60804 Tecnología energética
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Tema 1: Introducción/repaso

Cristóbal Cortés

Máquinas y Motores Térmicos
Departamento de Ingeniería Mecánica

Actualizado: septiembre de 2021

Índice

1. CONTEXTO: Estadísticas energéticas
2. REPASO: Primer principio de termodinámica y balances de energía a equipos y plantas
3. REPASO: Segundo principio de termodinámica. Usos en tecnología energética
4. GENERALIDADES: Fuentes de energía. Balance energético de la tierra. Energías renovables. Combustibles fósiles
5. GENERALIDADES: Datos típicos de equipos energéticos

Estadísticas energéticas

Por Internet, exceso de datos:

- Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE), Gobierno de España: https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/estudios-informes-y-estadisticas
- Foro de la Industria Nuclear Española: https://www.foronuclear.org/publicaciones-archivo/energia-archivo/2021-version-online/
- BP p.l.c. - Statistical Review of World Energy: https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html
- Y muchos más: Unión Europea (Eurostat), World Energy Council (ONU), International Energy Agency (industria), DOE - Department of Energy (gobierno federal USA), …

Energía primaria y energía final

- Energía primaria: extraída de las fuentes naturales

  Se refiere esencialmente a la energía química = poder calorífico de combustibles, fósiles, residuos y renovables (ojo a la referencia, PCS, PCI, Tema 5)

  En otros casos se aplican convenciones (ojo, no siempre unificadas: verificar fuente):

  - Hidráulica, eólica, solar: energía primaria = electricidad (o calor)
  - Nuclear: energía primaria = calor = electricidad/rendimiento, rendimiento = convencional del ciclo vapor + alternador = {usualmente} = 1/3

- Energía final: utilizada en una aplicación, esp. una planta industrial. O bien: la que se factura. Incluye combustibles + electricidad suministrados a la planta

  Pérdidas, autoconsumos y almacenamientos se contabilizan de diferentes formas. Se definen rendimientos o intensidades (1/rendimiento) entre energías y con relación a variables económicas (e.g., energía primaria y PIB)

Unidades de energía

- **Unidad SI**: julio (J) — $1\ J = 1\ N \times m = 1\ kg \times m^2 \times s^{-2}$

Otras:

	caloría (cal)	$1\ cal = 4.1868\ J$
tamaño ↓	unidad térmica británica (Btu)	$1\ Btu = 1.055\,055\,852\,62 \times 10^3\ J$
	kilovatio-hora (kWh)	$1\ kWh = 1/1.163\ ter = 3.6 \times 10^6\ J$
	termia (ter)	$1\ ter = 10^6\ cal = 1.163\ kWh = 4.1868 \times 10^6\ J$
	barril de petróleo (barril = 158.9 litros)	$1\ barril = 5.52 \times 10^9\ J$
	tonelada equivalente carbón (tec)	$1\ tec = 7 \times 10^9\ cal = 2.931 \times 10^{10}\ J$
	tonelada equivalente petróleo (tep)	$1\ tep = 10^{10}\ cal = 4.1868 \times 10^{10}\ J$

$1\ ktep = 11.63\ GWh = 4.1868 \times 10^{13}\ J;\ 1\ GWh = 1/11.63\ ktep = 3.6 \times 10^{12}\ J$

- **Unidad de potencia SI**: vatio (W) — $1\ W = 1\ J \times s^{-1}$

Otras:

Kilocaloría/hora (kcal/h)	$1\ kcal/h = 1.163\ W$
Caballo de vapor (cheval vapeur – CV)	$1\ CV = 735.5\ W$
Caballo de potencia (horse power – hp)	$1\ hp = 745.7\ W$

Balances de energía

- Balances estacionarios [W] a un sistema técnico, *abierto*, que admite y expulsa masa:

Energía total (1er principio de termodinámica): $$\dot{m}\left[h+\tfrac{1}{2}v^2+gz\right]_{ent}^{sal}=q-w_{eje}$$

Energía mecánica: $$\dot{m}\left[\frac{p}{\rho}+\tfrac{1}{2}v^2+gz\right]_{ent}^{sal}=-w_{eje}+w_{dl}-D_v$$

