

Fuentes de Energía

Capítulo 2: Recursos, impactos y eficiencias

Autor:

- Antonio Lecuona Neumann. Catedrático del Área de Máquinas y Motores Térmicos. Dpto. De Ingeniería Térmica y de Fluidos, [Grupo ITEA](#), [Universidad Carlos III de Madrid](#), Leganés, España. 2014.

2019

NOTAS:

\doteq significa definición. $\dot{\quad}$ significa flujo de una magnitud, p. e. caudal másico [kg s^{-1}] para la masa y potencia para la energía [$\text{J s}^{-1} \equiv \text{W}$] \dot{Q} , \dot{h} , salvo para la potencia mecánica que es W .

La variante intensiva de una variable termodinámica extensiva se denota con minúscula.

gicp: gas ideal ($P/\rho = R_g T$; $R_g = R/PM$) caloríficamente perfecto $c_v = \text{cte}$. $T > 0$: temperatura absoluta [K], mientras que t es la temperatura sensible [$^{\circ}\text{C}$]. Para gicp es $c_p = c_v + R_g$. $\langle \quad \rangle$ indica dependencia funcional.

La información contenida en este documento sirve de propósito exclusivo como apuntes para alumnos en la enseñanza de la asignatura indicada y ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio. No obstante el/los autor/es no garantizan la exactitud, exhaustividad, actualización o perfección de su contenido. Por ello no será/n responsable/s de cualquier error, omisión o daño causado por el uso de la información contenida, no tratando con este documento prestar ninguna clase de servicio profesional o técnico; antes bien, se ofrece como simple guía general de apoyo a la docencia. En caso de detectar algún error, rogamos nos lo comunique e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.

Introducción al capítulo 2: Recursos, impactos y eficiencias.

Este capítulo establece la metodología aplicable a toda la asignatura de análisis medioambiental y termodinámico, especialmente éste en la segunda parte del capítulo. Se introduce:

- El consumo energético mundial y sus distintas fuentes, donde destaca la biomasa.
- El probable aumento del consumo mundial a causa del aumento de población y del nivel de desarrollo.
- La relación R/P . Considerando las reservas probadas de las distintas fuentes no renovables y al consumo anual actual se puede obtener el número de años estimados de su duración, pues si bien actualmente la producción P aumenta con el tiempo, las reservas R también por la actividad exploratoria y el avance tecnológico. El precio influye también el R , pues yacimientos no rentables pasan a ser rentables.
- El impacto ambiental de la energía. Gases de efecto invernadero principales. CO_2 , Metano y NO_x , huella de carbono. Emisiones directas e indirectas. Atribución a un ente: servicio o a un bien, a un territorio, a una población, o a una corporación. Emisiones corriente arriba y corriente abajo del ente. Emisiones netas por la fijación de CO_2 . Metodología para el cálculo de emisiones, factor de conversión a primaria FP , factor de emisión FE y su agregación. Cuadro de factores en España, por el IDAE. El protocolo de Kioto.
- El balance energético no estacionario de un volumen de control. Conveniencia de la entalpía. Ejemplos en régimen estacionario.
- El equilibrio térmico, mecánico y termodinámico, el estado muerto. Aplicación a la radiación térmica, de utilidad para el tema de la energía solar.
- La exergía como capacidad de realizar trabajo útil. Equivalente exergético del calor, ciclo y factor de Carnot al objeto de poder valorar la mayor o menor calidad del calor en función de su temperatura (introducción hecha en el cap. 1). Caso de un motor de combustión interna con aprovechamiento del calor residual.

La materia se compone del núcleo expositivo, lo complementan temas recordatorios y de ampliación (señalados como ex cursus), cuestiones de autoevaluación ejercicios propuestos y resueltos.

Dado el carácter cuantitativo de este capítulo, los ejercicios resueltos son relevantes y se recomienda especialmente su resolución sin observar la solución, incluso tras la explicación de los mismos en clase. Se introduce el análisis de la pérdida exergética de la combustión, la eficiencia (COP) de las bombas de calor como máquina frigorífica y calorífica. Se introduce la máquinas de absorción y se calcula su factor de emisión.

Índice

2.1.- Recursos y consumo energético.

2.2.- Impacto ambiental.

2.3.- Balance energético.

2.4.- Equilibrio térmico

2.5.- Eficiencias y límites.

2.6.- Fuentes no convencionales y almacenamiento estacional.

2.7.- Bibliografía

2.8.- Cuestiones de autoevaluación.

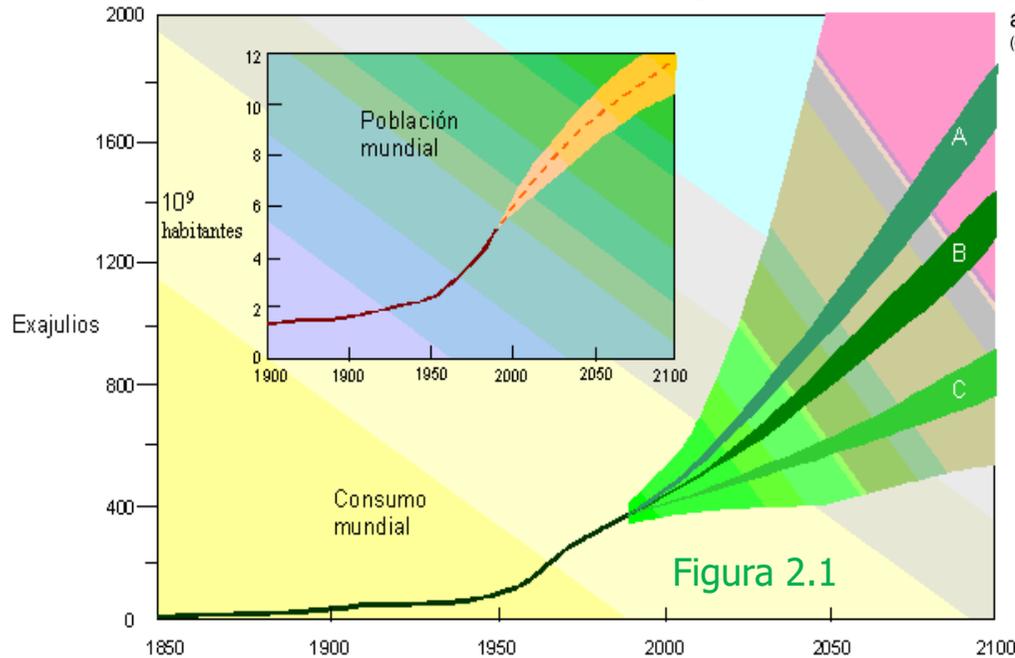
2.9.- Actividades propuestas.

2.10.- Temas recordatorios y avanzados.

Objetivos: Dar a conocer cómo se cuantifica el consumo actual y esperado y atribuirlo a regiones y sectores. Entender los recursos energéticos a nivel global y atribuirlo de forma general a fuentes, y de ello se deriva el tiempo de agotamiento, cifra relevante. Indicar los principales impactos medioambientales del uso de la energía e identificar los mayores contribuyentes. Recordar conceptos de Termodinámica e incidir en el concepto de eficiencia energética y de exergética, así como de irreversibilidad (degradación) a modo de límites a la eficiencia, además de las fugas de calor. (pérdidas).

2.1.- Recursos y consumo energético.

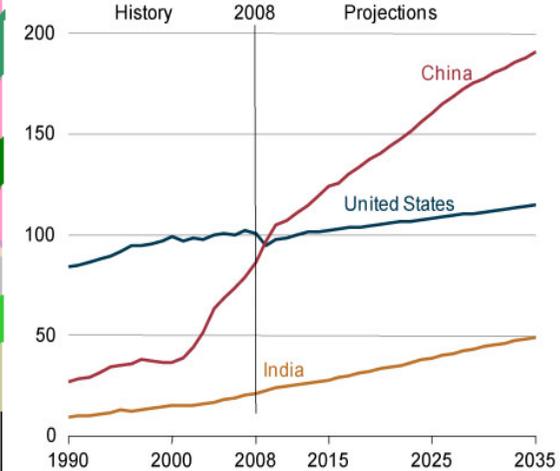
- Consumo = producción (P) mundial de energía histórico y futurible, según la [IEA](#) para distintos escenarios y regiones.



[Elaborado por el autor]

- La IEA (AIE en español) no prevé ni decrecimiento de la población ni del consumo energético mundiales, en contraste con la Fig. 1.4.
- Predominio de Asia en el consumo y población futuros de países no-OCDE. OCDE: Austria, Bélgica, Canadá, Chile, República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Israel, Italia, **Japón**, **Corea**, Luxemburgo, México, Países Bajos, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, Portugal, República Eslovaca, Eslovenia, España, Suecia, Suiza, Turquía, Reino Unido.

Figure 13. Energy consumption in the United States, China, and India, 1990-2035 (quadrillion Btu)

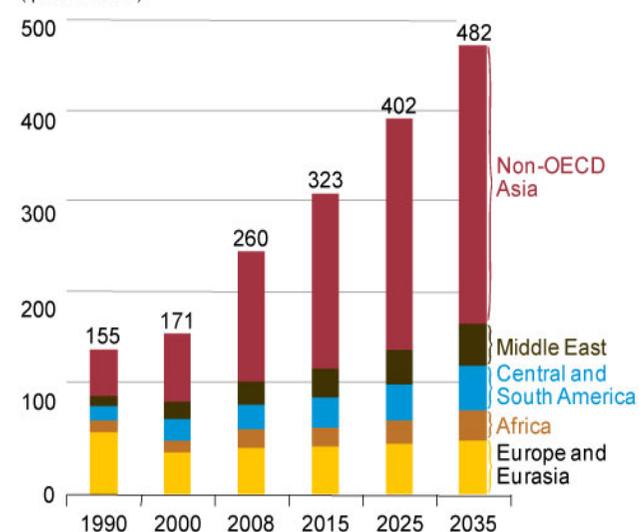


Por regiones

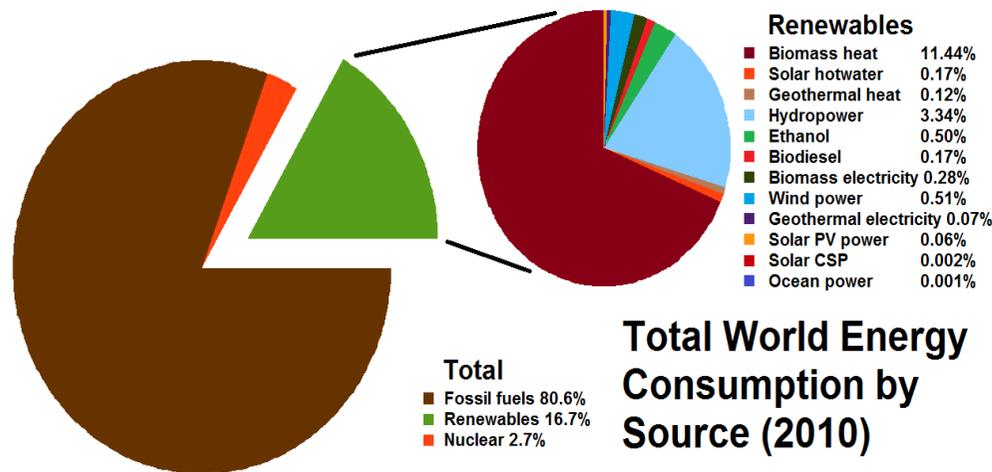
Fuente ambas figuras:
U.S. Energy Information Administration (Sept 2011)
<http://www.eia.gov/forecast/s/ieo/world.cfm>
[uso permitido citando fuente original]

Destaca el crecimiento de China

Figure 14. Non-OECD energy consumption, 1990-2035 (quadrillion Btu)



2.1.- Recursos y consumo energético.



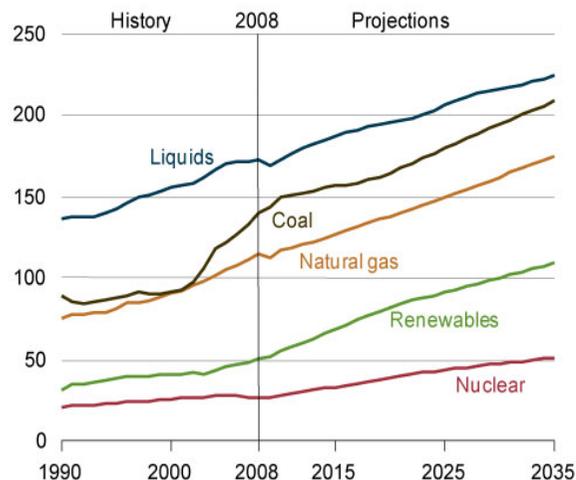
- La mayor parte del consumo mundial es de fuentes fósiles y dentro de las renovables la **biomasa es la más usada**. De ella ~ la mitad es de uso tradicional. Para producir electricidad la renovable más usada es la hidroeléctrica.

