



ULL

---

Universidad de La Laguna

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Grado en Ingeniería Química Industrial

TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

**ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA  
ENERGÍA NUCLEAR COMO  
FUENTE DE ENERGÍA  
SOSTENIBLE, SEGURA Y LIMPIA**

---

AUTORA:

Elba Fernández Aisa

TUTOR:

Francisco José García Álvarez

JULIO 2017

*Agradecimientos:*

*A mi padre:*

*Por estar siempre a mi lado,  
Por levantarme cuando no podía sola,  
Por iluminarme cuando yo no veía la salida,  
Por ser mi apoyo incondicional,  
Por ti soy lo que soy.*

*A mi madre:*

*Que nunca perdió la fe en mí,  
Que me cuidó y abrigó en todo momento,  
Que siempre supo cómo animarme,  
Que sin su sonrisa yo no sabría sonreír,  
Que sin ella, yo no sabría vivir.*

*Gracias por no dejarme abandonar,*

*Gracias.*

## Índice

Resumen .....	11
Abstract .....	12
Autorización del tutor .....	13

### Capítulo 1. Introducción

Justificación.....	16
Peticionario.....	17
Objeto.....	18
Alcance .....	19

### Capítulo 2. Estudio de Mercado

Objeto.....	22
Introducción a la Energía Nuclear .....	23
La Energía Nuclear y el Cambio Climático .....	24
Enfoque futuro sobre el cambio climático .....	26
Actuación de la Energía Nuclear .....	28
Protocolo de Kioto .....	30

<b>Energía Nuclear a nivel mundial .....</b>	<b>31</b>
<b>Mix Energético en España.....</b>	<b>36</b>
<b>Energía Nuclear en España .....</b>	<b>39</b>
<b>Industria Nuclear en España .....</b>	<b>41</b>
<b>Desarrollo sostenible.....</b>	<b>42</b>
<b>Perspectiva de la Energía Nuclear .....</b>	<b>44</b>

### *Capítulo 3. Estudio técnico*

<b>Objeto.....</b>	<b>47</b>
<b>Funcionamiento de una Central Nuclear.....</b>	<b>48</b>
<b>Diagrama de bloque .....</b>	<b>49</b>
<b>Diagrama de flujo.....</b>	<b>51</b>
<b>Componentes.....</b>	<b>53</b>
Edificio de Contención .....	53
Edificio de combustible .....	55
Edificio de turbinas.....	56
Edificios auxiliares y de salvaguardias .....	57
Edificio eléctrico .....	57
Otros Edificios.....	58
<b>Centrales Nucleares en España .....</b>	<b>59</b>
<b>Indicadores de funcionamiento .....</b>	<b>61</b>
<b>Otros emplazamientos .....</b>	<b>62</b>
Fábrica de elementos combustibles .....	62
Centro de almacenamiento de El Cabril .....	63
Almacén Temporal Centralizado .....	64

## Capítulo 4. Estudio de Diseño

<b>Objeto</b> .....	<b>67</b>
<b>Normativa aplicable</b> .....	<b>68</b>
<b>Localización</b> .....	<b>69</b>
<b>Bases para el diseño</b> .....	<b>72</b>
<b>Fases de construcción</b> .....	<b>73</b>
<b>Niveles de seguridad</b> .....	<b>74</b>
<b>Diseño del reactor</b> .....	<b>75</b>
<b>Planta de la Central</b> .....	<b>78</b>
<b>Costes de una Central Nuclear</b> .....	<b>82</b>

## Capítulo 5. Conclusiones

<b>Conclusiones</b> .....	<b>85</b>
---------------------------	-----------

## Bibliografía

<b>Bibliografía</b> .....	<b>89</b>
<b>Bibliografía consultada</b> .....	<b>90</b>

## Índice de Anexos

### Anexo 1. Fisión Nuclear

<b>Fisión Nuclear</b> .....	<b>2</b>
Fisión nuclear en cadena .....	<b>3</b>
Interés práctico de la Fisión .....	<b>4</b>

### Anexo 2. Los Reactores Nucleares

<b>Conceptos básicos sobre Reactores Nucleares</b> .....	<b>6</b>
<b>Componentes del núcleo del reactor</b> .....	<b>7</b>
Combustible Nuclear .....	8
Barras de control .....	8
Moderador .....	9
Refrigerante .....	9
Reflector .....	9
Blindaje .....	10
<b>Tipos de reactores nucleares</b> .....	<b>10</b>
<b>Reactores del futuro</b> .....	<b>12</b>
<b>Reactores de Generación III+</b> .....	<b>13</b>
<b>Reactores de Generación IV</b> .....	<b>13</b>

## *Anexo 3. Las Materias Primas*

<b>Combustible Nuclear .....</b>	<b>18</b>
Etapas para la obtención .....	19
<b>Ciclo del Combustible Nuclear .....</b>	<b>23</b>
Ciclo abierto.....	24
Ciclo cerrado.....	24

## *Anexo 4. Gestión de Residuos*

<b>Residuos Radioactivos .....</b>	<b>27</b>
<b>Gestión de Residuos Radioactivos .....</b>	<b>28</b>
Tipos de almacenamiento .....	28
Plan General Residuos Radiactivos .....	30
Financiación de la gestión y desmantelamiento.....	31

## *Anexo 5. La Tecnología Nuclear*

<b>Aplicaciones de la tecnología Nuclear.....</b>	<b>34</b>
Industria .....	34
Hidrología .....	35
Minería .....	36
Medicina .....	36
Arte.....	37
Exploración Espacial .....	37
Cosmología .....	38

<b>Alimentación.....</b>	<b>39</b>
<b>Medio Ambiente .....</b>	<b>39</b>
<b>Efecto Invernadero.....</b>	<b>40</b>
<b>Investigación y Desarrollo Nuclear.....</b>	<b>41</b>

## *Anexo 6. Legislación Nuclear*

<b>Normas Internacionales .....</b>	<b>45</b>
Legislación comunitaria .....	45
En materia de salvaguardias.....	46
En materia de Responsabilidad Civil.....	46
En materia de Seguridad Nuclear .....	47
En materia de notificación de accidentes.....	47
En materia de Protección Física.....	47
<b>Normas Estatales .....</b>	<b>48</b>
Leyes.....	48
<b>Otras Normas .....</b>	<b>48</b>
<b>Legislación instalaciones radiactivas.....</b>	<b>50</b>
<b>Normativa de transporte.....</b>	<b>50</b>



## *Índice de Ilustraciones*

Imagen I. Capacidad de la Industria Nuclear en España en 2016. Fuente Foro Nuclear .....	41
Imagen II. Esquema de una central nuclear .....	48
Imagen III. Diagrama de bloques de una Central Nuclear .....	49
Imagen IV. Diagrama de flujo de los circuitos que intervienen en una Central Nuclear .....	51
Imagen V. Barreras del Edificio del Reactor de una Central Nuclear .....	52
Imagen VI. Componentes de una Central Nuclear .....	53
Imagen VII. Vasija de un reactor PWR.....	54
Imagen VIII. Generador de Vapor Ensa .....	55
Imagen IX. Edificio de turbinas de una Central Nuclear .....	56
Imagen X. Turbina de una Central Nuclear .....	56
Imagen XI. Distribución de los edificios de una Central Nuclear .....	57
Imagen XII. Esquema torre de refrigeración de tiro natural .....	58
Imagen XIII. Mapa de ubicación de Centrales Nucleares en la Península Ibérica .....	59
Imagen XIV. Interior de la Fábrica de ENUSA en Juzbado .....	62
Imagen XV. Interior de El Cabril .....	63
Imagen XVI. Diseño conceptual del ATC.....	64
Imagen XVII. Situación geográfica de C.N. José Cabrera .....	70
Imagen XVIII. Visión de la C.N. de José Cabrera antes de su desmantelamiento.....	71
Imagen XIX. Vista de la localización de la C.N. de José Cabrera tras su desmantelamiento ...	71
Imagen XX. Cronograma de montaje del Reactor AP 1000 aportado por Westinghouse .....	73
Imagen XXI. Planta Westinghouse AP 1000 .....	76
Imagen XXII. Sección del reactor Westinghouse AP 1000 .....	77
Imagen XXIII. Vista en planta de la central nuclear a realizar .....	78
Imagen XXIV. Sección del edificio de contención con el AP 1000 de Westinghouse .....	80
Imagen XXV. Vasija del reactor y generador de vapor para el AP 1000 de Westinghouse .....	81

## *Índice de Ilustraciones de Anexos*

Imagen XXVI.Uranio, Torio y Plutonio .....	2
Imagen XXVII.Reacción en cadena de la fisión nuclear del U-235.....	3
Imagen XXVIII.Detalles del núcleo de un Reactor Nuclear .....	9
Imagen XXIX.Esquema Reactor RBMK.....	11
Imagen XXX.Reactor de Temperatura Muy Alta, VHTR de Generación IV .....	15
Imagen XXXI.Reactor de Sal Fundida, MSR de Generación IV .....	15
Imagen XXXII.Etapas del combustible nuclear .....	19
Imagen XXXIII.Yellow cake de uranio .....	19
Imagen XXXIV.Diagrama de flujo de la obtención de concentrado de Uranio .....	20
Imagen XXXV.Diagrama de flujo de la obtención del dióxido de uranio .....	21
Imagen XXXVI.Pastillas de polvo de dióxido de uranio .....	22
Imagen XXXVII.Descripción del ciclo de Combustible Nuclear .....	23
Imagen XXXVIII.Separación y transmutación de residuos radiactivos.....	30
Imagen XXXIX.Retos de la plataforma CEIDEN .....	41



## Resumen

El objetivo de este proyecto es el estudio de la generación eléctrica nuclear como sistema energético que reduzca la dependencia de los carburantes fósiles en el contexto actual; dónde la demanda mundial ha generado la escasez de los mismos y propiciado un gran impacto en el cambio climático.

Esta situación energética y medioambiental ha hecho que se busquen fuentes alternativas de abastecimiento que logren un equilibrio entre la obtención de la energía necesaria y una contaminación ínfima.

Se pretende estudiar la tecnología empleada en la Energía Nuclear, las reacciones que tienen lugar en el proceso industrial y las instalaciones donde se realizan. Se describirán los equipamientos, el transporte, la seguridad empleada, tipos de reactores, las aplicaciones y los residuos, entre otros, con la finalidad de analizar su viabilidad basándonos en ella como fuente sostenible, segura y limpia.

## Abstract

The purpose of this degree final work is the feasibility study of nuclear power generation as an energy system that reduces dependence on fossil fuels in a current moment where the global demand has generated the scarcity of the same ones and propitiated a great impact in the climatic change.

This energy and environmental situation has led to the search for alternative sources of supply that achieve a balance between obtaining the necessary energy and minimal pollution.

The intention of this project is to study the technology used in Nuclear Energy, the reactions that take place in the industrial process and the facilities where they are made. Equipment, transport, safety, applications and waste will be described, among others, with the aim of analyzing its viability based on it as a sustainable, safe and clean source.

IMPRESO TFG05	
AUTORIZACIÓN DEL TUTOR PARA LA PRESENTACIÓN DEL TFG	
<b>TÍTULO DEL TFG:</b>	Estudio de Viabilidad de la Energía Nuclear como fuente de energía sostenible, segura y limpia.
<b>ESTUDIANTE/S:</b>	D <sup>a</sup> Elba Fernández Aisa
<b>GRADO:</b>	GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL
<b>TUTOR/ES:</b>	D. Francisco José García Álvarez
<p>El tutor, ha revisado el documento elaborado por la estudiante y autoriza la presentación y defensa del Trabajo Fin de Grado arriba referenciado, y se comprometen a entregar el informe de evaluación en fecha anterior a la defensa del trabajo.</p>	
<p><b>¿Propone vocal externo para el tribunal de este TFG?</b> <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No</p> <p>Nombre y apellidos del vocal: _____</p> <p>Empresa/Institución/Organismo: _____</p> <p><b>El tutor declara que la persona propuesta como vocal es un profesional de reconocido prestigio y probada solvencia que no pertenece a ninguno de los estamentos universitarios, y que tampoco ha ejercido como tutor externo del trabajo a evaluar.</b></p>	
<p>En La Laguna, a 26 de Junio de 2017</p>	
<p><b>Firma del Tutor:</b></p>  <p>Fdo... D. Francisco José García Álvarez</p>	



---

*Capítulo 1.*

# *Introducción*

---

## Justificación

La energía se ha convertido en sinónimo de bienestar y de progreso. El ser humano, sin ser consciente de ello, es dependiente de la misma en su día a día. Esto ha provocando que su consumo se haya duplicado en la últimas tres décadas y se estima que antes de 2030 aumente en un 60%. [1]

La población mundial consume unos ochenta y cinco millones de barriles de petróleo al día, a unos cincuenta euros por barril, hacen cinco mil millones de euros diarios de consumo de petróleo, sin contemplar el resto de energías procedentes de combustibles fósiles. [2]

La energía es, por tanto, un tema de actualidad a la que se le añade la inquietud creciente por el medio ambiente y el cambio climático. Es decir, consumir menos y hacerlo mejor.

Es en este contexto se plantea el desarrollo y la mejora de fuentes de energía sostenibles con el medio ambiente. Por esto motivo, se ha considerado el estudio descrito a lo largo del presente proyecto con la finalidad de evaluar la posibilidad de la Energía Nuclear como una fuente de energía sostenible, segura y limpia.

## Peticionario

A petición del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de La Laguna, en Santa Cruz de Tenerife, se ha realizado el presente trabajo de fin de Grado bajo el título de *“Estudio de Viabilidad de la Energía Nuclear como fuente de energía sostenible, segura y limpia”* para optar a la titulación del Grado de Ingeniería Química Industrial.

## Objeto

El objeto del presente proyecto se basa en estudiar los diferentes factores y variables que entran en juego en una Central Nuclear para satisfacer las necesidades eléctricas en España con la finalidad de estudiar la viabilidad de la instalación de una nueva central nuclear en España y así contribuir al descenso de las concentraciones de gases de efecto invernadero que se producen y procediendo al cumplimiento de los protocolos actuales que regulan dichas emisiones.

Para conseguir el objetivo planteado, se desarrollan los siguientes puntos:

- Comenzaremos especificando qué es la Energía nuclear y cómo afecta al medio ambiente.
- Realizaremos un estudio para determinar las demandas de energía a nivel mundial y español.
- Proseguiremos describiendo el funcionamiento técnico de una Central Nuclear.
- Brevemente, se verán las distintas Centrales Nucleares ubicadas en España así como los distintos emplazamientos destinados para los residuos.
- Con los datos obtenidos y tras la realización de los Anexos, procederemos a definir los parámetros necesarios para el estudio de la viabilidad de la instalación de una nueva central en España.
- Se buscarán posibles ubicaciones de la misma teniendo en cuenta la capacidad de producción necesaria.
- Estableceremos las bases del diseño de la central nuclear.
- Describiremos el tipo de reactor que emplearemos y se mostrarán esquemas de ubicación de la maquinaria y elementos.
- Finalmente, realizaremos las conclusiones pertinentes.

## Alcance

Se establecerán los factores que determinarán la instalación de una nueva Central Nuclear para la producción de una potencia eléctrica de 1000 MW empleando un reactor de agua a presión que ayude a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. [3]

Se considerará que la generación eléctrica derivada de la puesta en operación de este proyecto sustituye a la producción que se habría generado con otras fuentes de abastecimiento energético cuya combustión emite mucho más volumen de este gas de efecto invernadero.

Teniendo en cuenta que la realización del presente proyecto tiene un tiempo limitado de redacción y por la falta de fuentes fehacientes de datos en España, no se contemplará la viabilidad económica que supondría la instalación de una nueva Central Nuclear ni se procederá al diseño de los parámetros de los equipos del mismo. Se realizará una estimación del coste de Operación y Mantenimiento de una Central Nuclear a partir de datos históricos para establecer un rango económico.

Se supondrá que la materia prima llega a la central en forma de pastillas de UO<sub>2</sub>, por lo que no se tendrán en cuenta los diferentes procedimientos llevados a cabo hasta obtener dichas pastillas. Tampoco se tendrán en cuenta los procedimientos de gestión de los residuos, suponiéndose que éstos, tras su vida útil, se situarán en las piscinas ubicadas en la misma central hasta que el organismo pertinente se haga cargo de ellos.



---

*Capítulo 2.*  
*Estudio de*  
*Mercado*

---

## Objeto

Se procederá a situar la demanda energética en España y en el mundo con la finalidad de analizar los factores de los que depende actualmente y para, a posteriori, tenerlos en cuenta para situar la nueva Central Nuclear.

Comenzaremos con una visión general sobre cómo la Energía Nuclear ayuda a disminuir el porcentaje de las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Tras analizar el mix energético actual de la demanda energética en España, nos centraremos en la fuente de energía producida por la fisión nuclear en nuestro país para establecer los criterios necesarios para las conclusiones de viabilidad de la instalación de una nueva Central Nuclear que aumente la producción de ésta energía.

## Introducción a la Energía Nuclear

La energía nuclear es la energía obtenida al manipular la estructura interna de los átomos que procede de fuentes en las que se realizan reacciones nucleares de manera controlada para transformar la energía que se libera en forma de calor del combustible empleado.

Este tipo de fuente de energía es, sin duda, la que más debate y controversia genera a raíz de accidentes nucleares ocurridos a lo largo de la historia o a la potencia que las armas nucleares son capaces de liberar. Tras estos acontecimientos, la política energética en varios países ha provocado el cierre progresivo de centrales nucleares y del avance de las tecnologías en el sector nuclear.

Tras la industria aeronáutica, la industria nuclear es el segundo sector que invierte más en seguridad. El estricto control reglamentario institucional contempla todas y cada una de las fases que componen el ciclo de producción, así como la protección de los trabajadores y del público en general. Aunque la producción de energía eléctrica es la utilidad más habitual de dicha industria, existen muchas otras aplicaciones de la energía nuclear en otros sectores, como en aplicaciones médicas, medioambientales, industriales o militares

## La Energía Nuclear y el Cambio Climático

Las emisiones de dióxido de carbono derivadas de actividades industriales, en especial las que utilizan combustibles fósiles, y el efecto invernadero que éstas emisiones producen sobre la atmósfera, son responsables en gran parte del cambio climático global que se ha experimentado en los últimos años.

