiva -volcanes y géisers) y la energía acumulada en forma química por las plantas (fotosíntesis), el balance resultará:

Energía neta de radiación solar = energía saliente por radiación térmica

$$I_{o,planeta} (1-A)\pi R_{planeta}^2 = \sigma T_{e,planeta}^4 4\pi R_{planeta}^2 \quad (3.2)$$

donde A es el albedo (porcentaje de energía reflejada por el planeta). Para la Tierra, el albedo es de 0.3 y $R_{Tierra}=6.35 \cdot 10^6 \text{ m}$, con lo que se obtiene una temperatura efectiva de T_e , Tierra = 255K. Nótese cómo la temperatura efectiva de nuestro planeta es mucho más baja que la temperatura media de la superficie

terrestre, que es de 288 K. La razón está en el fenómeno de efecto invernadero que provocan los gases atmosféricos.

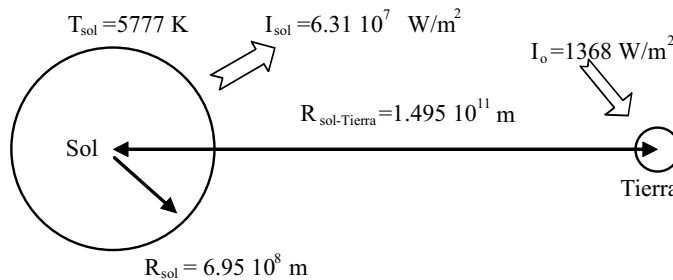


Fig. 3.1 Relación entre la constante solar y la radiación emitida por el Sol

Ejercicio 1.1

Determinar la constante solar y la temperatura efectiva en el planeta Marte. $R_{\text{Sol-Marte}} = 2.25 \cdot 10^{11} \text{ m}$, $R_{\text{Marte}} = 3.4 \cdot 10^6 \text{ m}$, albedo $A = 0.15$, constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$. Para este planeta la temperatura efectiva coincide prácticamente con la temperatura media superficial debido a que la atmósfera marciana es muy tenue.

1.2 Atenuación atmosférica de la radiación solar

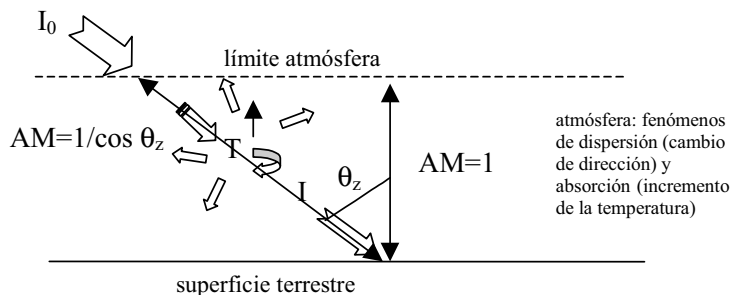


Fig. 3.2 Esquema de la atenuación solar provocada por la atmósfera

La atmósfera terrestre se comporta como un medio participante (también llamado no transparente) a la radiación solar. Ello implica que la radiación solar exoatmosférica sufre una atenuación en su camino hacia la superficie terrestre. La atenuación es debida a dos factores: a la dispersión y a la absorción, tal como indica la figura 3.2

La dispersión es el fenómeno por el cual cierta porción de radiación sufre un cambio en su dirección original de propagación. La dispersión no afecta por igual a todo el espectro de radiación, sino que afecta sobretodo a longitudes de onda pequeñas (menores de $0.6 \mu\text{m}$). Es provocada por la interacción de la radiación con las moléculas de aire (dispersión de Rayleigh), con el agua (en su forma líquida -nubes- o vapor), o con los aerosoles (partículas de polvo sólidas). La dispersión acaba produciendo finalmente que una parte importante de la radiación solar se redirija hacia el espacio exterior (es lo que se llama reflexión).