Fuente: RENEwABLES 2012 GLObal STaTuS REPORT.

www.ren21.net

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Total_World_Energy_Consumption_by_Source_2010.png [Dominio Público]

Figure 15. World energy consumption by fuel, 1990-2035 (quadrillion Btu)



Fuente: U.S. Energy Information Administration (Sept 2011) [uso permitido citando fuente original]

- El petróleo, el carbón y el gas natural seguirían siendo de consumo mayoritario en las próximas décadas, según la IEA.
- Los combustibles líquidos se emplearán mayoritariamente en el transporte, igual que ahora, a pesar de incrementos de precio, salvo innovaciones (coche eléctrico ...).
- El mayor crecimiento es para las renovables.
- Crecimiento, de todos, especialmente en Asia.

Reservas:

- Las reservas de petróleo no son conocidas, no se ha explorado toda la superficie (especialmente los mares), la capacidad de extracción del petróleo depende de la tecnología (que mejora) y del precio, así como las exploraciones que resulten exitosas. Sin embargo hay estimaciones.
- Las reservas de gas pueden acompañar al petróleo o ser independientes. Pero se aplican las mismas consideraciones que al petróleo.
- Las reservas de carbón son más abundantes, conocidas y más repartidas.

2.1.- Recursos y consumo energético (cont.).

- El consumo y la producción anuales (P) prácticamente coinciden. Solo se diferencian en la acumulación en reservas estratégicas, que son despreciables.
- Asumiendo una producción igual a la de 2010 como simple referencia:

Tabla 2.1: Duración en años de las reservas probadas de las fuentes principales [más información](#)

Fuente	Reservas probadas R (EJ)	Producción actual P (EJ/año)	Reservas/producción R/P (años)
Carbón, PCI	20.000	139	144
Crudo convencional, PCI	8.100±20%	173	47±20%
Gas natural (GN), PCS	8.100-10.000	108	75-93
Uranio (fisión 1 paso)	2.000-7.000	29	69-241
Deuterio+Tritio (fusión)	6×10^6	0	∞
Deuterio+Deuterio (fusión)	6×10^9	0	∞
Total	---	449	

- Las reservas reales totales de petróleo en yacimientos podrían llegar a ser 4 veces las probadas, pero pueden ser muy costosas de extraer y a un ritmo bajo, de mala calidad, o imposibles de extraer con la tecnología actual.
- Además del crudo convencional hay **del orden del doble o más no convencional**: petróleo extra pesado, rocas y tierras bituminosas; de baja calidad, muy costosos y muy consumidores de energía para extraerlos y procesarlos. Se podría llegar a que cueste más extraerlos que su PCI .
- Las reservas de uranio son inciertas y dependen del precio del producto, el cual influye poco en el precio final de la electricidad nuclear, por lo que puede encarecerse mucho, permitiendo extraer de minerales menos concentrados.

2.2.- Impacto ambiental.

Tabla 2.2.- Impactos ambientales principales de las fuentes de energía más comunes

Fuente	Territorio	Aguas	Atmósfera
Carbón	Destrucción capa vegetal y degradación paisaje.	Acidificación por procesamiento del mineral, y lixiviados	NO _x , SO ₂ , HCs, PM, Hg, radioactividad, CO ₂
Petróleo y GN	Contaminación suelos y degradación paisaje.	Derrames accidentales y fugas del crudo acompañante	NO _x , SO ₂ , PM, CO ₂ , fugas de metano
Nuclear	Residuos nucleares y combustible gastado.	Contaminación en la minería. Consumo en el ciclo Rankine	Indirectas o posible accidente
Solar y eólica	Solo ocupación del territorio y afección de ecosistemas.	Limpieza de los colectores y consumo del ciclo Rankine. Fotovoltaica produce tóxicos en la fabricación	Ninguna, solo emisiones indirectas fabricación equipos
Hidroeléctrica	Inundación territorio.	Modificación caudales, evaporación del agua.	Ninguna, solo indirectas (construcción p. e.)
Biomasa	Reducción de la biodiversidad.	Pesticidas y fertilizantes. Consumo para riego.	NO_x , PM , HCs .

2.2.- Impacto ambiental (cont.). Huella de carbono.

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) atribuibles.

Huella de carbono de:

- Una organización. Típicamente durante el año.
- Bienes y servicios. Durante su ciclo de vida.
- Individual. Típicamente en los últimos 12 meses.
- Evento. Congreso, concierto, viaje ...
- Territorial. CCAA, nacional ...
- Por sectores. Industrias ...

Gestión:

1. Evaluación de las emisiones.
2. Riesgos y oportunidades.
3. Plan de reducción.
4. Comunicar.

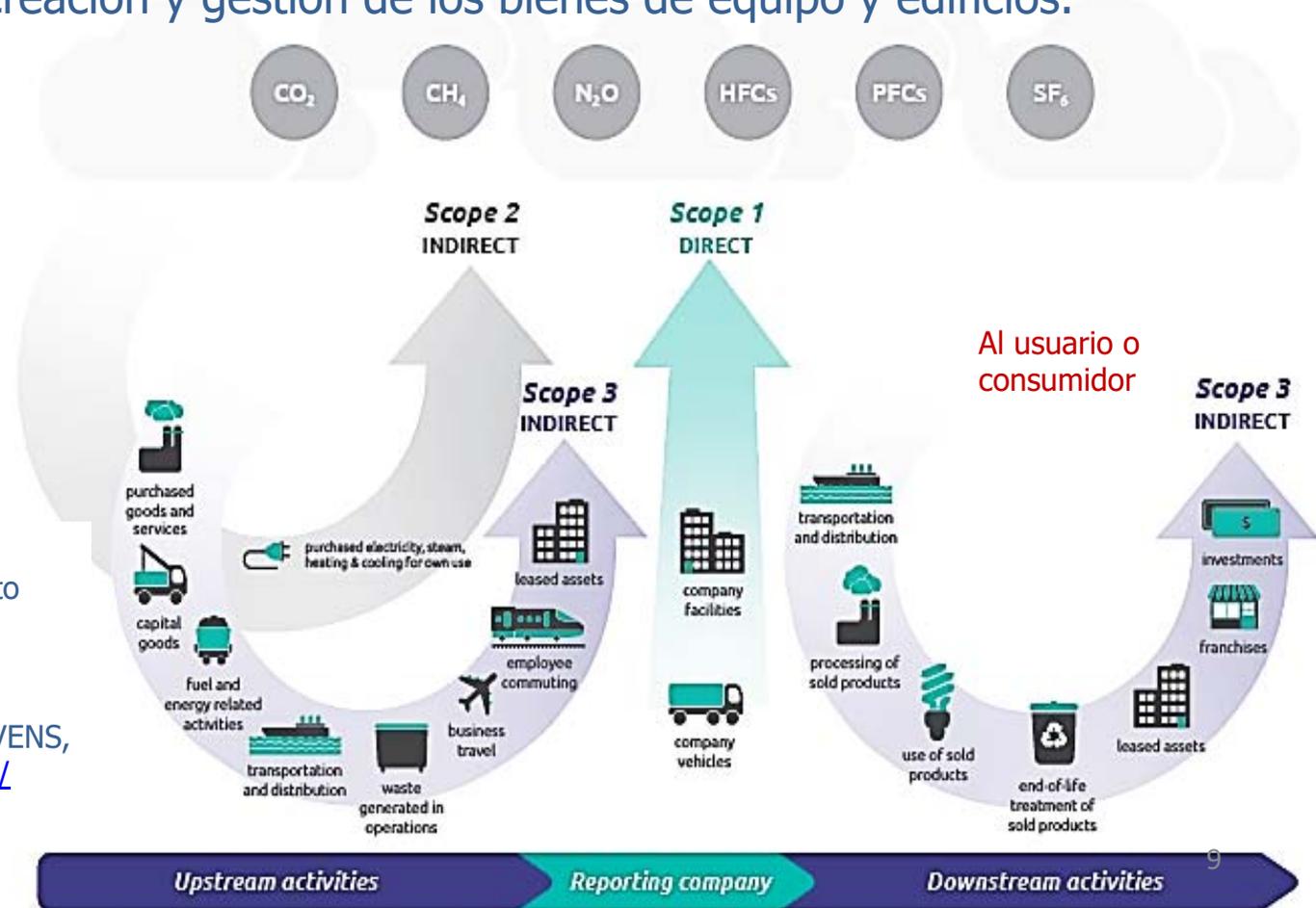
2.2.- Impacto ambiental (cont.). Huella de carbono de una organización.

Emisiones directas: Debidas a su uso directo p. e. combustión o fugas.

Emisiones indirectas: Debidas a la elaboración y distribución de los productos y servicios consumidos (*upstream*) incluida la energía, y producidos (*downstream*, que se atribuirán al usuario o consumidor, pero que comporta una Responsabilidad Social Corporativa) y la gestión de sus residuos, que consumen energía y materiales. Impacto debido a la creación y gestión de los bienes de equipo y edificios.

i A las emisiones es necesario “detracer” la fijación y el almacenamiento de carbono realizado, directamente o por la adquisición de certificados !

Figura. 2.6.- Diagrama de las emisiones de los 6 gases de efecto invernadero considerados actualmente. Fuente: 2010 Organizational Greenhouse Gas Inventory. L. DRAUCKER, A. STEVENS, G. MADAIHAH. <http://www.wri.org/> CC: by-nc-nd 3.0



2.2.- Impacto ambiental (cont.).

World GHG Emissions Flow Chart

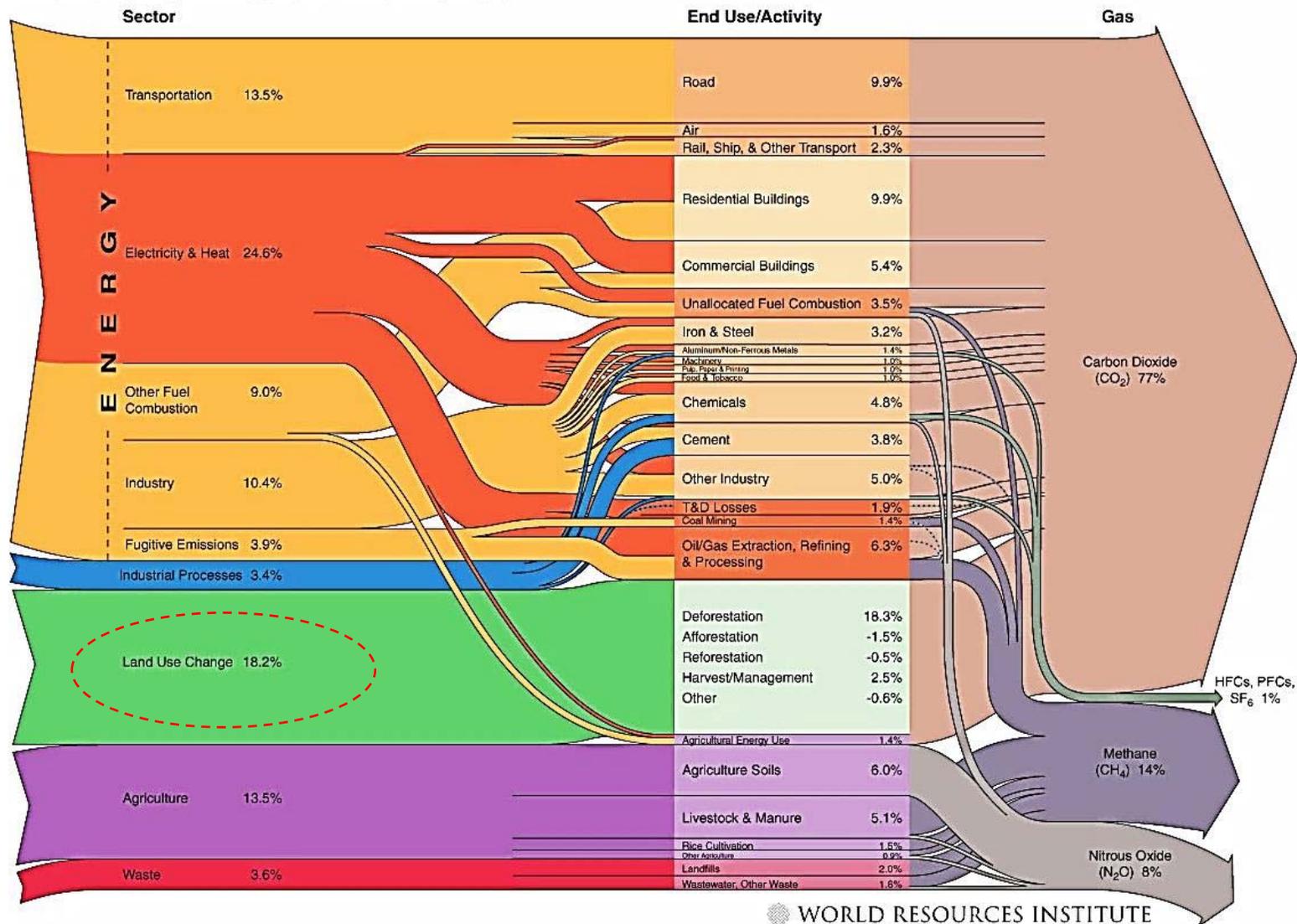


Figura 2.7.- Origen de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs y SF₆). Fuente: www.wri.org under creative commons license, en % de efecto invernadero resultante. Destacan las emisiones por cambio de uso del territorio.

2.2.- Impacto ambiental (cont.).