Por esta razón, es de vital importancia que se controlen dichas emisiones para que el calentamiento global no vaya en aumento, presentándose dos grandes retos; incrementar el suministro eléctrico demandado por una sociedad en crecimiento tecnológico y, a la vez, mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, GEI.

En 2007, la Unión Europea aprobó el Plan Energético Medioambiental 2020 proponiendo un paquete integrado de medidas sobre el cambio climático y la energía que prevé nuevos y ambiciosos objetivos para dicho año.

El objetivo 20/20/20 para 2020 consiste en llevar a Europa hacia un futuro sostenible con una economía que genere pocas emisiones de carbono y, para ello, se deberá reducir las emisiones que provocan el efecto invernadero en un 20%, ahorrar un 20% del consumo de energía empleando una mejor eficiencia energética y conseguir que la energía primaria se de un 20% de origen renovable.

Existe un consenso acerca de que los impactos del cambio climático, provocados por un incremento de 2°C en la temperatura media global, son negativos en ecosistemas, agricultura, abastecimiento de agua, biodiversidad y salud humana en la mayor parte de las regiones del planeta. [4]

Según los distintos escenarios contemplados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, IPCC, para poder mantener el incremento de la temperatura media global

por debajo esos 2°C será necesario mantener la concentración de CO<sub>2</sub> equivalente en la atmósfera en valores de 450 ppm en volumen en 2100.

Todas las fuentes energéticas tienen una repercusión medioambiental en algún momento de su ciclo de producción. Actualmente, las dos únicas fuentes existentes que no emiten gases de efecto invernadero en su operación son las energías renovables y la energía nuclear. Las energías renovables son necesarias pero complementarias, ya que no pueden sustituir a medio plazo la generación nuclear.

Sin embargo, habrá que considerar todos los aspectos del ciclo de producción ya que en la extracción y el transporte de los combustibles nucleares se producen emisiones de CO<sub>2</sub>. Para ello podemos observar la *Tabla 1*. en la que se comparan diferentes cantidades de la emisión de este gas a lo largo de todo el ciclo de producción.

Toneladas de CO <sub>2</sub> por GWh producido			
Carbón	1.100	Solar	40
Gas natural (cogeneración)	650	Hidráulica	20
Gas natural (ciclo combinado)	450	Nuclear	5
Biomasa	50	Eólica	4

*Tabla 1. Cantidades de CO<sub>2</sub> en distintas fuentes de energía considerando el ciclo de vida completo. Fuente Foro Nuclear*

De manera resumida, las centrales nucleares no producen GEI u otros gases contaminantes en su operación, y tan solo 5 toneladas de CO<sub>2</sub> cuando se considera su ciclo de vida completo como se puede ver en la *Tabla 1*.

Por este motivo, la energía nuclear es hoy en día la única fuente capaz de suministrar grandes cantidades de electricidad sin contribuir de forma significativa al cambio climático.

## Enfoque futuro sobre el cambio climático

El Quinto Informe de Evaluación del IPCC ha adoptado un nuevo enfoque para proyectar el cambio climático durante los próximos siglos dejando atrás la forma tradicional de monitorizar los cambios a través de concentraciones atmosféricas, el forzamiento radiactivo<sup>1</sup>, las precipitaciones y la temperatura.

Las nuevas proyecciones se basarán en hipótesis alternativas acerca de los valores de forzamiento radiactivo para el año 2100. Se incluyen cuatro sendas representativas de concentración para analizar a corto y largo plazo las distintas emisiones de todos los GEI. Se emplea la abreviación de RCP junto a un número para diferencias éstas sendas.

En la *Gráfica 1*. Observamos las distintas sendas de mitigación que se podrían dar a lo largo del siglo sin aplicar ninguna política climática.

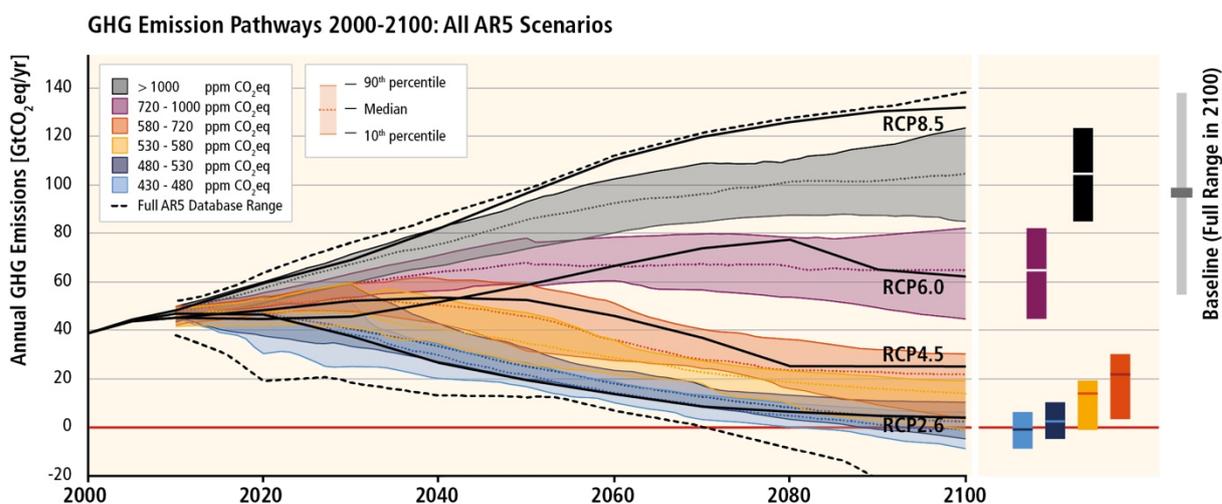


Gráfico 1. Sendas representativas de concentración de gases de efecto invernadero. Fuente Sociedad Nuclear Española

<sup>1</sup> Se trata del cambio en el flujo energético causado por diferentes sustancias y procesos naturales y antropológicos que alteran el presupuesto energético de la Tierra. Se mide en la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera.

Para mantener la concentración de CO<sub>2</sub> eq en la atmósfera de la que hablamos anteriormente, dada por el IPCC, de 450 ppm en volumen, deberemos tomar la senda de mitigación RCP2.6 que se observa en la *Gráfica 1*.

Si queremos conseguir dicho objetivo, las emisiones globales de GEI para el año 2050 deben ser entre el 40 y el 70% inferiores a las recogidas en el año 2010. Se requerirá una rápida descarbonización del sistema energético actual aplicando medidas de captura de carbono en las plantas que quemen combustibles fósiles, usando biocombustibles o incrementando las fuentes bajas en carbono, reforzando el uso de Energía Nuclear como fuente de energía sostenible, limpia y segura.

## Actuación de la Energía Nuclear

Actualmente, el parque nuclear mundial está formado por 448 reactores en treinta y un países y generan alrededor del 11,5% de la electricidad consumida en el planeta; aproximadamente unos 2.400 TWh anuales. En trece de esos países, la energía nuclear suministra más del 30% de sus necesidades eléctricas, alcanzando en algunos de ellos valores superiores al 50%. Las emisiones anuales totales en el mundo por cualquier actividad realizada son de 49Gt de CO<sub>2</sub> eq, de las cuales mas del 75% corresponden al sector de la energía. [5]

Según el informe *Climate Change and Nuclear Power 2015*, en los últimos cuarenta y cinco años, la energía nuclear ha evitado más de 65 Gt de emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo. Siguiendo en la línea del informe IPCC, el crecimiento de la industria nuclear podrá evitar la emisión de entre 3300 y 9000 Mt de CO<sub>2</sub> eq anuales al alcanzar el año 2050. [6]

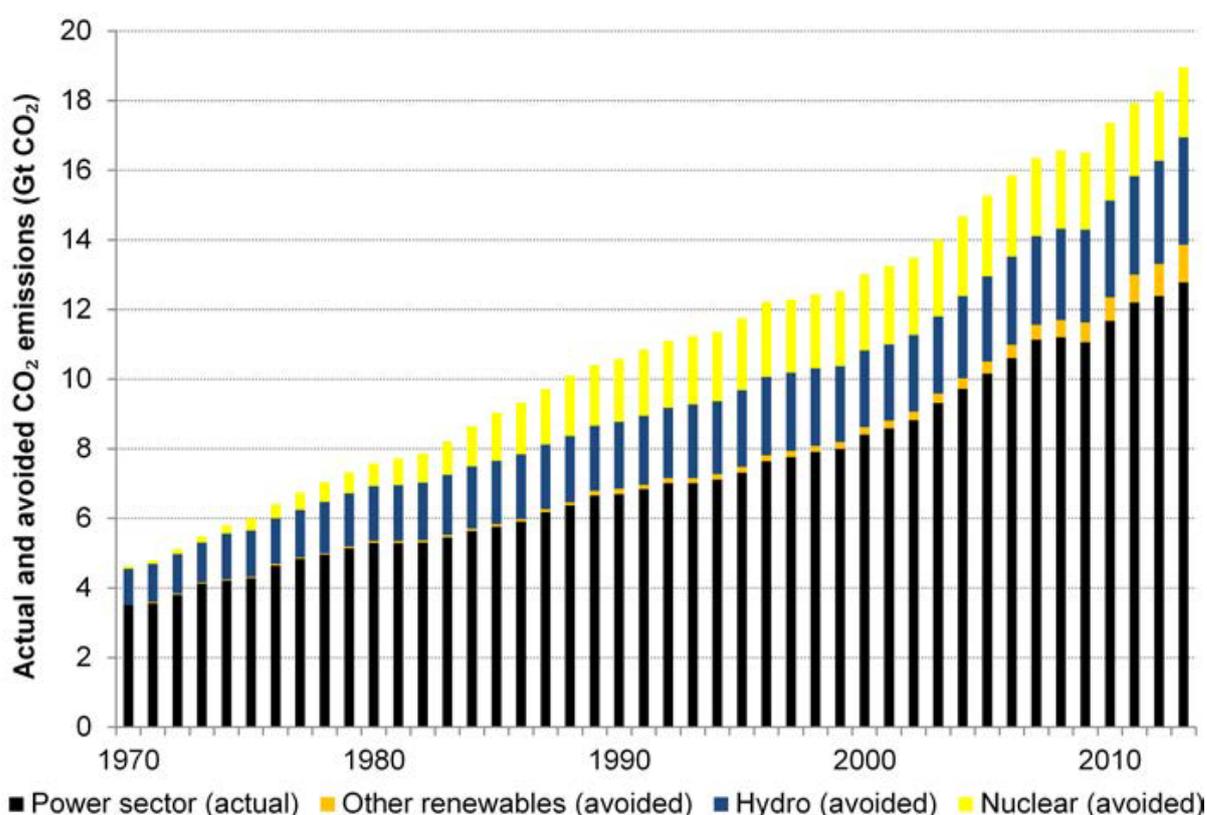


Gráfico 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> globales en el sector eléctrico mundial y emisiones evitadas por las tecnologías bajas en carbono. Fuente Organismo Internacional de Energía Atómica, 2015

En el *Gráfico 2.* se puede observar claramente la evolución de las emisiones globales de los sectores eléctricos a nivel mundial y las emisiones evitadas. La altura total de las columnas muestra cuáles habrían sido las emisiones totales sin las tres fuentes bajas en carbono.

De esa manera, las secciones de azul, amarillo fuerte y amarillo flojo representan las emisiones anuales evitadas por la energía nuclear, hidroeléctrica y otras renovables. Solo en el año 2012 la energía nuclear evitó 1,98 Gt de CO<sub>2</sub>, lo que corresponde con el 33,9% del total de las emisiones evitadas, la energía hidroeléctrica evitó 2,96 Gt, un 50,5% y las otras renovables 0,92 Gt, 15,6%.

## Protocolo de Kioto

Un objetivo importante de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, UNFCCC, es la estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que no implique una interferencia peligrosa con el sistema climático, y que permita un desarrollo sostenible. Como las actividades relacionadas con la energía representan el 80% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a escala mundial, la energía es clave en el cambio climático.

Este Protocolo, cuyo objetivo es reducir en un 5,2% las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo con relación a los niveles de 1990, fue firmado en diciembre de 1997 y en la actualidad, la suma de los 164 países que lo han aceptado, suponen más del 61% de las emisiones.<sup>2</sup>

Los actuales miembros de la Convención Marco para el Cambio Climático, han coincidido en la urgente necesidad de elevar el nivel de esfuerzo colectivo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de forma que se limite el crecimiento de la temperatura global a 2°C.

Para ello se ha constituido un grupo de trabajo encargado de elaborar un plan de reducción global de emisiones que entre en vigor en 2020, por lo que se ha llegado a un acuerdo para prorrogar la vigencia del Protocolo de Kioto hasta ese años 2020.

Canadá, Japón y Rusia han comunicado que no participarán en este nuevo compromiso y Estados Unidos no ha ratificado el Protocolo, con lo que el nuevo esfuerzo es en gran medida europeo.

---

<sup>2</sup> Según datos de la UNFCCC

## Energía Nuclear a nivel mundial

Los gobiernos cada vez más apuestan por el mantenimiento de las centrales nucleares en sus países, así como la construcción de nuevas plantas ya que la Energía Nuclear es una fuente energética que garantiza el abastecimiento eléctrico, frena las emisiones contaminantes, reduce la dependencia energética exterior y produce electricidad de forma constante con precios estables y predecibles.

Según el Organismo Internacional de Energía Atómico, OIEA o en sus siglas en inglés AIEA, los 448 reactores en operación producen el 11,5% de la electricidad total consumida en el mundo. Los datos suministrados por dicho organismo, nos dicen que desde agosto de 2016 se encuentran sesenta y una unidades en construcción en países como India, Rusia, Corea del Sur, China, Finlandia o Francia. Los programas nucleares de los diferentes países, así como todas las instalaciones nucleares, se encuentran bajo la supervisión y control del OIEA con sede en Viena.

Actualmente, Francia se sitúa como el país de la Unión Europea más partidario de esta fuente de energía con un 76,34% de su electricidad total procedente de la energía nuclear. Cuenta con cincuenta y ocho reactores nucleares en operación y con la construcción de otra nueva unidad de generación, EPR.

En Finlandia el 33,74% de la electricidad proviene de los cuatro reactores que tienen en operación y, además están construyendo una nueva unidad y ya hay estudios que plantean la necesidad de una sexta. Por otro lado, Reino Unido cuenta con quince reactores que producen el 18,87% de su electricidad total consumida y ha aprobado la construcción de nuevas centrales nucleares.

Procedemos a analizar la energía consumida en diferentes países de la Unión Europea empleando los precios Spot<sup>3</sup> diarios y el conjunto de tecnologías que se usan para satisfacer las necesidades energéticas.

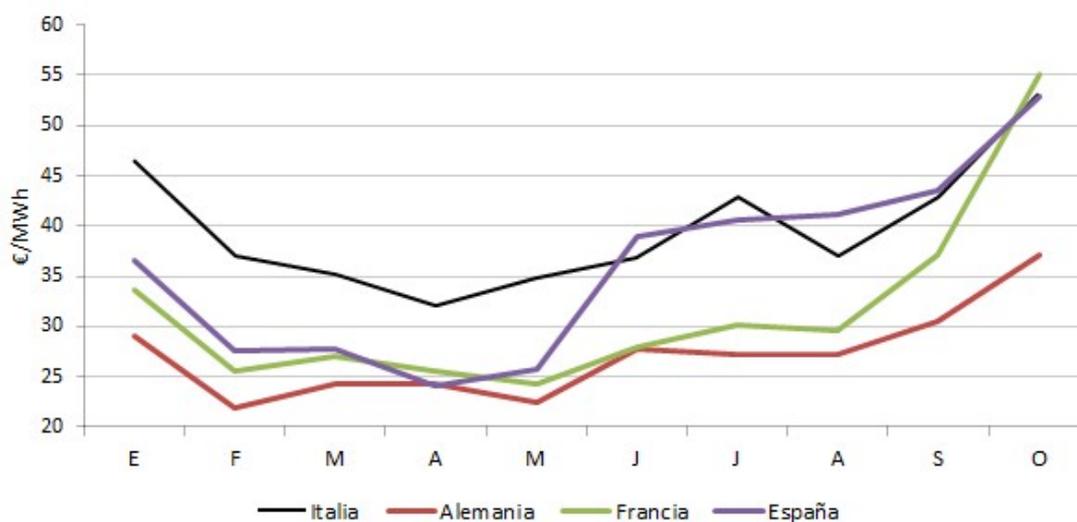


Gráfico 3. Media mensual del precio Spot de 2016. Fuente REE

De acuerdo con el *Gráfico 3*, Italia ha sido el país con mayor precio Spot medio a lo largo del año 2016, debido a que el 65% de su energía la obtiene de combustibles fósiles, tal y como se observa en el *Gráfico 4*. A raíz de la decisión de abandonar la Energía Nuclear, tras el año 1987, este país se ha visto conducido a tener los precios energéticos más elevados de Europa.

Opuesto a Italia, observamos que Francia, con un mix energético de 73% procedente de la industria nuclear y tan solo un 8% de combustibles fósiles, se sitúa en uno de los países de la Unión Europea con un precio de la energía media más bajo. Francia sería un claro ejemplo de cómo influyen las distintas fuentes de energía en el mix energético de un país.

<sup>3</sup> El precio spot o precio corriente de un producto, de un bono o de una divisa es el precio que es pactado para transacciones (compras o ventas) de manera inmediata.

Esta influencia es tan grande que a partir del mes de agosto, tras el parón nuclear de veintiuno de las cincuenta y ocho centrales francesas, se produce un incremento del precio de la energía en todos los países. Esto implica que estamos en un mercado interconectado y que se estima que los resultados del precio de Spot que se obtengan a finales de 2017 sean superiores a los del *Gráfico 3*. ya que dicha parada nuclear implica la falta de producción de energía en Francia y que, para abastecerse su demanda, deberán comprar la energía de otros países.