- Conceptos: $\dot{m}$ = caudal (kg/s); entalpía $h = u + p/\rho$ [kJ/kg], propiedad termodinámica que aparece en el balance al sistema abierto; w_{eje} = trabajo en las partes móviles de la máquina; w_{dl} = energía de dilatación/contracción del volumen (gas); $D_v > 0$: fricción o disipación viscosa de energía mecánica en calor (todas en W)

Balances de energía

- Casos comunes para uso rápido: A menudo, ΔE_c, ΔE_p << w_{eje} ó q. En un conducto sin partes móviles, $w_{eje} = 0$. En una máquina, $q = 0$. En máquinas eléctricas, $\dot{m} = 0$

Intercambiador de calor:

$$q = \dot{m}(h_{sal} - h_{ent}) \approx \left\{ \begin{array}{l} \text{gas (ideal): } \Delta h \approx c_p \Delta T \\ \text{líquido: } \Delta h \approx c\Delta T + \Delta p / \rho \approx c\Delta T \end{array} \right\} = \dot{m} c_p (T_{sal} - T_{ent})$$

Máquina térmica:

$$w_{eje} = \dot{m}(h_{ent} - h_{sal}) \approx \left\{ \text{gas (ideal): } \Delta h \approx c_p \Delta T \right\} = \dot{m} c_p (T_{ent} - T_{sal})$$

Máquina hidráulica ($\rho \approx$ cte., $w_{dl} \approx 0$):

$$\dot{m}\left[\frac{p}{\rho}\right]_{sal}^{ent} = \dot{V}\Delta p = w_{eje} + D_v = \left\{ \begin{array}{ll} w_{eje}/\eta > 0 & \text{turbina} \\ \eta w_{eje} < 0 & \text{bomba} \\ & \text{ventilador} \end{array} \right.$$

Balances de energía

- Casos comunes para uso rápido: A menudo, ΔE_c, ΔE_p << w_{eje} ó q. En un conducto sin partes móviles, w_{eje} = 0. En una máquina, q = 0. En máquinas eléctricas, $\dot{m} = 0$

Estrangulación/pérdida de carga:

$$h + \tfrac{1}{2}v^2 + gz \approx h = \text{cte.}$$

Líquido o gas en flujo incompresible con q = 0, T = cte.:

$$\dot{V}\left[p + \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z\right]_{sal}^{ent} = \rho D_v > 0$$

Caldera/equipo de combustión:

$$\dot{m}_{comb} h_{comb} = \dot{m}_{comb} PC = q_u + \underbrace{\dot{m}_{gas} h_{gas} + m_{sol} h_{sol} + q}_{\Sigma L_i} \qquad \eta = \frac{q_u}{\dot{m}_{comb} PC} = 1 - \Sigma l_i$$

Máquina eléctrica:

$$\left|q\right| = q_{roz} + q_{Cu} + q_{Fe} = w_{el} - w_{eje} > 0$$

$$> 0 \quad > 0 \quad \text{motor} \quad w_{el} > w_{eje}$$

$$< 0 \quad < 0 \quad \text{generador} \quad \left|w_{el}\right| < \left|w_{eje}\right|$$

Segundo principio de termodinámica

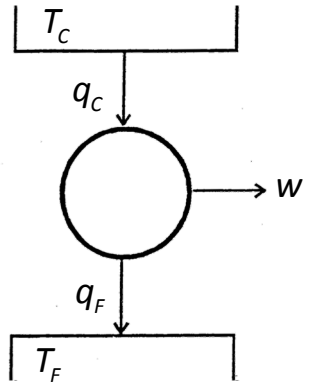
- Principal consecuencia (máquinas y ciclos térmicos, fósiles, biomasa, solares, nucleares): la generación de energía mecánica o eléctrica por medio de calentamiento (energía química, nuclear, solar) está limitada: rendimiento de Carnot

$$w = q_C - q_F$$

$$\eta = \frac{w}{q_C} = 1 - \frac{q_F}{q_C}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

