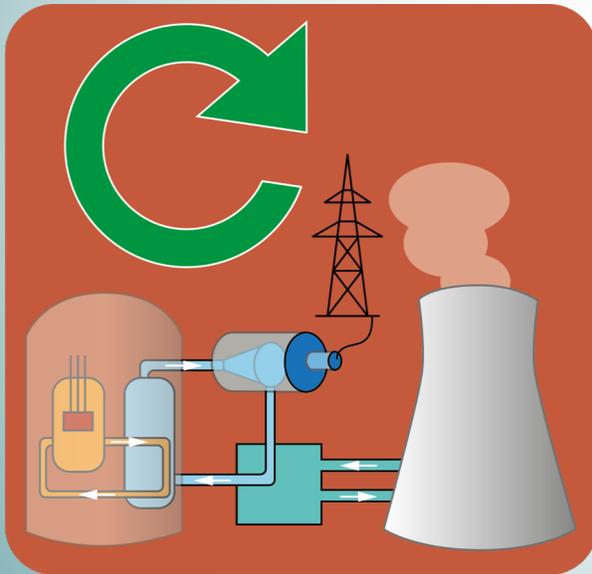


# Ampliación de Ingeniería Nuclear y Ciclo de Combustible

## Bloque III. Reactores Nucleares



**Fernando Delgado San Román**  
**Cristina Fernández Diego**  
**Manuel José Ibarra Arenado**

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



# 1. Reactores de fisión

---

# 1.1. Centrales nucleares

---

- 
- Edificios de una central nuclear
  - Sistemas de una central nuclear
  - Componentes básicos de una central nuclear

# Edificios de una central nuclear



- 
- **Edificio del reactor o recinto de Contención.** Es el más característico de la central nuclear.
    - En general, los recintos de contención acostumbran a ser estructuras de hormigón totalmente herméticas, sin puertas ni ventanas, de forma esférica o cilíndrica rematada en cúpula semiesférica o semielíptica.
    - En su interior está el reactor y, en general, todos aquellos elementos que contiene material con alto grado de radiactividad. En algunas centrales en el edificio de contención también está la zona de manejo de combustible.
  
  - **Edificio de combustible.**
    - En él se almacenan tanto los elementos de combustible nuevo como los ya utilizados. Estos últimos se mantienen en una piscina llena de agua de donde sólo se extraerán llegado el momento de su gestión final, o para ser almacenados en un ATI (Almacén Temporal Independiente) como el construido en las centrales de Trillo o Zorita.

# Edificios de una central nuclear



---

## ❑ **Edificio de turbinas.**

- Contiene el grupo o grupos de turbina-alternador y la mayoría de sistemas auxiliares de éste. En las centrales de gran potencia, equipadas con varios grupos generadores, éstos se pueden agrupar en un mismo edificio.

## ❑ **Edificio de salvaguardias y equipos auxiliares.**

- Estos edificios contienen la mayoría de los sistemas de emergencia y seguridad para caso de avería en el reactor, así como los sistemas meramente auxiliares para las operaciones de recarga, arranque, etc.

## ❑ **Edificio eléctrico.**

- Donde están localizados los sistemas eléctricos, los centros de control de motores, las cabinas de potencia y la Sala de Control, que es desde donde se controlan todos los sistemas de la central.

## ❑ **Otros edificios.**

- En la central existen otras dependencias: para tratamiento de agua, almacenamiento de desechos, oficinas, talleres y laboratorios, así como una zona destinada a parque eléctrico convencional, transformadores, interruptores, etc.

# Sistemas de una central nuclear



- 
- Una central nuclear posee diversos sistemas:
    - Sistemas de seguridad activos y pasivos
    - Sistemas eléctricos
    - Sistemas de control del reactor
    - **Sistemas de refrigeración**
    - ...
  
  - El sistema de refrigeración se encarga de refrigerar el reactor.
    - Está formado por uno o varios circuitos – primario, secundario y terciario- conectados a través de intercambiadores.

# Sistemas de una central nuclear



- 
- Los principales componentes del sistema de refrigeración son:
    - Vasija del reactor
    - Presionador
    - Generadores de vapor
    - Bombas del refrigerante del reactor
    - Turbinas
    - Alternador
    - Condensador
    - Torres de refrigeración

# Componentes básicos de una central nuclear



- **Vasija del reactor:** contiene los elementos combustibles en los cuales se produce la fisión de los núcleos atómicos.
  - Sus paredes, junto con el resto del circuito primario, constituyen una barrera para las partículas radiactivas que se producen en su interior.
  
- **Elementos combustibles:** múltiples varillas que contienen pastillas de dióxido de uranio ( $\text{UO}_2$ ).
  - El agua de refrigeración fluye en sentido ascendente a través del elemento combustible, extrayendo el calor generado por la reacciones nucleares
  
- **Barras de control:** se alojan entre las varillas de los elementos combustibles.
  - Están fabricadas de un material que absorbe neutrones (p.ej. Carburo de Boro).
  - Introduciendo o extrayendo las barras de control en el interior de los elementos combustibles se puede controlar el número de reacciones nucleares.

# Componentes básicos de una central nuclear



- **Presionador:** Equipo presente en las centrales PWR
  - Función: controlar la presión en el circuito primario
  - Como: mediante el uso de unas resistencias calefactoras, sumergidas en la parte inferior, y unas duchas en la parte superior, que permiten calentar o enfriar el contenido del presionador, de manera que aumente o disminuya la presión del mismo y en consecuencia del resto del circuito primario.
  