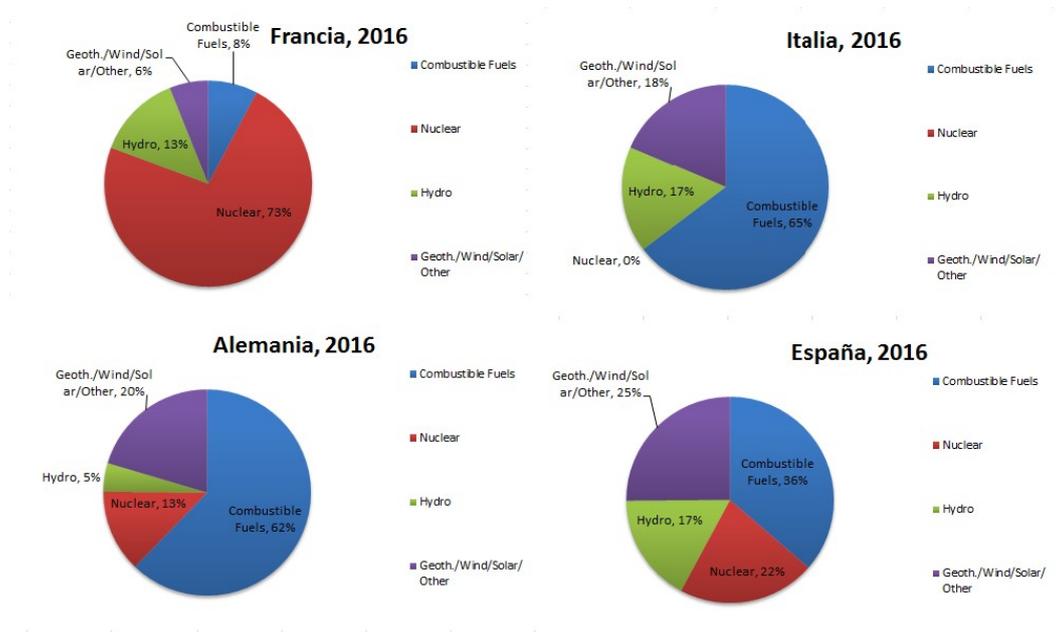


Gráfico 4. Mix Energético de 2016. Fuente IEA

Finalmente, vemos que en el caso Alemán, el gobierno ha apostado por las energías renovables con la creación del ambicioso programa impulsado por Angela Merkel bajo el nombre “Energiewende”, Revolución Energética, desde el año 2010.

A pesar de que las energías renovables en Alemania solo representan un 25% del total de la producción eléctrica del país, el plan prevé que en 2035 la energía de origen renovable represente el 60% del total.

Si hasta ahora nos hemos centrado en el análisis de los precios del 2016 en los distintos mercados mayoristas europeos de la electricidad, no debemos olvidar que este coste representa aproximadamente entre un 30% y un 50% del precio final de nuestra factura de la luz, en función del tipo de consumidor.

Por esta razón, procedemos a analizar la evolución de los precios eléctricos, comparando entre los distintos países de nuestro entorno y separando por tipo de consumidor ya que la demanda de un cliente doméstico se sitúa en un rango menor a 20 MWh en comparación con el consumo de entre 2.000 y 20.000 MWh de un cliente industrial. Comenzaremos por los últimos mostrando un análisis que incluye todos los impuestos y costes regulados que se soportan junto con el recibo de la electricidad.

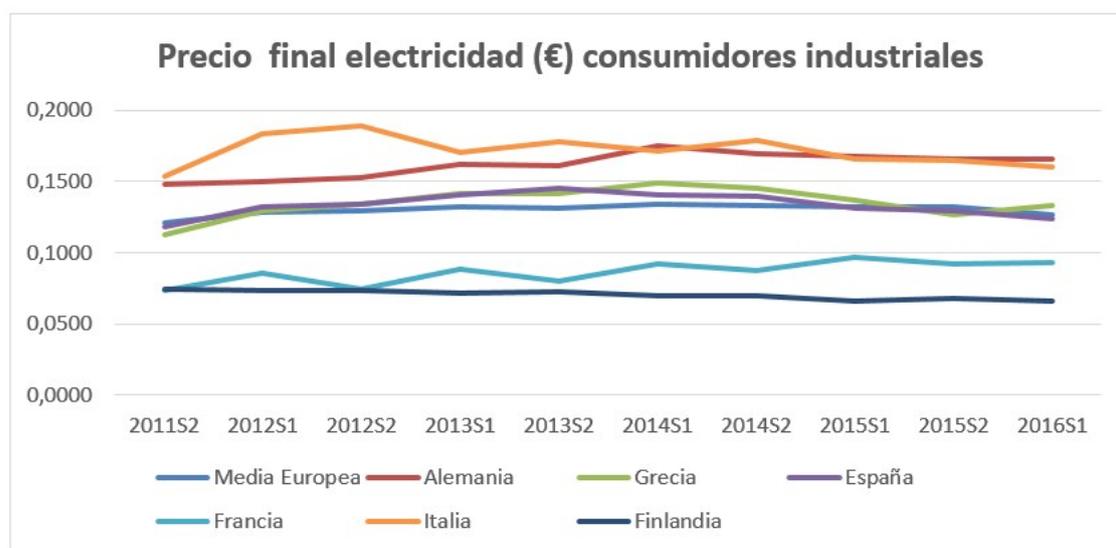


Gráfico 5. Precio de la energía por países en la industria. Fuente EUROSTAT

España se sitúa en la franja media, ligeramente por encima de la media europea, con un precio para el año 2016 de 0,1234 €/kWh. En la franja alta tenemos de nuevo a Italia, con un coste de 0,1598 €/kWh, y Francia estaría en el rango opuesto, con un precio de 0,0925 €/kWh. Finlandia se encuentra en el análisis debido a que se trata de un referente en lo que a precios bajos de la electricidad se refiere, con 0,0661 €/kWh.

A continuación, mostramos el gráfico con las mismas características pero para un cliente doméstico:

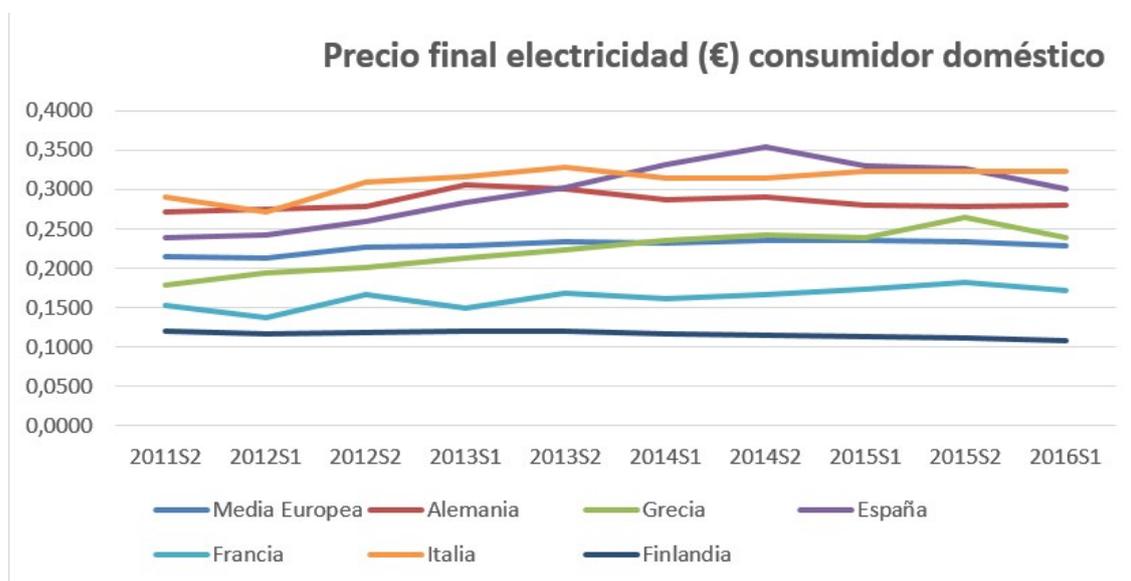


Gráfico 6. Precio de la energía por países para uso doméstico. Fuente EUROSTAT

La primera conclusión a la que se llega observando este último gráfico es que para cliente doméstico la energía es más cara que para la industria. Tras esto y comparando con las conclusiones anteriores, en España, el precio de la energía es de los más altos de Europa junto a Italia. Cada kWh consumido en los hogares de nuestro país supusieron 0,2998 € el año pasado, casi el triple que a un finlandés que pagó 0,1079 €/kWh.

## Mix Energético en España

La expresión mix energético se describe como la combinación de las diferentes fuentes de energía existentes que se utilizan para cubrir la demanda eléctrica de un país, es decir, el conjunto de tecnologías que se usan para satisfacer la demanda eléctrica.

La demanda final de energía eléctrica en 2016 fue de 262.105 GWh, con una variación de un -2.2% respecto a la producción neta de 2015<sup>4</sup>.

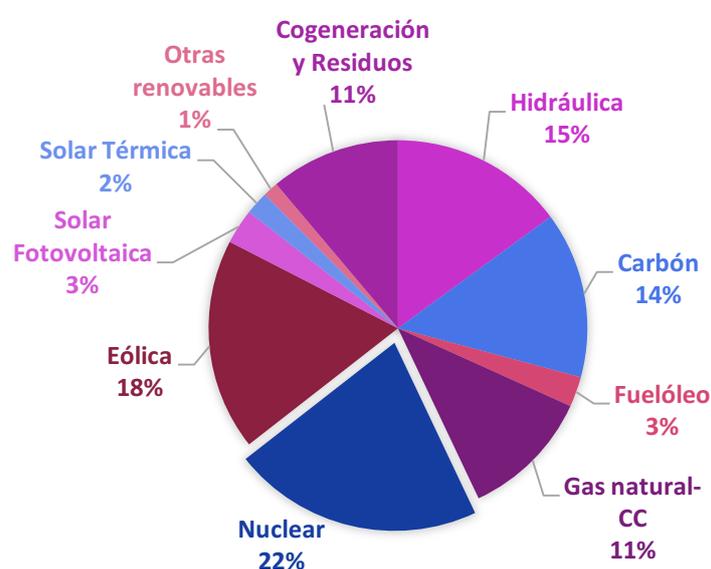


Gráfico 7. Producción Neta de Energía en España. 2016. Fuente REE

Históricamente, la pobreza de recursos energéticos ha sido uno de los elementos limitantes en el desarrollo económico de España. La escasez de éstos recursos ha condenado al país a una situación energética de déficit y dependencia exterior.

La dependencia energética externa de España es mayor que la media de la Unión Europea. El 71% de la energía primaria<sup>5</sup> consumida es importada del exterior.

<sup>4</sup> Datos de la página web de la Red Eléctrica de España, REE.

<sup>5</sup> Toda forma de energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada.

La energía eléctrica media generada ha evolucionado en los últimos años desde un 56% en centrales térmicas de combustibles fósiles a principios de este siglo a un aumento de las energías renovables, que en 2016 cubrieron el 39% de la demanda.

La producción de energía hidráulica varía con los años en función de las precipitaciones. La energía eólica cubría en 2005 un 7,7% de la demanda, en 2013 alcanzó su pico con un 21% y descendió hasta el 18% en 2016.

Por otro lado, las centrales nucleares españolas han visto mermadas su crecimiento en las últimas décadas, pasando de un 35% en 1996 a 22% en el último año.

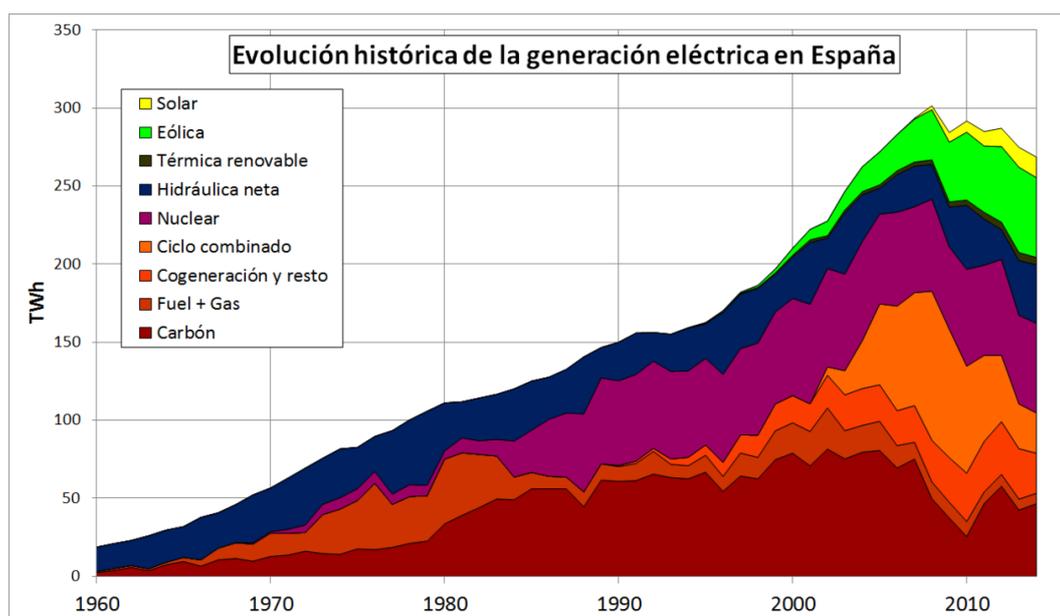


Gráfico 8. Evolución del Mix Energético en España hasta el año 2014. Fuente Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital

En 2016 España tuvo un consumo de energía final, incluyendo el consumo para usos no energéticos, de 87.739 Ktep<sup>6</sup> y el consumo de energía primaria fue de 123.868 Ktep<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> El tep se define como la tonelada equivalente de petróleo

<sup>7</sup> Datos del Instituto Nacional de Estadísticas para el Ministerio de Comercio Exterior y Turismo.

Esta última demanda se obtiene tras sumar el consumo de energía final, los consumos en los sectores energéticos y las pérdidas.

El aumento registrado en ese año, superior al de la energía final, ha tenido gran relevancia en el mix de la generación eléctrica. En concreto, la generación de carbón ha subido por segundo año consecutivo lo que ha aumentado a su vez la del petróleo y el gas natural en unos años donde la producción hidráulica y eólica han sido algo escasas.

## Energía Nuclear en España

El desarrollo nuclear español comenzó durante el régimen franquista en el año 1945, tras la Segunda Guerra Mundial momento en el que el gobierno reservó los yacimientos de uranio ante la presunción de dichos minerales y se les declaró de interés nacional. Tres años más tarde, se formó la Junta de Investigaciones Atómicas presidida por Otero de Navascués. Los primeros objetivos de dicha junta se orientaban al estudio de la explotación de los yacimientos de uranio y a la formación de personal en las técnicas relacionadas con la extracción, metalurgia y física del mineral.

En la década de 1950 se pudo proyectar la primera central en España y se situó en el país más avanzado en aplicar las tecnologías nucleares. El Decreto-ley de veintidós de octubre de 1951 transformó la Junta en la Junta de Energía Nuclear, JEN, comenzando entonces la investigación sistemática de minerales radiactivos en España.

Desde entonces la Junta de Energía Nuclear ha proyectado su labor como Centro de Investigación, como Órgano Asesor del Gobierno, como Instituto encargado de los problemas de seguridad y protección, contra el peligro de las radiaciones ionizantes y como impulsora del desarrollo industrial, relacionado con las aplicaciones de la energía nuclear. En 1960 se implanta la Ley de energía nuclear y se comienzan los preparativos de la primera central nuclear en el país. Su construcción se llevo a cabo a partir de 1965 hasta el año 1969 donde, la Central José Cabrera, más conocida como Zorita, comenzó su actividad.

Hasta la década de los ochenta, se produjo el momento de máxima actividad de la industria nuclear en España, proporcionando empleo a más de 20.000 personas, entre ellas más de 5.000 técnicos de alta cualificación. Tras la llegada al poder del PSOE en 1982, se suspendieron todos los programas ambiciosos de energía nuclear debido a la presión social.

Esta presión social surgió a raíz de algunos accidentes en diversas centrales de Estados Unidos y otros países, un sector de la comunidad científica y el incipiente movimiento ecologista comenzaron a defender que las actividades que implicaban la fisión atómica

suponían un riesgo para la población y el medio ambiente en general, por los riesgos de fugas radioactivas o la compleja gestión de los residuos.

En 1984 el gobierno revisa el Plan Eléctrico Nacional, limitando la construcción de nuevas centrales a 4 y paralizando otras 5, y en diciembre de 1994 se paraliza definitivamente con la Ley de Ordenación del Sistema Eléctrico, Ley 40/1994, de 30 de diciembre 4, se llevó a la suspensión del desarrollo de políticas y puesta en marcha de centrales energéticas de fisión atómica. A la parada temporal de los programas se le denominó *Moratoria nuclear*, impuesta por el presidente Felipe González por "dos razones: la seguridad y el agobio y sobrerresponsabilidad" que suponía la imposibilidad de eliminar los residuos radiactivos.

Debido a las inversiones realizadas por las eléctricas y la suspensión de sus actividades y proyecto, las pérdidas alcanzarían las 729.000 millones de las antiguas pesetas, unos 4.380 millones de euros. Para compensarlas, el Estado español aprobó en 1996, una disposición que permite a las compañías eléctricas cobrar un porcentaje para recuperar las inversiones que permitió el gobierno iniciar y posteriormente detuvo.

El plazo durante el que esa moratoria debe permitir recuperar las inversiones realizadas es de 25 años, hasta el año 2020. La normativa de la moratoria nuclear contemplaba la posibilidad de que las centrales paralizadas cedieran el derecho de compensación a terceros, creando el Fondo de Titulación de Activos resultantes de la Moratoria Nuclear el 4 de julio de 1996.

Debido a la disminución de los tipos de interés y al fuerte aumento de la demanda eléctrica, en 2006 se modifican los criterios de la moratoria, al amortizarse más rápidamente de lo previsto la deuda contraída. Esto provocó que el plazo de amortización disminuyera hasta el año 2015, terminando de pagarse el 26 de octubre de 2015. El importe total ascendió a 5.717 millones de euros. [8] [10] [11]

## Industria Nuclear en España

Las empresas del sector nuclear español tienen una participación muy destacada en la operación segura de las centrales nucleares de nuestro país. Se encuentran presentes en toda la cadena de valor, desde los estudios iniciales, el diseño conceptual, la construcción, los combustibles, el desarrollo, el suministro de equipos y componentes, hasta la gestión de los residuos y los procesos de desmantelamiento de las instalaciones.

