

Apuntes de Diseño de Centrales Eléctricas

Bogurad Barański Barańska Adrián Teixeira de Uña

17 de febrero de 2024

1. Recursos Energéticos y la Producción de Electricidad.

1.1. Introducción.

- **Recursos energéticos:** principalmente son combustibles fósiles y nuestra sociedad se ha hecho extraordinariamente dependiente de ellos para su desarrollo.
- **Combustibles fósiles:** comprenden principalmente el petróleo y sus derivados (gasolinas, gasóleos, gases licuados del petróleo, etc.), el gas natural, el carbón mineral y el uranio. Al principio de la explotación de estos recursos, se consideraban ilimitados y su impacto ambiental era despreciable.
- **Consumo masivo de hidrocarburos:** está produciendo alteraciones en la atmósfera a nivel mundial por la emisión de gases de efecto invernadero, originando un calentamiento global y un cambio climático.
- **Esquema de consumo energético actual:** no es sustentable por:
 - *Razones económicas:* próxima escasez de hidrocarburos.
 - *Razones ecológicas:* alteración de la atmósfera y el suelo.

Es imperativo el **desarrollo de nuevas alternativas energéticas** más eficientes y menos agresivas contra el medio ambiente:

- Incremento de las fuentes de energía renovable, consideradas como inagotables.
- Resurgimiento de la energía nuclear.

1.2. Fuentes de energía no renovable.

- **Definición:** energía que está almacenada en cantidades fijas, comúnmente en el subsuelo. A medida que se consume un recurso no renovable, se va agotando.
- **Reservas:** sujetas a la factibilidad técnica y económica de su explotación, al descubrimiento de nuevos yacimientos y al ritmo de extracción y consumo.

1.2.1. Fuentes de energía fósil.

Se llama energía fósil la que se obtiene de la combustión (oxidación) de ciertas sustancias que, según la geología, se produjeron en el subsuelo a partir de la acumulación de grandes cantidades de residuos de seres vivos, hace millones de años. Son los siguientes recursos:

- **Petróleo y derivados:** el petróleo es una mezcla de una gran variedad de hidrocarburos (compuestos de carbono e hidrógeno) en fase líquida, mezclados con una gran variedad de impurezas. Por destilación y otros procesos, se obtienen las diversas gasolinas, el diésel, etc.
- **Gas natural:** está compuesto principalmente por metano y corresponde a la fracción más ligera de los hidrocarburos, por lo que se encuentra en los yacimientos en forma gaseosa.
- **Carbón mineral:** es principalmente carbono, también de origen fósil, que se encuentra en grandes yacimientos en el subsuelo.

1.2.2. Fuentes de energía nuclear.

Son aquellas que provienen de la desintegración de átomos mediante fisión o la fusión de isótopos para producir energía.

- **Uranio:** elemento radiactivo natural. Se encuentra en la naturaleza en casi todas las rocas y suelos.
- **Torio:** tiene usos muy similares al Uranio.
- **Energía de fusión nuclear:** pretende imitar el comportamiento de las reacciones que se producen en el Sol. Fusionando un isótopo de Deuterio con otro de Tritio se obtiene un átomo de Helio, un neutrón y energía.

1.3. Fuentes de energía renovable.

Se llama energía renovable la que puede explotarse ilimitadamente, es decir, su cantidad disponible (en la Tierra) no disminuye a medida que se aprovecha. La principal fuente de energía renovable es el Sol:

- Es una esfera gaseosa, cuyos componentes principales son el hidrógeno, el helio y el carbono. Su masa es 330.000 veces la de la Tierra.
- Se comporta como una perfecta central nuclear y en su seno se desarrollan reacciones termonucleares de fusión de núcleos de hidrógeno en helio.
- En su núcleo, fusiona 620 millones de toneladas métricas ($620 \cdot 10^9$ kg) de hidrógeno por segundo: $4H \rightarrow 1He + \text{Energía}$.