- **Generadores de vapor:** son intercambiadores de calor. Conectan el circuito primario y el secundario, por lo que también se consideran parte del circuito secundario.
  - Función: transmitir calor del primario al secundario.
  - Como: El agua del primario (proveniente directamente del reactor) circula por el interior de un haz de tubos. El agua del circuito secundario, al entrar en contacto con el exterior del haz de tubos, se calienta y se vaporiza conduciéndolo a turbinas.

# Componentes básicos de una central nuclear



- 
- ❑ **Bombas:** una bomba de gran potencia y tamaño por lazo.
    - Función: transportar el agua del circuito primario desde el generador de vapor a la vasija.
  
  - ❑ **Turbinas:** La turbina tiene dos cuerpos, uno de alta presión y otro de baja presión.
    - Función: conversión de la energía térmica contenida en el vapor en energía mecánica.
    - Como: El vapor procedente del generador de vapor entra en la turbina de alta presión. El vapor que sale de la turbina de alta presión se envía a los recalentadores donde se calienta de nuevo y se deshumidifica para aumentar el rendimiento termodinámico de la planta y para evitar daños estructurales de las turbinas de baja presión.

# Componentes básicos de una central nuclear



- **Alternador:** Conectado solidariamente a la turbina mediante un eje que le transmite el giro de esta última.
  - Función: Conversión de la energía mecánica (giro) en energía eléctrica.
  
- **Condensador:** es un intercambiador de calor. Conecta circuito secundario con terciario.
  - Función: conversión del vapor que sale de turbinas en agua.
  - Como: El vapor de baja energía que sale de las turbinas de baja presión se conduce al condensador, donde se enfría y se condensa gracias al agua fría proveniente del circuito terciario. El agua condensada vuelve a los generadores de vapor, previo calentamiento, transportada por equipos de bombeo.

# Componentes básicos de una central nuclear



- ❑ El **agua de refrigeración del condensador** puede proceder del mar, de un río o de un embalse, volviendo a mayor temperatura a la fuente inicial. Para que no haya un cambio brusco de temperatura de la fuente, y pueda influir en el ecosistema, se vigila la temperatura del agua de retorno.
  
- ❑ **Torre de refrigeración:** estructura hiperbólica utilizada en las centrales térmicas para minimizar el impacto medioambiental.
  - Función: refrigeración del agua de retorno del circuito terciario.
  - Como: El agua caliente procedente del condensador se envía a un enrejado situado en el interior de la torre dejándola caer en forma de lluvia. Su enfriamiento se produce por convección y evaporación al entrar en contacto con las corrientes de aire que suben por esta chimenea. El agua así enfriada se retorna a la fuente.

---

## ❑ Libros y monografías:

- *Curso básico de Ciencia y Tecnología Nuclear*. Jóvenes Nucleares, Edición 2013.

## ❑ Páginas Web:

- [http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/7\\_energa\\_nuclear.html](http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/7_energa_nuclear.html)

## 1.2. Generación I y II

---

- 
- ❑ Evolución de las centrales nucleares
  - ❑ Clasificación de los reactores nucleares
  - ❑ Reactor de agua a presión (PWR)
  - ❑ Reactor de agua en ebullición (BWR)
  - ❑ Reactor de agua pesada (CANDU)
  - ❑ Reactor refrigerado por gas (GCR)

- **Centrales de Generación I (1950-70):** Las primeras centrales nucleares.
  - **Prototipos** de centrales nucleares de baja potencia que pretendían **evaluar su viabilidad técnica y económica**.
  - Diseño y desarrollo en las **décadas de los 50 y 60**.
  - **Muchos diseños** con diferentes combustibles, refrigerantes, materiales y componentes. Tres líneas generales de diseño:
    - PWR (Shippingport, USA, 1957-1982)
    - BWR (Dresden, USA, 1960-1978)
    - GCR (Calder Hall ,UK, 1956-2003)
  - Alguno de los diseños propuestos fueron adoptados a escala comercial.

- **Centrales de Generación II (1970-90):** Agrupa a las diferentes líneas de reactores comerciales que surgieron de los primeros prototipos. La mayoría de estas centrales continúan en operación hoy en día, entre ellas todas las española.
  - **Refrigeradas por gas o agua.**
  - **Moderadas por agua o grafito.**
  - “Queman” **uranio natural o enriquecido.**
  - Han alcanzado un **alto nivel de seguridad y rendimiento.**
  - En la actualidad, más de 400 reactores de IIª Generación en operación
  - La mayoría de ellos lleva más de 30 años en servicio.
  - Esto equivale a una experiencia acumulada de más de 10.000 años-reactor.
  - Principales limitaciones:
    - ✓ La temperatura de operación menor de 300 °C limita la eficiencia del ciclo térmico.
    - ✓ El espectro neutrónico térmico limita el coeficiente de reproducción de material físil.

# Clasificación de los reactores nucleares



- En función del **tipo de sustancia a la que se transmite el calor, los reactores pueden ser:**
  - **Agua pesada ( $D_2O$ , óxido de deuterio)**
  - **De gas ( $C_2O$ )**
  - **De sodio líquido**
  - **Agua ligera ( $H_2O$ )**
    - { **Agua en ebullición:** el agua hierve en el interior del reactor.
    - } **Agua a presión:** el agua no hierve en el interior del reactor.
  
- En función de **donde se produce el vapor, los reactores pueden ser:**
  - **Ciclo directo:** el vapor se produce en el interior del propio reactor.
  - **Ciclo indirecto:** el vapor se produce en un intercambiador de calor exterior al reactor, conocido como **generador de vapor**.
  
- Según el **tipo de material fisionable empleado, los reactores pueden ser:**
  - **De uranio natural:** misma proporción de uranio que en la naturaleza.
  - **Uranio enriquecido:**  $UO_2$  enriquecido en un porcentaje (e.g., 5%) con U-235.
  - **Plutonio:** mezcla de U-235 y Pu.