La industria nuclear española participa en el desarrollo nuclear en cuarenta países en todo el mundo, empleando un 70% de la actividad a la exportación. El sector nuclear español genera empleo cualificado, de alto nivel tecnológico y alto valor añadido y sus empresas son el reflejo de la Marca España como sinónimo de calidad.



Imagen 1. Capacidad de la Industria Nuclear en España en 2016. Fuente Foro Nuclear

## Desarrollo sostenible

Las características de la energía nuclear hacen de ella una fuente de energía que puede contribuir de manera significativa a afrontar las necesidades de sostenibilidad. Como ya se ha descrito a lo largo de este proyecto, la operación de las instalaciones nucleares no supone la emisión de gases de efecto invernadero.

La operación del parque nuclear europeo consigue un ahorro anual de 700 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq.

España es uno de los países que más se aleja del compromiso de Kioto. Las emisiones de GEI están un 33% por encima del compromiso adquirido en el mismo y sin las nucleares esta cifra estaría por encima del 50% ya que las centrales nucleares evitan cada año la emisión de unos 50 millones de toneladas.

Esta cantidad representa la sexta parte del total asignado a nuestro país en la estrategia europea para cumplir con dicho tratado.

Desde el punto de vista del consumo de recursos, el uranio actualmente utilizado no tiene ningún otro uso. Se considera que a los ritmos actuales de consumo existen reservas para unos 250 años aunque se estima que el desarrollo tecnológico debería permitir un mejor aprovechamiento de éste combustible.

Su utilización en la Unión Europea supone una producción eléctrica equivalente a dos veces la producción de petróleo de Kuwait. Este país árabe consume 2 millones de barriles de petróleo cada día. [7]

La operación de las instalaciones nucleares emite sustancias radiactivas en un nivel tan bajo que su efecto sobre el medio ambiente es del orden  $10^{-3}$  del fondo natural.

Este impacto es medido de manera continua mediante un Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental, lo que nos permite afirmar que el impacto de la operación de las centrales nucleares sobre el medio ambiente y sobre las personas es muy bajo. Para poder observar este impacto tenemos el siguiente gráfico:

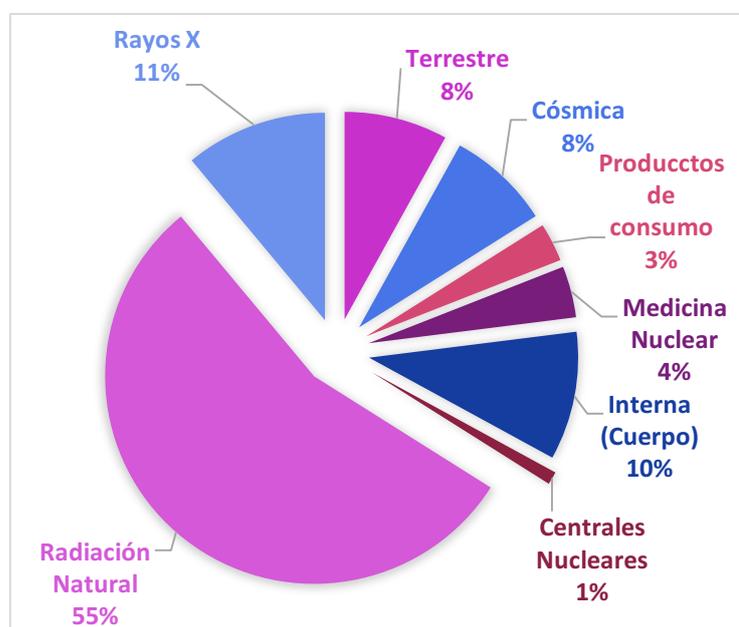


Gráfico 9. Procedencia de la radiación recibida por el cuerpo humano en un año. Fuente CONAMA

## Perspectiva de la Energía Nuclear

En los próximos años los grandes países industrializados van a necesitar mayor potencia eléctrica instalada para hacer frente a los retos industriales, y gran parte de la expansión futura de la electricidad tendrá lugar en países subdesarrollados, que anteriormente no han tenido acceso a la electricidad, o ha sido muy escasa. Países que están teniendo crecimientos muy rápidos en los últimos años.

Por estas razones, se están considerando varias alternativas, bien mediante el aumento de potencia y extensión de la operación de las centrales actuales, o mediante nuevas centrales, algunas ya en construcción u otras en diseño en algunos países.

Estas decisiones están adecuadamente enfocadas, ya que tanto la energía nuclear como la hidráulica que tienen un funcionamiento en base, son las únicas no productoras de CO<sub>2</sub>, permitiendo asegurar el abastecimiento ante la demanda, y con costes de la energía producida muy competitivos, y menos cambiantes que los de otras energías como petróleo y gas.

La sostenibilidad de la política energética es inseparable, en estos momentos, de la política del cambio climático. El esquema del escenario energético para el 2030 debería permitir que todas las tecnologías con baja emisión de CO<sub>2</sub> compitiesen en precio, sin que existan subsidios, y que permitan reducciones en el coste efectivo.

Para la energía nuclear se estima que los costes de capital de una central están entre el 59% y el 72% del coste de la electricidad generada, y el objetivo es reducir este coste, mediante diseños avanzados, modulares y con sistemas más simples.

De las centrales operando en Europa, el 40% alcanzaran los 40 años de operación en los próximos 5 a 10 años. Una forma de hacer más competitiva la energía nuclear consiste en hacer alargamientos de la vida de estas centrales, pasando de 40 a 60 años. Otra forma consiste en apostar por la construcción de nuevas centrales. [5]



---

*Capítulo 3.*

*Estudio técnico*

---

## Objeto

Procederemos a describir el funcionamiento de una Central Nuclear estándar, analizando los diferentes componentes de los que dispone así como los edificios y equipos que lo forman. Se irán mostrando diferentes diagramas para facilitar el entendimiento y la distribución de la misma.

Posteriormente, nos centraremos en las distintas centrales nucleares existentes en España. Para ello, se situarán en un mapa tanto las centrales en operación como aquellas en fase de desmantelamiento y otras instalaciones.

Se realizará una tabla para mostrar información que caracteriza a las diferentes Centrales Nucleares actualmente en operación en nuestro territorio. Esta información será primordial para definir los parámetros que debemos alcanzar en el supuesto diseño de la nueva central con valores, como por ejemplo, de potencia eléctrica neta para alcanzar los objetivos de disminución de emisiones de gases.

## Funcionamiento de una Central Nuclear

Una central nuclear es una instalación industrial construida para generar electricidad a partir de la energía nuclear y se engloban en la familia de las centrales termoeléctricas ya que utilizan el calor para generar la energía eléctrica. Actualmente el calor de las centrales nucleares proviene de la fisión de materiales como el uranio y el plutonio.

El funcionamiento de una central nuclear se basa en el aprovechamiento del calor para mover una turbina por la acción del vapor de agua, la cual está conectada a un generador eléctrico.

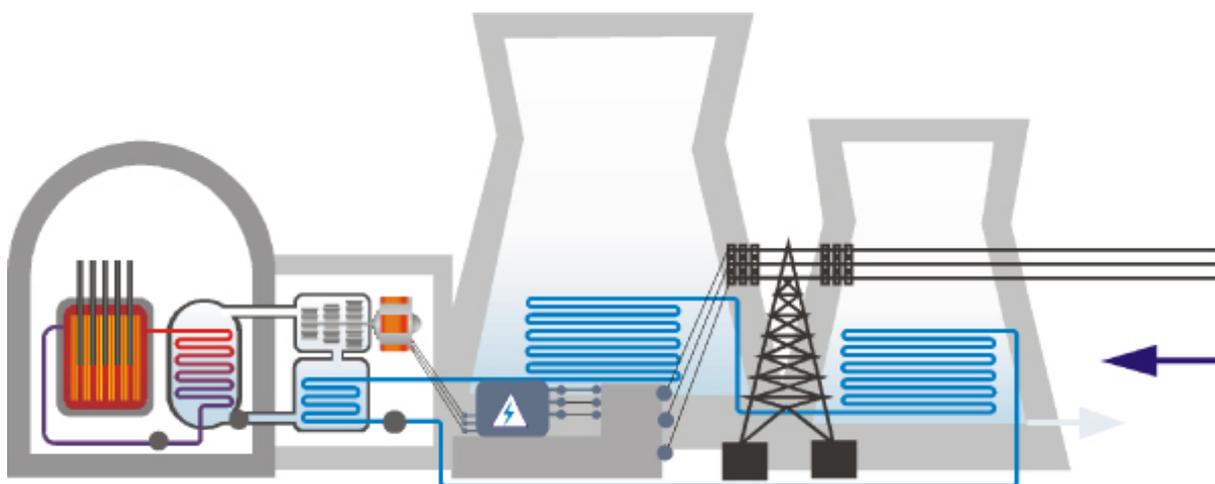


Imagen II. Esquema de una central nuclear

De manera resumida, tras la fisión del uranio realizada en el reactor se produce una enorme liberación de energía en forma de calor. Esta calor se emplea para evaporar agua y se trasporta hasta un conjunto formado por una turbina y un generador. Por la acción de este vapor, las aspas de la turbinan mueven el generador que transforma la energía mecánica en electricidad. Los residuos generados por la fisión del uranio son almacenados dentro de la propia central, en unas piscinas de hormigón especiales para materiales radioactivos.

## Diagrama de bloque

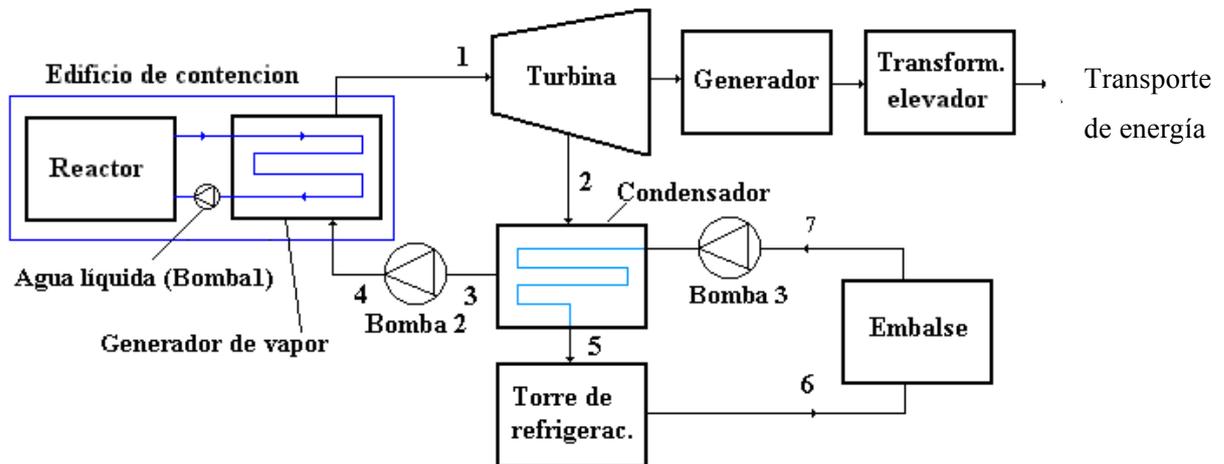


Imagen III. Diagrama de bloques de una Central Nuclear

Todas las Centrales Nucleares cuentan con sistemas de refrigeración por agua están formado por diferentes circuitos que serán independientes entre sí, con la finalidad de reducir las posibilidades de escape de los materiales radioactivos que por ellos circulan.

Observando la *Imagen III.* procedemos a identificar los circuitos y las partes que interactúan en ellos.

- El circuito principal se encuentra dentro del edificio de contención de hormigón formado por el reactor, una bomba y un generador de vapor.
- El circuito primario se encarga de refrigerar al circuito principal y en él nos encontramos las siguientes corrientes numeradas en el diagrama de flujo:
  1. Circulará vapor a alta presión y a alta temperatura hacia la turbina.
  2. De la turbina saldrá vapor a baja presión pero mantendrá la alta temperatura.
  3. Al pasar por el condensador se obtiene agua líquida a baja presión y baja temperatura.

4. La bomba de impulsión permite que circule agua líquida a alta presión, manteniéndose la temperatura baja.
- El siguiente circuito se encarga de licuar el vapor generado usando agua de un depósito exterior. Enumeramos las diferentes corrientes del diagrama:
    5. Del condensador se extrae agua caliente que asciende a la torre de refrigeración.
    6. De dicha torre se obtiene agua templada que se envía al embalse.
    7. Del embalse saldría agua fría que deberá ser impulsada por la bomba hasta el condensador.

## Diagrama de flujo

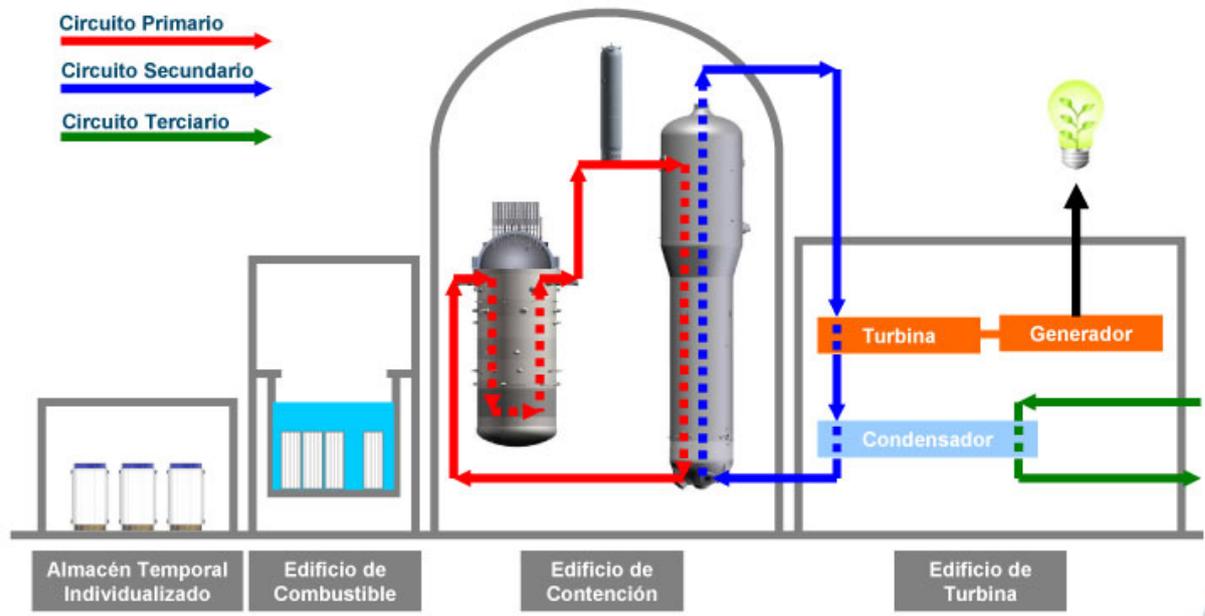


Imagen IV. Diagrama de flujo de los circuitos que intervienen en una Central Nuclear

El edificio de Contención cuenta con unas paredes de un espesor de 60 cm, tiene forma cilíndrica y está rematado por una cúpula semiesférica. En él se encuentra el *circuito primario* que está formado por la vasija del reactor que contiene el núcleo y tres lazos. Cada uno incorpora un generador de vapor y una bomba principal.

El moderador<sup>8</sup> que circula por su interior, en este caso agua, toma el calor producido en el reactor por la fisión nuclear y lo transporta hasta el generador de vapor. En él, un segundo flujo de agua independiente al primero absorbe el calor a través de la convección producida por el contacto de las tuberías por las que circula el agua del circuito primario. Por fin, dicho fluido retorna a la vasija del reactor tras ser impulsado por las bombas principales.

<sup>8</sup> Ver Anexo 2. Los Reactores Nucleares

El funcionamiento del circuito primario cuenta con la presencia de una serie de sistemas auxiliares que aseguran el control de volumen, purificación y desgasificación del refrigerante.

La salida al exterior tanto de la radiación como de productos radiactivos es imposible por tres barreras físicas, asegurando cada una de ellas, que la hipotética rotura de una barrera sea soportada por la siguiente.

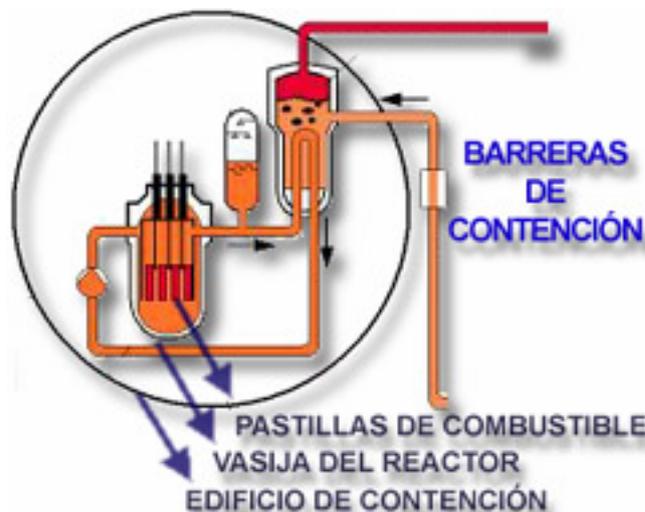


Imagen V. Barreras del Edificio del Reactor de una Central Nuclear

En el *circuito secundario* se produce la generación de electricidad. Como ya hemos citado, el vapor producido en los generadores circula hasta el condensador a través de la turbina que transforma la energía térmica en energía mecánica. La rotación de los álabes de la turbina acciona directamente el alternador de la central y produce energía eléctrica. El vapor de agua que sale de la turbina pasa a estado líquido en el condensador, retornando al generador de vapor para reiniciar el ciclo.

El *circuito terciario* forma el Sistema de Refrigeración o de Circulación y se basa en la refrigeración del condensador. Este sistema consta de dos torres de refrigeración de tiro natural, un canal de recogida de agua y las correspondientes bombas de impulsión para la refrigeración del condensador y elevación del agua a las torres.