Algunos datos sobre el efecto del Sol sobre la Tierra:

- Como la masa del Sol es del orden de $2 \cdot 10^{30}$ kg y contiene el 30 % de hidrógeno, si todo el hidrógeno solar se convirtiera en helio se obtendría una energía de $3,75 \cdot 10^{44}$ J.
- La Tierra recibe una irradiancia de $1370 \frac{W}{m^2}$ (constante solar) en la parte externa de la atmósfera, y como la distancia media del Sol a la Tierra es de $1,5 \cdot 10^{11}$ m, el Sol emita una radiación igual a:

$$4\pi(1,5 \cdot 10^{11})^2 \cdot 1370 = 3,8 \cdot 10^{26} \frac{J}{s}$$

La Tierra podrá alimentarse de radiaciones durante $3,13 \cdot 10^{10}$ años.

- No toda la radiación interceptada por la Tierra es absorbida; una fracción de la energía incidente es reflejada de regreso al espacio, principalmente por las nubes ($\simeq 20\%$), por los constituyentes atmosféricos ($\simeq 6\%$) y por la superficie terrestre ($\simeq 4\%$).
- En la superficie terrestre llega una irradiancia alrededor de los $1,000 \frac{W}{m^2}$

1.3.1. Energía solar.

Está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra. Puede ser:

- Directa: una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar.
- Térmica: se denomina térmica la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio: agua o aceite. Pueden ser:
 - *De baja temperatura*: con colectores para producción de ACS (Agua Caliente Sanitaria).
 - *De alta temperatura*: centrales termosolares para producción de energía eléctrica mediante espejos parabólicos o con heliostatos con receptor central en torre.
- Fotovoltaica: es el aprovechamiento de la energía solar por medio de células fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico. El conjunto de células fotoeléctricas se denomina panel fotovoltaico. Se encuentra en las centrales fotovoltaicas.

1.3.2. Energía eólica.

Es la energía que se extrae del viento que procede de la energía solar y del movimiento de rotación de la Tierra. La aplicación más importante es con la utilización de aerogeneradores en parque eólicos (*onshore* y *offshore*).

1.3.3. Energía de la biomasa.

Definición de biomasa: conjunto de materiales de origen biológico, vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de estos materiales, utilizados para la producción de energía eléctrica o térmica.

Es un tipo de producción de energía gestionable. Depende de la disponibilidad de biomasa. Se utiliza en:

- Centrales térmicas de combustión de biomasa con turbinas de vapor.
- Centrales térmicas de gasificación de biomasa con cogeneración:
 - MACI (Motores Alternativos de Combustión Interna).
 - Turbina de gas.

1.3.4. Energías marinas.

- *Diferencia de temperatura oceánica (OTEC):* Consiste en aprovechar la diferencia de temperatura que existe entre la superficie del océano (unos 20 °C o más en las zonas tropicales) y la correspondiente a unas decenas de metros debajo de la superficie (cerca a 4 °C).
- *Energía de las olas: central undimotriz:* También se puede aprovechar el vaivén de las olas del mar para generar energía eléctrica. Las olas son, a su vez, producidas en parte por el efecto del viento sobre el agua y por el movimiento rotacional de la Tierra.
- *Energía de las mareas: central mareomotriz:* Depende de la atracción gravitatoria del Sol y la Luna. En algunas regiones costeras se dan unas mareas especialmente altas y bajas. La amplitud de la marea en algunos puntos de la Tierra puede alcanzar los 10 m.
- *Energía de las corrientes marinas:* A profundidades de 20 a 30 m existen unas corrientes marinas de baja velocidad (2 a 3 m/s) que dependen de los ciclos de las mareas.
- *Gradiente salino o Potencia osmótica:* Aprovechar la diferencia de salinidad entre el agua de los océanos y el agua de los ríos.

1.3.5. Energía hidráulica.

Se obtiene a partir de caídas de agua, artificiales o naturales. Estrictamente, también esta es una forma derivada de la energía solar, porque el Sol provee la fuerza impulsora del ciclo hidrológico. Se dividen en grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas.

1.3.6. Hidrógeno. Pila de combustible.

El uso del hidrógeno como portador energético para complementar los mercados de la electricidad y combustibles líquidos presenta ventajas de versatilidad de fuentes de suministro, almacenamiento eficaz y bajas emisiones en los puntos de consumo.