# Reactor de agua a presión (PWR)



- ❑ Son los más comunes.
- ❑ Utilizan **uranio natural (óxido de uranio) enriquecido en U-235 (al 3%)**, colocados en barras recubiertas con circonio.
- ❑ El **agua ligera** actúa tanto de **moderador como de refrigerante**, utilizándose las **barras de boro** sólo para **controlar la potencia del reactor** y para **provocar su parada**.
- ❑ En este reactor el **agua** se encuentra a una **presión de 160 bares** y, por ello, **no hierve** pese a que se eleva su temperatura por encima de los 100°C (unos 310° C).
- ❑ El **agua caliente** se lleva a un **intercambiador agua-agua**, donde el agua a presión (primario del intercambiador) se enfría, mientras que el **agua del secundario se calienta y convierte en vapor**, que es el que mueve la turbina.
- ❑ **Para el reabastecimiento de combustible el reactor ha de ser parado.**

# Reactor de agua en ebullición (BWR)



- ❑ Son los más parecidos a las centrales de carbón, pero **su uso está menos extendido que los PWR.**
- ❑ En estos reactores el **agua ligera** es el **elemento moderador** y, a su vez, el que **se calienta** por la fisión del uranio.
- ❑ El **agua hierve**, debido a la baja presión –unas 70 Atm- en la cámara del reactor, **convirtiéndose en vapor**, el cual se envía directamente a la turbina.
- ❑ La **alimentación continua del reactor con agua fría** impide que se alcancen temperaturas elevadas en su interior.
- ❑ El **tipo de combustible** y los **sistemas de control** son **idénticos a los PWR.**

# Reactor de agua pesada (CANDU)



- 
- ❑ Son conceptualmente iguales a los de agua ligera, sólo que **emplean agua pesada** -óxido de deuterio- **como elemento moderador y de transferencia de calor.**
  - ❑ El combustible utilizado es el uranio natural, en forma de óxido, que se introduce en tubos fabricados con una aleación de circonio.
  - ❑ El **reactor es más complejo** que los de agua ligera, de ahí que no sean muy usados en la práctica.
  - ❑ La tecnología de este tipo de reactor nuclear ha sido desarrollada principalmente en **Canadá.**

# Reactor refrigerado por gas (GCR)



- ❑ Este tipo de reactores **carecen de sustancias en estado líquido en su interior**, y por tanto, de bombas y otros mecanismos.
- ❑ El **combustible** es **uranio natural** (sin enriquecer) y el **moderador** es **grafito** (en barras)
- ❑ El **refrigerante** es, usualmente, **anhídrido carbónico** ( $\text{CO}_2$ ), introducido en el reactor con un soplante, y que circula por canalizaciones practicadas en el interior de las barras de grafito.
- ❑ El  **$\text{CO}_2$  recalentado forma el primario de un intercambiador gas-agua.**
- ❑ El **agua que se hace pasar por el secundario se calienta y evapora, pasando a mover la turbina.**
- ❑ La tecnología de este tipo de reactor nuclear ha sido desarrollada principalmente en **Francia y Reino Unido.**

---

❑ **Páginas Web:**

- *Energía nuclear de fisión.* <http://comunidad.eduambiental.org/>
- <http://energia-nuclear.net/reactor-nuclear/tipos-de-reactor-nuclear.html>

## 1.3. Generación III y III+

---

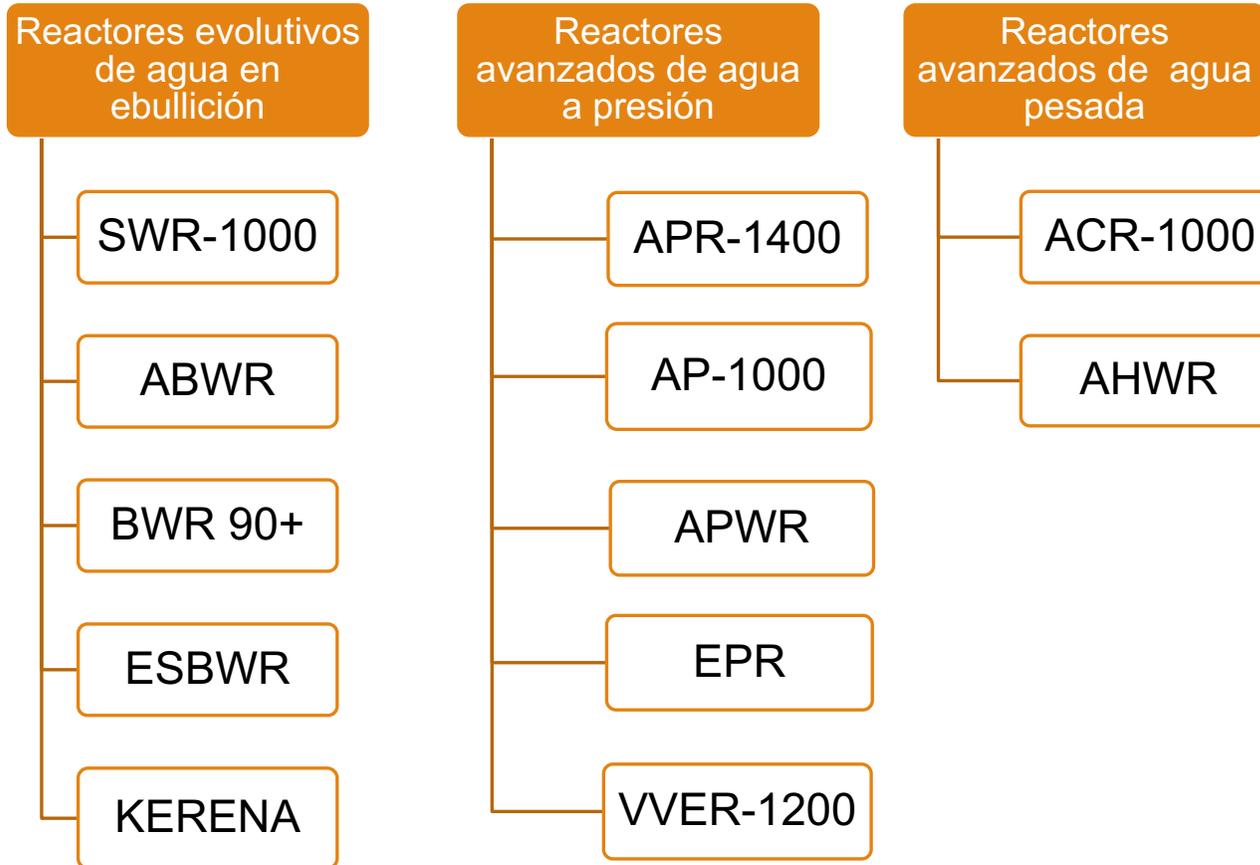
- 
- ❑ Evolución de las centrales nucleares
  - ❑ Familias de reactores de Generación III y III+
  - ❑ ABWR (Advanced Boiling Water Reactor)
  - ❑ ESBWR (Economical Simplified Boiling Water Reactor)
  - ❑ EPR (European Pressurized Reactor)
  - ❑ AP-1000
  - ❑ ACR-100 (Advanced CANDU Reactor)