Metodología para el cálculo de emisiones y energía primaria consumida

- Los usuarios consumen productos y vectores energéticos en forma de energía final.
- El origen primario del consumo energético a menudo es difícil de determinar, así como las emisiones relacionadas.
- Si se trata de un bien o servicio es aún más complejo determinar la "mochila" energética y de carbono asociados. Para ello existen bases de datos, cada vez más completas.
- Como primera aproximación se dispone de coeficientes medios nacionales de:
 1. $FP = \text{Factor de conversión a primaria} = \frac{\text{energía primaria}}{\text{energía final}} = \eta^{-1}$, ver Cap. 1 y Ec. (2.5).
 2. $FE = \text{Factor de emisión} = \frac{\text{emisiones}}{\text{energía final}}$.
- Como ejemplo se muestra la tabla que publicó el [IDAE](#) para España.
 - Debería actualizarse cada año.
 - Debería particularizarse para distintas regiones de España.
- **Ejemplo:** En una vivienda se puede consumir electricidad y gas butano en la cocina. Además la parte que corresponda de fuel para calefacción en la comunidad de vecinos y electricidad de zonas comunes. Para la electricidad se usará un valor medio, indicado al final de la Tabla 2.3, por no discriminarse el origen de la electricidad al consumirla (nuclear, térmica, renovables, cogeneración, etc.). La electricidad consumida en los hogares tiene mayores pérdidas en el transporte hasta el punto de consumo que el consumo en alta tensión, típico de la industria.
- Herramienta: [Calculadora de factores de emisión](#) del IDAE.

2.2.- Impacto ambiental (cont.)

Carburantes y combustibles

- Se toma como pase la energía final en tep, 1ª columna.
- Esa energía ocupa en litros o en toneladas métricas lo indicado en la 2ª columna. Para gases se expresa en m³ en condiciones normales de presión y temperatura (Nm³).
- Esa energía supone una energía primaria indicada en la 3ª columna /tep, por lo invertido desde la "cuna" hasta el usuario. Destaca el elevado valor del bioetanol, con un 70% más de energía primaria por el consumo en el cultivo y elaboración.
- La 4ª columna indica este valor en MWh/tep consumid.
- La 5ª columna expresa las toneladas métricas de CO₂ emitidas/tep consumido, llamado **factor de emisión**. Destaca el valor neutro atribuido a los bio-combustibles, lo cual no es cierto en la parte del consumo para su obtención y puesta en manos del consumidor.

Electricidad

- Se toma el MWh de energía final como base y su equivalente directo en tep (0,086, véase Cap. 1, Ap. 1.7), expresado igual para todas en la 2ª columna.

FACTORES DE CONVERSIÓN ENERGÍA FINAL -ENERGÍA PRIMARIA y FACTORES DE EMISIÓN DE CO ₂ - 2010									
CARBURANTES									
FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO			ENERGÍA PRIMARIA ⁽¹⁾		FACTOR DE EMISIÓN ⁽²⁾			
	tep	Volumen específico		tep	MWh	tCO ₂ /tep			
Gasolina	1	1.290	l	1,10	12,79	2,90			
Gasóleo A y B	1	1.181	l	1,12	13,02	3,06			
Gas natural	1	910	Nm ³	1,07	12,44	2,34			
Biodiesel	1	1.267	l	1,24	14,42	neutro			
Bioetanol	1	1.968	l	1,70	19,77	neutro			
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1.763	l	1,05	12,21	2,72			
Queroseno	1	1.213	l	1,12	13,02	3,01			
COMBUSTIBLES									
FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO			ENERGÍA PRIMARIA ⁽¹⁾		FACTOR DE EMISIÓN ⁽²⁾			
	tep	Masa o vol. combustible		tep	MWh	tCO ₂ /tep			
Hulla	1	2,01	t	1,14	13,21	4,23			
Lignito negro	1	3,14	t	1,14	13,21	4,16			
Carbón para coque	1	1,45	t	1,14	13,26	4,40			
Biomasa agrícola	1	3,34	t	1,25	14,53	neutro			
Biomasa industria forestal	1	2,87	t	1,25	14,53	neutro			
Coque de petróleo	1	1,29	t	1,42	16,49	4,12			
Gas de coquerías	1	1,08	t	1,14	13,26	1,81			
Gasóleo C	1	1,092	l	1,12	13,02	3,06			
Fuelóleo	1	1,126	l	1,11	12,91	3,18			
Gas Natural	1	910	Nm ³	1,07	12,44	2,34			
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1,763	l	1,05	12,21	2,72			
Butano	1	1,670	l	1,05	12,21	2,72			
Propano	1	1,748	l	1,05	12,21	2,67			
Gas de refinería	1	0,85	t	1,12	13,07	2,30			
ELECTRICIDAD									
TECNOLOGÍA	ENERGÍA FINAL		ENERGÍA PRIMARIA				FACTOR DE EMISIÓN		
	MWh	tep	Bornas de central		En punto de consumo		En bornas de central (neta)		En punto de consumo
			MWh	Tep	MWh	tep	tCO ₂ /MWh	tCO ₂ /MWh	tCO ₂ /MWh
Hulla+ antracita	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	1,13	1,17	1,27
Lignito pardo	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,90	0,93	1,01
Lignito negro	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,97	1,00	1,09
Hulla importada	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,90	0,94	1,02
Nuclear	1	0,086	3,03	0,26	3,29	0,28	0	0	0
Ciclo Combinado	1	0,086	1,93	0,17	2,09	0,18	0,34	0,35	0,38
Hidroeléctrica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0
Cogeneración MCIA ⁽³⁾	1	0,086	1,67	0,14	1,74	0,15	0,37	0,38	0,42
Cogeneración TG ⁽⁴⁾	1	0,086	1,61	0,14	1,69	0,15	0,33	0,34	0,37
Cogeneración TV ⁽⁶⁾	1	0,086	1,72	0,15	1,80	0,16	0,41	0,42	0,46
Cogeneración CC ⁽⁶⁾	1	0,086	1,54	0,13	1,61	0,14	0,31	0,32	0,35
Eólica y fotovoltaica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0
Solar termoeléctrica	1	0,086	4,56	0,39	4,95	0,43	0	0	0
Biomasa eléctrica	1	0,086	4,88	0,42	5,29	0,46	0	0	0
Biogás	1	0,086	3,70	0,32	4,02	0,35	0	0	0
RSU	1	0,086	4,02	0,35	4,36	0,38	0,24	0,25	0,27
Centrales de fuelóleo	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,71	0,73	0,79
Gas siderúrgico	1	0,086	2,86	0,25	3,10	0,27	0,64	0,69	0,75
Energía Eléctrica General	1	0,086	0,17		0,18		0,23	0,23	
			tep /MWh neto	tep /MWh	tep /MWh	tep /MWh	tCO ₂ /MWh bruto	tCO ₂ /MWh neto	tCO ₂ /MWh final
Energía Eléctrica Baja Tensión (Sector Doméstico)	1	0,086	0,17		0,19		0,23	0,23	
			tep /MWh neto	tep /MWh final	tep /MWh	tep /MWh	tCO ₂ /MWh bruto	tCO ₂ /MWh neto	tCO ₂ /MWh final

Electricidad

- Los MWh de combustible /MWh_e para producir la electricidad justo a la salida de la central se expresa en la 3ª columna y su equivalente en tep (usando la 2ª columna) se muestra en la 4ª. Destaca la nuclear entre las no renovables y la biomasa para producción de electricidad entre las renovables, por la escasa eficiencia de la central eléctrica.
- La solar termoeléctrica tiene un valor elevado por igual motivo, aunque no "consume" al ser solar.
- Como hay pérdidas en el transporte y distribución de la electricidad, los valores en punto de consumo son mayores, 5ª y 6ª columnas.
- Como las centrales eléctricas consumen parte de su propia electricidad, en la columna 7ª se indica el factor de emisión justo a la salida del generador eléctrico, sin interés externo.
- Las medias nacionales, general y solo del sector doméstico, se indican en las dos filas de más abajo. Se obtiene ≈ 2,1 MWh primario/MWh final, no explicitándose el algoritmo **Tabla 2.3. Fuente. [Uso no comercial]**

2.2.- Impacto ambiental (cont.).

Ejercicio 2.1: Determine la eficiencia energética media de las centrales nucleares y de las de ciclo combinado en primaria, en España, sin incluir transporte hasta el punto de consumo de la elec..

$$\eta_{nuc} = \frac{1 \text{ MWh}}{3,03 \text{ MWh}} = 33\%$$

$$\eta_{cc} = \frac{1 \text{ MWh}_e \times 1,07 \frac{\text{MWh}_{prim}}{\text{MWh}_{comb.}}}{1,93 \text{ MWh}_{prim}} = 55,4\%$$

Ejercicio 2.2: Determine la eficiencia del transporte de electricidad desde bornes de central hasta punto de consumo doméstico (final) en España.

$$\eta_{cc} = \frac{2,72 \frac{tCO_2}{\text{MWh}_{bruto}}}{3,09 \frac{tCO_2}{\text{MWh}_{neto}}} = 0,88\%$$

FACTORES DE CONVERSIÓN ENERGÍA FINAL -ENERGÍA PRIMARIA y FACTORES DE EMISIÓN DE CO ₂ - 2010									
CARBURANTES									
FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO		ENERGÍA PRIMARIA ⁽¹⁾		FACTOR DE EMISIÓN ⁽²⁾		tCO ₂ /tep		
	tep	Volumen específico	tep	MWh					
Gasolina	1	1.290 l	1,10	12,79			2,90		
Gasóleo A y B	1	1.181 l	1,12	13,02			3,06		
Gas natural	1	910 Nm ³	1,07	12,44			2,34		
Biodiesel	1	1.267 l	1,24	14,42			neutro		
Bioetanol	1	1.968 l	1,70	19,77			neutro		
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1.763 l	1,05	12,21			2,72		
Queroseno	1	1.213 l	1,12	13,02			3,01		
COMBUSTIBLES									
FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO		ENERGÍA PRIMARIA ⁽¹⁾		FACTOR DE EMISIÓN ⁽²⁾		tCO ₂ /tep		
	tep	Masa o vol. combustible	tep	MWh					
Hulla	1	2,01 t	1,14	13,21			4,23		
Lignito negro	1	3,14 t	1,14	13,21			4,16		
Carbón para coque	1	1,45 t	1,14	13,26			4,40		
Biomasa agrícola	1	3,34 t	1,25	14,53			neutro		
Biomasa industria forestal	1	2,87 t	1,25	14,53			neutro		
Coque de petróleo	1	1,29 t	1,42	16,49			4,12		
Gas de coquerías	1	1,08 t	1,14	13,26			1,81		
Gasóleo C	1	1.092 l	1,12	13,02			3,06		
Fuelóleo	1	1.126 l	1,11	12,91			3,18		
Gas Natural	1	910 Nm ³	1,07	12,44			2,34		
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1.763 l	1,05	12,21			2,72		
Butano	1	1.670 l	1,05	12,21			2,72		
Propano	1	1.748 l	1,05	12,21			2,67		
Gas de refinería	1	0,85 t	1,12	13,07			2,30		
ELECTRICIDAD									
TECNOLOGÍA	ENERGÍA FINAL	ENERGÍA PRIMARIA				FACTOR DE EMISIÓN			
		Bornas de central		En punto de consumo		En bornas de alternador (bruta)		En bornas de central (neto)	En punto de consumo
		MWh	tep	MWh	tep	tCO ₂ /MWh	tCO ₂ /MWh	tCO ₂ /MWh	
Hulla+ antracita	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	1,13	1,17	1,27
Lignito pardo	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,90	0,93	1,01
Lignito negro	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,97	1,00	1,09
Hulla importada	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,90	0,94	1,02
Nuclear	1	0,086	3,03	0,26	3,29	0,28	0	0	0
Ciclo Combinado	1	0,086	1,93	0,17	2,09	0,18	0,34	0,35	0,38
Hidroeléctrica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0
Cogeneración MCIA ⁽³⁾	1	0,086	1,67	0,14	1,74	0,15	0,37	0,38	0,42
Cogeneración TG ⁽⁴⁾	1	0,086	1,61	0,14	1,69	0,15	0,33	0,34	0,37
Cogeneración TV ⁽⁶⁾	1	0,086	1,72	0,15	1,80	0,16	0,41	0,42	0,46
Cogeneración CC ⁽⁶⁾	1	0,086	1,54	0,13	1,61	0,14	0,31	0,32	0,35
Eólica y fotovoltaica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0
Solar termoelectrica	1	0,086	4,56	0,39	4,95	0,43	0	0	0
Biomasa eléctrica	1	0,086	4,88	0,42	5,29	0,46	0	0	0
Biogás	1	0,086	3,70	0,32	4,02	0,35	0	0	0
RSU	1	0,086	4,02	0,35	4,36	0,38	0,24	0,25	0,27
Centrales de fuelóleo	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,71	0,73	0,79
Gas siderúrgico	1	0,086	2,86	0,25	3,10	0,27	0,64	0,69	0,75
Energía Eléctrica General	1	0,086	0,17	0,18	0,23	0,23	0,23	0,25	0,25
			tep /MWh neto	tep /MWh	tCO ₂ /MWh bruto	tCO ₂ /MWh neto	tCO ₂ /MWh final		
Energía Eléctrica Baja Tensión (Sector Doméstico)	1	0,086	1,94	2,21	2,63	2,72	2,72	3,09	3,09
			MWh primario/MWh neto	MWh primario/MWh final	tCO ₂ /tep bruto	tCO ₂ /tep neto	tCO ₂ /tep final		

Ejercicio 2.3:

Determine la eficiencia energética de la obtención del bioetanol.

$$\eta_{biod} = \frac{1 \text{ MWh}}{1,70 \text{ MWh}_{prim}} = 59\%$$

Del orden de la mitad de la energía contenida en la biomasa original se emplea al obtener el bioetanol de ella.