La pila de combustible combina hidrógeno y oxígeno a través de una membrana de intercambio protónico, puede generar energía eléctrica obteniéndose como único residuo agua.

Para conseguir hidrógeno hay que consumir energía eléctrica. El hidrógeno se puede obtener:

- *Blanco:* en estado bruto en el subsuelo.
- *Verde:* del agua mediante electrolisis con energías renovables y biometano.
- *Rosa:* del agua mediante electrolisis con energía nuclear.
- *Gris:* del gas natural.
- *Azul:* del gas natural, pero se captura el CO₂ residual.
- *Marrón:* del carbón.

Para transformar de vuelta el hidrógeno en electricidad hay dos métodos:

- *Grupo electrógeno:* utilizando un motor de combustión interna.
- *Pila de combustible:* $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O + \text{Calor} + \text{Energía Eléctrica}.$

1.3.7. Energía geotérmica.

La energía geotérmica es un tipo de energía renovable que se basa en el aprovechamiento del calor que existe en el subsuelo de nuestro planeta. Es decir, utilizar el calor de las capas internas de la Tierra y con él genera energía.

La temperatura de la Tierra va aumentando conforme descendemos y nos acercamos al núcleo terrestre. El gradiente térmico hace aumentar la temperatura del suelo entre 2 °C y 4 °C por cada 100 metros que descendemos. Hay diversas zonas del planeta donde este gradiente es mucho mayor y se debe a que la corteza terrestre es más delgada en ese punto.

1.4. Combustibles fósiles.

1.4.1. Reservas y recursos mundiales.

Las cantidades de materia prima energética que pueden aprovecharse para su transformación en energía útil en condiciones económicas rentables se denominan reservas (explotables). Cuando hay razones suficientes para la existencia de cantidades mayores, a estas se les denomina recursos (previsibles).

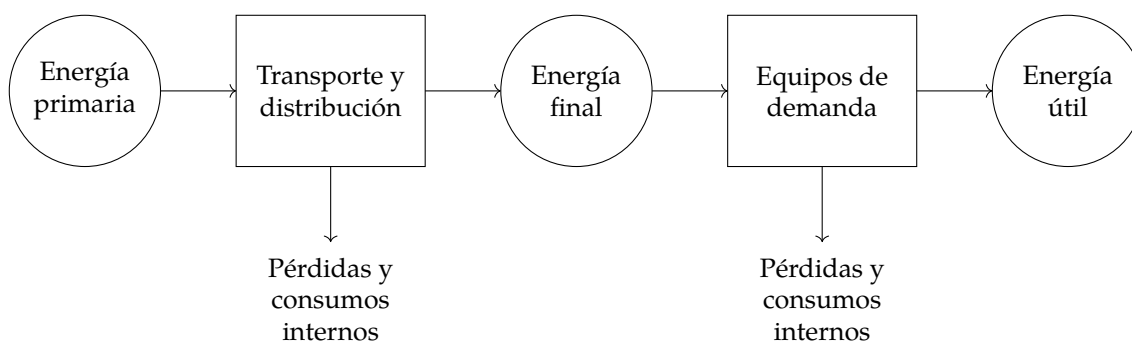
La evaluación de las reservas energéticas existentes en nuestro planeta se estimaban en $33000 \cdot 10^{18}$ J, a los cuales habría que añadir $349395 \cdot 10^{18}$ J correspondientes a recursos de difícil explotación.

1.4.2. Evolución de las reservas de petróleo y gas.

	1984	1994	2004	2020	Duración Reservas	Evolución R/P
Petróleo - 10^9 barriles	761	1017	1185	1732	42 años	31 a 42 años
Petróleo - %	100	134	156	-		
Gas - $10^{12} m^3$	96	142	179	200	67 años	59 a 67 años
Gas - %	100	148	186	-		

1.5. Concepto de energía primaria, final y útil.

- *Energía primaria*: son todas las formas de energía disponibles en la naturaleza antes de ser convertidas o transformadas. Consisten en la energía contenida en los combustibles crudos, la energía solar, la eólica, la biomasa, la hidráulica, etc.
- *Energía final*: proviene de las energías primarias, a la que llega después de sufrir transformaciones tecnológicas.
- *Energía útil*: la deseada por el consumidor.