# Evolución de las centrales nucleares



- 
- ❑ **Centrales de Generación III y III+ (1990-2030):** Centrales similares a las de la 2ª generación pero con mejoras desarrolladas a partir de la experiencia operativa.
  - ❑ Principales mejoras:
    - **Diseño más simple y robusto.**
    - **Diseño estandarizado y modular.**
    - **Sistemas de seguridad pasivos, redundantes o intrínsecos.**
    - **Mayor factor de disponibilidad y vida útil típica de 60 años.**
    - **Reducida probabilidad de accidentes con fusión de núcleo.**
    - **Mitigación de las consecuencias en caso de fusión de núcleo.**
    - **Doble contención.**
    - **Mayor quemado.**
    - **Uso de venenos quemables.**
    - **Capacidad para operar con 100% de combustible de MOx.**
    - **Capacidad de seguimiento de carga.**

# Familias de reactores de Generación III y III+



# ABWR (Advanced Boiling Water Reactor)



- ❑ BWR de IIIª generación de GE Hitachi y Toshiba.
- ❑ Tiene una potencia nominal de 3.920 MWth y 1.380 MWe ( $\eta=34,5\%$ )
- ❑ Diseño aprobado por la NRC.
- ❑ Evolución en:
  - Seguridad:
    - ✓ Respuesta completamente automática ante accidentes de pérdida de refrigeración.
    - ✓ Mejor control de potencia mediante control fino del movimiento de las barras de control.
    - ✓ Mejora del ECCS
    - ✓ Tiene una  $CDF_{max}$  de diseño de  $1,6 \times 10^{-7}$  por reactor-año.
  - Diseño de vasija y componentes muchísimo más sencillo.

# ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor)



- ❑ BWR de III<sup>a</sup>+ generación desarrollado a partir del Simplified-BWR y del ABWR por GEH.
- ❑ Tiene una potencia nominal de 4500 MWth y 1.520 MWe ( $\eta=34,7\%$ )
- ❑ Diseño aprobado por la NRC.
- ❑ Mejoras:
  - Aspecto económico:
    - ✓ Mayor competitividad basada en las economías de escala.
    - ✓ Vida de diseño de 60 años y factor de disponibilidad de 95%.
  - Seguridad pasiva:
    - ✓ Circulación natural en el circuito del núcleo.
    - ✓ ECCS pasivo, por evaporación y condensación.
    - ✓ Tiene una  $CDF_{\max}$  de diseño de  $2 \times 10^{-8}$  por reactor-año.

# EPR (European Pressurized Reactor)



- ❑ Tecnología PWR de Areva NP, EDF (Reactores N4 de Framatome) y Siemens KWU (KONVOI).
- ❑ Tiene una potencia nominal de 4590 MWt, y una potencia eléctrica neta de 1630 MWe ( $\eta=36\div37\%$ ), la mayor potencia de los reactores construidos hasta la actualidad.
- ❑ Evolución en:
  - Aspecto económico: factor de disponibilidad del 92% y vida de diseño de 60 años.
  - Seguridad: prevención de accidentes severos, mitigación de sus consecuencias y protección frente a impacto de aviones.
    - ✓ Posee medidas de protección activas y pasivas
    - ✓ Tiene una  $CDF_{\max}$  de diseño de  $6,1 \times 10^{-7}$  reactor-año.
  - Operación: mejor uso del combustible, generando menos residuos.
    - ✓ El reactor puede usar como combustible  $UO_2$  (5%), uranio reprocessado, y óxido de plutonio y uranio mezclado (MOX) en el 100% de los elementos combustibles.
    - ✓ Puede realizar seguimiento de la demanda.

- 
- ❑ Es un reactor de agua a presión (PWR) de Westinghouse de Generación III+
  - ❑ Evolución del AP600 con una potencia nominal de 3400 MWt y 1.250 MWe neta, de dos lazos.
  - ❑ Diseño aprobado por la NRC.
  - ❑ Evolución en:
    - Seguridad:
      - ✓ Sistema de Refrigeración Pasiva del núcleo.
      - ✓ En caso de fusión del núcleo, el corium se retiene dentro de la vasija, que se refrigera externamente con agua.
      - ✓ Tiene una  $CDF_{\max}$  de diseño de  $2,41 \times 10^{-7}$  por reactor y año.
    - Diseño: Importante simplificación, reduciendo considerablemente el número de tuberías, válvulas y otros componentes.