Ejercicio 2.4:

El biodiesel, el bioalcohol y la biomasa se consideran en esta tabla neutros a efectos de emisiones de CO₂, ¿cierto?.

Lo que emiten es capturado por los vegetales en la cosecha siguiente. Sin embargo la energía consumida en su obtención no tiene porque ser renovable y por lo tanto neutra (indirectas, Fig. 2.6), lo que se ignora en esta tabla.

Tabla 2.3. Fuente. [Uso no comercial]

2.2.- Impacto ambiental (cont.).

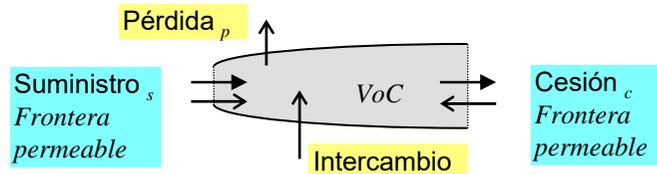
El [Protocolo de Kioto](#) obliga a los países signatarios (países desarrollados excepto EEUU y Canadá. China e India no se consideraron) a limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero en 2012, en forma de toneladas equivalentes de CO₂, con respecto a las de 1990, aumentadas o disminuidas según país. Resultado en Europa ("[El País](#)"): Le ha seguido el [Acuerdo de París](#) en 2015 y aplicable a partir de 2020.

- A España se le permitió subir un 15% y no cumplimos.
- En España: [El transporte por carretera](#) es el sector más emisor y el que más ha aumentado.
- La industria ha bajado sus emisiones.
- El sector residencial ha aumentado sus emisiones.

2.3.- Balance energético.

Volumen de control V_{oC} , balance equivalente a la Ec. (1.1), pero más elaborado [4].

[Elaborada por el autor]



$$E = U + E_{cin} + E_{pot}$$

$$h = u + \frac{p}{\rho}$$

Caudal másico: \dot{m}

$$U = \underbrace{U_f}_{\text{Formación}} + \underbrace{U_T}_{\text{Térmica}}$$

$$h_t = h + \underbrace{v^2/2}_{\text{En. cin. p. u. de masa}} + \underbrace{gz}_{\text{En. grav. p. u. de masa}}$$

← Entalpía total, véase Tema Avanzado 2.2.

$$\frac{dE_{VoC}}{dt} = \underbrace{\sum \dot{Q}_i + \underbrace{W_i}_{\text{Potencia aportada sin variación de volumen p.e. un eje, eléctrica ...}} - p \frac{dV_{VoC}}{dt}}_{\text{Potencia mecánica}} - \underbrace{\sum (\dot{Q}_p + W_p)}_{\text{Intercambios considerados pérdidas, >0 hacia afuera, según se indica con flechas abiertas.}} + \underbrace{\dot{m}_s h_{t,s} - \dot{m}_c h_{t,c}}_{\text{Flujo de energía interna, cinética, potencial y trabajo de flujo a través de las fronteras permeables a la masa, >0 según se indica con flechas cerradas.}}$$

Intercambios > 0 hacia adentro, según se indica con flechas abiertas a través de la frontera impermeable al flujo másico.

Intercambios > 0 hacia afuera, según se indica con flechas abiertas.

Todas las áreas de la frontera

Todas las áreas de la frontera

Intercambio a través de las paredes impermeables al fluido.

(2.1)

Ejercicio 2.5: Aplicar el balance energético a una válvula (restricción regulable en un conducto) en estado estacionario, adiabática y sin fugas, expansionando un gicp.

Volumen de control = $\overbrace{\text{entrada+salida}}^{\text{Permeables al flujo}} + \text{paredes internas del conducto mojadas por el flujo.}$

$$\frac{dE_{VoC}}{dt} = \sum \dot{Q}_i + W_i - p \frac{dV_{VoC}}{dt} + \sum (\dot{Q}_p + W_p) + \dot{m}_s h_{t,s} - \dot{m}_c h_{t,c} \rightarrow h_{t,s} = h_{t,c}$$

$\frac{dE_{VoC}}{dt} = 0$ por ser estacionario
 $\sum \dot{Q}_i = 0$ por ser adiabática
 $W_i = 0$ por inamovible
 $\frac{dV_{VoC}}{dt} = 0$ por inamovible
 $\sum (\dot{Q}_p + W_p) = 0$, adiabática
 Balance másico: $\dot{m}_s = \dot{m}_c$

fluidos $\left\{ \begin{array}{l} h_s = h_c \\ g(z_s - z_c) \square h_s - h_c \\ \text{Sin reacción: } h_{f,s} = h_{f,c} \\ \text{gicp} \rightarrow h = c_p T + \text{cte.} \end{array} \right\} \rightarrow T_s = T_c$

Generalmente a la entrada y salida la velocidad es moderada $\Rightarrow v^2 \square h$

2.3.- Balance energético.

Ejercicio 2.6: Aplicar el balance energético a un cuerpo al cual incide una irradiancia (intensidad) G [W/m²] p. e. solar y con una superficie con conocidos coeficientes adimensionales de absorción (absortancia α), de reflexión (reflectancia o reflectividad ρ) y de transmisión (transmitancia τ). Obtener la relación entre ellos. Introducción.

Solución: Se asume el intercambio radiativo como calor, a los efectos; aunque podría ser considerado trabajo W , salvo la absorbida pues se ha degradado a térmica. El volumen de control V_{oC} incluye solamente un cuerpo semitransparente (p. e. cubierta de vidrio) con igual área incidente que transmitida A .

$$\underbrace{\frac{dE_{VoC}}{dt}}_{\substack{\text{Potencia} \\ \text{de calor absorbido} \\ \dot{Q}_\alpha}} = \sum_{\substack{\text{Todas la} \\ \text{áreas de} \\ \text{la frontera}}} \dot{Q}_i + \underbrace{W_i}_{=0 \text{ por frontera inamovible}} - p \underbrace{\frac{dV_{VoC}}{dt}}_{=0 \text{ por frontera inamovible}} - \sum_{\substack{\text{Todas la} \\ \text{áreas de} \\ \text{la frontera}}} (\dot{Q}_p + W_p) + \underbrace{\dot{m}_s h_{t,s} - \dot{m}_c h_{t,c}}_{\dot{m}_s = \dot{m}_c = 0} \Rightarrow \dot{Q}_\alpha = \sum_{\substack{\text{Todas la} \\ \text{áreas de} \\ \text{la frontera}}} \dot{Q}_i = \dot{Q}_s - \dot{Q}_c$$

=0, toda la radiación se incluye en los intercambios

$\dot{Q}_s = GA$
Radiación con espectro original

$\dot{Q}_c = (G_p + G_\tau)A$
Degradado a energía térmica

$\dot{Q}_\alpha = G_\alpha A$
Se le asocia una intens. interna

$\Rightarrow G = G_\alpha + G_p + G_\tau \Rightarrow 1 = \alpha + \rho + \tau$

(2.3)

Definiciones: $G_\alpha \square \alpha G$; $G_\tau \square \tau G$; $G_{refl} \square \rho G$

NOTA: Se ha asumido que no existe estado estacionario; en consecuencia, el calor absorbido se disipa en el interior y calienta el cuerpo progresivamente, en tiempos característicos mucho mayores que el de interacción de la radiación con el cuerpo, por lo que se asumen valores en el mismo instante. Como consecuencia de este calentamiento el cuerpo aumentaría su emisión espontánea de radiación térmica, lo que no se ha considerado aquí. Alternativamente, se puede considerar que se equilibra el calor disipado con una extracción interna de ese calor (refrigeración) o simplemente con pérdidas al ambiente, considerando $0 \neq \dot{Q}_p = \dot{Q}_\alpha$ y estado estacionario. El resultado sería el mismo.

2.4.- Equilibrio térmico.

- Ocurre el [equilibrio térmico](#) cuando las temperaturas coinciden del sistema, anulándose el flujo neto de energía térmica, es decir, calor transportado.
- Es parte del [equilibrio termodinámico](#) que implica además del equilibrio térmico, el equilibrio mecánico (cuando la suma de fuerzas y pares se anulan) y el equilibrio químico (cuando no es posible reacción alguna, los [potenciales termodinámicos](#) de cada especie coinciden para cada fase).
- Cuando un cuerpo alcanza el equilibrio termodinámico con el ambiente, ha alcanzado el denominado **estado muerto**.

Ejercicio 2.7: 1.- Considere la [emisividad](#) ε de la superficie A como el cociente entre su potencia emisiva espontánea y la del mismo cuerpo a igual temperatura, pero con una superficie ideal denominada [negra](#) (absorbe toda la radiación incidente, independientemente de su dirección y longitud de onda; emite la máxima potencia independientemente de la dirección; es decir, de forma difusa; y ésta es solo función de su temperatura superficial T). 2.- Considere la [absortancia](#) α como la fracción de la radiación térmica incidente que absorbe el área A . 3.- Considere el ambiente circundante como una cavidad cerrada negra rodeando completamente al cuerpo considerado pequeño y además opaco (potencia transmitida nula). De ello obtenga la condición que resulta del equilibrio térmico entre ambos ([ley de Kirchhoff](#) [2] y [3]) ver [Apartado 8.1](#).

Solución: Por el equilibrio térmico, el intercambio neto de calor a través de una superficie de control que rodea al cuerpo ha de ser nulo; luego, resumiendo el balance energético en un estado estacionario se resume en que la potencia emitida iguala a la absorbida:

$$\underbrace{\overbrace{\dot{Q}_\varepsilon}^{\text{Emitido espontáneamente}}}_{\varepsilon A \underbrace{\dot{Q}_{e,negro}}_{f(T)}} = \underbrace{\overbrace{\dot{Q}_\alpha}^{\text{Absorbido}}}_{\alpha A \underbrace{\dot{Q}_{e,negro}}_{f(T)}} \Rightarrow \varepsilon = \alpha \quad (2.4)$$

NOTA: Las [Ecs. \(2.3\)](#) y [\(2.4\)](#) solo son estrictamente aplicables a una banda estrecha del espectro de la radiación. O se puede extender a todo el espectro en su conjunto para el denominado [cuerpo gris](#). En general los materiales se comportan de forma distinta en bandas distintas del espectro, p. e. [superficies selectivas](#). Sin embargo, la reducción a cuerpo gris es aceptable en ciertos materiales simples y para bandas de emisión próximas a las de absorción.

2.5.- Eficiencias y límites.

- La eficiencia energética (de conversión) o rendimiento, es un convenio que expresa de forma adimensional el cociente entre la energía en el producto deseado y la invertida para ello, **Cap. 1**.

$$\eta = \frac{\text{Energía en } \left\{ \begin{array}{l} \text{el} \\ \text{los} \end{array} \right\} \text{ producto } \left\{ \begin{array}{l} \\ \text{s} \end{array} \right\}}{\text{Energía suministrada (o que sea onerosa)}} \quad (2.5)$$

- La energía gratuita en ocasiones no se considera en el denominador, p. e. el calor tomado de la atmósfera (aerotermia) o del suelo (geotermia) en una bomba de calor.
- El segundo principio de la termodinámica (**Anexo I del Cap. 1**) establece límites adicionales a los del primer principio (que ha dado lugar al balance de energía), p. e. la fracción del calor Q suministrado a temperatura T que puede convertirse en el máximo trabajo útil $\tau_{u,max}$ viene de multiplicarlo por el factor de Carnot, definiendo la exergía A del calor (véase **Ap. 2.10**):

$$\dot{A} \square W_{u,max} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (2.6)$$

- El resto es calor residual a temperatura del estado muerto (ambiente) T_0 . Por lo tanto inútil
- Esto significa que los procesos disipativos, como la conducción de calor que baja T sin alterar Q , rebajan la exergía; por irreversibilidad.
- La viscosidad y el rozamiento, disipativos también, convierten trabajo útil en calor, por lo que tan solo una fracción de él es convertible en trabajo útil. Ha ocurrido una irreversibilidad o **degradación** de la energía. Si ese calor se pierde, además ocurre una **pérdida**.

2.5.- Eficiencias y límites (cont.).