2 Captación solar

2.1 Descripción física

El captador o colector solar plano es el elemento de captación solar térmica más utilizado. Su función es la de convertir la radiación solar en energía térmica. La energía térmica se traduce en incrementar la temperatura de un fluido (agua, aceite o aire). No posee ningún sistema de seguimiento solar sino que se monta de forma estacionaria con una inclinación que permita la máxima captación solar según el periodo del año en que opera. Trabaja tanto con radiación directa como difusa. Su campo de aplicación típico es para temperaturas medias de hasta 80°C, aunque con cambios en el diseño se utiliza para procesos a más baja o a más alta temperatura. Sus elementos constitutivos típicos son:

- Cubierta transparente. Constituye la parte superior y exterior del colector y, aunque se han ensayado otros materiales, normalmente se trata de vidrio. Su característica principal es su alta transmitancia a la radiación solar y a la vez su opacidad para la radiación térmica, que provoca el llamado efecto invernadero. Se prescinde de la cubierta en el caso de destinarse el colector solar al calentamiento de piscinas.
- Placa absorbente. Se sitúa debajo de la cubierta dejando entre ambos elementos una cámara de aire. En este elemento se absorbe la energía solar y es por tanto el punto de más alta temperatura del colector. Típicamente es un metal con un tratamiento superficial que combine una alta absorción solar con una reducida emisión térmica.
- Tuberías o conductos. Se sitúan con muy buen contacto térmico, normalmente soldados, a la placa absorbente. Es por su interior por donde circula el fluido que se quiere calentar (fluido caloportador).
- Aislante. Aísla térmicamente las tuberías del medio exterior. Está constituido de un material de baja conductividad térmica (material liviano con alto contenido de aire).

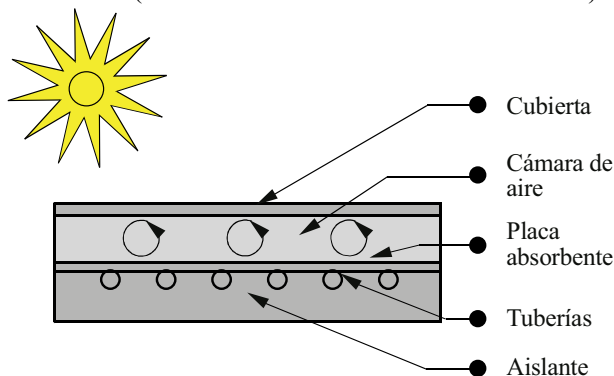


Fig. 3.7 Esquema de un captador solar plano de agua

Ejercicio 2.1

Razona para qué climas sería interesante utilizar más de una cubierta solar.

2.2 Ecuación básica de transferencia de calor

Es la ecuación de la energía formulada para régimen estacionario, hipótesis aceptable en captadores solares. Establece que el calor útil, Q_u , que proporciona un colector o captador solar es igual a la ganancia solar, Q_{inc} , menos las pérdidas convectivas – radiativas, Q_{lossc} :

$$Q_u = Q_{inc} - Q_{lossc} = I_T A_c - U_L A_c (T_p - T_a) \quad (3.11)$$

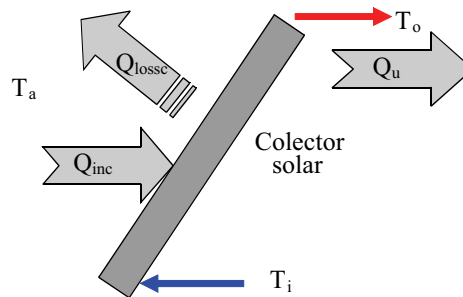


Fig. 3.8 Calores involucrados en un colector solar plano

La anterior ecuación convenientemente manipulada, que exprese la temperatura de la placa absorbente de los colectores, T_p , en función de la temperatura del fluido a la entrada de los mismos, T_i , resulta de la siguiente forma:

$$Q_u = F_R A_c [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (3.12)$$

donde:

Q_u : calor útil que proporciona el captador (W), en forma de calor sensible del fluido caloportador,

A_c : área de captación útil del captador (m^2),

S : ganancia solar sobre la placa absorbente $S = (\tau\alpha)I_T$ (W/m^2),

U_L : coeficiente global de pérdidas (W/m^2K),

T_i : temperatura del fluido caloportador a la entrada ($^{\circ}C$),

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}C$),

FR : cociente entre el calor útil y el calor útil teórico (máximo) que se produciría si la temperatura media de la placa absorbente (T_p) fuera igual a T_i .

