Apuntes

Energía Nuclear en la Transición Energética

Temas 1 a 6

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Versión v1.0

Índice general

1 Introducción: la transición energética **2**

2 Fuentes de energía **2**
2.1 Propiedades para compararlas . . . 2
2.2 Indicadores de operación . . . 3
2.3 La energía nuclear de fisión . . . 3

3 Planificación y escenarios energéticos **4**
3.1 Elementos . . . 4
3.2 Marco . . . 4
3.3 Herramientas de escenarios . . . 4

4 Adaptación de la energía nuclear a la transición **4**
4.1 DAFO . . . 4
4.2 Operación a largo plazo (LTO) . . . 5
4.3 Reactores modulares pequeños (SMR) . . . 5
4.4 Ciclo de combustible . . . 5

5 Análisis y proyecciones **6**

6 Fusión nuclear **6**
6.1 Fundamento . . . 6
6.2 Condiciones . . . 6
6.3 Tecnologías . . . 6

7 Cómo se evalúa **7**

Resumen

Resumen de los seis temas de la asignatura: por qué hace falta una transición energética, las fuentes de energía y sus propiedades, la planificación con escenarios, cómo se adapta la energía nuclear (operación a largo plazo, reactores modulares, ciclo de combustible), sus proyecciones y la fusión. Incluye órdenes de magnitud calculados para razonar en el examen y en los debates. Los datos de un país o de un año concreto conviene contrastarlos con las fuentes citadas en clase (Foro Nuclear, OIEA, AIE, Red Eléctrica).

1 Introducción: la transición energética

El modelo actual de producción y consumo de energía no es sostenible por varias razones a la vez: cambio climático por emisiones de gases de efecto invernadero, agotamiento y concentración geográfica de los combustibles fósiles, contaminación atmosférica con efectos sobre la salud, desigualdad en el acceso a la energía y dependencia exterior. La **transición energética** busca un sistema descarbonizado, seguro y asequible (el "trilema" energético).

Órdenes de magnitud útiles: el consumo medio mundial es de unos 2,5 kW por persona (en España, unos 3,3 kW); la potencia solar que recibe la Tierra es del orden de 175 000 TW, frente a unos 18 TW de potencia antropogénica. No falta energía: falta convertirla de forma útil, gestionable y barata. La **exergía** es la parte de la energía que se puede convertir en trabajo; el segundo principio explica por qué no toda la energía es igual de valiosa.

Fuentes de datos: Enerdata, Agencia Internacional de la Energía, Foro Nuclear, Banco Mundial, Our World in Data, Red Eléctrica.

2 Fuentes de energía

2.1 Propiedades para compararlas

- **Recurso y reserva**: cantidad total cuantificada frente a la parte económicamente explotable hoy.
- **Renovable o no renovable**: si el ritmo de uso es compatible con su regeneración.
- **Localización**: dónde está el recurso y si se puede elegir el emplazamiento.
- **Gestionabilidad**: capacidad de ajustar la producción a la demanda (almacenamiento, regulación).
- **Predictibilidad y variabilidad**: si se puede prever la disponibilidad y cuánto cambia con el tiempo.
- **Madurez tecnológica**, costes, impactos sociales y ambientales a lo largo de todo el proyecto (construcción, operación, desmantelamiento).

2.2 Indicadores de operación

Fórmulas clave

$$\text{Factor de carga} = \frac{E_{producida}}{P_{nominal} \cdot T} \qquad \text{Factor de operación} = \frac{\text{horas acoplada}}{\text{horas del periodo}}$$

Indisponibilidad programada y no programada: energía no producida por paradas atribuibles a la central, sobre la producible.

La nuclear trabaja con factores de carga muy altos (en torno al 85–90 %): es energía de base, gestionable a escala de días y semanas, con capacidad limitada de seguimiento de carga rápido en el diseño de los reactores actuales.

2.3 La energía nuclear de fisión

Cada fisión de un núcleo de U-235 libera unos 200 MeV ($3{,}2 \cdot 10^{-11}$ J). Fisionar 1 kg de U-235 libera unos $8{,}2 \cdot 10^{13}$ J (unos 950 MWd), lo mismo que quemar unas 2800 toneladas de carbón.