- El mezclado de dos sustancias distintas origina asimismo una pérdida de exergía
- La reacción química puede aumentar o disminuir la exergía.
- **Ex cursus**: En un flujo de combustible y aire, su exergía viene dada por la disminución de la función de Gibbs $g = h - Ts$ [MJ/kg], a presión y temperatura atmosféricas, $T_{amb} = T_0$. Pero el término de variación de entropía s es generalmente despreciable, por lo que viene dado aprox. por la disminución de entalpía h . Como los reactantes y productos estarán a T_{amb} y P_{amb} , la variación de entalpía térmica $h_T = u_T + p/\rho$ es nula, luego A viene dada por la disminución de la entalpía de formación h_f . Resulta igual al poder calorífico superior PCS, si lo expresamos por unidad de masa de combustible. Que es el calor liberado en una combustión completa condensando el agua formada por el hidrógeno además del agua libre del combustible. Así:

$$\tau_{u.\max} = \left(\underbrace{g_s}_{\text{Aire+comb.}} - \underbrace{g_c}_{\text{Prod.}} \right)_{T_{amb}; P_{amb}} = \left[h_s - h_c - T_{amb}(s_s - s_c) \right]_{T_{amb}; P_{amb}} \square \left[h_s - h_c \right]_{T_{amb}; P_{amb}} = \left[h_{f,s} - h_{f,c} \right]_{T_{amb}; P_{amb}}$$

Considerando las masas: $\left(m_{\text{aire,esteoq.}} + m_{\text{comb}} \right) \left[h_{f,s} - h_{f,c} \right]_{T_{amb}; P_{amb}} \square m_{\text{comb}} PCS \leftarrow \text{Definición (2.7)}$

Calor p. u. de masa de mezcla a evacuar para que los productos salgan a igual temperatura T_{amb} que los reactantes. Véase TR 2.2

- Luego, - todo el **PCS** de un combustible es (aproximadamente) convertible íntegramente en trabajo útil -. Para conseguirlo es necesario proceder reversiblemente.
- En los motores térmicos el **PCS** se convierte en energía térmica, como paso intermedio, irreversible; por lo que ya no es posible obtener todo el trabajo útil del combustible, por ocurrir una degradación. Quedará tan solo el calor liberado (**PCS**) por el factor de Carnot.
- En las células de combustible no se usa este paso intermedio, por lo que pueden obtener todo el trabajo útil, si operan reversiblemente, llegando actualmente a $\eta \approx 0,6$.
- Generalmente el **PCS** no se calcula, sino que se mide en un calorímetro a presión constante.

2.5.- Eficiencias y límites (cont.).

Ejercicio 2.8: Obtenga la eficiencia energética y exergética al ocurrir una combustión adiabática partiendo de reactantes a T_{reac} . Para ello aplique un balance energético y exergético a un quemador en el que ocurre una combustión perfecta y completa dando lugar a un gicp que alcanza una temperatura T_{prod} .

Solución: Para que la combustión sea perfecta (CO_2 , H_2O y N_2 como productos de la reacción) ha de ser pobre en combustible, luego hay aire en exceso. Como las temperaturas alcanzadas son muy elevadas, no condensa el agua, por lo que se usa el PCI en lugar del PCS . Balance energético,

$$\text{Ec. (2.7): } \left. \begin{array}{l} \text{Dosado} \\ \text{relativo} \end{array} \right\} = F_R = \frac{\overbrace{\dot{m}_{comb}/\dot{m}_{aire}}^F}{\underbrace{(\dot{m}_{comb}/\dot{m}_{aire})_{\text{estequiométrico}}}_{F_e \approx \frac{1}{15} \text{ para hidrocarburos}}} \leq 1 \quad \left. \vphantom{\frac{\dot{m}_{comb}/\dot{m}_{aire}}{(\dot{m}_{comb}/\dot{m}_{aire})_{\text{estequiométrico}}}} \right\} \Rightarrow T_{prod} = T_{reac} + \frac{F \times PCI}{c_{p,prod}(1+F)} \quad (2.8)$$

Al ser la combustión adiabática no se pierde calor alguno, por lo que la eficiencia energética es la unidad. Con dosado estequiométrico, las temperaturas alcanzadas, partiendo de temperatura ambiente, superan los 1.000 K para los combustible habituales en aire. La eficiencia exergética es:

$$\text{Ec. (2.6): } \varepsilon = \frac{A_{prod}}{A_{comb}} = \frac{\dot{m}_{comb} PCS \left(1 - \frac{T_0}{T_{prod}}\right)}{\dot{m}_{comb} PCS} = 1 - \frac{T_0}{T_{prod}} \approx 1 - \frac{300 \text{ K}}{[273,16 + (1.000 \text{ a } 2.700)]\text{K}} = 0,76 \text{ a } 0,9. \quad (2.9)$$

Luego, se destruye (pierde) entre un 10 % a un 24 % de trabajo útil máximo por meramente la irreversibilidad de la combustión estequiométrica. Si se diluyen los productos con aire (mezcla pobre, $F_R < 1$) se destruye aún más, pues baja T_{prod} .

2.5.- Eficiencias y límites (cont.).

- Se define la eficiencia de un motor que quema combustible en su interior dividiendo el trabajo τ por el trabajo útil máximo de un combustible (exergía).
- Debido a que en los motores no se suele aprovechar el calor de condensación del agua producida en la combustión, se usa el poder calorífico inferior **PCI**, en lugar del superior, el cual es mayor, porque normalmente no se condensa el agua.

☞ Puesto que compara exergías, es una **eficiencia exergética** ε también.

$$\eta \square \frac{\tau_{eje}}{\tau_{u,max}} = \frac{\overbrace{\dot{W}}^{\text{Potencia (útil)}}}{W_{u,max}} \square \frac{W}{\underbrace{\dot{m}_{comb} PCI}_{\text{Ec. (2.7)}}}$$

- En los motores, además de potencia mecánica se obtienen calores residuales aprovechables Q_{res} , los cuales son un producto energético también. En tal caso la **eficiencia energética** puede aproximarse al 100%:

$$\left. \begin{aligned} \eta \square \frac{W + \dot{Q}_{res}}{\dot{m}_{comb} PCI} \\ \dot{m}_{comb} PCI = W + \dot{Q}_{res} + \dot{Q}_p \end{aligned} \right\} \eta = 1 - \frac{\dot{Q}_p}{\dot{m}_{comb} PCI}$$

Tabla 2.4.- Calores residuales aprovechables en motores térmicos. Las pérdidas 1% a 5%.

Ciclo	Flujo	t [°C]	% PCI
Otto y Diesel	Escape	300-900	20-40
"	Refrigeración del agua	75-85	20-40
"	Posenfriamiento del turbo	50-95	10-20
"	Refrigeración del aceite	70-90	5-10
Brayton	Escape	300-500	60-80
Rankine	Condensador	30-50	50-70

2.6.- Fuentes no convencionales y almacenamiento estacional.

- La **energía térmica contenida en el aire y en el suelo** tienen un nivel térmico (T) adecuado para considerarlas una fuente de energía no convencional y renovable, véase la **Fig. 1.2**.
 1. Tal es el caso de calentar en invierno bombeando calor tomado de ellas hacia una temperatura mayor. P. e. el terreno puede estar a una temperatura mayor que el aire, haciendo que la eficiencia de la bomba de calor sea mayor, por disminuir el salto térmico necesario (geotérmica somera).
 2. Tal es el caso de verano, en que el aire atmosférico hace de sumidero térmico. El terreno puede estar a una temperatura menor, lo que hace que la eficiencia de la bomba de calor (aire acondicionado) sea mayor por disminuir el salto térmico.
- El calor vertido al terreno no se disipa tan rápido como el calor vertido a la atmósfera, por lo que puede ser almacenado hasta el invierno. Se denomina **almacenamiento estacional**.
- A lo largo de los años, el calor vertido al terreno ha de igualar al extraído para evitar su saturación térmica. Si se logra que esté más cálido en invierno y más fresco en verano, que el aire, es posible un ahorro energético que puede ser rentable frente al costo de los pozos necesarios.

2.6.- Fuentes no convencionales y almacenamiento estacional (cont.).

Ejercicio 2.9: Una bomba de calor extrae calor del aire en invierno a $t_s = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y lo bombea hasta $t_c = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ para consumo en calefacción y ACS (compresión mecánica) consumiendo para ello trabajo. Asumir que por irreversibilidades internas y externas al ciclo es posible un 50% de la eficiencia energética de Carnot (ver Ap. 2.10) para bombas de calor actuando entre las temperaturas que se indican (que para ellas se denomina *COP*). Calcular:

1. Eficiencia obtenible en el caso base. **Sol.:**

$$COP = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{T_s}{T_c}} = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{(5 + 273)\text{K}}{(70 + 273)\text{K}}} = 2,6$$

2. Eficiencia obtenible si se extrae el calor de un pozo geotérmico a $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Ganancia obtenible en %. **Sol.:**

$$COP = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{T_s}{T_c}} = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{(15 + 273)\text{K}}{(70 + 273)\text{K}}} = 3,1 \rightarrow 19\%$$

3. Eficiencia obtenible, si en el caso 2 se opta por calefacción por suelo radiante, con lo que la temperatura del agua caliente producida es de $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Ganancia obtenible en % sobre caso base. **Sol.:**

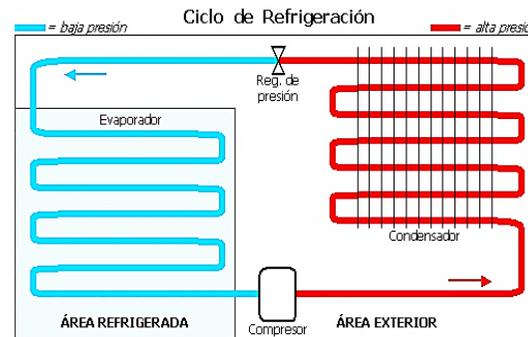
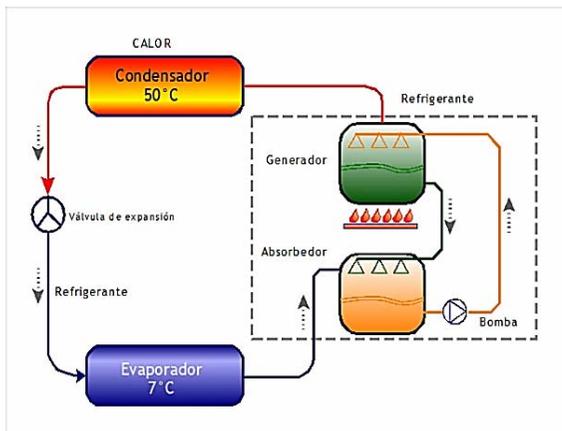
$$COP = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{T_s}{T_c}} = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{(15 + 273)\text{K}}{(35 + 273)\text{K}}} = 7,7 \rightarrow 196\%$$

4. Eficiencia en la utilización de la energía primaria al consumir electricidad producida por ella como energía secundaria para mover la bomba, si la eficiencia media de las centrales eléctricas es del 40% desde el punto de consumo de su combustible y si la eficiencia energética del transporte, distribución de electricidad a los usuarios domésticos y conversión final es del 90%. **Sol.:**

$$\eta = 0,9 \times 0,4 \times 2,6 = 0,936$$

2.6.- Fuentes no convencionales y almacenamiento estacional (cont.).

Ejercicio 2.10: Las máquinas de absorción, son un tipo de bomba de calor (usable para para producir frío en su evaporador, o para producir calor en su condensador). No consumen trabajo, sino calor (en su generador de vapor) a una temperatura relativamente alta t_g , mayor que la ambiente. El absorbedor de vapor tiene que evacuar calor residual al ambiente (Aquí; Aquí). Hay de dos tipos, de simple efecto ($COP_{se} \approx 0,7$; $t_g \geq 70 \text{ }^\circ\text{C}$) y de doble efecto ($COP_{de} \approx 1,2$; $t_g \geq 150 \text{ }^\circ\text{C}$). Se pide comparar: **a)** las emisiones específicas de efecto invernadero en masa de CO_2 equivalente de esta técnica de refrigeración. Se consume gas natural en una caldera, con eficiencia energética 0,9 y 0,8 respectivamente y considerando en esta cifra enfriamiento de los humos hasta t_g . **b)** la emisión de la de compresión mecánica ($_{cm}$) (Aquí) consumiendo electricidad en España. Para ello asuma para esta última tecnología un $COP_{cm} = 3,0$. Usense los factores de emisión propuestos por el IDAE, Tabla 2.3. **Solución:**



$$FE_{cm} = 3,09 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{tep}_e} \frac{\text{tep}_e}{\text{tep}_e \cdot 3,0 \text{ tep}_{\text{frío}}} = 1,03 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{tep}_{\text{frío}}} = 0,089 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{MWh}_{\text{frío}}}$$

Fuente: Ciclo de refrigeración, Evazquezm, CC BY SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciclo_de_Refrigeraci%C3%B3n.png

Fuente: Ciclo refrigeración por absorción, Czajko, CC BY SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciclo_refrigeracion_por_absorcion.png

$$FE_{se} = 2,34 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{tep}_{\text{gn}}} \frac{\text{tep}_{\text{gn}}}{0,9 \text{ tep}_{\text{calor}}} \frac{\text{tep}_{\text{calor}}}{0,7 \text{ tep}_{\text{frío}}} = 3,71 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{tep}_{\text{frío}}} = 0,32 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{MWh}_{\text{frío}}}$$

$$FE_{de} = 2,34 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{tep}_{\text{gn}}} \frac{\text{tep}_{\text{gn}}}{0,8 \text{ tep}_{\text{calor}}} \frac{\text{tep}_{\text{calor}}}{1,2 \text{ tep}_{\text{frío}}} = 2,43 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{tep}_{\text{frío}}} = 0,208 \frac{t_{\text{CO}_2}}{\text{MWh}_{\text{frío}}}$$

A la vista de los resultados, ¿resulta adecuado quemar gas natural para producir frío? SI NO Razón: NO, FE_{cm} es el menor.