Este calor útil va destinado a aumentar el calor sensible del fluido que circula por el captador, es decir,

$$Q_u = m_c C_p (T_o - T_i) \quad (3.13)$$

donde:

- m_c : caudal del fluido caloportador (kg/s),
 C_p : calor específico a presión constante (J/kgK),
 T_o : temperatura del fluido a la salida del captador (°C, K),
 T_i : temperatura del fluido a la entrada del captador (°C, K).

Se pueden hacer las siguientes observaciones:

1. Las pérdidas son directamente proporcionales a la diferencia de temperatura entre T_i y T_a .
2. Se puede producir una Q_u negativa, que indicaría que el fluido a la salida del captador tendría una temperatura más baja que a la entrada.
3. El diseño de colectores va encaminado a disminuir F_R y U_L . Muchas veces disminuir U_L es a expensas de disminuir S (o aumentar las pérdidas ópticas).

En lugar de trabajar dimensionalmente es preferible, para generalizar el resultado, hacerlo de forma adimensional, y así obtenerse el llamado rendimiento del captador:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{inc}} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (3.14)$$

De forma aproximada, esta ecuación es una recta: el primer término es la ordenada en el origen y $F_R U_L$ representa la pendiente de la recta (Fig. 3.9). Nótese que el máximo rendimiento ($F_R(\tau\alpha)$) se consigue si $T_i = T_a$ o bien para radiaciones incidentes muy elevadas ($I_T \rightarrow \infty$). En estos casos el rendimiento puede ser del 80%. Ahora bien, el rendimiento medio anual está alrededor de un 45% en aplicaciones destinadas a la obtención de agua caliente sanitaria.

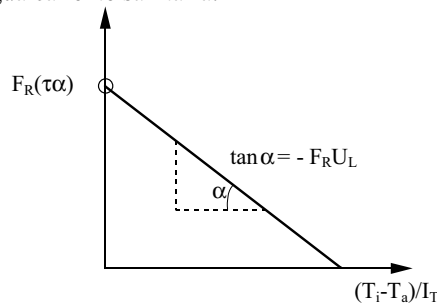


Fig. 3.9 Curva de rendimiento del colector η en función de $(T_i - T_a)/I_T$

Tabla 3.2 Parámetros típicos de rendimientos de captadores solares planos

Tipo de colector	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$ (W/m ² K)
No selectivo (ver punto 2.7)	0.8	6 – 7
Selectivo	0.8	4 – 5
De piscina (sin cubierta)	0.9	10

Ejercicio 2.2

Suponiendo un rendimiento constante del 50% para un captador solar de agua ($C_p = 4180$ J/kgK) y un caudal de $m_c = 0.05$ l/s, ¿qué incremento de temperatura del fluido caloportador ($T_o - T_i$) se obtendrá con un área de captación de $A_c = 2$ m² y una energía solar incidente de $I_T = 1000$ W/m²?

3 Acumulación térmica

3.1 Descripción física de unidades típicas de acumulación

La intermitencia de la radiación solar hace absolutamente imprescindible utilizar algún sistema de acumulación que permita aprovechar la energía que en determinados momentos sobra para aquellos otros momentos en que hay un déficit. Por tanto, algún sistema de acumulación estará siempre presente en toda instalación solar situado entre la captación y la carga a satisfacer. En instalaciones solares existen básicamente dos sistemas de acumulación: el tanque de agua y el lecho de piedras, en función de si el colector solar es de agua o aire respectivamente.

El tanque de agua es el sistema empleado casi exclusivamente en instalaciones solares destinadas a la producción de agua caliente sanitaria. Consiste en un tanque cilíndrico convenientemente aislado. Hay un circuito de carga procedente de captación y un circuito de descarga hacia la demanda. El volumen del tanque de acumulación constituye un importante variable en el diseño de la instalación. Normalmente oscila entre 50 y 100 litros por metro cuadrado de captación.