$$\eta < \eta_{\text{Carnot}}$$

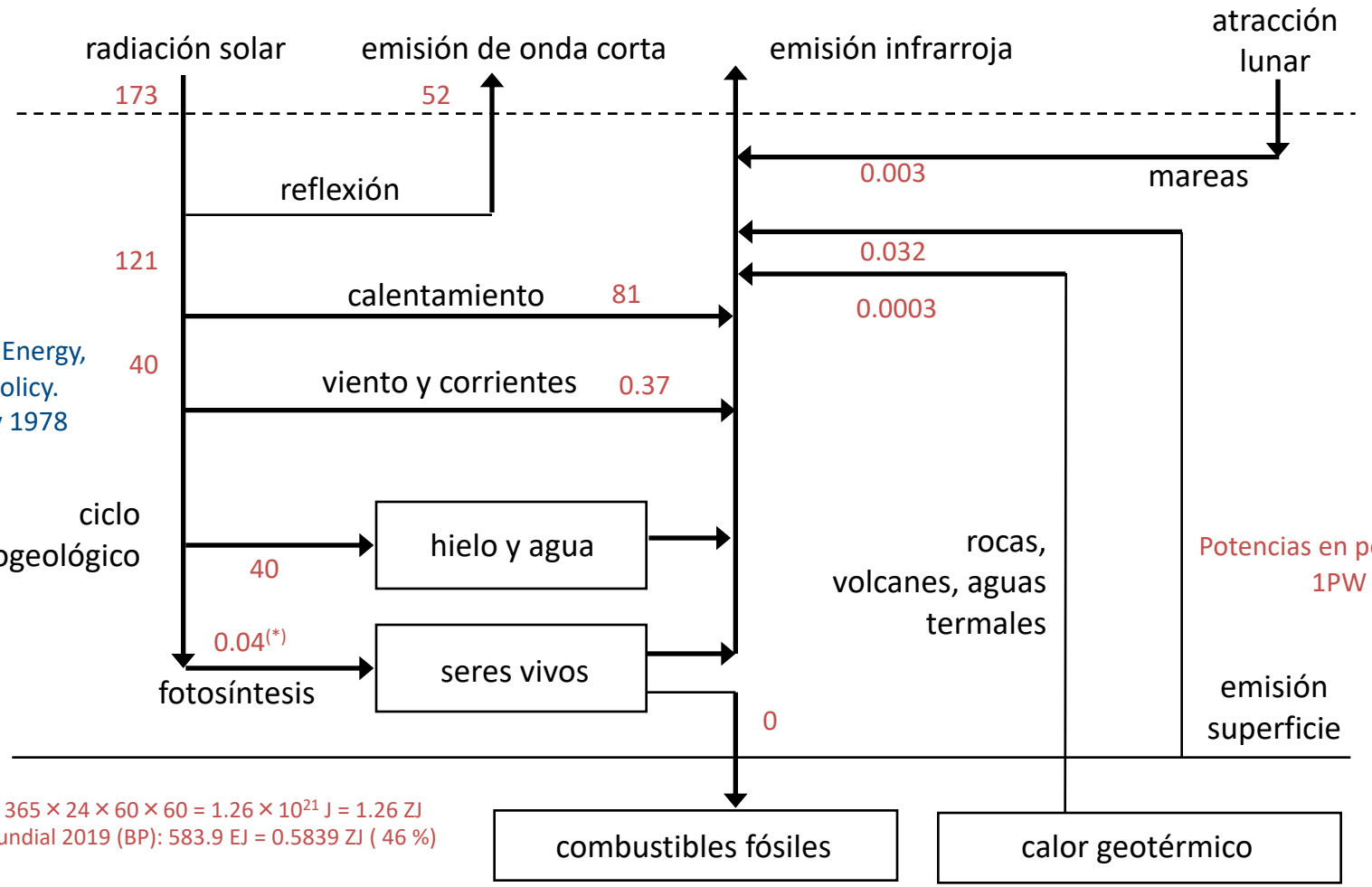


- El concepto de entropía s [J/kg·K] no es necesario saber qué significa, sólo el balance:

$$\dot{m}[s]_{ent}^{sal} = \dot{m}\Delta s = \frac{q}{T_s} + s_{gen}, \quad \text{con} \quad s_{gen} > 0$$

- Que permite una aplicación útil a máquinas térmicas, en lugar de la complicación de los balances de energía total y mecánica. Con $q = 0$, el balance es $\dot{m}(s_{sal} - s_{ent}) = \dot{m}\Delta s = s_{gen} > 0$ y la mejor máquina (ideal, inexistente) es la reversible con $s_{gen} = 0$, $s_{sal} = s_{ent}$, $\Delta s = 0$. Se define el rendimiento isoentrópico como (turbina): $\eta_s = w/w_{\Delta s=0} = \Delta h/\Delta h_{\Delta s=0} < 1$