2.7.-Bibliografía.

- [1] Guerrero-Lemus, Ricardo, Martínez-Duart, José Manuel. Renewable Energies and CO₂. Cost Analysis, Environmental Impacts and Technological Trends. Springer Verlag, 2012 Edition. Series: Lecture Notes in Energy, Vol. 3. 2013.
- [2] Incropera F. P. De Witt D. Introduction to Heat Transfer, 1990, Wiley.
- [3] Sigalés B. Transferencia de Calor, 2003, Reverté.
- [4] Moran M. J., Shapiro H. N. Fundamentos de Termodinámica Técnica, 1993, Reverté.
- [5] Sala Lizárraga J. M., López González L. M. Termodinámica Química, 2002, Ed. Ochoa ISBN 84-7359-543-2.

2.8.- Cuestiones de autoevaluación.

¿Cuál es la región del planeta donde se prevé el mayor crecimiento del consumo energético?	Asia
¿Cuál es la región el planeta donde se prevé un mayor crecimiento de la población?	Asia
La fuente de energía de la que más se consume es la leña.	NO
La hidroeléctrica no es una fuente de energía renovable.	NO
Mayoritariamente las agencias prevén un crecimiento acelerado del consumo energético en las próximas décadas	NO
La renovable que más produce en el mundo es la hidroeléctrica	NO
En el mundo, la nuclear es la tecnología de generación eléctrica mayoritaria	NO
La renovable que más electricidad produce en el mundo es la hidroeléctrica	SI
La biomasa es la renovable que más energía produce en el mundo debido a su uso tradicional	SI
El carbón es la fuente de energía fósil que más produce en el mundo	NO
Las reservas de petróleo están bien definidas por la gran cantidad de exploraciones realizadas	NO
La relación reservas a producción del uranio están bien definidas por la rareza de este mineral	NO
Las emisiones de CO ₂ por tep del carbón son las mayores en comparación con otras fuentes de energía convencionales	SI
Es perfectamente correcto considerar los biocombustible neutros en emisiones de carbono (CO ₂) a la atmósfera pues en su elaboración y entrega al usuario no entra más que energía renovable	NO
En España, globalmente y a efectos de las emisiones de carbono a la atmósfera la relación energía eléctrica producida en bornes de central/energía consumida pudiera ser igual o superior al rendimiento de las centrales de ciclo combinado	SI

2.8.- Cuestiones de autoevaluación (cont.).

El peso del CO ₂ emitido al quemar un combustible es igual al peso del combustible	NO
La entalpía de formación de una sustancia es el calor a añadir para recuperar la presión y temperatura de los productos al formarse partiendo de los reactantes siguientes: C, O ₂ , H ₂ , S, N ₂ .	SI
La aplicación del balance de energía a una turbina adiabática en régimen estacionario nos dice que la potencia extraída en el eje es igual al producto del caudal másico que la atraviesa por la disminución de la entalpía de remanso.	SI
En una máquina frigorífica las pérdidas de calor podrán ser desde el exterior hacia el volumen de control	SI
La transmisión del calor, aún siendo un proceso necesario en muchos casos, disminuye la exergía de un flujo de calor	SI
La totalidad del calor suministrado a un sistema puede convertirse en trabajo útil	NO
La exergía de un combustible a temperatura ambiente es aproximadamente igual a su poder calorífico	SI
El COP de una máquina frigorífica de compresión mecánica convencional es típicamente menor que 1	NO
Un motor Diesel puede tener un rendimiento energético próximo al 100% si se aprovecha el calor residual de sus gases de escape, el calor de la refrigeración completa del motor y el calor de posenfriamiento del aire a la salida del turbo	SI
La temperatura de los gases de escape de una turbina de gas convencional raramente sobrepasa los 90 °C	NO
Si una bomba de calor tiene un COP para calefacción de 3 puede resultar en un ahorro económico hasta que la electricidad que consuma sea 3 veces más cara que un combustible de sustitución.	SI
Pueden construirse máquinas frigoríficas que consuman energía solar térmica de baja temperatura	SI
Se podría usar en verano energía solar térmica para almacenar calor en el subsuelo para su uso en el invierno para calefactar locales.	SI
Entre los gases de efecto invernadero apreciable está el metano y el óxido nitroso	SI

2.8.- Cuestiones de autoevaluación (cont.).

2.1	Existe actualmente equidad en el acceso a la electricidad en nuestro planeta	NO
2.2	¿Es necesario el consumo de energía para provocar el desarrollo?	SI
2.3	¿Trae un mayor desarrollo un mayor consumo energético?	SI
2.4	¿Todos los países con grandes recursos energéticos fósiles están muy desarrollados?	NO
2.5	¿Son las causas de una elevada intensidad energética de Rusia y de Arabia Saudí las mismas?	NO, Rusia es por clima e ineficiencia en una sociedad no muy desarrollada económicamente y Arabia Saudí es una sociedad con elevados estándares
2.6	¿Es normal que en el desarrollo de un país se ofrezca al ciudadano energía subvencionada?	SI
2.7	¿Son elevados los costes externos de la energía nuclear?	SI, por el mantenimiento de la seguridad en el suministro del combustible, operación de las centrales y gestión y almacenamiento de los residuos.
2.8	¿Son los costes de amortización elevados con la energía solar?	SI
2.9	¿Considera que la reducción de la biodiversidad por los cultivos energéticos para la obtención de biomasa es un coste externo?	SI
2.10	¿Considera que la anegación de territorios en cuencas por las centrales hidroeléctricas es necesario considerarlo un coste externo?	SI
2.11	¿Tiene el ciudadano español que acudir el mercado de electricidad para suministrar su hogar?	NO (Véase tarifa de último recurso)

2.9.- Actividades propuestas.

Actividad 2.1: Aplique el balance másico y energético a un volumen de control invariable (V_{oC}) con entrada (s) y salida (c) y simplifíquelo de forma clara y justificada para obtener de ello las 2 expresiones de la potencia calorífica intercambiada con otra corriente líquida de sentido contrario y paralela a ella para formar un **intercambiador de calor a contracorriente**, con caudales másicos estacionarios \dot{m}_1 y \dot{m}_2 respectivamente y calores específicos c_1 y c_2 . El conjunto del cambiador de calor es adiabático con el exterior, sin fugas de fluido y con caídas de presión en cada uno de los dos circuitos pequeñas frente al cambio en la energía térmica p. u. de volumen. Desprecie cambios en la energía cinética frente a los de la térmica. Véase **Tema Recordatorio 2.2**.

Solución: Consideramos un volumen de control para cada corriente, $j = 1,2$. La estacionariedad indica que el caudal másico de salida es igual al de entrada. No se considera reacción química y sí un posible cambio de fase completo de una sustancia pura ($T = \text{cte.}$) de calor latente a presión constante L de la fase I a la II y con signo inverso en sentido inverso. En los cambiadores de calor la sección de paso al fluido suele ser la misma a la entrada que a la salida, con lo que la energía cinética no cambia entre la entrada y la salida en flujo líquido, pero ocurrirá una aceleración/deceleración si se evapora/condensa, o si es gaseoso por su cambio de densidad; aún así se dice despreciable. Los conductos suelen tener una sección de paso amplia, por lo que el **trabajo de flujo** p/ρ [4] suele ser casi el mismo a la salida que a la entrada. Las diferencias de altura entre entrada y salida no suelen ser tan grandes que haga que la energía gravitatoria cambie apreciablemente frente a lo que cambie la térmica.:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{dE_{V_{oC}}}{dt}}_{\text{Estacionario}} &= \underbrace{\sum \dot{Q}_i}_{\substack{\text{Intercambios} \\ \text{Todas las áreas} \\ \dot{Q}_i}} + \underbrace{\dot{W}_i}_{\substack{\text{Potencia aportada sin} \\ \text{variación de volumen (eje)} \\ =0, \text{ no hay eje}}} - \underbrace{p \frac{dV_{V_{oC}}}{dt}}_{\substack{\text{Pot. aportada} \\ \text{por variación de} \\ \text{volumen, si } P \text{ es} \\ \text{homogénea} \\ \text{El cambiador no} \\ \text{varía su volumen}}} - \underbrace{\sum (\dot{Q}_p + \dot{W}_p)}_{\substack{\text{Pérdidas } =0 \\ \text{Todas las áreas}}} + \underbrace{\dot{m}_s h_{t,s} - \dot{m}_c h_{t,c}}_{\substack{\text{Estacionario: } \dot{m}_s = \dot{m}_c = \dot{m}_i \\ \underbrace{\dot{m}_s}_{H_s} \underbrace{h_{t,s}}_{H_s} - \underbrace{\dot{m}_c}_{H_c} \underbrace{h_{t,c}}_{H_c}}} \Rightarrow \dot{Q}_{i,j} = \dot{m}_i (h_{t,c,j} - h_{t,s,j}) = \dot{m}_i \overbrace{\Delta h_{t,i}}^{\text{Salida-entrada}} \\
 &\quad \underbrace{\text{Flujo de energía interna, cinética, potencial y trabajo de flujo a través de las fronteras permeables}} \\
 &\quad \underbrace{\text{Potencia mecánica}} \\
 &\quad \text{Intercambio a través de las paredes impermeables al fluido} \\
 \Delta h_i &= \Delta \left(u_f + u_T + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right) = c_I \Delta T_I + L + c_{II} \Delta T_{II}; \quad C = c_p \text{ si se trata de un gas.} \left\{ \begin{array}{l} \Delta T_I: \text{ desde la entrada hasta el cambio de fase} \\ \Delta T_{II}: \text{ desde el cambio de fase hasta la salida} \end{array} \right. \\
 &\quad \Rightarrow \underbrace{\dot{Q}_{i,j}}_{j=1,2} = \dot{m}_j (c_I \Delta T_I + L + c_{II} \Delta T_{II})_j
 \end{aligned}$$

2.9.- Actividades propuestas.

Actividad 2.2 : Demuestre que si un conjunto de n máquinas térmicas se colocan en serie a lo largo de una única línea, **tomando la primera energía de una fuente única para todas** y estando caracterizada cada una de ellas por el rendimiento (eficiencia) energético η_i , el rendimiento del conjunto es $\eta = \prod_{i=1}^n \eta_i$.

Solución: Aceptando que la definición de η es energía a la salida (cedida) dividida por la energía a la entrada (suministrada) resulta de multiplicar $n-1$ veces por 1:

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{E_{c,n}}{E_{s,1}} = \frac{E_{c,1}}{E_{s,1}} \frac{E_{c,2}}{\underbrace{E_{c,1}}_{=E_{s,2}}} \frac{E_{c,3}}{\underbrace{E_{c,2}}_{=E_{s,3}}} \dots \frac{E_{c,n}}{E_{s,n}} \\ \eta_i &= \frac{E_{c,i}}{E_{s,i}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \eta = \prod_{i=1}^n \eta_i$$

2.9.- Actividades propuestas.

Actividad 2.3: Un motor alternativo de combustión interna (MACI) [turboalimentado](#) y [posenfriado](#) quema un caudal másico $\dot{m}_{comb} = 180$ kg/h de [gas natural](#) canalizado, con $PCI = 45$ MJ/kg, en una central de distrito de [cogeneración](#), actuando normalmente; esto es, en condiciones estacionarias.

- i. Produce $W_{mot} = 1$ MW en el eje, el cual mueve un generador asíncrono de electricidad con eficiencia energética $\eta_{gen} = 90\%$, aprovechándose la degradación en calor que ocurre en su interior como aporte al circuito de agua caliente del posenfriador que enfría el aire turbo-comprimido.
- ii. Se han medido $\dot{Q}_{pos} = 100$ kW de aprovechamiento del calor evacuado en el posenfriamiento (intercooling) del aire comprimido por el turbocompresor, el cual se aprovecha para calefacción por suelo radiante de locales comerciales anejos. Se realiza por medio de un anillo de agua caliente al que se suministra a la temperatura media $t_{cal} = 40$ °C.
- iii. Un 20% de la potencia calorífica del combustible se extrae a la temperatura media $t_{ref} = 80$ °C del circuito de refrigeración del motor para atender el consumo de agua caliente sanitaria (ACS) por medio de un anillo de agua caliente para la distribución al vecindario, la cual se prepara a $t_{ACS} = 60$ °C para evitar la [legionelosis](#) y se mezcla con agua fría en el momento de su envío al usuario para evitar quemaduras.
- iv. Otro 20% de la entalpía térmica de los humos de escape produce vapor de agua transfiriéndole calor a la temperatura media $t_{vap} = 180$ °C en una caldera de recuperación en la central y para igual propósito, destinada a los vecinos más alejados, dada la mayor densidad energética del vapor, que condensa en el punto de consumo.
- v. El resto se pierde a) directamente a la atmósfera como aire caliente y b) en forma de entalpía térmica de los gases de escape a $t_{vap} = 130$ °C.