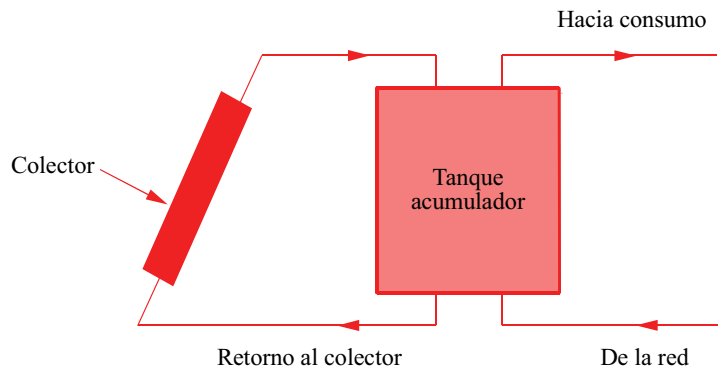


Fig. 3.12 Esquema de tanque solar integrado en el colector

El lecho de piedras constituye el sistema de acumulación utilizado cuando los colectores solares son de aire. Consiste en una cavidad paralelepípedica llena de piedras (cantos rodados) a través de la cual se hace circular alternativamente aire para calentar el lecho (carga) o para calentar el aire (descarga). El tamaño de los cantos oscila entre 1 y 3 cm. Las dimensiones globales del lecho oscilan entre 0.15 y 0.35 m³ por metro cuadrado de captación. La profundidad del lecho oscila típicamente entre 1.25 y 2.5 m. No debe ser muy elevada, porque la caída de presión sería enorme, y tampoco muy pequeña, pues permitiría la adecuada transferencia de calor entre el aire y los cantos.

Un tercer sistema que tanto puede servir para colectores de agua como de aire es la acumulación por calor latente. En este caso se aprovecha el alto calor latente que experimentan ciertas sustancias durante el cambio de fase sólido-líquido. La ventaja de este sistema es que permite la acumulación a muy bajas temperaturas (a la temperatura de cambio de fase) y con un volumen reducido; la desventaja está

en la dificultad de encontrar un material apropiado y en el diseño de estas unidades. Las unidades de cambio de fase por calor latente deben tener una alta superficie de intercambio de calor que ponga en contacto el fluido caloportador con el material de cambio de fase (PCM).

3.2 Ecuaciones características

Acumulación por tanque de agua

El agua es un material ideal para procesos de acumulación por tener la mayor capacidad específica de todos los materiales (4180 J/kg°C) junto con una densidad aceptable (1000 kg/m³). Ello hace posible acumular grandes cantidades de energía a bajas temperaturas y en un espacio relativamente pequeño. Asumiendo una única temperatura para todo el tanque (tanque no estratificado) y que se proporciona energía auxiliar dentro del tanque, podemos efectuar el siguiente balance térmico (Fig. 3.13):

energía acumulada = calor entrante + energía auxiliar - calor saliente - pérdidas térmicas

$$E_{acum} = Q_u + Q_{aux} - Q_{tank} - Q_{loss} \quad (3.19)$$

De donde, desarrollando los térmicos de energía acumulada y energía perdida tenemos que:

$$mC_p \frac{dT_s}{dt} = Q_u + Q_{aux} - m_s C_p (T_s - T_{red}) - UA(T_s - T_a) \quad (3.20)$$

donde:

- m: cantidad de agua (kg),
- T_s: temperatura que alcanza el tanque no estratificado (°C, K),
- t: tiempo (s),
- Q_u: calor proveniente del campo de colectores y analizado en el anterior capítulo. Sería necesario descontar las pérdidas a través del sistema de distribución (W),
- Q_{aux}: energía auxiliar proporcionada al tanque de acumulación para conseguir que la temperatura de entrega a la carga sea la apropiada. A veces, ésta se proporciona fuera del tanque solar (W),
- m_s: consumo de ACS (kg/s),
- UA: representa el coeficiente de pérdidas a través del tanque (W/K),
- T_a: temperatura ambiente que rodea al tanque de acumulación (°C, K),

El método más sencillo de proporcionar energía auxiliar al tanque de acumulación es añadiendo una resistencia eléctrica posicionada a la salida del tanque. Sin embargo, resulta más eficiente proporcionar

esta energía a la salida del tanque de acumulación, es decir colocar la energía auxiliar en serie al tanque de acumulación.