1.6. Formas prácticas de la energía.

Pueden ser el agua almacenada en un embalse, una barra de material fisionable o un combustible que al quemarse proporciona calor. No todos los combustibles proporcionan la misma cantidad de calor por unidad de masa (1 kg de gasolina \neq 1 kg carbón).

Para poder relacionar y comparar unos con otros tendremos que referirnos a la cantidad específica de energía por unidad de masa (o de volumen), desprendida en un proceso de combustión, llamada **poder calorífico** o **densidad energética** o entalpía $\left(\frac{MJ}{kg}, \frac{MJ}{l}, \frac{MJ}{Nm^3}\right)$.

Los combustibles que dan agua como resultado de la combustión poseen dos poderes caloríficos, el inferior (**PCI**) y el superior (**PCS**). Las fuentes energéticas más buscadas son aquellas en las que la energía está muy concentrada (mucha energía por unidad de masa).

Combustible	PCI	
	$\frac{MJ}{kg}$	$\frac{kWh}{kg}$
Hidrógeno	141.0	39.2
Gas natural	46.4	12.9
Gasolina	43.3	12.0
Gasóleo	42.7	11.9
Fuel-oil	40.8	11.3
Antracita	35.1	9.8
Lignito	25.6	7.1

1.7. Concepto de eficiencia o rendimiento.

El rendimiento es un concepto termodinámico. En ingeniería suele utilizarse preferentemente la eficiencia, que establece la relación entre la energía útil y la primaria. A veces se llama COP (*Coefficient of Performance*)

Las distintas transformaciones energéticas implican una serie de pérdidas y consumos internos tanto en la generación como en el transporte.

Valores medios de eficiencias de diferentes tipos de centrales	
Hidroeléctrica	85 %
Térmica de Carbón	40 %
Nuclear	32 %
Ciclo Combinado	52 %
Solar fotovoltaica	18 %
Cogeneración	80 %

Rendimiento de varios tipos de convertidores	
Tipo de convertidor	η_{aprox}
Motor de combustión	30 %
Turbina de gas	29 %
Turbina Pelton	92 %
Célula de combustión	80 %
Célula fotovoltaica	12 %
Panel solar fototérmico	70 %
Motor eléctrico	95 %

Aunque no es exactamente lo mismo, no se diferencia la energía mecánica de la energía eléctrica puesto que la conversión puede hacerse con factores cercanos a la unidad (el rendimiento de un generador síncrono puede llegar al 90 %)

$$1 kWh_e \approx 1 kWh_m$$

Sin embargo, no ocurre lo mismo con la energía eléctrica y la energía térmica. Pueden necesitarse hasta 3 o más kWh_t para obtener un kWh_e .

1.8. Unidades de energía.

La **Agencia Internacional de la Energía (AIE)** expresa sus balances de energía en una unidad común que es la **tonelada equivalente de petróleo (tep o toe)**:

- Una tep se define como la energía liberada en la combustión de una tonelada de crudo de petróleo tipo de $10^4 \frac{kcal}{kg}$ de poder calorífico:

$$1 \text{ tep} = 10^7 \text{ kcal} = 41860 \text{ MJ}$$

$$0,086 \text{ tep} = 1 \text{ MWh}$$

$$1 \text{ tep} = 11,63 \text{ MWh}$$

- La conversión de unidades habituales a tep se hace en base a los poderes caloríficos inferiores de cada uno de los combustibles considerados.