Desarrolle, calcule y exprese las solución exclusivamente en el espacio reservado al efecto. Considere que el [estado muerto](#) es la atmósfera a 298 K.

Se pide:

2.9.- Actividades propuestas.

Actividad 2.3 (cont.): Un motor alternativo de combustión interna (MACI) ...

1. Calcular el rendimiento energético y exergético del motor contabilizando exclusivamente la electricidad producida como útil (rendimiento eléctrico).

Solución:

$$\eta_e = \frac{W_u}{\dot{m}_{comb} PCI} = \frac{1 \text{ MW}_{mot} \times 0,9 \frac{W_e}{W_{mot}}}{180 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \underbrace{\frac{1 \text{ h}}{3.600 \text{ s}}}_{=1} \cdot \underbrace{\frac{\text{MW}}{\text{MW}}}_{=1}} = \frac{0,9 \text{ MW}}{2,25 \text{ MW}} = 0,4$$

Por ser la electricidad íntegramente convertible en trabajo útil, es **exergía** en un 100%, y como el *PCI* es exergía también (salvo un pequeño error), la eficiencia (rendimiento) exergética/o:

2. Calcular el rendimiento energético y exergético de la instalación de cogeneración completa.

Solución: $\varepsilon_e = \eta_e$ (2.6):

$$\eta_{co} = \frac{W_u + \dot{Q}_{pos} + \dot{Q}_{ref} + \dot{Q}_{vap}}{\dot{Q}_{comb}} = \frac{0,9 \text{ MW} + 100 \text{ kW} + 2 \times 0,2 \times 2,25 \text{ MW}}{2,25 \text{ MW}} = \frac{1,9 \text{ MW}}{2,25 \text{ MW}} = 0,84$$

$$W_{u,max,pos} = \dot{Q}_{pos} \left(1 - \frac{T_0}{T_{pos}} \right) = 100 \text{ kW} \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{(40 + 273,16) \text{ K}} \right) = 4,84 \text{ kW}$$

$$W_{u,max,ref} = \dot{Q}_{ref} \left(1 - \frac{T_0}{T_{ref}} \right) = 0,2 \times 2,25 \text{ MW} \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{(80 + 273,16) \text{ K}} \right) = 70,3 \text{ kW}$$

$$W_{u,max,vap} = \dot{Q}_{vap} \left(1 - \frac{T_0}{T_{vap}} \right) = 0,2 \times 2,25 \text{ MW} \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{(180 + 273,16) \text{ K}} \right) = 154,1 \text{ kW}$$

La exergía de los calores residuales es muy baja, por su baja temperatura. Sólo se tienen en cuenta las temperaturas de suministro, ignorándose las irreversibilidades restantes hasta el punto de consumo.

$$\varepsilon_{co} = \frac{W_u + \sum W_{u,max}}{\dot{Q}_{comb}} = \frac{0,9 \text{ MW} + (4,84 + 70,3 + 154,1) \text{ kW}}{2,25 \text{ MW}} = \frac{1,13 \text{ MW}}{2,25 \text{ MW}} = 0,5 < \eta_{co}$$

2.9.- Actividades propuestas.

Actividad 2.4: Considere el poder calorífico inferior de un gas natural de valor $PCI = 45 \text{ MJ/kg}$ (Transpa. 20 del Cap. 1). Considere que para su extracción, purificación, licuefacción, transporte en estado líquido, regasificación y distribución se consume adicionalmente el equivalente energético de un 15% de su PCI . A esa energía consumida adicional se le otorga un alto factor de emisión de GEI en términos de CO_2 , que es estimativamente equivalente al doble que el propio gas natural al quemarse. Esto es a causa de la naturaleza de esa energía empleada y a causa de asociársele las ineludibles pequeñas fugas de gas natural durante el transporte desde el yacimiento hasta el punto de consumo y en el propio punto de consumo, ya que el gas natural tiene un efecto invernadero $\cong 25$ veces el del propio CO_2 por unidad de masa. Si se asume un factor de emisión básico de $2,34 \text{ kg de } \text{CO}_2 \text{ por kg de gas natural quemado}$, se pide determinar el factor de emisión total (emisiones directas e indirectas) del empleo del gas natural en la producción de electricidad en una central de ciclo combinado que ofrece un rendimiento energético basado en el PCI de $0,6$. Pasar el resultado a g/MWh y comparar con la [Tabla 2.3](#).

Solución: Se quema todo el gas natural en la central, despreciándose las fugas en términos másicos. Es necesario sumar el 15% multiplicado por su factor relativo de emisión ($2,0$). Finalmente, dado que se aprovecha un 60% del PCI es necesario dividir por este rendimiento y por el PCI para dar la cifra por unidad de energía.

$$\left. \begin{aligned}
 FE &= \frac{2,34(1 + 0,15 \times 2,0) \text{ kg}_{\text{CO}_2.\text{eq}}/\text{kg}_{\text{gn}}}{0,6 \frac{\text{MJ}_e}{\text{MJ}_{\text{gn}}} 45 \frac{\text{MJ}_{\text{gn}}}{\text{kg}_{\text{gn}}}} = 0,113 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2.\text{eq}}}{\text{MJ}_e} \\
 1\text{MJ} &= 10^3 \text{ kW} \times 1\text{s} \times \frac{1 \text{ h}}{3.600 \text{ s}} = \frac{1}{3,6} \text{ kWh}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow FE = 0,113 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2.\text{eq}}}{\text{MJ}_e} \frac{3,6\text{MJ}_e}{\text{kWh}_e} = 407 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2.\text{eq}}}{\text{kWh}_e}$$

La [Tabla 2.3](#) proporciona 340 g/kWh_e , menor. Probablemente: a) por no tener en cuenta totalmente las emisiones indirectas, que aquí son meramente estimativas, b) por considerar un gas natural de mayor calidad y por ello de mayor PCI , o c) por considerar el PCS , cosa habitual con el GN, dado que su combustión limpia hace que al condensar la humedad de los humos, el agua no sea ácida, y pueda condensar sin daño.

2.9.- Actividades propuestas.

Actividad 2.5: Realice una comparación de: consumo de energía primaria (e_p) en tep/km y factor de emisión total FE (directas e indirectas) en g de CO_2/km entre: a) de exclusivamente el consumo de combustible de un automóvil con rendimiento de motor $\eta_{mot} = 0,4$. Circula por carretera a 90 km/h consumiendo $n = 5$ l/100 km para un combustible con $PCI = 43,1$ MJ/kg del gasóleo A y; b) el mismo vehículo, pero eléctrico a baterías de igual potencia de motor, con rendimiento global de carga y descarga de sus baterías $\eta_{cd} = 0,8$ y un rendimiento del motor eléctrico $\eta_{moe} = 0,9$. Datos adicionales exclusivamente en la [Tabla 2.3](#) y unidades. En ella use la fuente $n = 5$ para la electricidad, empezando por la primera. Si el FE de la electricidad correspondiente a n es 0 en la [Tabla 2.3](#), use el mínimo de la columna en lugar de 0.

$$\text{Energía consumida: } e \left[\frac{\text{Mwh}}{\text{km}} \right] = \overset{n=5}{\underset{\sim}{5}} \frac{1}{100 \text{ km}} \frac{1 \text{ tep}}{1.181 \text{ l}} 41,87 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \frac{1.000 \text{ kgep}}{\text{tep}} \frac{\text{MWh}}{3.600 \text{ MJ}} = 4,92 \times 10^{-4} \frac{\text{Mwh}}{\text{km}}$$

$$\text{Diésel, Energía primaria por km } \left[\frac{\text{tepp}}{\text{km}} \right]: e_{p,Diésel} = \overset{n=5}{\underset{\sim}{5}} \frac{1}{100 \text{ km}} \frac{1,12 \text{ tep}_p/\text{tep}}{1.181 \text{ l/tep}} = 4,74 \times 10^{-5} \frac{\text{tepp}}{\text{km}}$$

$$\text{Diésel, GEI por km } \left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{km}} \right]: FE_{Diésel} = e_{p,Diésel} 3,06 \frac{\text{tCO}_2}{\text{tep}} \frac{1 \text{ tep}}{1,12 \text{ tep}_p} 10^6 \frac{\text{g}}{\text{t}} = 130 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}, \text{ o bien } \overset{n=5}{\underset{\sim}{5}} \frac{1}{100 \text{ km}} \frac{1 \text{ tep}}{1.181 \text{ l}} 3,06 \frac{\text{tCO}_2}{\text{tep}}$$

$$\text{Energía motriz: } e_{mot} \left[\frac{\text{Mwh}}{\text{km}} \right] = e \times \eta_{mot} = 4,92 \times 10^{-4} \frac{\text{Mwh}}{\text{km}} 0,4 = 1,968 \times 10^{-4} \frac{\text{Mwh}}{\text{km}}$$

Fuente primaria de electricidad: Nuclear al ser $n = 5$, pero como consta 0, se toma el mínimo, de $n = 17$ (RSU).

$$\text{Eléctrico, Energía primaria por km } \left[\frac{\text{tepp}}{\text{km}} \right]: e_{p,El} = \frac{E_{mot}}{0,8 \times 0,9 \text{ MWh/MWh}_{\text{usuario}}} \frac{\text{MWh}}{\text{km}} \times 0,28 \frac{\text{tepp}}{\text{MWh}_{\text{usuario}}} = 7,65 \times 10^{-5} \frac{\text{tepp}}{\text{km}}$$

$$\text{Eléctrico, GEI por km del combustible } \left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{km}} \right]: FE_{El} = C_{p,El} 0,27 \frac{\text{tCO}_2}{\text{tep}} 10^6 \frac{\text{g}}{\text{t}} = 20,7 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$$

2.10.- Temas recordatorios y avanzados (*ex cursus*).

Tema recordatorio 2.1.- La deducción del factor de Carnot [4], sea para un motor térmico o para una bomba de calor (usada como máquina frigorífica o como máquina calorífica) se basa en que los intercambios de calor se realizan **reversiblemente** y a solo 2 temperaturas constantes, cesión a alta T_c y suministro a baja T_s , denominado ciclo de Carnot. $Q > 0$ si se toma del foco térmico y < 0 si se vierte en él (sumidero). El intercambio de trabajo se realiza también reversiblemente. En consecuencia, el ciclo es internamente reversible y por lo tanto se puede aplicar la igualdad de Clausius, la cual viene a expresar que como consecuencia del ciclo termodinámico realizado, la entropía no varía:

$$S_{final} - S_{inicial} = \oint \frac{dQ}{T} = 0 \Rightarrow \frac{Q_s}{T_s} + \frac{Q_c}{T_c} = 0$$

Además se intercambiará trabajo a lo largo del ciclo $\tau > 0$ si se trata de una bomba de calor. Y < 0 si se trata de un motor térmico, para el cual se suministra en alta y se cede en baja temperatura. Por aplicación del primer principio (balance energético) **Ec. (1.1) o (2.1)**:

$$\left. \begin{array}{l} \text{A. Motor térmico, } T_c < T_s : \\ \eta = \frac{|W|}{Q_s}; \text{ Balance Energético: } |W| = Q_s - |Q_c| \\ \text{Ec. (2.r.1): } \frac{Q_s}{T_s} - \frac{|Q_c|}{T_c} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_c}{T_s} \begin{cases} > 0 \\ < 1 \end{cases}; \text{ Generalmente } T_c = T_{amb} \quad (2.r.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{B. Bomba de calor, } T_c > T_s : \\ \eta_{mf} = \frac{Q_s}{W}; W = |Q_c| - Q_s \\ \text{a. Máquina frigorífica (mf): Ec. (2.r.1): } \frac{|Q_c|}{T_c} - \frac{Q_s}{T_s} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \overbrace{\eta_{mf}}^{COP_{mf}} = \frac{1}{\frac{T_c}{T_s} - 1} \begin{cases} > 0 \\ \gg 1 \end{cases}; \text{ En climatización generalmente } T_c = T_{amb} \quad (2.r.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{b. Máquina calorífica (mc): } \\ \eta_{mc} = \frac{|Q_c|}{W} \\ |Q_c| = W + Q_s \\ \text{Ec. (2.r.2)} \end{array} \right\} \Rightarrow \overbrace{\eta_{mc}}^{COP_{mc}} = \eta_{mf} + 1 > 1; \text{ En climatización generalmente } T_s = T_{amb} \quad (2.r.3)$$

NOTA: resulta corriente cambiar el criterio de signos del balance energético en casos particulares para que las cantidades sean positivas. P. e. la potencia de un motor se ofrece como cantidad positiva. 35

2.10.- Temas recordatorios y avanzados (*ex cursus*).