Cabe hacer notar que el calor útil, Q_u, proporcionado por el colector dependerá precisamente del resultado de la anterior ecuación, ya que ésta proporciona T_s, que será (salvo pérdidas) la temperatura de entrada de los captadores. Es por ello que la anterior ecuación deberá ser resuelta conjuntamente con la ecuación característica de un colector solar plano.

4 Instalaciones solares

4.1 Descripción física de instalaciones de ACS

Se limitará aquí la explicación a aplicaciones de instalaciones solares destinadas a la producción de ACS (agua caliente sanitaria), por ser esta aplicación la que concentra la mayoría de las instalaciones realizadas hoy en día. Todas ellas tienen en común que se utiliza como captador solar el colector solar plano de agua y como acumulador el tanque de agua.

Una primera división la podemos establecer entre instalaciones en donde el movimiento del agua es por convección natural o por convección forzada.

Las instalaciones solares de ACS por *convección natural* (o de termosifón, esquema 0) son las más simples al carecer de bomba de circulación. Sus dos principales elementos son el captador solar y el tanque de acumulación. Éste último debe estar siempre por encima del primero y el captador debe tomar el agua del tanque por su parte inferior y enviarla a su parte superior para aprovechar al máximo la estratificación térmica del tanque. El flujo de agua depende de la insolación solar. Éste es cero si la insolación es cero y se regula de forma proporcional a la intensidad de la radiación solar. Típicamente el colector y el tanque se suministran de forma conjunta e indivisible. Su rango de aplicación es para instalaciones con demanda muy pequeña (segunda residencia) y para aquellos climas en donde no hay heladas frecuentes.

Las instalaciones solares de ACS por *convección forzada* (esquemas 1, 5, 7) son las más utilizadas pues permiten un mayor control del funcionamiento de la instalación solar. En este caso el caudal, a través de los captadores, es el enviado por una bomba o circulador. La regulación del circulador (encendido y apagado) se efectúa con un termostato diferencial (apartado 4.2). Para evitar problemas de congelación del agua en los captadores se utiliza un intercambiador para separar la captación de la acumulación, que es donde se encuentra el agua destinada al consumo. Ello permite utilizar en el circuito de captación agua con anticongelante (sobretudo se utiliza agua más etilenglicol). Para instalaciones medianas-grandes (mayores a 25 m²) se recomienda utilizar dos tanques. Uno destinado a la acumulación solar exclusivamente y el otro destinado a proporcionar la energía suplementaria. De esta forma el rendimiento global de la instalación mejora sensiblemente al estar el fluido caloportador en los captadores a menor temperatura.

Tabla 3.6 Resumen de las instalaciones solares representadas

	Intercambiador captador - acumulador	Número de tanques solar + convencional	Apoyo energético
Esquema 0	-	1	Eléctrico
Esquema 1	Interno	1	Eléctrico
Esquema 5	Externo	2	Eléctrico
Esquema 7	Externo	2	Intercambiador externo