# ACR-1000 (Advanced CANDU Reactor)



- 
- ❑ Reactor CANDU de Generación III+ desarrollado por la compañía canadiense AECL. En realidad combina características de los reactores CANDU con características de los reactores PWR.
  - ❑ Tiene una potencia nominal de 1200 MWe.
  - ❑ Mejoras:
    - Aspecto económico:
      - ✓ Reduce los costes de capital del CANDU original utilizando uranio con bajo enriquecimiento. Esto permite que el reactor sea más compacto y, por ello, más barato.
      - ✓ Reemplaza el refrigerante de  $\text{D}_2\text{O}$  en la sección de alta presión de la calandria con agua "ligera" convencional. Esto reduce en gran medida la cantidad de agua pesada necesaria, y el coste del bucle del refrigerante primario.

# ACR-1000 (Advanced CANDU Reactor)



## □ Mejoras:

- Seguridad:
  - ✓ 2 sistemas de apagado de seguridad rápidos e independientes.
  - ✓ 1 sistema de agua de reserva (RWS).
  - ✓ 1 sistema de suministro eléctrico de emergencia (EPS).
  - ✓ 1 sistema de agua de refrigeración (CWS)

---

## ❑ Libros y monografías:

- *Curso básico de Ciencia y Tecnología Nuclear*. Jóvenes Nucleares, Edición 2013.

## ❑ Páginas Web:

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_CANDU\\_reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_CANDU_reactor)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor\\_europeo\\_presurizado](https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_europeo_presurizado)
- <https://es.wikipedia.org/wiki/AP1000>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor\\_nuclear\\_avanzado\\_de\\_agua\\_en\\_ebullición](https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_nuclear_avanzado_de_agua_en_ebullición)

# 1.4. Generación IV

---

- 
- ❑ Evolución de las centrales nucleares
  - ❑ GFR (Gas-cooled Fast Reactor)
  - ❑ LFR (Lead-cooled Fast Reactor)
  - ❑ MSR (Molten Salt Reactor)
  - ❑ SFR (Sodium-cooled Fast Reactor)
  - ❑ SCWR (SuperCritical Water-cooled Reactor)
  - ❑ VHTR (Very High Temperature Reactor)

- 
- ❑ **Centrales de Generación IV (2030-):** Engloba a una serie de proyectos, programas e iniciativas –bastante genéricos- para el desarrollo y prueba de varios sistemas nucleares muy innovadores.
  - ❑ **Principios a cumplir** por las nuevas centrales:
    - **Sostenibilidad.** Los diseños deben cumplir objetivos como:
      - ✓ Seguridad de suministro de combustible nuclear a largo plazo.
      - ✓ Minimizar y gestionar los desechos nucleares, y reducir su periodo de gestión.
    - **Economía:** los diseños deben:
      - ✓ Ofrecer más ventajas económicas que otras fuentes de energía durante el ciclo de vida útil
      - ✓ Equiparar su nivel de riesgo financiero con el de otros proyectos energéticos.

- Principios a cumplir por las nuevas centrales:
  - **Seguridad y fiabilidad.** los diseños deben sobresalir por su seguridad y fiabilidad. Así, deben:
    - ✓ Reducir al mínimo la probabilidad de daños en el núcleo del reactor y su magnitud.
    - ✓ Eliminar la necesidad de adoptar medidas de emergencia fuera del emplazamiento.
  - **Resistencia a la proliferación y protección física:** los diseños deben:
    - ✓ constituir la vía menos deseable y atractiva para la desviación o el robo de materiales utilizables para la fabricación de armas.
    - ✓ Brindar mayor protección física contra actos de terrorismo.
- Otra novedad es que los diseños pueden no estar exclusivamente orientados a la generación eléctrica, sino aplicables a otros campos (generación de hidrógeno, grandes sistemas de transporte o, simplemente, generación de calor).

- Existen dos iniciativas internacionales para desarrollar estos diseños avanzados que puedan funcionar hacia el año 2030 y que cumplan con los requisitos anteriores:
  - **El GIF (Generation IV International Forum),**
    - ✓ Participan: Argentina\*, Australia, Brasil\*, Canadá, China, Euratom, Francia, Japón, Corea del Sur, Rusia, Sudáfrica, Suiza, Reino Unido, Estados Unidos.
    - ✓ Este grupo seleccionó en el año 2002 para su estudio 6 sistemas de entre casi 100:
      - ✓ dos reactores refrigerados por gas a alta temperatura (uno térmico y otro rápido), otros dos reactores rápidos (uno refrigerado por sodio y otro por plomo), un reactor refrigerado por agua supercrítica y uno de sales fundidas.
  - **El INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles),**
    - ✓ Participan el Organismo Internacional de la Energía Atómica, y en el que participan la Unión Europea, Rusia y otros países (**incluida España**).

# GFR (Gas-cooled Fast Reactor)



## □ Principales características:

- El reactor opera con neutrones rápidos, lo cual permite utilizar como combustible gran parte de los residuos nucleares actuales y otros combustibles diferentes al Uranio, como el Torio.
- Refrigerado por gas inerte: He o CO<sub>2</sub>.
- Ciclo del combustible cerrado.
- Temperatura de salida muy alta (850 °C) utilizando directamente una turbina de gas de ciclo cerrado Brayton (Alta eficiencia).
- Aplicaciones complementarias: producción de hidrógeno.