## Componentes

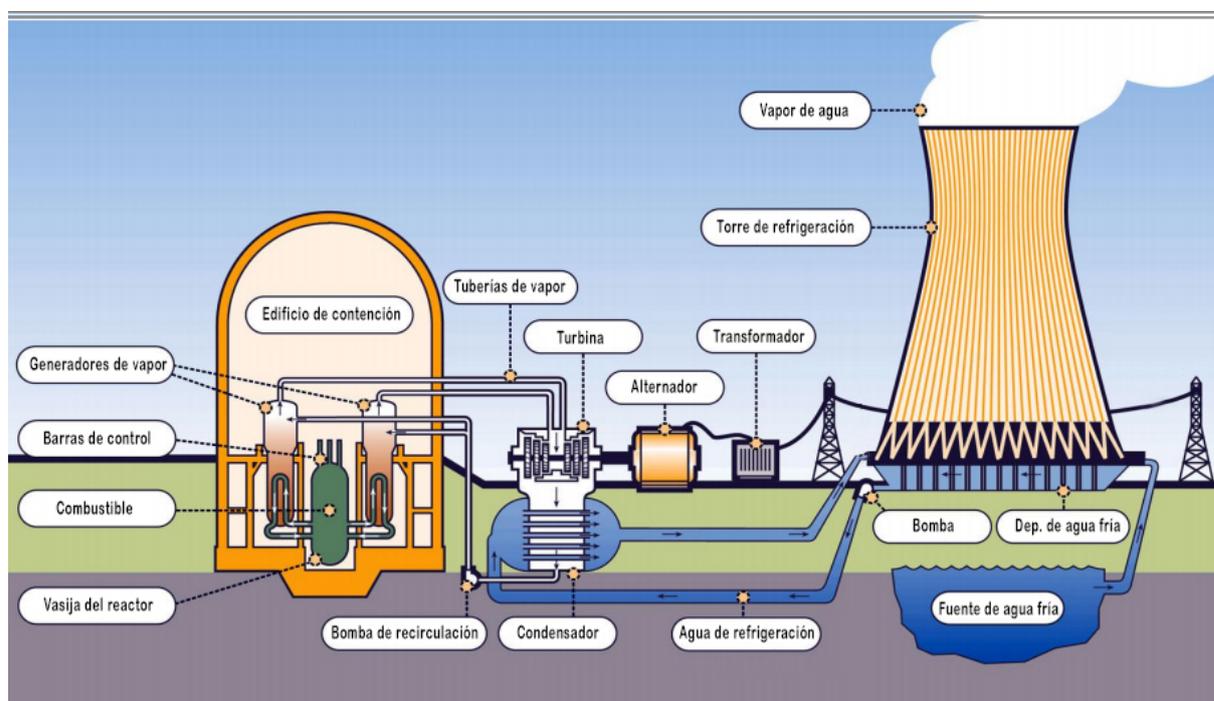


Imagen VI. Componentes de una Central Nuclear

Procedemos a mostrar los diferentes elementos que componen una Central Nuclear común que emplea un reactor de agua a presión, PWR. Para definirlos situaremos los componentes ubicados en los distintos edificios que componen cualquier Central Nuclear:

### Edificio de Contención

En este recinto se alojan los principales componentes del circuito primario, como son el reactor, los generadores de vapor, el presionador y las bombas del refrigerante. 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. Encontramos los siguientes elementos dentro del edificio más característico de una central nuclear:

## Reactor

Donde se produce la reacción de fisión. En el *Anexo II*, se profundiza en los componentes de los reactores nucleares y su funcionamiento.

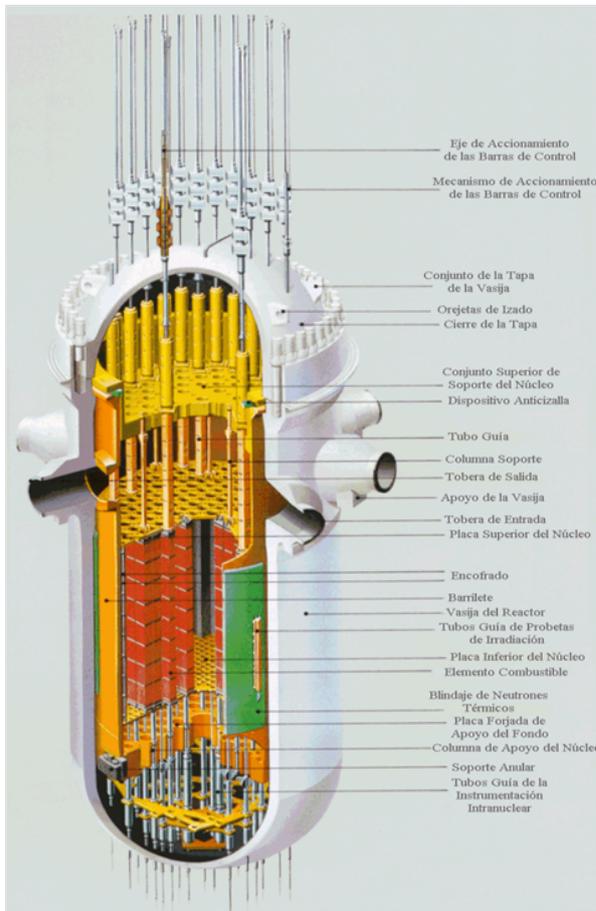


Imagen VII. Vasija de un reactor PWR

## Vasija del reactor

Se trata de una vasija de acero en la que se aloja el reactor nuclear. Podemos observar su forma y sus componentes en la *Imagen VII*. Su núcleo está formado por los elementos de combustible.

## Presionador

Componente del circuito de refrigeración primario, que tiene como objetivo mantener en equilibrio la fase líquida y la fase vapor en condiciones de saturación, con el fin de controlar la presión del mismo.

## Barras de control

Son los elementos de control del reactor y actúan como absorbentes de neutrones.

Son barras de indio-cadmio o carburo de boro, que permiten controlar en todo momento la población de neutrones y la reactividad del reactor, haciendo que sea crítico durante su funcionamiento y subcrítico durante las paradas.

## Generadores de vapor

Se tratan de intercambiadores de calor en los que el agua de refrigeración del circuito primario, que circula por el interior de los tubos con forma de U invertida, cede su energía al agua del circuito secundario, transformándose ésta en vapor de agua.



Imagen VIII. Generador de Vapor Ensa

### 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 solo 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.

Dado que, en este edificio se depositan materiales de alta radiactividad, las normas de precaución y seguridad son similares en el edificio de contención.

Muy a menudo, los dos edificios están comunicados entre sí para permitir el paso de materiales radiactivos de un edificio al otro sin abandonar la zona de seguridad.

### Combustible

Material en el que tienen lugar las reacciones de fisión. Normalmente se emplea óxido de uranio enriquecido. Se utiliza simultáneamente como fuente de energía y de neutrones para mantener la reacción en cadena.

Se presenta en estado sólido en forma de pastillas cilíndricas encapsuladas en varillas metálicas de unos cuatro metros de longitud.

### Edificio de turbinas

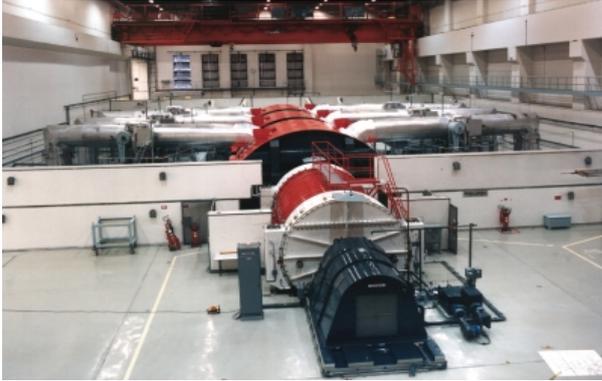


Imagen IX. Edificio de turbinas de una Central Nuclear

Contiene el grupo o grupos de turbina-alternador y la mayoría de sistemas auxiliares de éste.

En el caso de que los condensadores de vapor se alimenten a partir de un río próximo, la toma de agua de refrigeración se hace aguas arriba de la central y el vertido algunos metros más abajo. Si no existe disponible

cerca de la central ningún curso de agua abundante se pueden utilizar torres de refrigeración, donde se enfríe el agua del condensador antes de devolverla al río.



Imagen X. Turbina de una Central Nuclear

### Turbina

Instalación a la que llega el vapor de agua proveniente de los generadores de vapor, cuya energía se transforma, a través de los álabes, en energía mecánica de rotación. Existen varias secciones para la expansión del vapor. Su eje está solidariamente unido al eje del alternador.

### Alternador

Equipo que produce la electricidad al convertir la energía mecánica de rotación de la turbina en energía eléctrica de media tensión y alta intensidad.

### Condensador

Intercambiador de calor formado por un conjunto de tubos por los que circula el agua de refrigeración. El vapor de agua que entra en el condensador procedente de la turbina se licúa pasando a fase líquida. Esta conversión produce un vacío que mejora el rendimiento de la turbina.

## Edificios auxiliares y de salvaguardias

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.

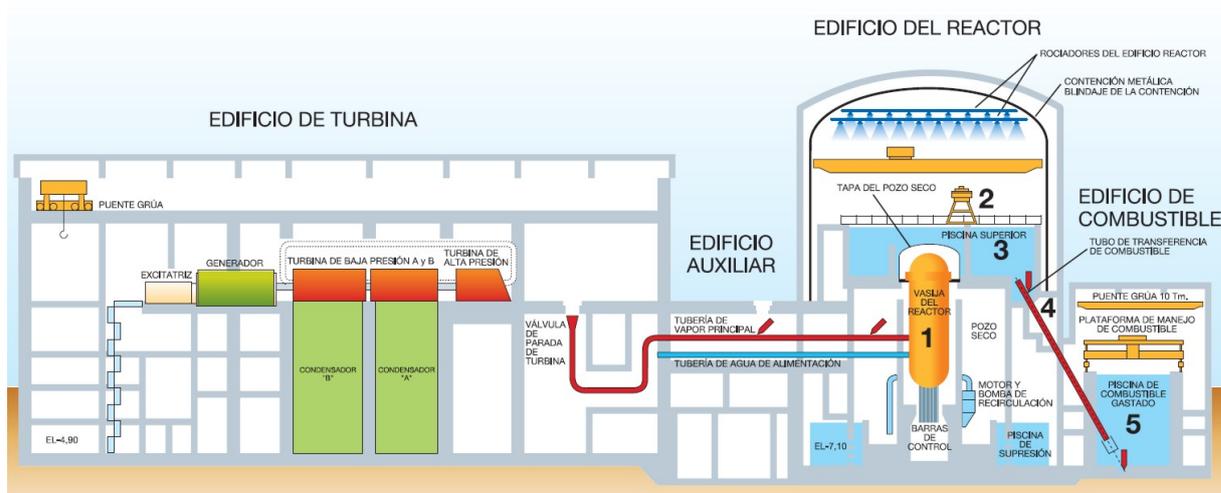


Imagen XI. Distribución de los edificios de una Central Nuclear

## 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.

## Transformador

Equipo que eleva la tensión de la electricidad producida en el alternador para minimizar las pérdidas en su transporte hasta los puntos de consumo.

## Otros Edificios

Además de los edificios ya mencionados, 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.

## Agua de refrigeración

Agua que se toma de un río, un embalse o el mar y que se utiliza para licuar el vapor de agua en el condensador. Puede ser devuelta directamente al origen, ciclo abierto, o reutilizarse a través de la torre de refrigeración, ciclo cerrado.

## Torre de refrigeración

Instalación que permite ceder a la atmósfera, que actúa como foco frío, una parte del calor residual producido en la generación de electricidad. Se utiliza para enfriar el agua que circula por el condensador, formando parte del circuito auxiliar de refrigeración de la central.

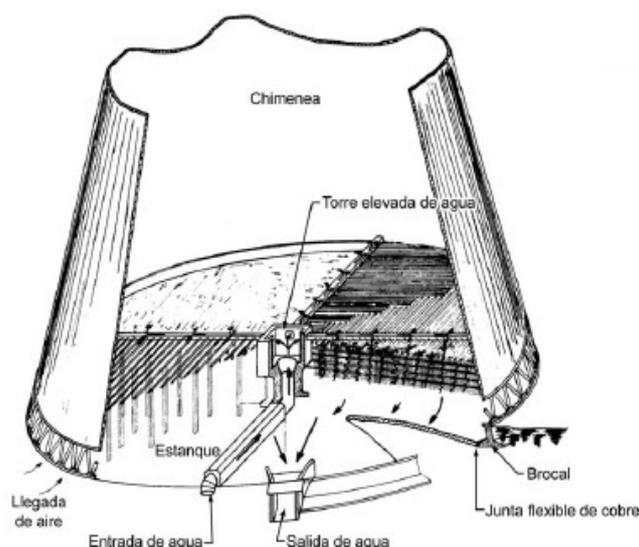


Imagen XII. Esquema torre de refrigeración de tiro natural

## Centrales Nucleares en España

El parque nuclear español está formado actualmente por ocho reactores situados en seis centrales nucleares situadas en la península. En la *Imagen XIII*. Se encuentran ubicadas las distintas centrales en operación, así como aquellas desmanteladas o en fase de desmantelación y paradas.

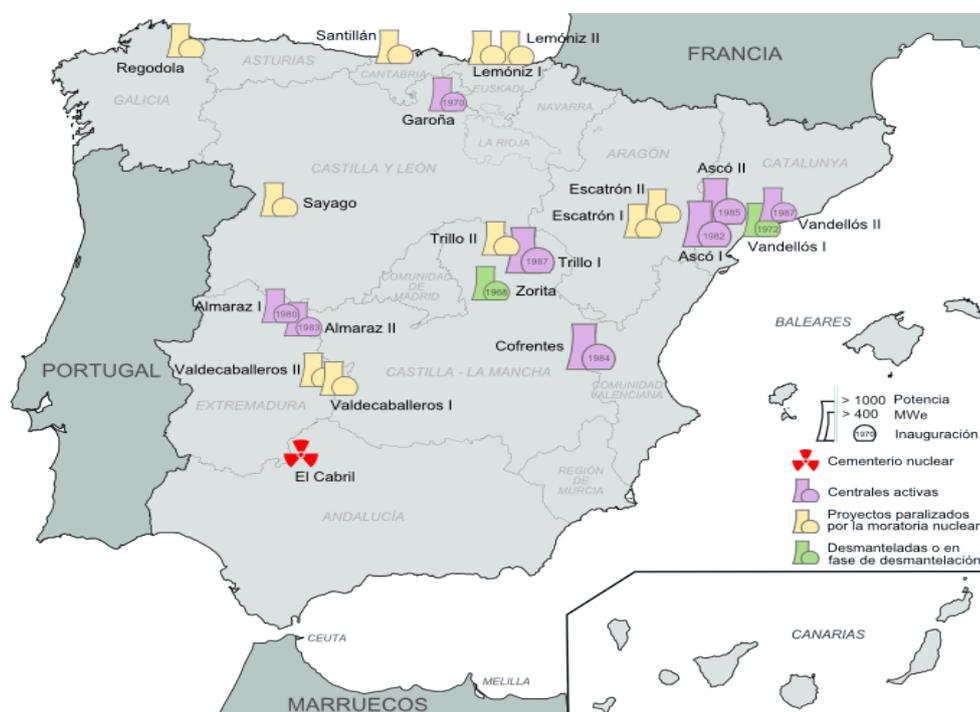


Imagen XIII. Mapa de ubicación de Centrales Nucleares en la Península Ibérica

Durante el año 2016, la energía eléctrica bruta producida en el parque nuclear español fue de 7864,77 MW, lo que representó el 21,39% del total de la producción bruta del país.

Estos reactores operativos son de vital importancia para la estabilidad del sistema eléctrico al estar siempre disponibles. El pasado año, la tecnología nuclear fue la fuente que más electricidad generó en el sistema eléctrico español.

En la siguiente tabla se muestran las centrales nucleares en operación con su localización, tipo de reactor, potencia instalada y empresa propietaria:

Central nuclear	Localización	Inicio de la operación	Tipo de reactor	Potencia eléctrica, MW	Empresa propietaria	
ALMARAZ I	Cáceres	1983	PWR	1049,40	Iberdrola Endesa Gas Natural Fenosa	53% 36% 11%
ALMARAZ II	Cáceres	1984	PWR	1044,50	Iberdrola Endesa Gas Natural Fenosa	53% 36% 11%
ASCÓ I	Tarragona	1984	PWR	1032,50	Endesa	100%
ASCÓ II	Tarragona	1986	PWR	1027,21	Endesa Iberdrola	85% 15%
COFRENTES	Valencia	1985	BWR	1092,02	Iberdrola	100%
SANTA MARÍA DE GAROÑA	Burgos	1971	BWR	466,00	Nuclenor = Iberdrola + Endesa	100% 50+50
TRILLO	Guadalajara	1988	PWR	1066,00	Iberdrola Gas Natural Fenosa EDP Nuclenor	48% 34,5% 15,5% 2%
VANDELLÓS II	Tarragona	1988	PWR	1087,14	Endesa Iberdrola	72% 28%

Tabla II. Datos de interés de las Centrales Nucleares en operación en España. Fuente MINETUR

## Indicadores de funcionamiento

Los indicadores de funcionamiento son parámetros que nos permiten medir y representar la excelencia en el funcionamiento y la seguridad operacional de una central nuclear.

Se tratan de indicadores estandarizados para todas las centrales nucleares que forman el parque nuclear mundial y son los siguientes:

- El *factor de Carga* es la relación entre la energía eléctrica producida en un período de tiempo y la que se hubiera podido producir en el mismo período funcionando a la potencia nominal.
- *Factor de Operación*, se trata de la relación entre el número de horas que la central ha estado acoplada a la red y el número total de horas del período considerado.
- El *factor de Disponibilidad* se define como el complemento a 100 de los factores de Indisponibilidad Programada y No Programada.
- El *factor de Indisponibilidad Programada* será la relación entre la energía que se ha dejado de producir por paradas o reducciones de potencia programadas atribuibles a la propia central y la energía que se habría generado en el mismo período funcionando a la potencia nominal.
- Se denomina *factor de Indisponibilidad No Programada* a la relación entre la energía que se ha dejado de producir por paradas o reducciones de potencia no programadas atribuibles a la propia central en un período de tiempo y la energía que se hubiera podido producir en el mismo período funcionando a la potencia nominal.