Tema recordatorio 2.2.- Un flujo interno estacionario es calentado a través de las paredes, p. e. en un cambiador de calor, [Actividad propuesta 2.5](#). El cálculo del incremento de temperatura se basa en el balance de masa y de energía. Dice que, para un gas ideal caloríficamente perfecto (gicp) y para un líquido ideal caloríficamente perfecto (licp), es:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{Q}_{ext \rightarrow flujo} = \dot{m}(h_{t,c} - h_{t,s}) \\ V^2 \ll h \\ h = u + \frac{P}{\rho} \\ \text{Sin reacción: } u = u_T \\ \underbrace{g(z_s - z_c)}_{\substack{\text{Entre entrada y salida} \\ \text{la altura cambia poco.}}} \square h_s - h_c \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{Q}_{ext \rightarrow flujo} = \dot{m}(h_c - h_s) = \dot{m}\Delta h$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{gicp: } h = c_v T + \frac{P}{\rho} + \text{cte.} = c_p T \Rightarrow \dot{Q}_{ext \rightarrow flujo} = c_p \Delta T; \Delta \rho < 0; \underbrace{\Delta p}_{\substack{\text{Por} \\ \text{viscosidad} \\ \text{y por el} \\ \text{calentamiento}}} < 0 \\ \text{licp: } h = \underbrace{c}_{c_v=c_p=c} T + \frac{P}{\rho} + \text{cte.} \\ \rho = \text{cte. y generalmente } \frac{\Delta p}{\rho} \square c \Delta T \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{Q}_{ext \rightarrow flujo} = c \Delta T; \Delta \rho = 0; \underbrace{\Delta p}_{\substack{\text{Por} \\ \text{viscosidad}}} < 0$$

(2.r.4)

Tema recordatorio 2.3.- En la [Ec. \(2.1\)](#) se ha definido la entalpía total por agregación a la entalpía de las formas habituales de energía p. u. de masa. Esto recuerda que se suele definir por entalpía de remanso, total, o [de parada](#), o incluso total, aquella a la que solamente se suma la energía cinética por unidad de masa, pues es la que se alcanza al remansar adiabáticamente hasta el reposo una corriente estacionaria sin variar su altura geográfica. Si además el remansamiento es isentrópico se obtienen la [presión](#) total o de [remanso](#) por agregación de la [presión dinámica](#); y para gases también se obtiene la temperatura y la densidad totales, de remanso o de parada, mayores que las estáticas.

2.10.- Temas recordatorios y avanzados (cont.) (*ex cursus*)

Tema avanzado 2.1.- A efectos del Reglamento de Instalaciones Térmicas de la Edificación [RITE](#) (p. e. [calificación energética de vivienda](#)), el IDAE propuso los siguientes [factores de conversión a primaria y de emisión](#) para España en 2013, para las distintas fuentes de energía usadas en la edificación. Difieren algo de la media nacional, p. e. la electricidad se consume en baja tensión, el gas natural a baja presión, los GPL (propano y butano) se pueden consumir embotellados o por suministro de tanque compartido. [Documento posterior](#)

Tema avanzado 2.2.- La función de estado [entalpía](#) h se construye por mera conveniencia, para agregar el [trabajo de flujo](#) a la energía en los balances, por resultar el trabajo de flujo reversible también una función de estado. Pudiera ser $h = e + pv$, pero no es lo más frecuente pues e incorpora todas las formas de energía. De ahí nacen las distintas definiciones de entalpía, pues en la energía se pueden considerar sumadas unas formas u otras. Las tablas termodinámicas de propiedades de sustancias puras consideran solamente u_T . Las [tablas de reacciones químicas](#) consideran solamente la energía de formación de las especies químicas en un estado estándar (0), cercano al ambiente, partiendo de un estado químico de referencia $h_f^0 = u_f^0 + p^0 v^0$. La energía cinética y potencial gravitatoria puede pues incluirse o no. Por compacidad en la notación consideraremos que $h = u + pv$, [Ec. \(2.1\)](#). En la **entalpía total** h_t están incluidas todas aquellas formas de energía que puedan cambiar, ya que los dos principios de la termodinámica están formulados como diferencias. Aquí son la cinética y gravitatoria adicionalmente a u , que incorpora la de formación y la térmica (que incluye la [sensible](#) y la [latente](#)). En algunos textos y tablas se incluye la latente en la de formación por ocurrir un cambio en el estado de agregación de la materia.

Tema avanzado 2.3.- A menudo se citan como “pérdidas” lo que son degradaciones como consecuencia de irreversibilidades, p. e. por la viscosidad, que origina pérdida (caída) de presión de remanso en un flujo adiabático, llamada pérdida de carga. Lo que sí es cierto es que originan una destrucción de exergía, reduciendo la posibilidad de obtener trabajo útil y de transferir calor y de ello pensar en una “pérdida” es admisible, pero confuso. La auténtica pérdida es la de trabajo o calor, sea ésta incontrolada; es decir, fugas, o cesiones inevitables, por existir un flujo indeseado hacia fuera o hacia dentro del sistema.

2.10.- Temas recordatorios y avanzados (cont.) (*ex cursus*)

Tema avanzado 2.3.- El gobierno de España en 2020 ha promulgado el “**acuerdo de Declaración ante la Emergencia Climática y Ambiental en España**”, cuyo contenido puede resumirse en [30 puntos](#).

2.9.- Actividades propuestas. Temas avanzados.

Actividad 2.6: En el país vecino, Francia, la mayor parte de la electricidad se produce con centrales nucleares, cuya emisión de gases de efecto invernadero directa e indirecta, es muy baja. En este caso analice las posibilidades de producir frío y calor de climatización en los edificios consumiendo exclusivamente electricidad. Se sugieren los siguientes puntos de vista: capacidad de generación a lo largo del año y del día de las centrales nucleares, capacidad de transporte de la red eléctrica, tecnología de distribución del calor y del frío en el interior de los edificios, posible almacenamiento térmico local, inercia térmica del edificio.

Solución: Una central nuclear funciona a potencia continua cercana a su máximo. Detener centrales voluntariamente resulta costoso, aunque reducir su potencia algo (hasta un 30%) es posible. Por ello la climatización exclusivamente eléctrica resulta inconveniente al ser variable a lo largo del año y a lo largo del día. La red eléctrica necesita ser potente para absorber los picos de consumo y la parada de centrales nucleares para recarga. Complementar la generación nuclear con centrales ágiles, p. e. de ciclo combinado o de ciclo Brayton simple (turbina de gas CBT) facilita mucho el poder acoplar la generación a la variable demanda instantánea. Producir calor eléctrico por efecto Joule (resistencia eléctrica) resulta simple y fácilmente controlable al poder ser realizable en cada punto de consumo, usando la instalación eléctrica, que es útil para otros propósitos. La producción de frío para cada usuario puede resultar costosa por tener que evacuar el calor extraído, aunque con bombas de calor de ventana y las de tipo "split" es actualmente posible a precios interesantes. En edificios nuevos se suele optar por la producción de calor y de frío centralizada, distribuyéndose con un circuito de agua (hidrónico) o por conductos con aire. Resulta menos impactante y posiblemente más eficiente. El almacenamiento local, o incluso regional, de la electricidad facilitaría mucho la estabilidad de la red y la participación de la generación continua o no programable, como las renovables. Actualmente es costoso, salvo con las centrales hidroeléctricas reversibles. El almacenamiento térmico local se practica, en forma de agua caliente, hielo, etc. pero de forma minoritaria. La inercia térmica de los edificios favorece aplicar calor o frío de forma no continua.

2.9.- Actividades propuestas. Temas avanzados.

Actividad 2.7: Analice las subvenciones y ayudas que la electricidad producida por cogeneración bajo el antiguo [régimen especial de la producción](#) o su equivalente posterior, en España. Analice la proporción que supone esta generación en el mercado eléctrico nacional, p. e. consultando la web de Red Eléctrica Española ([REE](#)). Más información, [Cogeneración Wikipedia](#), [ACOGEN IDAE Cogeneración](#)

Solución: [Una presentación general](#). Véase la legislación más reciente y comentarios p. e. en: [APPA](#) y más concretamente de cogeneración en [COGEN](#).

Las disposiciones jurídicas relativas a cogeneración de alta eficiencia provienen de directivas europeas que se trasponen a la legislación nacional en un plazo determinado. Puede haber disposiciones nacionales adicionales, e incluso de los gobiernos autónomos españoles que no sean contrarias a las anteriores.

El acceso a la red eléctrica, que en España es de ámbito nacional, y la posibilidad de comercializar la electricidad inyectada son regulados, tanto en la esfera económica como en la técnica.

- En algunos países, y en España, el poder consumir e inyectar electricidad de la red a conveniencia está regulado también y facturar por el consumo detrayendo la producción, consumo neto, se denomina en inglés "net metering".
- En España se usa el concepto de "retribución razonable" primándose la inversión y la operación de las plantas de cogeneración. [Artículo más reciente 2019](#).
- El uso de la red eléctrica como "fuente y sumidero infinitos" por a modo de respaldo acarrea unos costes en la red que cada usuario debería compartir (salvo exenciones singulares que incentiven una cierta tecnología), tanto si se es consumidor exclusivamente, como si se es productor, o ambos a la vez.

Los productores en régimen especial, ya desaparecido, ahora unidos en una [clasificación oficial](#) disfrutaban de beneficios por la generación **renovable**, la **cogeneración** y aquella que consume **residuos** con potencias inferiores a 50 MW_e.

La legislación ha considerado que la sustitución de quemadores para producir calor por motores cogenerando, capaces de aprovechar la exergía de los combustible para generar electricidad (energía de mayor calidad) y obtener el calor deseado del calor residual del motor, es beneficioso para la sociedad y debe ser apoyado, tanto si se consume como si se inyecta en la red. Para ello ha de lograrse una utilización del calor superior a un mínimo, pues de lo contrario se produciría un fraude de ley, al resultar el rendimiento energético global insuficiente. La cogeneración en España disfruta de buena salud, habiendo cubierto el 11% de la demanda de electricidad del país, [ACOGEN](#).

2.9.- Actividades propuestas. Temas avanzados.

Actividad 2.8: Analice el destino del precio pagado por la electricidad consumida en los hogares en España, y de ello deduzca el % del coste final al usuario correspondiente a la retribución de la generación de la electricidad para el consumo de un hogar medio español, con 10 kW_e de potencia contratada sin [discriminación horaria](#). [AEE](#), accedido en diciembre 2019.

Solución: Fuentes sugeridas [Información de Iberdrola](#). El % no ha cambiado con el tiempo, [p. e.](#) 2017 → accedido el 06/12/2019. [Otra fuente 2013](#): Se indica el destino de la factura a diciembre de 2013, desglosando de forma ligeramente diferente. No se indica si es consumo en los hogares ni más precisión.

2.9.- Actividades propuestas. Temas avanzados.

Actividad 2.9: Analice el precio de la electricidad consumida en los hogares en España. Formule la ecuación que proporciona el coste de la electricidad en baja tensión para usuarios domésticos con las [opciones](#) de: 1: **tarifa regulada** Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC Véase [REE PVPC](#) u [OCU](#)) y para 2: **libre mercado**, p.e. [compra colectiva](#) u [ofertas compañías comercializadoras](#), para potencias contratadas < 9,9 kW, tarifas 2.0. Cite las fuentes usadas y no olvide consignar los desarrollos. Use exclusivamente el espacio reservado en esta cara del formulario.

Solución: La factura bimensual se descompone en tres términos:

- 1.- El término de potencia contratada, $W_{m\acute{a}x}$ (a pagar aunque no se consuma nada y limita la potencia instantánea con un Interruptor de Control de Potencia ICP o limitador, o contador digital), proporcional a ella en PVPC. Suma de peaje y margen de comercialización, en PVPC es $\frac{4\text{€} \times n^{\circ} \text{ de días}}{\text{año}} \times W_{m\acute{a}x}$
- 2.- Un término de energía, proporcional al consumo E . [Hay 3 tarifas](#) en PVPC: general, nocturna y supervalle. [Información](#). ($0,044027 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ para tarifa 2.0A+coste energía en el mercado mayorista para ese periodo). A la suma se le puede aplicar un descuento del [Bono Social](#) en el mercado regulado.
- 3.- Un tercer término de pagos adicionales. Este último se resume en la aplicación de un impuesto a la electricidad i_e , proporcional al coste total del término de potencia y de energía multiplicado por 1,051127, y adicionalmente, un coste regulado por la administración de alquiler del contador C_{al} , salvo que sea propiedad del cliente y otros servicios en la opción libre mercado, p. e., mantenimiento. A la cantidad total resultante se le carga el IVA correspondiente, 21% desde enero de 2014, o su equivalente en Canarias, Ceuta o Melilla. Se indican valores aproximados a 2019. De esta manera:

$$C = \left(W_{max} \underbrace{c_{wmax}}_{\substack{42,04 \frac{\text{€}}{\text{kWañño}} \\ \text{Se cobra por días}}} + E \underbrace{c_E}_{\substack{0,124107 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \\ \text{Dos términos:} \\ 1: \text{peajes} \\ 2: \text{coste estimado de la energía}}} \right) \left(1 + \underbrace{1,05113}_{\substack{\text{Ley 38/1992} \\ 0,04864 \frac{\text{€}}{\text{€}} \\ 0,07 \text{ a partir de 2012}}} \times i_e \right) + \underbrace{C_{al}}_{\substack{\text{Analógico: } \leq 0,51 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \\ \text{Digital: } \leq 0,81 \frac{\text{€}}{\text{mes}}}}$$

El resultado final a 2019 es que a un usuario doméstico medio el coste final con impuestos ronda los 0,25 €/kWh y para uno industrial aprox. 0,1 €/kWh. [AEE. Propuesta modificación 2020. Nuevas tarifas](#)