La **tonelada equivalente de carbón (tec)** se define como la energía liberada en la combustión de una tonelada de hulla estándar de $7000 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$ de poder calorífico. La equivalencia viene dada por:

$$1 \text{ tec} = 7 \cdot 10^6 \text{ kcal} = 0,7 \text{ tep}$$

En las estadísticas de comercio internacional es frecuente hablar de **barriles de petróleo (bbl)**:

$$1 \text{ bbl} = 159 \text{ l} = 0,146 \text{ tep}$$

La **U.S. Energy Information Administration (EIA)** utiliza el **BTU (British Thermal Unit)** como unidad de energía:

$$1 \text{ kWh} = 3412 \text{ BTU}$$

$$1 \text{ therm} = 10^5 \text{ BTU}$$

Unidades de energía	
1 tep	10^7 kcal
1 kcal	4184 J
1 MWh	0.086 tep
1 tec	0.7 tep
1 bbl	0.146 tep
1 kWh	3412 BTU
1 therm	10^5 BTU

1.9. Unidades de energía en combustibles gaseosos.

Es frecuente referir el **PCI (poder calorífico inferior)** a la unidad de volumen (m^3), pero si no están definidas las condiciones, carecería de significado.

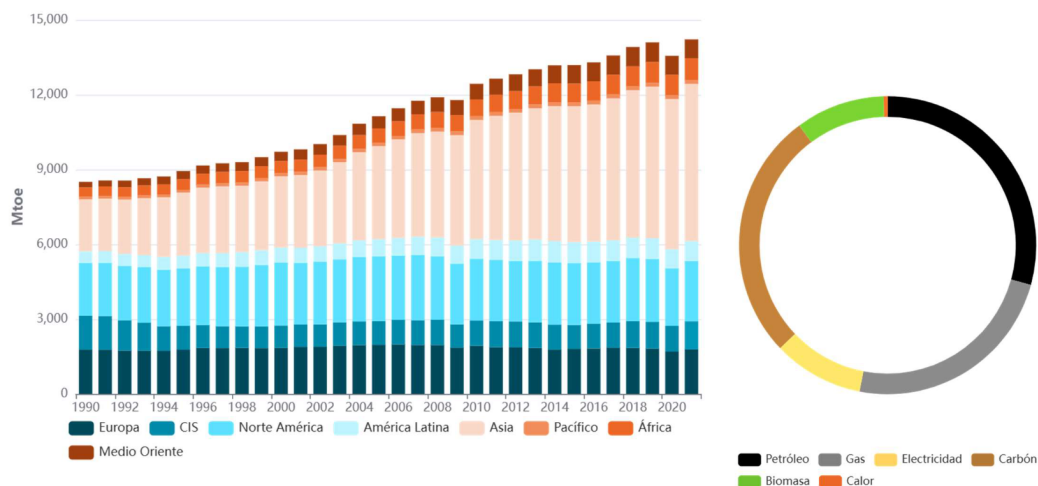
- Condiciones normales:** corresponden a 0°C y 1 atm . Se suele indicar con la letra *N* al lado de la unidad de volumen, v.g. $3,4 \text{ Nm}^3$.

$$10^3 \text{ Nm}^3_{\text{Gas Natural}} = 0,9 \text{ tep}$$

- Condiciones estándar:** corresponden a 15°C y 1 atm . Se suele indicar con la letra *S* al lado de la unidad de volumen, v.g. $3,4 \text{ Sm}^3$.
- Thermia (th):** unidad de energía, equivalente a 1 millón de calorías. Se usa en el suministro de gas natural para calcular las facturas. Como el gas suministrado tiene un poder calorífico algo variable, el cobro se hace en termias en vez de m^3 .

$$\text{Referido a un gas con PCS} = 10^4 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3} = 10 \frac{\text{th}}{\text{Nm}^3}$$

1.10. Consumo mundial de energía primaria.



El WEC (**World Energy Council**, fundado en 1923, considera tres escenarios hasta el 2020 en su estudio “*Energía para el mundo del mañana*” que publicó en 1993. En todos ellos se considera que para el año 2020 la población mundial será de 8100 millones (según Naciones Unidas). En el año 2022 hay 8.000 millones. Para el año 2030 se estima en 8.500 millones.

Existen diversos escenarios atendiendo al balance entre crecimiento económico y orientación ecológica:

- **Escenario de referencia:** Crecimiento económico medio. La economía mundial crece moderadamente a una media del 3.3 % anual, resultando una demanda de energía primaria mundial en 2020 de 13.4 *Gtep*, y una aportación de las renovables nuevas para ese año del 4.5 % (0.6 *Gtep*).