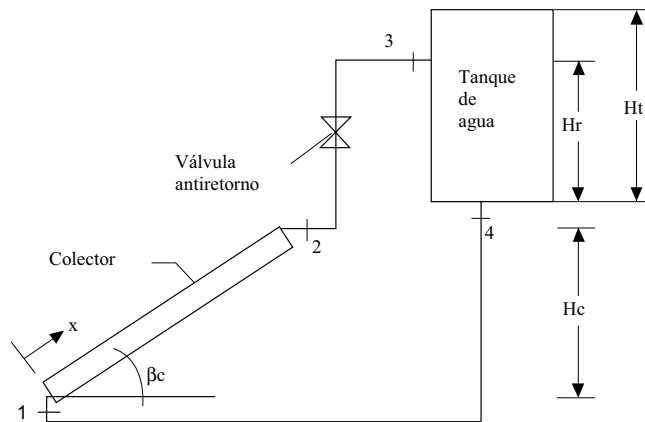


Fig. 3.15 Esquema de una instalación solar de ACS con convección natural

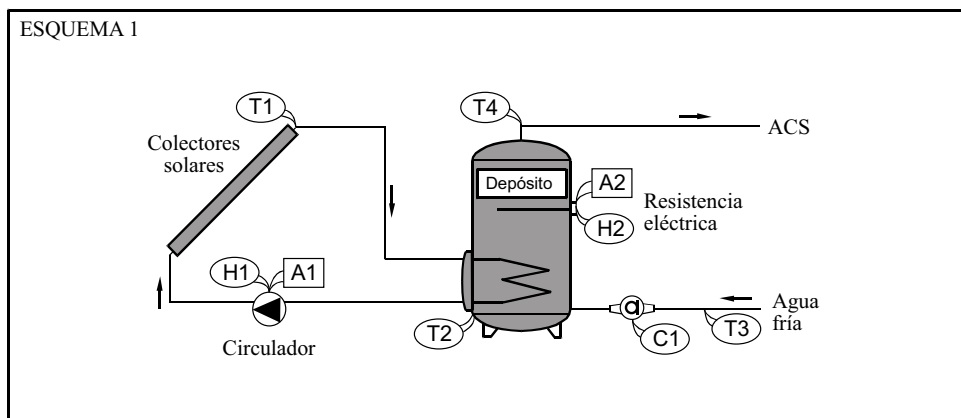


Fig. 3.16 Esquema de una instalación solar de ACS con convección forzada

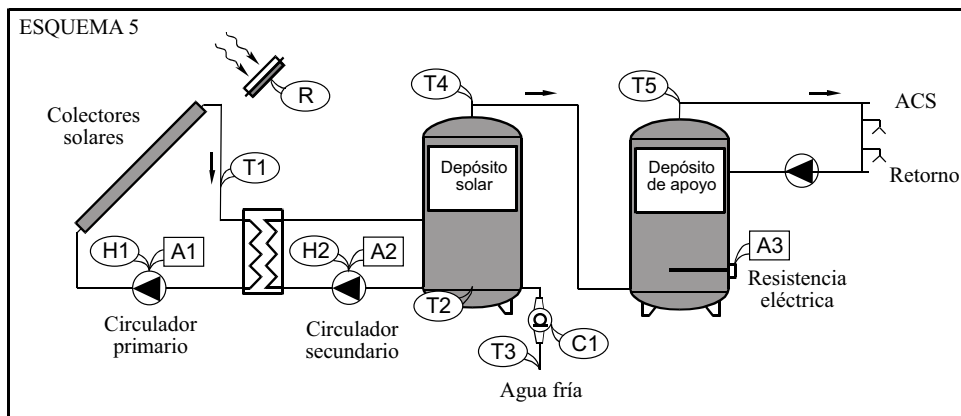


Fig. 3.17 Esquema de una instalación solar de ACS con convección forzada

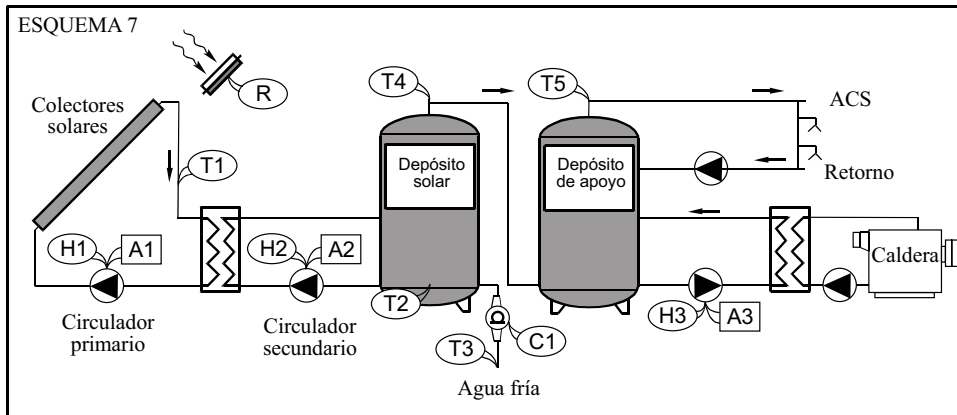


Fig. 3.18 Esquema de una instalación solar de ACS con convección forzada

4.2 Elementos auxiliares: intercambiadores, bombas, reguladores

En nuestras latitudes es casi imprescindible el uso de un intercambiador que separe el agua de consumo del agua que circula a través de los captadores. En instalaciones familiares el intercambiador se sitúa en el mismo tanque acumulador, en forma de serpentín interior o de envoltorio del tanque solar. El intercambiador hace disminuir el rendimiento global del colector al hacer llegar a los colectores un fluido más caliente que en su ausencia. La eficacia de este intercambiador integrado en el tanque no es muy elevada debido a que en el tanque el intercambio de calor es sólo por convección natural. La eficacia del intercambiador puede ser del $\epsilon=30\%$ y el coeficiente global de transmisión de calor de $600\text{ W/m}^2\text{K}$. Para instalaciones grandes se recomienda utilizar un intercambiador exterior que tenga más altas prestaciones. El intercambiador más utilizado en energía solar es el llamado intercambiador de placas. Es un intercambiador que permite en unas dimensiones muy pequeñas intercambiar gran cantidad de calor. Consiste en una sucesión de placas por donde circula alternativamente el fluido caliente y el frío. Las placas presentan una serie de estrías o corrugaciones que permiten aumentar la superficie de intercambio de calor y provocar la turbulencia del flujo, con lo cual aumenta la eficacia del intercambio. La eficacia media puede llegar a ser del $\epsilon=85\%$ y el coeficiente global de transmisión de calor de $4000\text{ W/m}^2\text{K}$.