## □ Actividades de diseño:

- ALLEGRO (Unión Europea)

# LFR (Lead-cooled Fast Reactor)



- Principales características:
  - El reactor opera con neutrones rápidos, y utilizada ciclo cerrado de combustible para la conversión eficiente de uranio fértil.
  - El refrigerante es metal líquido: plomo, o bismuto-plomo eutéctico.
  - En términos de sostenibilidad, el plomo es abundante y, por lo tanto, disponible, incluso en caso de despliegue de un gran número de reactores.
  - Temperatura de operación elevada.
  - Poco impacto en caso de accidente grave.
  - Aplicaciones complementarias:
    - ✓ Fabricación de hidrógeno
    - ✓ Generación de calor para procesos.
  
- En la década de los 20 se prevé la construcción de varios reactores experimentales:
  - Refrigerados por plomo o plomo-bismuto: ALFRED en Europa, BREST-300 en Rusia
  - Refrigerado por plomo-bismuto: SVBR-100 en Rusia

□ Principales características:

- El reactor puede operar con neutrones rápidos o térmicos.
- El refrigerante consiste en una sal fluorada fundida.
- El combustible puede ir disuelto en el refrigerante o en estado sólido.
- La unidad de reprocesamiento de combustible en la propia planta permite la producción de plutonio o U-233 a partir del torio.
- Temperatura de operación elevada.

□ Actividades de diseño:

- Reactor prototipo FHR de 2 MWt (China).

# SFR (Sodium-cooled Fast Reactor)



- ❑ Principales características:
  - El reactor opera con neutrones rápidos.
  - El refrigerante consiste en metal fundido a baja presión.
  - Temperatura de operación elevada.
  - Ciclo del combustible cerrado para la gestión eficiente de los actínidos y la conversión del uranio fértil.
  
- ❑ Más de 400 años-reactor de experiencia operativa desde el año 1951:
  - BN-800 (Rusia) and CEFR (China) comenzaron a operar en la década anterior
  
- ❑ Actividades de diseño
  - ASTRID (Francia); JSFR (Japón); PGSFR (Corea); BN-1200 (Rusia); ESFR (Unión Europea); AFR-100 (Estados Unidos); CFR-1200 (China)

# SCWR (SuperCritical Water-cooled Reactor)



- ❑ Principales características:
  - El reactor puede operar con neutrones rápidos o térmicos.
  - Combina tecnología LWR o PHWR con tecnología avanzada de agua supercrítica usada en plantas de carbón
  - Opera por encima del punto crítico termodinámico (374° C, 22,1 MPa) del agua.
- ❑ Experiencia operativa:
  - No existe ninguna planta SCWR
  - Existe una vasta experiencia en plantas supercríticas de carbón.

# VHTR (Very High Temperature Reactor)



## □ Principales características:

- El reactor opera con neutrones térmicos.
- Reactor refrigerado por helio y moderado por grafito.
- Temperatura de operación muy elevada.
- Combustible: partículas TRISO en pebbles o blocks.
- Ciclo de combustible abierto.
- Seguridad excepcional.
- Experiencia operativa desde 1963.
- Aplicaciones no-eléctricas:
  - ✓ Producción de hidrógeno.
  - ✓ Producción de oxígeno.

## □ Actividades de diseño

- Planta HTR-PM de demostración en construcción (China); Nuevas plantas nucleares de generación (Estados Unidos); HTR naturalmente seguro (Japón)...

---

## □ Libros y monografías:

- *Curso básico de Ciencia y Tecnología Nuclear*. Jóvenes Nucleares, Edición 2013.
- *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*, OECD Nuclear Energy Agency, enero 2014

## 2. Reactores de fusión

---

## 2.1. La fusión nuclear

---

- 
- ¿Qué es la fusión?
  - El confinamiento
  - Reactores magnéticos

# ¿Qué es la fusión?

- ❑ **Proceso mediante el cual dos núcleos atómicos se unen para formar uno de mayor peso atómico, desprendiéndose mucha energía.**
- ❑ Protones ( ${}^1\text{H}$ ) se fusionan para dar lugar a helio ( ${}^4\text{He}$ ) y abundante energía en forma de positrones, neutrinos y radiación que calientan estrellas como el Sol.

✓ **Energía producida por el defecto másico** de la reacción:

$$E = (M[4 {}^1\text{H}] - M[{}^4\text{He}]) \times c^2$$

- ❑ En el Sol el ritmo de fusión es muy bajo; pero debido a su inmensa cantidad de plasma, al elevadísimo tiempo de confinamiento y la altísima densidad de éste, se convierten millones de toneladas de  ${}^1\text{H}$  en  ${}^2\text{H}$  por segundo.

# ¿Qué es la fusión?

- ❑ Reacción de fusión más eficiente:

**Deuterio ( $^2\text{H}$ ) con Tritio ( $^3\text{H}$ )**



- ❑ Al reactor nuclear se le alimenta con sólo **unos pocos gramos de combustible**.
- ❑ No se utilizan neutrones: **no es una reacción en cadena**.
- ❑ **INCONVENIENTE**: hay que calentar el combustible hasta cientos de millones de grados:

***ENORME INYECCIÓN DE ENERGÍA***

# ¿Qué es la fusión?

- 
- Deuterio → No es radiactivo
    - La mayor parte del Deuterio se produjo en el Big Bang
    - Abundancia en la Tierra: 0,015% de todo el Hidrógeno
    - **Uso industrial: agua pesada (D<sub>2</sub>O)**
  
  - Tritio → **Es radiactivo**: radiación  $\beta$ ; vida media: 12 años
    - Abundancia del Li en la corteza terrestre: 65 ppm
  
  - T~100.000.000 grados
  
  - Los neutrones resultantes de la fusión no se usan en la reacción. Por lo tanto, **no es una reacción en cadena.**

- ¿Cómo conseguir una **reacción de fusión eficiente**?
  - **Confinamiento del combustible** durante un **tiempo suficiente**: **calentamiento** de las partículas de combustible (aumentan su velocidad, de modo que al chocar entre sí pueden superar la repulsión de los núcleos y fusionan) de una mezcla con **alta densidad** (una alta concentración de partículas facilita el choque entre ellas).
  