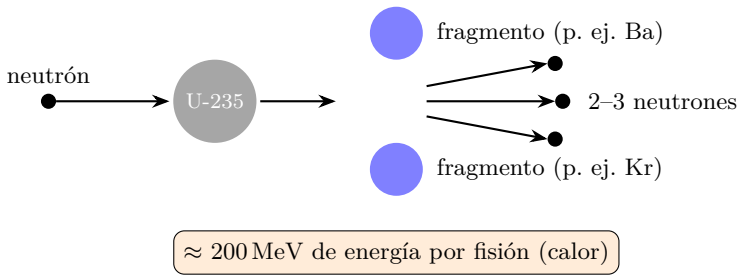


Figura 1. Fisión de un núcleo de U-235. Los neutrones liberados pueden provocar nuevas fisiones y mantener la reacción en cadena.

Orden de magnitud de una central de 1000 MWe

Con rendimiento del 33 % (3030 MWt) y factor de carga del 90 %, fisiona alrededor de una tonelada de U-235 al año y, con un quemado de 45 MWd/kgU, descarga unas 22 toneladas de combustible gastado. Una térmica de carbón de la misma potencia quemaría millones de toneladas.

Reactores comerciales: de agua a presión (PWR) y en ebullición (BWR) son la mayoría; también de agua pesada (CANDU) y refrigerados por gas. Seguridad basada en defensa en profundidad y barreras sucesivas (vaina, circuito primario, contención).

3 Planificación y escenarios energéticos

3.1 Elementos

La planificación equilibra demanda y suministro a largo plazo (crecimiento económico y demográfico), actuando sobre la demanda (ahorro, eficiencia) y sobre la oferta (tecnologías, precios del carbono, cuotas, incentivos). Los sistemas energéticos están más condicionados por las *interacciones* entre elementos que por los elementos aislados: cambiar una pieza mueve las demás.

3.2 Marco

Acuerdo de París (CMNUCC y las COP), Objetivos de Desarrollo Sostenible, y en España el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC).

3.3 Herramientas de escenarios

- **EN-ROADS**: simulador global que muestra el efecto de políticas (precio del carbono, electrificación, eficiencia, nuevas tecnologías) sobre la temperatura en 2100.
- **Energy Transition Model**: simulador regional o nacional con detalle de demanda, oferta y costes.

Para un escenario hay que definir objetivos, hipótesis y alternativas (por ejemplo, mantener la cuota nuclear actual, retirarla o ampliarla) y comparar emisiones, coste y seguridad de suministro.

4 Adaptación de la energía nuclear a la transición

4.1 DAFO

Fortalezas: baja emisión de CO_2 en el ciclo de vida, alta densidad energética, gestionable, poca ocupación de suelo, combustible almacenable.	**Debilidades**: coste y plazo de construcción altos, residuos de alta actividad, aceptación social, flexibilidad limitada en diseños actuales.
Oportunidades: operación a largo plazo, reactores modulares pequeños, calor para industria e hidrógeno, apoyo a la estabilidad de redes con mucha renovable.	**Amenazas**: competencia de renovables más almacenamiento cada vez más baratos, precios de mercado bajos en horas solares, fiscalidad, incertidumbre regulatoria.

4.2 Operación a largo plazo (LTO)

Extender la vida de las centrales existentes más allá de los 40 años de diseño, con revisiones periódicas de seguridad, gestión del envejecimiento y sustitución de componentes. Suele ser la forma más barata de mantener generación baja en carbono.

4.3 Reactores modulares pequeños (SMR)

Potencias de decenas a unos 300 MWe por módulo, fabricación en serie en taller, seguridad pasiva y construcción más rápida. Se plantean para sustituir centrales de carbón, dar calor industrial o abastecer sistemas aislados. Su reto es demostrar costes en serie y licenciamiento.

4.4 Ciclo de combustible

Minería y concentrado de uranio, conversión, **enriquecimiento** (hasta 3–5 % de U-235), fabricación de elementos combustibles, irradiación en el reactor, almacenamiento del combustible gastado (piscinas y almacenes en seco), y gestión final. **Ciclo abierto**: el combustible gastado va a almacenamiento geológico profundo. **Ciclo cerrado**: se reprocesa para recuperar uranio y plutonio. Los residuos de alta actividad son pocos en volumen pero de muy larga vida.