## Otros emplazamientos

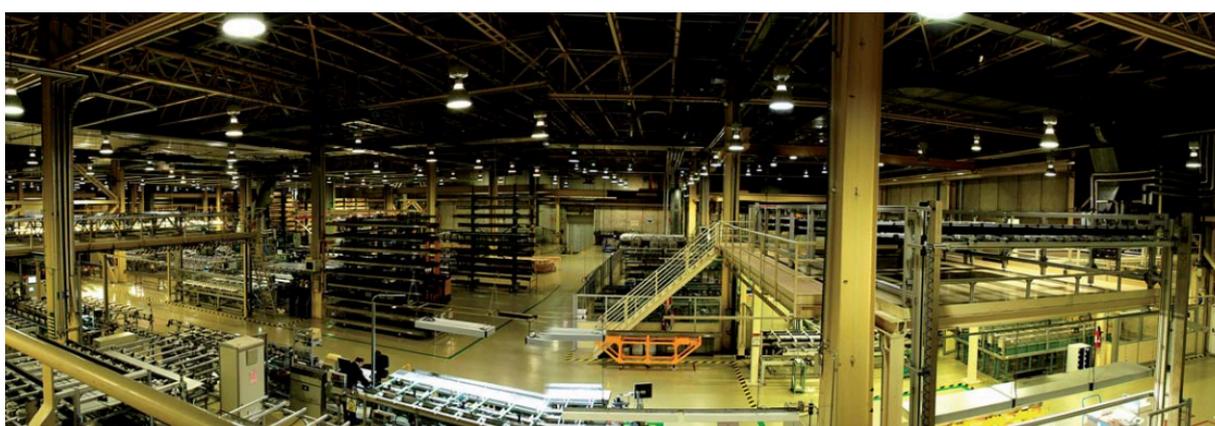
Junto a las Centrales Nucleares operativas y en desmantelamiento, España cuenta también con otras instalaciones nucleares de las que hablaremos brevemente a continuación:

### Fábrica de elementos combustibles

La fábrica de Enusa se encuentra en la localidad salmantina de Juzbado desde 1985 y se sitúa entre las más innovadoras fábricas de combustibles nucleares de Europa.

El centro posee un equipo especializado y altamente cualificado que abarca todo el ciclo de producción de combustible y cuentan con una planta de Ingeniería de Calidad que controla y certifica la calidad final del producto.

En el año 2016 ha suministrado a las centrales nucleares españolas Almaraz II, Ascó II, Trillo y Vandellós II un total de ciento treinta y una toneladas de uranio en distintos grados de enriquecimiento. El 65% del total de sus productos se exportaron a centrales de Francia, Bélgica y Alemania. En total se montaron seiscientos tres elementos combustibles para reactores de agua a presión, PWR y para reactores de agua en ebullición, BWR.



*Imagen XIV. Interior de la Fábrica de ENUSA en Juzbado*

### Centro de almacenamiento de El Cabril

Situada en la provincia de Córdoba, este centro de residuos nucleares cuenta con las tecnologías de almacenamiento más avanzadas, dándole máxima importancia a su integración en el entorno. La instalación dispone de dos plataformas para el almacenamiento de residuos radiactivos de baja y media actividad, y otra con estructuras específicas para los de muy baja actividad.

El sistema de almacenamiento se basa fundamentalmente en la interposición de barreras de ingeniería y barreras naturales, que aíslan de forma segura los materiales almacenados durante el tiempo necesario para que se conviertan en sustancias inocuas.

Desde que abrió sus puertas en el año 1986 hasta finales del 2016, la instalación ha recibido un total de 43.039,84 metros cúbicos de residuos<sup>9</sup>.

El Cabril está considerado por la Nuclear Regulatory Commission estadounidense como una de las mejores instalaciones de almacenamiento de residuos radiactivos del mundo, sirviendo de referencia para centros similares fuera de España.



*Imagen XV. Interior de El Cabril*

---

<sup>9</sup> Dato obtenido del Foro Nuclear

## Almacén Temporal Centralizado

El Consejo de Ministros designó, el 30 de diciembre de 2011, el municipio conquense de Villar de Cañas como sede del Almacén Temporal Centralizado y su Centro Tecnológico Asociado para almacenar los residuos radiactivos de alta actividad y el combustible gastado de las centrales nucleares españolas.

En la actualidad, estos residuos se almacenan y vigilan en las propias centrales nucleares. Esta instalación almacenará durante, al menos 60 años, todo el combustible gastado y los residuos de alta actividad de las centrales nucleares españolas.

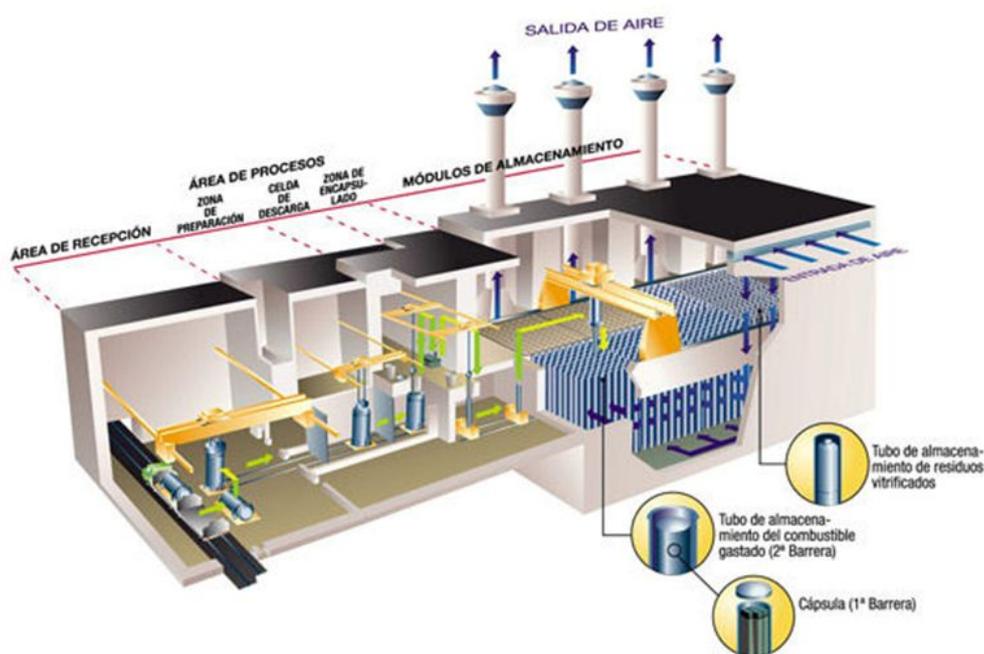


Imagen XVI. Diseño conceptual del ATC



---

*Capítulo 4.*  
*Estudio de*  
*Diseño*

---

## Objeto

Se analizarán las características de un proyecto de construcción de una nueva central nuclear en España que supondría el aumento del actual parque de generación eléctrica en 1000 MW.

Para definir las características del mismo y su adecuación al sistema español, se parte de la base de que actualmente hay en funcionamiento un total de ocho reactores nucleares que juntos suman 7864,77 MW<sup>10</sup> de potencia, que alimentan el 22%<sup>11</sup> de las necesidades eléctricas del país.

En este contexto, es donde se plantea el proyecto de la construcción de un nuevo reactor nuclear en España, permitiendo que la producción nuclear aumente en un 24,8% la demanda neta del país.

---

<sup>10</sup> Sumatorio de la potencia eléctrica de la *Tabla II*.

<sup>11</sup> Gráfica 7.

## Normativa aplicable

La mayor parte de la normativa nuclear tiene su base en los acuerdos internacionales que España ha suscrito y publicado en el Boletín Oficial del Estado y, por esta razón, tienen fuerza de Ley. Se encuentra regulada actualmente en nuestro Derecho por una ley de los años sesenta; la Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre Energía Nuclear, LEN.

El *Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas* desarrolla los principios contenidos en *la Ley de Energía Nuclear 25/1964* y establecía la debida regulación del régimen de autorizaciones administrativas, prueba, puesta en marcha y operación de las instalaciones, personal y documentación de las mismas, inspección y fabricación de equipos para la producción y manipulación de isótopos radiactivos y para la generación de radiaciones ionizantes.

El *Reglamento Nacional de Transportes de Mercancías Peligrosas por carretera*, se aprobó por Real Decreto 2115/98, *por ferrocarril*, por Real Decreto 2225/98, *por vía marítima*, por Real Decreto 145/89, y *por vía aérea*, en el BOE nº23, en 1991, y nº164, en 1997.

El *Reglamento de Cobertura de Riesgos Nucleares*, se aprobó por Decreto 2177/67 complementado por el Decreto 2864/68, sobre *Señalización de la Cobertura Exigible*, en materia de responsabilidad Civil por Riesgos Nucleares, estableciendo la cobertura de responsabilidad por daños nucleares ocasionados por las instalaciones o por el transporte de sustancias radiactivas.

El *Plan Básico de Emergencia Nuclear*, fue aprobado por Orden Ministerial y publicado en el BOE de 14 de abril de 1989, dando lugar a los Planes Provinciales de Emergencia Nuclear en aquellas zonas donde existan centrales nucleares.

## Localización

Los criterios de selección del emplazamiento se fundamentan en la evaluación de los sucesos externos que pudieran afectar a la central, tanto naturales como de origen humano, del impacto radiológico sobre la población y el medio ambiente de la zona, de los planes de emergencia y de la disposición de un adecuado sistema de refrigeración externa.

Dada la dificultad de encontrar emplazamientos en el territorio peninsular con características para ubicar una central nuclear, se ha considerado la reutilización de terrenos ya existentes. La central Nuclear de José Cabrera, Zorita, termina sus actividades de desmantelamiento en el próximo año 2019 por lo que será el candidato idóneo.

Las características que se han tenido en cuenta para, finalmente, elegir la antigua Central Nuclear de José Cabrera son:

- La potencia máxima a instalar depende del espacio físico. Para la potencia a estudio, 1000 MW, el terreno de la antigua central tendrá el espacio necesario.
- La disposición de agua en las proximidades que sea suficientemente abundantes como para garantizar la refrigeración del reactor, sin que ello suponga efectos negativos para la ecología acuática de la zona. Como es el caso del Río Tajo a escasos metros de las instalaciones.
- Al hacerse en el mismo terreno se cuenta con la suficiente capacidad de la red para evacuar la energía eléctrica.
- Evitar los costes derivados de la compra del terreno para explotación industrial.
- Ahorro significativo en aspectos relativos al licenciamiento previo.
- Evitar la presión social emergente en posibles nuevos emplazamientos para este tipo de obtención de energía.

La Central Nuclear está situada junto al río Tajo en el término municipal de Almonacid de Zorita, en la provincia de Guadalajara, y perteneció a la compañía Unión Eléctrica Madrileña, después Unión Fenosa. Su emplazamiento dista 3 km de Zorita de los Canes, 5 km de Almonacid de Zorita, 60 km de Guadalajara y 90 km de Madrid.

Procedemos a mostrar la ubicación de la antigua central, establecida como ubicación de nuestro proyecto a estudio:



*Imagen XVII. Situación geográfica de C.N. José Cabrera*



*Imagen XIX. Visión de la C.N. de José Cabrera antes de su desmantelamiento*



*Imagen XVIII. Vista de la localización de la C.N. de José Cabrera tras su desmantelamiento*

## Bases para el diseño

Los criterios de diseño de las estructuras, sistemas y componentes de una central nuclear están orientados al cumplimiento de las funciones fundamentales contra el escape de sustancias radiactivas. Esto se resume en el control de la potencia del reactor, la refrigeración del combustible y el confinamiento de las sustancias radiactivas dentro de las barreras físicas

Para tener un control de la potencia del reactor será imprescindible mantener el control en todo momento sobre el equilibrio de las reacciones nucleares producidas en el combustible, procediendo a extraer la energía que se libera. Los desequilibrios de potencia se denominan transitorios de reactividad, y deben ser compensados por el sistema de control que tenga el reactor.

La refrigeración del combustible se controlará manteniendo el equilibrio térmico mediante la extracción del calor generado por el combustible. Entre otras muchas causas de desequilibrio térmico, la más grave sería la pérdida de refrigerante, tras una rotura del circuito de refrigeración del reactor. Para ello, en los diseños se incorporan sistemas de refrigeración de emergencia, capaces de extraer la potencia residual tras un accidente con pérdida de refrigerante.

Se instalará un reactor de agua a presión del modelo AP-1000, Advanced Passive 1000 PWR, fabricado por la empresa Westinghouse con una potencia de 1100 MW. Se trata del primer reactor de Generación III+.

Se procederá a instalar grupos estandarizados ya que de esta manera se disminuirá el presupuesto y se facilitará futuros mantenimientos. Se puede citar como ventajas los beneficios que derivan de la estandarización de los suministros a las centrales nucleares, una vez que se han puesto en funcionamiento, y que redundan en mayor seguridad en el suministro de repuestos y en menores precios.

## Fases de construcción

A efectos puramente analíticos, el año de inicio del programa de construcción del presente proyecto se iniciará a finales de este año 2017, referencia para llevar a cabo las pertinentes estimaciones.

- La fase de autorizaciones y permisos será de tres años. Según los procesos de licenciamiento actuales marcado en otros países.
- La fase de construcción se prolongará cinco años.

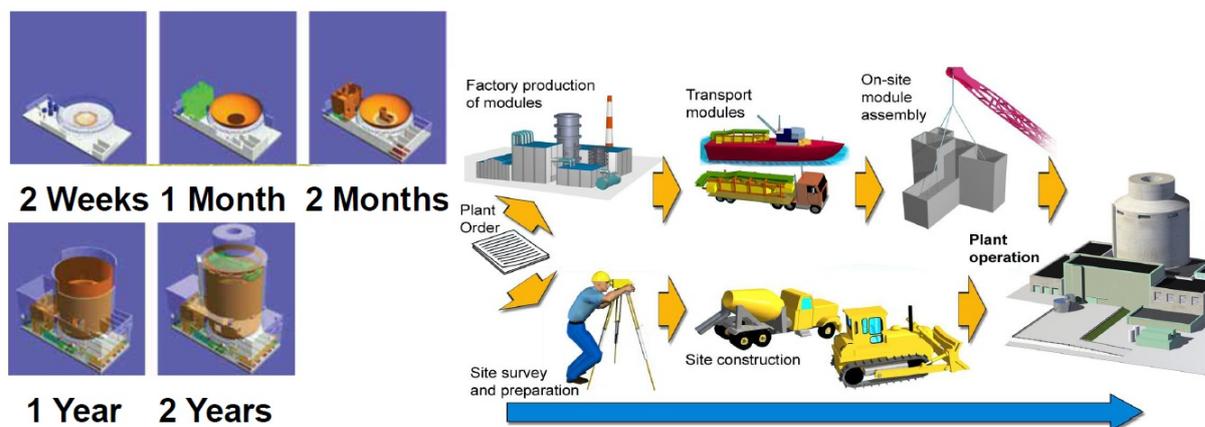


Imagen XX. Cronograma de montaje del Reactor AP 1000 aportado por Westinghouse

- En consecuencia, se ha considerado que el periodo total de puesta en funcionamiento será de un mínimo de ocho años.
- La Central Nuclear entraría en funcionamiento en 2025.

Esta fecha nos permitiría acercándonos a las metas que se han establecido en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero, cumpliendo el objetivo 20/20/20 y acercándonos al esquema del escenario energético establecido para el 2030.

## Niveles de seguridad

En el diseño de una Central Nuclear, los niveles de seguridad se basan en el principio de la defensa en profundidad. Éste establece niveles sucesivos de protección, disponiéndose en cada uno de ellos los mecanismos adecuados para corregir los potenciales fallos que pudieran producirse en un nivel anterior.

La incorporación de sistemas de seguridad capaces de hacer frente a incidentes y accidentes, evitando que se produzcan daños al núcleo y la liberación de material radiactivo al medio ambiente, así como mecanismos capaces de llevar el reactor a parada segura ante cualquier desviación con respecto a las condiciones normales de funcionamiento.

El principio de la defensa en profundidad exige tener siempre previstas las posibles eventualidades, por pequeña que sea su probabilidad, junto con las soluciones correspondientes a adoptar.

El Consejo de Seguridad Nuclear controlará que los niveles de riesgo existentes se encuentren dentro de los límites establecidos.

## Diseño del reactor

Lo que diferencia las características de una Central Nuclear y, sobretodo, la potencia eléctrica neta que puede producir, es el tipo de reactor que se instale. En el *Anexo 2* se enumeran los existentes.

La elección de un reactor debe basarse en las expectativas que se requieran de consumo, así como en el rendimiento esperado y otras características que se han ido desarrollando en el presente proyecto.

El reactor elegido es el AP 1000 de la empresa Westinghouse<sup>12</sup>, el primer reactor de Generación III+ en el que se han realizado varias mejoras importantes en las características de rendimiento del diseño basándose en la tecnología existente.

Cuenta con un diseño simple que utiliza componentes probados en un enfoque innovador y elegante de la seguridad. Las simplificaciones incorporadas proporcionan beneficios reales y cuantificados en la construcción, el funcionamiento y la seguridad.

Este reactor tiene un costo de operación muy atractivo por kWh en la gama de precios de electricidad de hoy<sup>13</sup>. La Westinghouse AP 1000 representa, por tanto, una planta de energía nuclear que es económica en la industria de energía eléctrica y, teniendo en cuenta que esta empresa suministra a aproximadamente la mitad de los reactores nucleares del mundo, será la opción escogida.

---

<sup>12</sup> **Westinghouse Electric** es una empresa manufacturera estadounidense fundada en 1886 y pionera en el transporte a larga distancia de electricidad y el transporte eléctrico de alta tensión.