- **Expresión matemática de estas condiciones**:
  - **Criterio de Lawson**: mantenimiento de las adecuadas condiciones de temperatura y densidad durante un tiempo suficiente de tal forma que se facilite la fusión.

$$n \times T \times \tau > 5 \times 10^{21} \text{ seg} \times \text{keV} \times \text{m}^{-3}$$

*n – densidad*

*T – temperatura*

*τ – tiempo*

## Tipos de confinamiento

---

### □ Confinamiento gravitatorio

- La gravedad confina las partículas en un espacio lo suficientemente reducido a altísimas temperaturas durante miles de años, facilitando así las reacciones de fusión.
  - ✓  $\tau$  de miles de años
- No es aplicable en la Tierra, ya que no se dispone de métodos para generar un campo gravitatorio lo suficientemente fuerte.

## Tipos de confinamiento

---

### □ Confinamiento inercial

- Una **pastilla de D+T** se comprime a muy altas densidades mediante radiación hasta superar el Criterio de Lawson, desencadenando la fusión.
  1. La superficie de la pastilla se calienta mediante láseres hasta forman una capa de plasma envolvente.
  2. La evaporación violenta del plasma envolvente provoca por reacción la compresión de la pastilla.
  3. La implosión produce una altísima densidad con temperaturas de  $10^8$  grados
  4. Se produce la fusión nuclear y la emisión de energía.

## Tipos de confinamiento

---

### □ Confinamiento magnético

- Consiste en confinar las partículas de plasma caliente en un espacio reducido mediante campos magnéticos, impidiendo con éstos que dichas partículas toquen las paredes del reactor.

¿Cómo se lleva a cabo este confinamiento?

- **Primera aproximación:** confinar el plasma en un cilindro magnético inyectando combustible por los extremos, manteniendo el plasma en el centro donde se producirían las reacciones de fusión.
  - ✓ Inconveniente: se escapan las partículas por los extremos.
- **Segunda aproximación:** cerrar el cilindro sobre si mismo para obtener un toroide del cual no se pueden escapar las partículas.
  - ✓ El toroide se llena con gas neutro que se ioniza.
  - ✓ Bobinas exteriores al toroide, y a lo largo de él, generan el campo magnético en la dirección toroidal.

- 
- ✓ *Problema:* el campo magnético no-uniforme hace que los electrones e iones de plasma experimenten una deriva contraria, generando un campo eléctrico que hace que las partículas escapen del confinamiento para acabar contra las paredes del contenedor, enfriándose sin llegar a producir reacciones de fusión.
  - ✓ *Solución:* superposición de un nuevo campo magnético, perpendicular al toroidal (campo poloidal), de manera que la nueva curvatura del campo compensa las derivas de las cargas.
  - Las líneas de campo magnético resultante giran de forma helicoidal, alrededor del eje del toro cerrándose sobre si mismas.
  - Dos estrategias para crear el campo magnético poloidal:
    - Mediante la inducción de una corriente en el plasma.
    - Mediante bobinas externas.

- 
- **Campo magnético toroidal** creado mediante bobinas (**bobinas toroidales**) distribuidas a lo largo del toroide
  
  - **Campo magnético poloidal** creado mediante una corriente  $I_p$  inducida en el seno del plasma en la dirección toroidal
    - ✓ El plasma actúa de circuito secundario de un transformador que tiene, obviamente, una bobina que actúa de circuito primario.
  
  - La **superposición de ambos campos** da lugar a un **campo magnético helicoidal**, de forma que las partículas circulan tanto por las zonas exteriores como por las interiores del toro.

## Tipos de reactores

---

### □ Tipo TOKAMAK

- ✓ *Años 50*: primer prototipo, T-1, en la URSS.
- ✓ *Años 70*: prototipo T-3 exitoso. Resultado: expansión de los TOKAMAKs por el mundo.
  - Grandes TOKAMAK: JET-UE, JT60-Japón; TFTR-USA).
  - TOKAMAKs de tamaño medio en muchos países de la UE y USA

## Tipos de reactores

---

### □ Tipo Stellarator

- ✓ Dispositivos toroidales donde el campo magnético poloidal lo generan bobinas exteriores.
- ✓ Desventaja:
  - Tolerancias de construcción muy pequeñas.
- ✓ Ventajas:
  - No hay corriente inductiva.
  - No hay corriente interna en el plasma, lo que evita interrupciones.

---

## □ Libros e informes

- Fusion Energy Science. *Clean, Safe and Abundant Energy through innovative Science and Technology. DOE/SC-0001*

## 2.2. EL ITER

---

- 
- El proyecto ITER
  - El combustible
  - Seguridad
  - Diseño TOKAMAK
  - Tritium breeding

# El proyecto ITER



---

***International Thermonuclear Experimental Reactor***  
***(I.T.E.R.)***  
***En latín “el camino”.***

- 
- ❑ El Deuterio es relativamente abundante: el 0.016% del Hidrógeno en la Tierra es Deuterio.
  - ❑ Tenemos **toneladas de él en el agua de los océanos**, en lo que se llama (*agua pesada*).
  - ❑ No es radiactivo y no existen riesgos en su almacenaje ni manipulación
  - ❑ El Tritio, sí que es radiactivo y apenas existe en la Naturaleza porque su vida media es de sólo 12 años.
    - Se puede sintetizar en otros reactores nucleares.