Considerando este estudio y con estos niveles de consumo de energía primaria y unos valores de reserva aproximados a los indicados anteriormente, se puede estimar el tiempo de duración de los distintos combustibles en años:

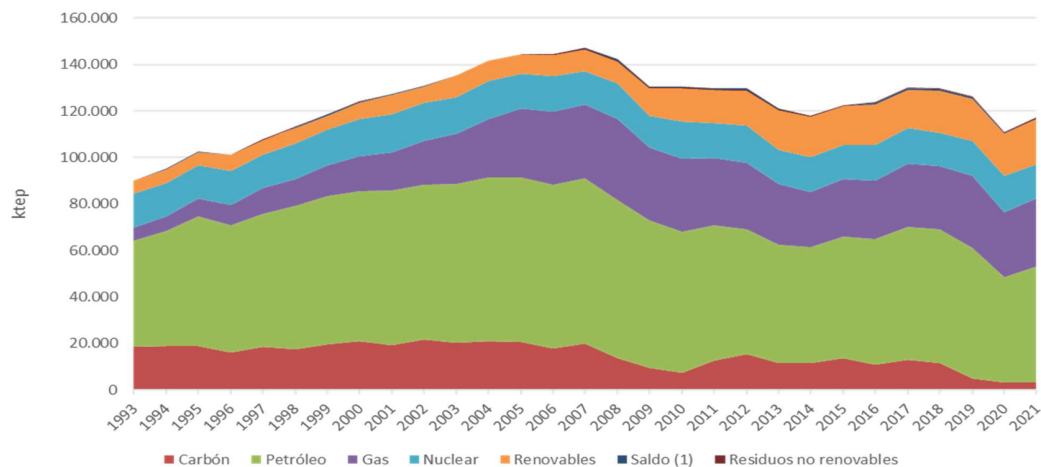
Fuente de Energía	Duración (años)
PETRÓLEO	42,2
CARBÓN	224
GAS NATURAL	62,2
URANIO	100

Las reservas totales de uranio se sitúan en unos 6,14 millones de toneladas. La demanda de las 442 unidades nucleares en funcionamiento (año 2011) fue de 68.875 toneladas de uranio.

- **Escenario de alto crecimiento económico:** el crecimiento económico es del 3,8 % y la demanda de energía primaria en el 2020 de unas 17 *Gtep* y una aportación de las renovables nuevas del 4.5 % (0.8 *Gtep*).
- **Escenario ecológico:** crecimiento económico medio con orientación ecológica. El crecimiento se supone del 3.3 %, pero la demanda de energía primaria crece sólo a 11.3 *Gtep* en el 2020, y una aportación de las renovables del 11.5 % (1.3 *Gtep*).

Todos los estudios indican un **crecimiento potencial de las renovables**. Según estimaciones de Naciones Unidas, se calcula la aportación de las renovables en el 30 % de las necesidades mundiales en el 2025, y el 45 % en el 2050.

Evolución del consumo energético en España:



(1) Saldo de intercambios internacionales de energía eléctrica (Importaciones-Exportaciones).

1.11. Intensidad energética primaria e intensidad de energía final.

1.11.1. Intensidad energética primaria.

Se define como el cociente entre el consumo de energía primaria y el PIB en un año concreto.

Tiene unidades de $\frac{ktep}{M€}$.

En España, a partir del 2005, se constató una mejora notable en la intensidad energética primaria, lo que significa que para producir una unidad de riqueza cada vez se necesita menor cantidad de energía (mayor eficiencia energética). Ha habido una ralentización del consumo energético y un crecimiento del PIB. España se encuentra en el puesto 34 de los 196 países.

1.11.2. Intensidad de energía final.

Se define como el cociente entre el consumo de energía final y el PIB.

La intensidad de energía final ha disminuido progresivamente. Esta mejora se debe sobre todo a las mejoras tecnológicas y de gestión, así como a la mejora de la estructura productiva y de la Ley de Energías Renovables y Eficiencia Energética.

En el año 2020 hubo una caída del PIB del 11 % junto con una bajada de consumo de energía primaria debido a la pandemia de COVID-19.