Las bombas o circuladores utilizados en aplicaciones solares son bombas todo-nada de bajo caudal (0.015 kg/s por m^2 de captación). Vienen reguladas por centralitas diferenciales, las cuales toman la decisión de puesta en marcha o paro de las bombas en función de la diferencia de temperatura entre dos puntos. Así, definiendo:

- T_{high} : temperatura a la salida de captadores,
- T_{low} : temperatura en la parte inferior del tanque,
- ΔT_{on} : diferencia de temperatura para encender las bombas,
- ΔT_{off} : diferencia de temperaturas para apagar las bombas.

la bomba se pone en marcha cuando está parada y

$$T_{\text{high}} - T_{\text{low}} > \Delta T_{\text{on}}$$

y permanece en marcha hasta que

$$T_{\text{high}} - T_{\text{low}} < \Delta T_{\text{off}}$$

Ejercicios

Test de autoevaluación

1. La constante solar

- a) está referida a una superficie perpendicular a la dirección solar.
- b) no varía a lo largo de los meses del año.
- c) está referida a una superficie horizontal.
- d) sería la misma para el planeta Marte.

2. La radiación solar al atravesar la atmósfera

- a) no sufre ninguna variación.
- b) se altera por el fenómeno de absorción atmosférica.
- c) se altera por el fenómeno de absorción y dispersión atmosférica.
- d) se ve alterada por el fenómeno de emisión, absorción y dispersión atmosférica.

3. La inclinación que debe tener una superficie orientada al sur para recibir la máxima cantidad de radiación solar al mediodía.

- a) depende de las propiedades físicas de la superficie analizada.
- b) depende del día del año.
- c) es exactamente igual a la latitud.
- d) es aproximadamente igual a 40° .

4. ¿Cuál es la utilidad del vidrio en un colector solar plano?

- a) Filtrar las frecuencias más energéticas del espectro solar.
- b) Aumentar la energía incidente sobre la superficie captadora.
- c) Reducir las pérdidas por convección y radiación térmica de la superficie captadora.
- d) Reducir las pérdidas conductivas de la superficie captadora.

5. El rendimiento de un colector solar plano

- a) es independiente de la temperatura del fluido que circula.
- b) no depende de las pérdidas radiativas del colector.
- c) no depende de las pérdidas convectivas del colector.
- d) aumenta si se utiliza una superficie absorbente selectiva.