<sup>13</sup> Según la propia empresa este precio oscila entre 3 y 3,5 ¢ / kWh

Comenzaremos mostrando una tabla con diferentes características que tiene el reactor de agua a presión que ha sido seleccionado y continuaremos con dos secciones del propio reactor obtenidos en la página web de la empresa:

Parámetro	AP1000
Salida eléctrica neta, MW	1117
Potencia del reactor, MWt	3400
Temperatura, °C	321
Número de conjuntos de combustible	157
Tipo de ensamblaje de combustible	157
Longitud activa del combustible, m	17x17
Varillas de control	53
Flujo del recipiente, 103 m <sup>3</sup> /h	68,1
Área del generador de vapor, m <sup>2</sup>	11600
Volumen del presurizador	59,5

Tabla III. Parámetros característicos del AP 1000 de Westinghouse

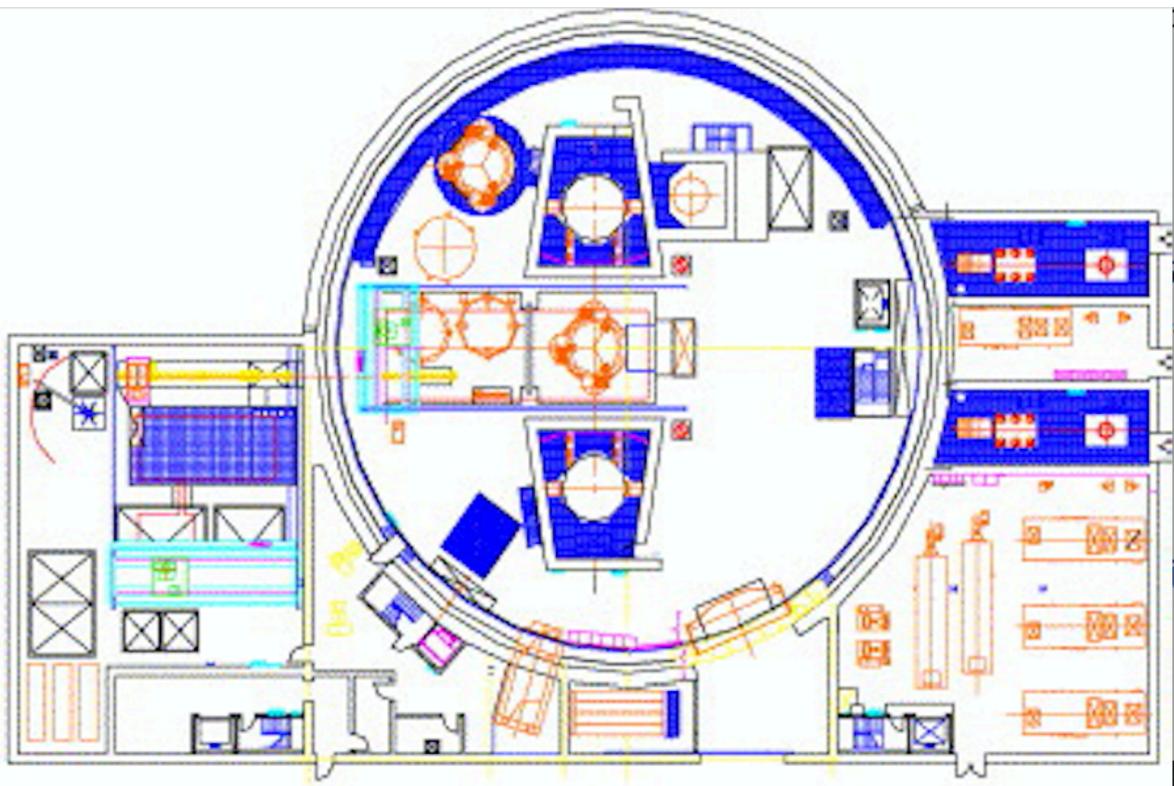


Imagen XXI. Planta Westinghouse AP 1000

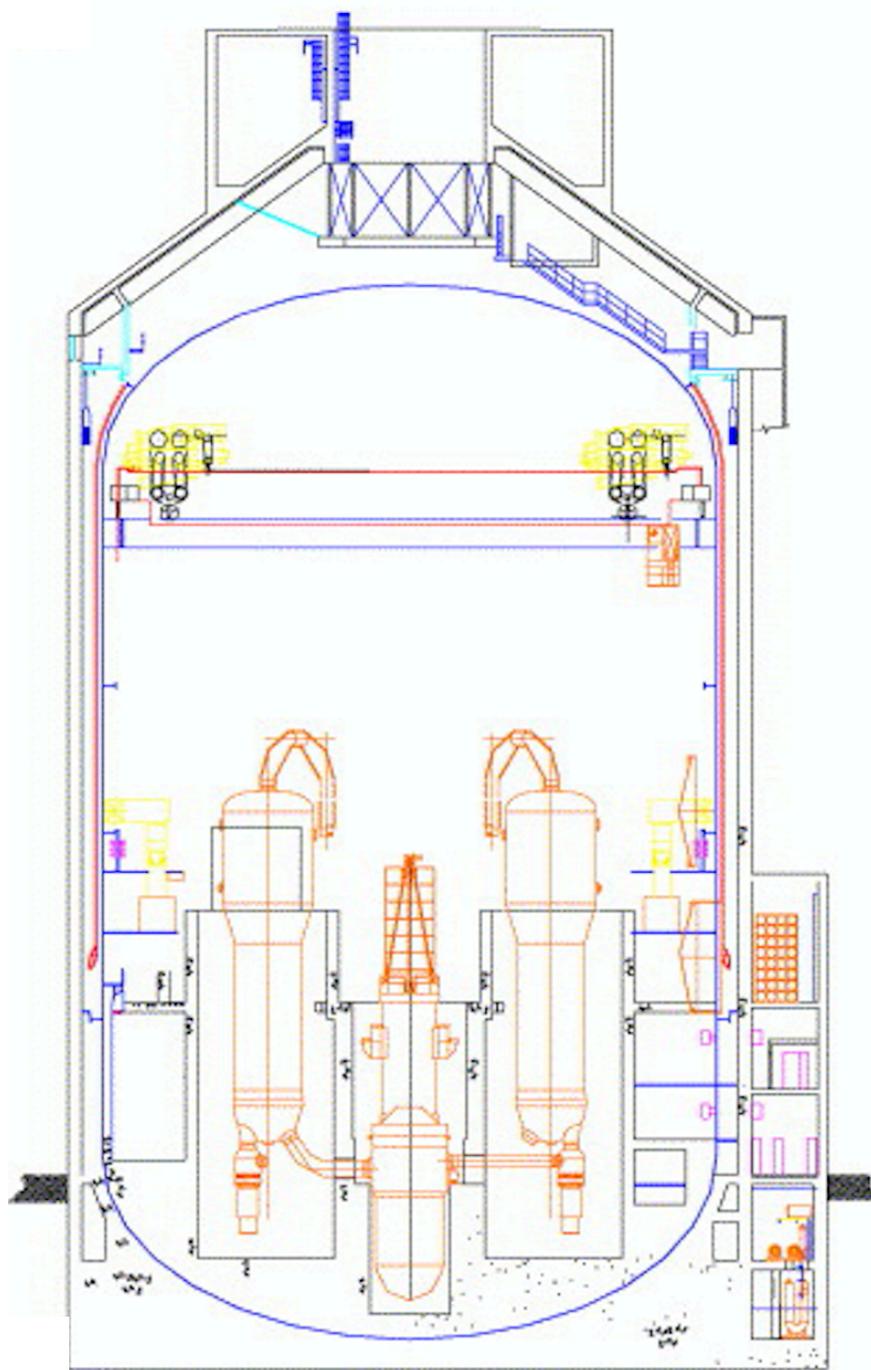


Imagen XXII. Sección del reactor Westinghouse AP 1000

## Planta de la Central

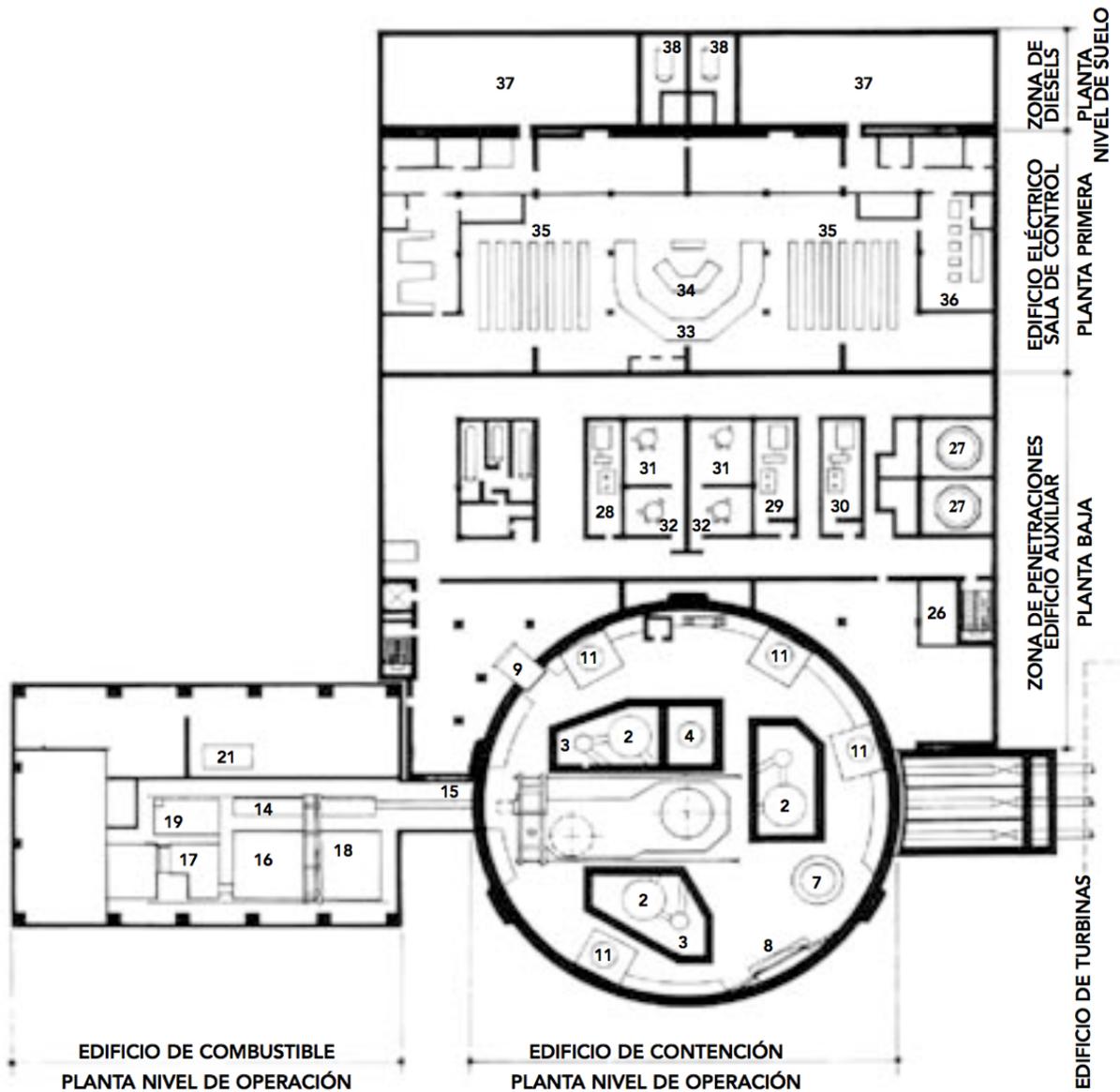


Imagen XXIII. Vista en planta de la central nuclear a realizar

1. Vasija del reactor	20. Zona de almacenaje de combustible nuevo
2. Generador de vapor	21. Equipos de ventilación de la piscina de combustible
3. Bomba de refrigeración del reactor	22. Embalaje para el transporte de combustible usado
4. Presionador	23. Grúa manipuladora de elementos de combustible
5. Acumulador	24. Tubería de vapor principal
6. Grúa manipuladora del combustible	25. Tubería principal de agua de alimentación
7. Zona de almacenaje de la tapa de la vasija	26. Zona de descontaminación de equipos
8. Compuerta de acceso de equipos	27. Tanques de ácido bórico
9. Acceso para personal	28. Bomba de carga A
10. Grúa polar	29. Bomba de carga
11. Unidades de refrigeración de la contención	30. Bomba de carga C
12. Bomba auxiliar de refrigeración (motor)	31. Bombas de evacuación del calor residual
13. Bomba auxiliar de refrigeración (turbina)	32. Bombas del sistema de rociado del recinto de contención
14. Canal de transferencia de combustible	33. Panel vertical de control
15. Tubo de transferencia de combustible	34. Pupitre de control
16. Piscina de combustible	35. Cabinas
17. Piscina recipientes de transporte	36. Sala del ordenador
18. Grúa de la piscina de combustible	37. Zona de turbogeneradores diésel
19. Zona de almacenaje de combustible nuevo	38. Depósitos de diésel.

Tabla IV. Elementos de la Imagen XXIII.

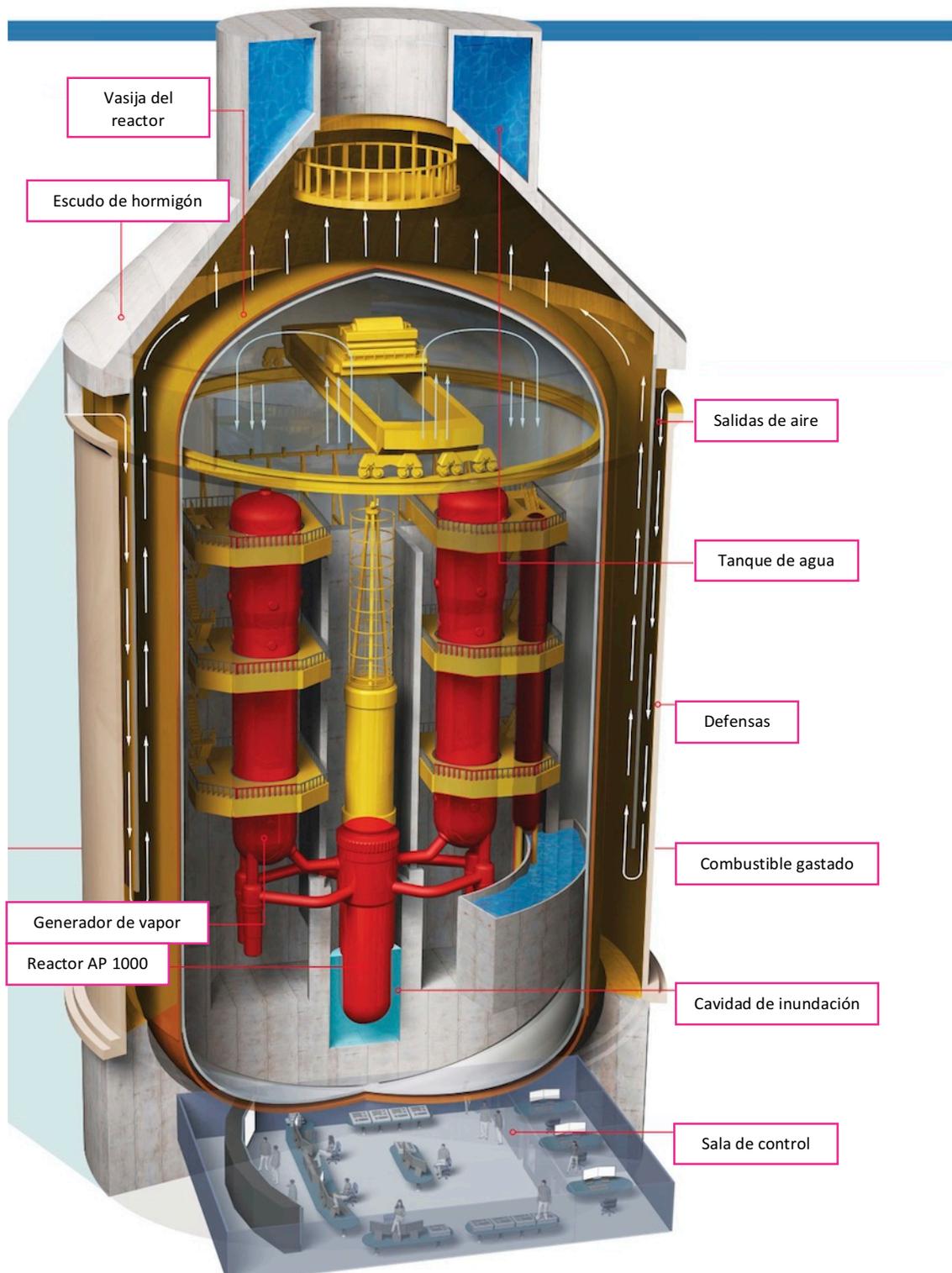


Imagen XXIV. Sección del edificio de contención con el AP 1000 de Westinghouse

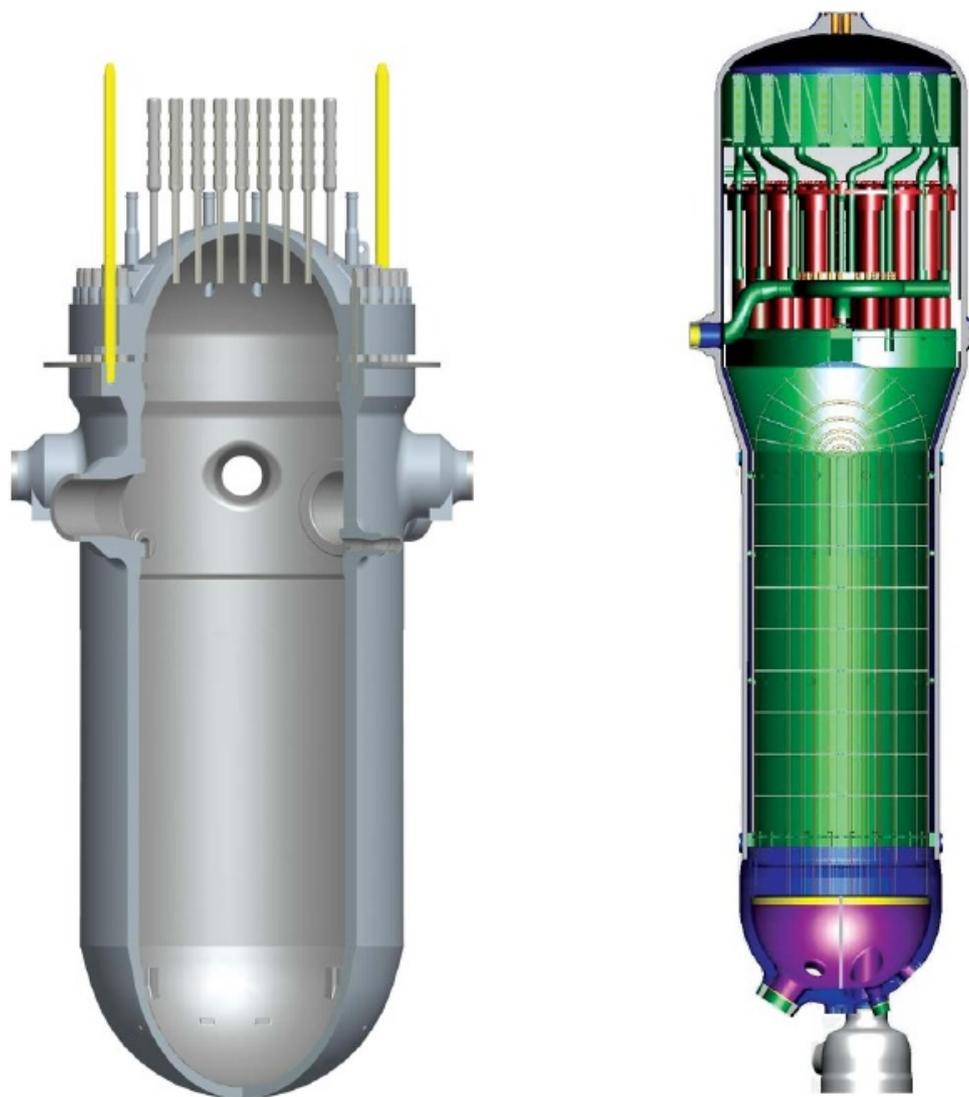


Imagen XXV. Vasija del reactor y generador de vapor para el AP 1000 de Westinghouse

## Costes de una Central Nuclear

El coste real de la energía eléctrica producida por una central en explotación, es la repercusión sobre cada kWh, de la amortización de la inversión de la central durante el proceso de producción eléctrica, del coste del combustible consumido y de los gastos de operación y mantenimiento necesarios.