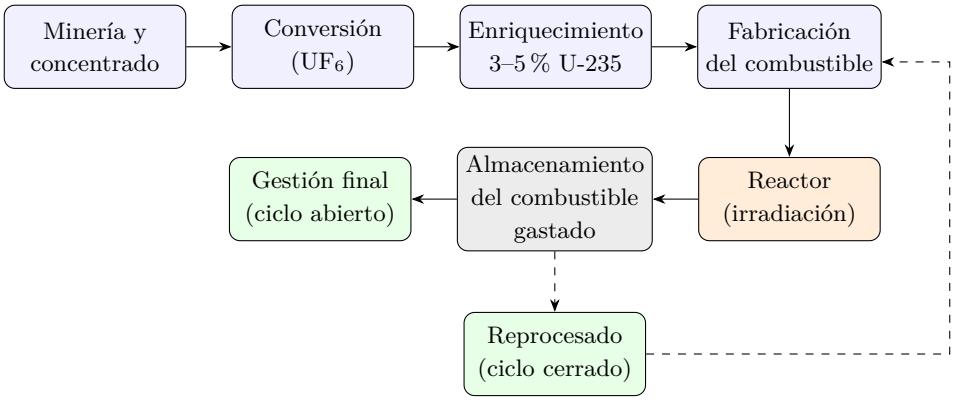


Figura 2. Ciclo del combustible nuclear. En el ciclo abierto el combustible gastado se gestiona como residuo. En el cerrado se reprocesa para recuperar uranio y plutonio.

5 Análisis y proyecciones

Los escenarios de la AIE y del OIEA proyectan la potencia nuclear mundial bajo distintas hipótesis; los que cumplen los objetivos climáticos suelen aumentarla. Para analizar una proyección:

$$E_{anual} = P \cdot 8760 \cdot FC, \qquad \text{emisiones evitadas} = E_{anual} \cdot f_{CO_2,\text{sustituida}}.$$

Ejemplo: 7,1 GW con $FC = 0{,}88$ producen unos 55 TWh/año; si sustituyeran ciclos combinados (0,37 t CO_2/MWh) evitarían unos 20 Mt de CO_2 al año. En España el calendario acordado en 2019 prevé el cierre escalonado de las centrales entre 2027 y 2035; su posible revisión forma parte del debate actual.

El **coste normalizado** (LCOE) de la nuclear nueva está dominado por la inversión, por lo que es muy sensible a la tasa de descuento y a los retrasos de obra; el de la operación a largo plazo es mucho menor.

6 Fusión nuclear

6.1 Fundamento

La reacción más accesible es D + T → ^{4}He (3,5 MeV) + n (14,1 MeV), 17,6 MeV en total. Por unidad de masa libera unas cuatro veces más energía que la fisión y millones de veces más que la combustión. El deuterio se obtiene del agua del mar y el tritio se produce en el propio reactor a partir del litio (envoltura regeneradora).

6.2 Condiciones

Hay que calentar el plasma a más de 100 millones de grados y confinarlo el tiempo suficiente. El **criterio de Lawson** (producto triple $nT\tau_E$) fija cuándo la energía de fusión compensa las pérdidas. El factor de ganancia $Q = P_{\text{fusión}}/P_{calentamiento}$; ITER aspira a $Q = 10$.

6.3 Tecnologías

Confinamiento magnético (tokamak como ITER, stellarator) y **confinamiento inercial** (láser). Ventajas: combustible abundante, sin reacción en cadena ni riesgo de fusión del núcleo, sin residuos de alta actividad de larga vida (materiales activados reciclables en unos 100 años). Retos: materiales frente a neutrones de 14 MeV, autosuficiencia en tritio, extracción de calor y coste. Horizonte comercial: segunda mitad de siglo.

7 Cómo se evalúa

El 60 % de la nota son ejercicios durante el curso (escenarios con EN-ROADS y Energy Transition Model, análisis de la energía nuclear, debate y conferencias) y el 40 % un examen escrito. Para el examen: dominar las propiedades de las fuentes de energía, los indicadores de operación, el ciclo de combustible, el DAFO, LTO y SMR, los órdenes de magnitud y los fundamentos de la fusión, y saber argumentar con datos.