Necesita temperaturas de más de **100 millones de grados** para iniciarla. En comparación, la **superficie del Sol** está a “sólo” 6000 °C, y su núcleo a menos de 16 millones de Kelvin **¡¡10 veces más caliente que el centro del sol!!**

---

**Los reactores de *fusión* son esencialmente diferentes** de los de *fisión*, debido a:

- ❑ Si existe algún tipo de fallo en el confinamiento del plasma, la reacción **se detiene inmediatamente**. No puede existir una “fusión del núcleo”.
- ❑ Requieren unos **pocos gramos** de combustible nuclear en cada instante
- ❑ El más pequeño error en el confinamiento magnético del plasma hará que éste toque las paredes. Sí, es cierto que las paredes se volverán radiactivas pero la reacción parará inmediatamente, debido al requisito de pureza del plasma que sostiene la fusión. **No hay posibilidad de que la cámara se funda y deje escapar el plasma.**
- ❑ **Apenas habrá residuos radiactivos**. El (Tritio) podría ser peligroso y debe ser almacenado con cuidado, pero sólo entre su producción y el consumo: **no existirán residuos radiactivos que almacenar por siglos.**

El corazón del ITER es la cámara, o *vasija*, donde ocurrirá la fusión nuclear. Entre unas pocas opciones posibles, se decidió construir ITER siguiendo un **diseño llamado Tokamak**, acrónimo ruso de “*cámara toroidal con bobinas magnéticas*”.

1. La **cámara de vacío** (vacuum Vessel, VV): esta cámara, hueca y que funcionará en alto vacío, es la que confinará al plasma.
2. **Imanes**: Electroimanes de superconductor
3. **Criostato**: aislará las partes internas calientes de los superconductores de los electroimanes.
4. La así llamada “**primera pared**”.
5. **Calentadores**: Proporcionan la energía necesaria para iniciar la fusión nuclear del plasma.
6. **Sensores de monitoreo**: Durante el funcionamiento de la máquina se vigilarán de cerca las medidas de sensores de esfuerzo mecánico, temperatura, vibraciones, etc.

## Campos magnéticos: Diseño y generación

---

- ❑ Las líneas de campo deberían ser helicoidales alrededor del toro para confinar mejor el plasma
- ❑ Se suma al campo toroidal otro perpendicular a éste. Campo poloidal.
- ❑ **Se genera con una fuerte corriente eléctrica de unos 15 millones de amperios** se induce en el plasma caliente en la dirección longitudinal
- ❑ **80.000 km de cables superconductores** (Nb<sub>3</sub>Sn) para cablear los **18 bobinas toroidales**
- ❑ 48 electroimanes, la generación del campo magnético de 11.8 Teslas (**200.000 veces el campo de la Tierra**) y 6.540 toneladas.

## Las paredes de la cámara

---

- La **primera pared de la cámara** estará expuesta a un intenso bombardeo de neutrones altamente energéticos. Las condiciones de trabajo serán:

(i) ser lo suficientemente resistentes para aguantar tiempo suficiente (meses o años) a la radiación.

(ii) ser capaces de **evacuar el calor eficazmente**.

**1º.- Capa de 1cm de Berilio.**

**2º.- Capa 1cm de cobre para distribuir más uniformemente el calor,**

**3º.- Capa de acero macizo (30cm) transfiera el calor al agua de refrigeración.**

(421 módulos, de 1 Tm cada uno.)

## Desviador/ Divertor

---

Tiene una doble función:

- (1) ayudar a darle forma al plasma
  - (2) **sacar la “basura” fuera del reactor**
- ✓ 54 bloques idénticos o “cassettes”,
  - ✓ Ideado para que sus superficies sean alcanzadas por partículas energéticas que escapan del plasma.
  - ✓ la misión del divertor es recoger el helio que se produce como producto de la reacción y que debe evacuarse para mantener la pureza del plasma.

Se espera que la reparación de módulos del divertor sea una operación habitual durante los años de operación de ITER “.

Como partes de estos pueden “activarse” (volverse radiactivos), se está construyendo un edificio exclusivamente dedicado a estas tareas de alta seguridad: se llama la **“célula caliente”**

## Calentado del plasma

---

- *Más de **100 millones de grados** para que arranque la fusión nuclear en el plasma del reactor.*

- *El mismo campo magnético que ayuda a confinar el plasma también **induce** una corriente eléctrica en él*



*La temperatura se elevará hasta unos 10 millones de grados, que no está nada mal para empezar...*

- *La energía restante se espera conseguirla por dos medios:*

*(1) la **inyección de iones acelerados** (las colisiones redistribuyen la energía, con un efecto de “calentón”).*

*(2) mediante **calentamiento por radiofrecuencia**.*

# Tritium Breeding



- 
- ❑ El tritio y deuterio son dos isótopos de hidrógeno que se utilizarán para alimentar la reacción de fusión en el ITER. Mientras que el deuterio se puede extraer del agua de mar en cantidades prácticamente ilimitadas, el suministro de tritio es limitado.
  
  - ❑ *Existe una segunda fuente de tritio:*
    - El tritio puede ser producido dentro del tokamak cuando los neutrones que escapan del plasma interactúan con un elemento específico (Litio, contenido en la corteza terrestre).

---

## □ Libros, monografías e informes:

- *ITER Technical basis. International Atomic Energy Agency. Vienna 2002.*
- *The status of the ITER design. Fusion and engineering design. Holtkamp, N (2009)*
- *Fusión energy productios from a deuterium-tritium plasma in the JET tokamakt. Nuclear Fusion. JET Team (1992)*

## □ Páginas Web:

- *[www.iter.org](http://www.iter.org)*