Balance energético de la Tierra



Richard C. Dorf. Energy, resources and policy. Addison-Wesley 1978

Potencias en petavatios
$1PW = 10^{15}$ W

(*) $4 \times 10^{13}W \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 1.26 \times 10^{21}$ J = 1.26 ZJ
Consumo EP mundial 2019 (BP): 583.9 EJ = 0.5839 ZJ (46 %)

Evaluación de recursos fósiles

- Recursos existentes: recursos en todos los yacimientos de combustibles fósiles cuya existencia sea conocida o sospechada

  → Recursos recuperables: recursos en yacimientos que pueden ser descubiertos y explotados de manera viable técnica y económicamente

  → Reservas probadas: recursos recuperables que existen en yacimientos conocidos (explorados y caracterizados y en explotación)

  Sólo en carbón se divide en reservas probadas recuperables (mina económica ≈ cielo abierto) y no recuperables (mina no económica ≈ de interior)

Evaluación de recursos fósiles

- Reservas probadas, producción anual y ratio, total mundial

	reservas y consumo anual (unidades)		reservas y consumo anual (J)		ratio (años)
carbón (Mt, EJ)	1 069 636	167.6	2.54×10^{22}	1.68×10^{20}	151.5
petróleo (barriles)	$1\,733.9\times10^{9}$	34.745×10^{9}	9.37×10^{21}	1.98×10^{20}	49.9
gas natural (m^3)	198.8×10^{12}	$3\,989.3\times10^{9}$	6.97×10^{21}	1.32×10^{20}	49.8

Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2020

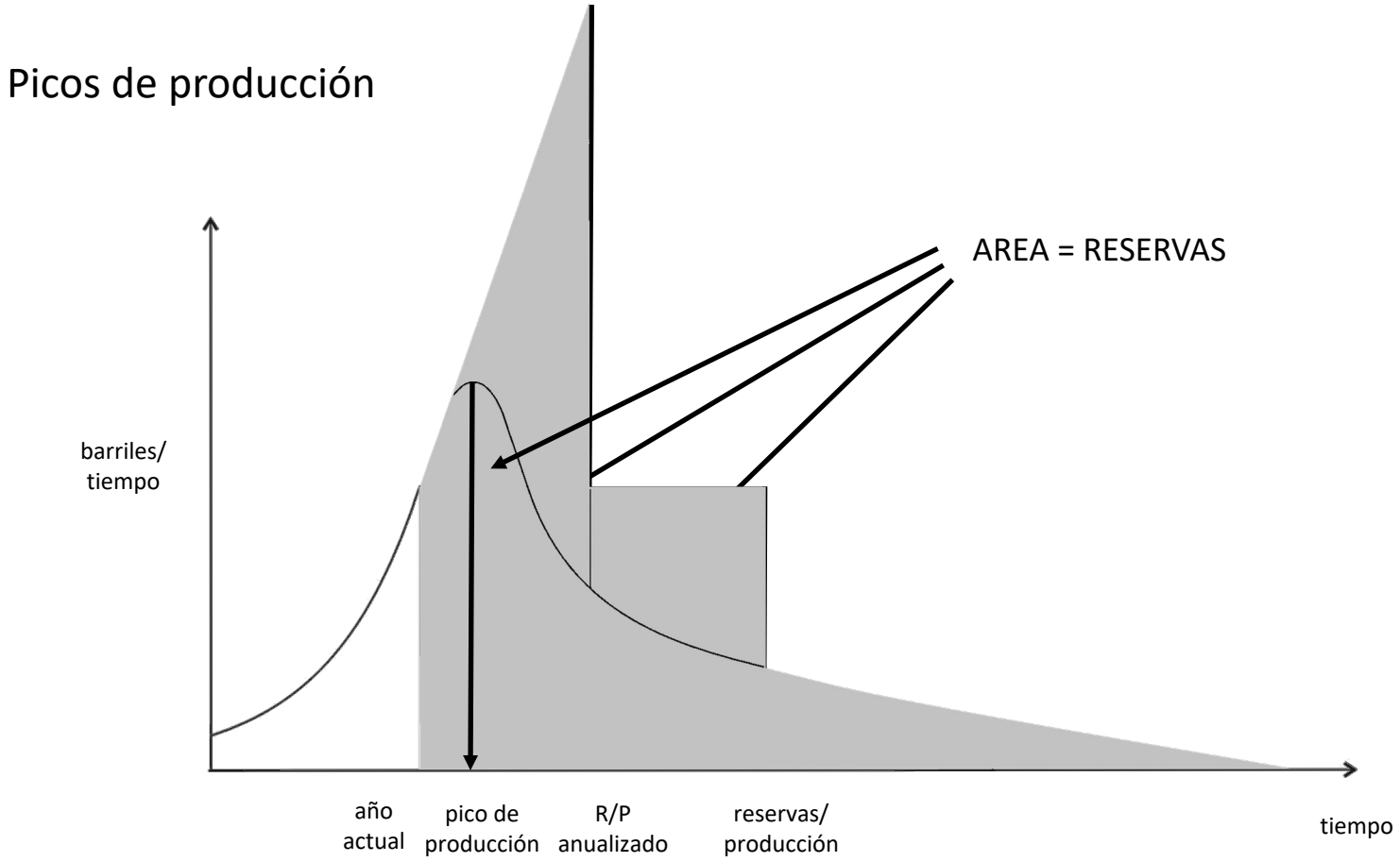
Notas: Conversiones en la transparencia 5. Mt de carbón a J con las cantidades separadas de antracita+hulla y subituminoso+lignito y la equivalencia a teps dadas en el informe (respectivamente 1 tep = 3 y 1.5 t). m^3 de gas a J con la equivalencia 10^9 m^3 de gas = 0.860 Mtep (36 MJ/m^3(N) que se menciona, razonable para PCI, v. tema 5). Ojo, cantidades de billón y trillón en escala corta (USA)

Evaluación de recursos fósiles

Picos de producción (esp. petróleo, pero no únicamente):

- Aumento porcentual constante $\Rightarrow$ curva de consumo/tiempo exponencial, pero en realidad llega un momento en que la producción no puede mantenerse y debe decrecer. Esto se debe a que no todos los yacimientos se agotan a la vez, y en el caso de petróleo/gas, también a la propia geofísica de los pozos
- Aunque el recurso puede acabarse mucho más tarde, los problemas comienzan mucho antes, en el momento que se alcanza el pico de producción y la demanda no puede alcanzarse
- Estimación para el petróleo: 2000 – 2010
- Literatura (nunca mejor dicho) recomendada: Kenneth S. Deffeyes. *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage*. Princeton University Press (2001)

Evaluación de recursos fósiles



Rendimientos de transformaciones energéticas

equipo o proceso	transformación	rendimiento
caldera de combustión	química → térmica	70-90^{+} %
caldera de recuperación	térmica → térmica	50-70 %
ciclo turbina vapor	térmica → mecánica	25-45 %
turbina gas	química → mecánica	30-40^{+}%
MACI	química → mecánica	25-40^{+} %
ciclo combinado	química → mecánica	45-60^{+} %
generador/motor eléctrico	mecánica ↔ eléctrica	80-95 %
central térmica	química → eléctrica	30-45 %
central hidroeléctrica	mecánica → eléctrica	80-90 %
central eólica	mecánica → eléctrica	25-45 %
central termosolar	solar → eléctrica	15-30%
paneles PV	solar → eléctrica	15-20 %

Tamaños máximos – generación eléctrica

Hidráulica	0.3 - 15 GW_e	embalse
Eólica	20 - 100 MW_e	parque, 2.5-6 MW_e/máquina
Central termosolar	100 MW_e	grupo, torre/colector distrib.
Central fotovoltaica	100^+ MW_e	potencia “pico”
Mareomotriz	300 MW_e	(singular)
Central térmica fósil	0.8 GW_e – 1^+ GW_e	grupo
Central nuclear	1.5 GW_e	grupo

Costes aproximados – generación eléctrica

	inversión (€/kW_e)	coste de generación (€/MW_eh)
Hidráulica	1 200	30 - 120
Eólica	700	40 - 80
Termosolar + almacen.	8 000	60 - 150
Fotovoltaica	2 000	40 - 70
Nuclear	2 500	30 - 120
Térmica de carbón	900	40 - 60
Ciclo combinado gas	550	45 - 90