La inversión realizada por una central eléctrica se amortiza a lo largo de su vida de operación. Además, suele crearse un fondo de financiación para llevar a cabo el desmantelamiento de la central una vez haya finalizado dicha vida de operación.

En España, el coste de Operación y Mantenimiento ha registrado un valor de 0,721 céntimos de euro/kWh neto y los costes medios de combustible nuclear alcanzaron los 0,343 céntimos de euro/kWh. [8]

Los factores determinantes en el costo de la electricidad generada por una central nuclear se resumen en la siguiente tabla: [9]

Porcentaje	Descripción
70%	Costos fijos por la construcción: intereses en créditos/ amortización del capital
20%	Costos fijos de operación/kWh: dependerá de la fiabilidad de la central nuclear y de los indicadores de funcionamiento
10%	Costos variables de funcionamiento: operación, mantenimiento, reparaciones, combustible...
No incluido	Desmantelamiento, gestión de residuos, riesgos, daños ambientales o humanos

Tabla V. Costos nucleares. Fuente Areva NP

Para poder encajar la viabilidad económica de la opción nuclear en España, hay que tener en cuenta la inversión de construcción de las instalaciones. El coste total estimado de construcción de una central nuclear tipo de 1000 MW es de aproximadamente 1.500 millones de euros. Estas cifras están en el rango de las que se manejan en el mundo. [8]



---

*Capítulo 5.*

# *Conclusiones*

---

## Conclusiones

El parque nuclear Español inició su operación en los años anteriores a los noventa, lo que implica que cada central nuclear lleva funcionando alrededor de treinta años. La tecnología ha avanzado a pasos agigantados desde entonces, por lo que las plantas han quedado totalmente obsoletas, agrupadas en la Generación I y II. Si se procediera a sustituirlas, se abaratarían los costes de mantenimiento mediante diseños avanzados, modulares y con sistemas más simples en concordancia tanto con la tecnología actual como con la Generación III+.

Es precisamente por esta razón que se ha contemplado en este proyecto la incorporación de un reactor de agua a presión, el AP 1000, que aumente la producción nuclear española en un 24,8%<sup>14</sup> respecto a la demanda energética total del país.

Tampoco podemos olvidar las extremadas medidas de seguridad que vienen de la mano con la instalación de estos nuevos reactores, dejando atrás la mala concepción generalizada de esta forma de energía debido a que si alguna actividad puede catalogarse como segura es, sin lugar a dudas, la producción de energía eléctrica en las centrales nucleares.

Nos encontramos en un momento crucial, donde la mayor preocupación existente es la disminución de los impactos climáticos que hemos ido desarrollando sobre nuestro medio ambiente. Por ello, debemos buscar soluciones y alternativas coherentes y factibles; sostenibles y limpias.

---

<sup>14</sup> Estimación realizada en el objeto del Capítulo cuatro a partir de la *Tabla II* y la *Gráfica 7*.

La energía nuclear, como se ha explicado a lo largo del presente proyecto, no solo permite garantizar el suministro energético a gran escala sino que también evita cada año un vertido adicional de 2000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en el mundo y 60 millones de toneladas en España. [8]

Por todo ello, las características de la energía nuclear en lo relativo a aspectos medioambientales, económicos y sociales hacen necesario considerarla como parte de la solución para afrontar este cambio climático. La sostenibilidad del sistema energético que permita un nivel de vida compatible con una sociedad totalmente dependiente de la misma, requerirá la contribución de esta fuente de energía basada en el conocimiento y la tecnología donde las reservas de la materia prima empleada se extienden para 250 años. [7]

Teniendo en cuenta que el desarrollo tecnológico está enfocado a permitir aprovechar éste combustible y a disminuir el volumen de los residuos radiactivos con técnicas como la separación y la transmutación, se contribuye a hacer de la energía nuclear una energía sostenible.

Podemos decir que, a cualquier escala, los beneficios de un combustible limpio, económico e inagotable pesan mucho más que los posibles y poco probables riesgos que pueda presentar.

Finalmente y en concordancia con lo expuesto en este trabajo, la posibilidad de la energía nuclear como como fuente de energía sostenible, limpia y segura es una afirmación viable pero la decisión final estará en manos del estamento que gobierne y de la influencia social, que más de una vez se encuentra desinformada.



---

## *Bibliografía*

---

## Bibliografía

- [1] Fusión Nuclear – ITER, 2013. Obtenido de:  
<https://www.youtube.com/watch?v=QNdEjkKwMXg>
- [2] Lauren C. Smith. El mundo en 2050.
- [3] “1000-MW Closed Cycle Water Reactor Study”, U.S. AEC Report WCAP-2385, 1963.
- [4] Energía Nuclear y Cambio Climático, Noviembre 2015. Foro Nuclear.
- [5] Resultados nucleares de 2015 y perspectivas para 2016. Foro de la Industria Nuclear Española.
- [6] Climate Change and Nuclear Power, 2015. Agencia Internacional de Energía Atómica.
- [7] Contribución de la energía nuclear al Desarrollo Sostenible. Congreso Nacional del Medio Ambiente, CONAMA para el Foro de la Industria Nuclear Española.
- [8] Manual de Tecnología Nuclear para periodistas, Universidad de Salamanca en asociación con el Foro Nuclear, 2004
- [9] Los costos de la Energía Nuclear. Fundación Heinrich Böll Stiftung, 2010
- [10] Documento BOE-A-1964-7544, Boletín Oficial del Estado. Gobierno de España
- [11] El País, sección de economía. Obtenido de:  
[http://economia.elpais.com/economia/2015/10/26/actualidad/1445877541\\_494176.html](http://economia.elpais.com/economia/2015/10/26/actualidad/1445877541_494176.html)

### Bibliografía consultada

Esteban, S. y Navarro, R. (2010). Química general: volumen I. Madrid: Editorial UNED

Fifth Assessment Report, IPCC (2013-2015)

[http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf)

Energy Technology Perspectives 2014, IEA

[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives\\_ES.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives_ES.pdf)

Fifth Assessment Report, IPCC (2013-2015)

[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf)

Energy Technology Perspectives 2014, IEA

[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives\\_ES.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives_ES.pdf)

Fifth Assessment Report, IPCC (2013-2015)

[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf)

Nuclear Technology and Economic Development in the Republic of Korea – AIEA (2006)

<https://www.iaea.org/sites/default/files/rok0809.pdf>

*Gobierno de España.* (s.f.). Obtenido de Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital  
<http://www.minetur.gob.es/energia/nuclear/Paginas/IndexEnergiaNuclear.aspx>

Historia Nuclear de España de Rafael Caro. Sociedad Nuclear Española. Madrid, 1995.

FORO NUCLEAR, Foro de la Industria Nuclear Española

<http://www.foronuclear.org>

Consejo de Seguridad Nuclear

<http://www.csn.es>

Sociedad Nuclear Europea

<http://www.euronuclear.org>

Agencia Internacional de Energía Atómica

<http://www.iaea.org/worldatom>

ENRESA: <http://www.enresa.es>

ENUSA: <http://www.enusa.es>

Central Nuclear de José Cabrera, Unión Fenosa Generación

<http://www.uef.es>

Origen y Gestión de Residuos Radiactivos. Colegio Oficial de Físicos-ENRESA, 2001

Física de Reactores. Caro, R. Instituto de Estudios Nucleares, 1974



---

# *Anexos*

---

---

*Anexo 1.*

*Fisión*

*Nuclear*

---

## Fisión Nuclear

La fisión nuclear es una reacción en la cual un núcleo pesado se convierte en inestable al ser bombardeado con neutrones, dando lugar a la descomposición en dos núcleos cuyos tamaños serán del mismo orden de magnitud, con un gran desprendimiento de energía y con la aparición de dos o tres neutrones según el núcleo que se fisione.

La energía total desprendida en la fisión nuclear inducida por neutrones procede de la energía cinética de los productos de fisión en aproximadamente un 80% y el resto debido, básicamente, a los neutrones.

La fisión de un núcleo de un átomo pesado, como puede ser el caso del Uranio, del Torio o del Plutonio, produce una elevada energía. Como referencia, si todos los núcleos contenidos en un gramo de Uranio 235 fisionaran, llegarían a producir una potencia constante de 1 MW durante un día. Otro ejemplo, el número de núcleos que fisionan en una fracción de segundo, liberan una energía de un millón de veces mayor a la obtenida al explotar un bloque de dinamita de la misma masa.

Las reacciones de fisión nuclear con neutrones no se producen de la misma manera en todos los núcleos, por esta razón distinguimos entre núcleos fisionables y fértiles. Los primeros, los núcleos fisionables, son aquellos que pueden sufrir reacciones de fisión con neutrones de cualquier energía y los segundos, los núcleos fértiles, pueden producir núcleos fisionables mediante reacciones de captura neutrónica pero solo con neutrones con una energía muy alta.



Imagen XXVI. Uranio, Torio y Plutonio

Para los núcleos que interesan para ser fisionados en los reactores (U, Th, Pu), los isótopos fértiles serán aquellos que tengan un número par de nucleones, mientras que los fisionables serán los que disponen de un número impar de ellos.

La capacidad de fisión de los núcleos se mide a través de la sección eficaz que depende de la energía de los neutrones que interaccionan con dichos núcleos. A medida que dicha energía disminuye, la sección eficaz aumenta y, por tanto, la capacidad de fisión. Por esta razón, la fisión será más probable con neutrones térmicos que con los rápidos. Por esta razón, la fisión será más probable con neutrones térmicos, lentos, que con los rápidos.

Los núcleos fisionables, reaccionan con cualquier neutrón, fisionarán en mayor cantidad cuando los neutrones sean térmicos, mientras que los núcleos fértiles, al tener umbrales de fisión altos, solo fisionarán con los rápidos.

### Fisión nuclear en cadena

Una reacción de fisión nuclear en cadena es un proceso de fisiones nucleares sucesivas en las que todos o parte de los neutrones liberados en cada fisión originan nuevas fisiones, y así sucesivamente.

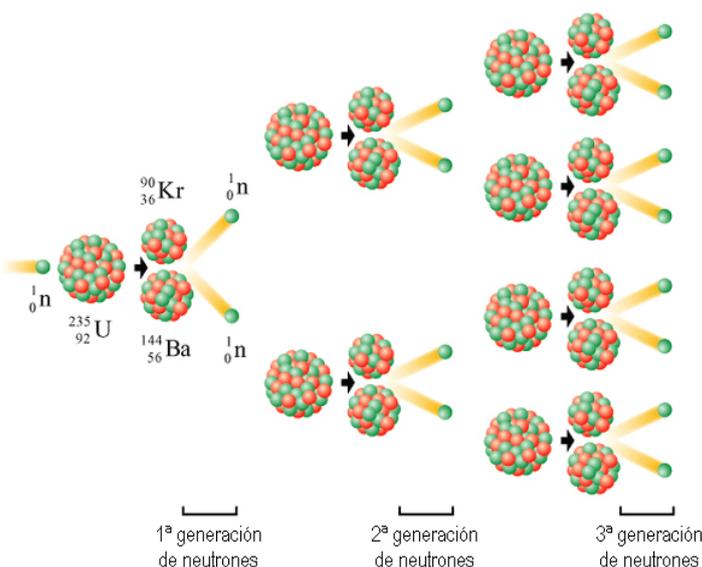


Imagen XXVII. Reacción en cadena de la fisión nuclear del U-235

Como ya hemos visto, en una reacción de fisión se liberan dos o tres neutrones con una energía igual o superior a la de los neutrones incidentes, esto permite que los nuevos neutrones producidos den lugar a nuevas fisiones consiguiendo que, una vez iniciada la reacción, no sea necesario continuar con el bombardeo de neutrones externos sino que la reacción se podría mantener por sí misma.

Si el número de neutrones del primer grupo es igual a la unidad se habrá obtenido una *reacción auto-sostenida* y con un número constante de fisiones por unidad de tiempo. Esto se debe a que cada neutrón que produjo inicialmente una fisión dará lugar a otro neutrón útil para continuar el proceso. Se dice entonces, que el sistema forma un *conjunto crítico*.

Si el número de neutrones útiles para producir nuevas fisiones fuera mayor que la unidad, el número de fisiones por unidad de tiempo sería creciente y tendríamos un *conjunto hipercrítico*.

Finalmente, si el número fuera menor que la unidad, la reacción decrecería con el tiempo y acabaría deteniéndose; el conjunto recibe el nombre de *subcrítico*.

### Interés práctico de la Fisión

Como ya hemos visto y debido a que la fisión nuclear puede dar lugar a una reacción nuclear en cadena permite que, una vez iniciada ésta, se mantenga por sí misma. Lo que significa que puede obtenerse una producción de energía en régimen estacionario.

La consecuencia práctica de ello, es que la fisión es una reacción nuclear que puede servir como fuente de energía para cubrir necesidades energéticas de la sociedad.

Esto es semejante a lo que ocurre con las reacciones químicas de combustión, que también sirven como fuentes de energía ya que una vez iniciada la combustión del carbón o del petróleo, la reacción se mantiene por sí misma sin necesidad de ninguna acción exterior.

El interés principal de la fisión es, por tanto, el empleo del mismo como fuente de energía debido, sobretodo, a su alto rendimiento energético. Un gramo de U-235 (siguiendo el ejemplo de la *Imagen III.*) fisionado totalmente, produciría una energía de 1 MWd<sup>15</sup>, lo mismo que la combustión de 2,1 tep.

---

<sup>15</sup> Megavatio día= 24.000 kilovatios-hora

---

*Anexo 2.*

*Los Reactores  
Nucleares*

---

## Conceptos básicos sobre Reactores Nucleares

La Fisión Nuclear del U-235 ha hecho posible la existencia de los reactores nucleares.

Definimos un reactor nuclear como una instalación capaz de iniciar, mantener y controlar una reacción nuclear de fisión en cadena controlada que libera energía en forma de calor. Estos dispositivos son utilizados como herramientas de investigación, como sistemas para producir isótopos radiactivos y también como fuentes de energía.

Debemos tener en cuenta que si todos los neutrones que se emiten produjeran nuevas fisiones, la reacción crecería de forma descontrolada produciendo una explosión violenta y energética, característica de las bombas atómicas. Por esta razón, será de vital importancia controlar la reacción. Para poder llevar a cabo la fisión en cadena de manera controlada, se dejará que cierta cantidad de neutrones se escapen del sistema y otros serán absorbidos por los núcleos que no se fisionan.

Aproximadamente, el 85% de la energía liberada en la reacción de fisión se extrae en forma de calor en un tiempo muy corto una vez transcurrido el proceso. El resto de la energía proviene del decaimiento radioactivo de los productos obtenidos de la fisión. Dicho decaimiento continuará aún cuando la reacción en cadena se ha detenido, por lo que el diseño

Los neutrones producidos en la fisión, al moverse en el núcleo del reactor, pueden producir nuevas fisiones o ser capturados en los materiales constituyentes. De esta manera, si en un cierto instante existen (n) neutrones en el reactor, al cabo de un cierto tiempo han desaparecido todos y dan lugar a una nueva generación de neutrones (n') que aparecen por fisiones.

Se denomina constante de multiplicación a la relación entre los neutrones de dos generaciones sucesivas.

$$K = \frac{n'}{n}$$

Esta relación puede tener diferentes soluciones, dando como resultados distintos tipos de reactores:

- Si la K es igual a la unidad ( $K=1$ ): Se producirán tantos neutrones como desaparecen. Se denominarla *reactor crítico*.
- Si la K toma valores menores a la unidad ( $K<1$ ): Al producirse menos neutrones de los que desaparecen, la reacción no se mantendrá ya que el número total de neutrones se anulará. Se denomina *reactor subcrítico*.
- Si la K toma valores mayores a la unidad ( $K>1$ ): La aparición de más neutrones de los que desaparecen, dará lugar a un estado divergente. Se denominará *reactor supercrítico*.

La reacción normal de un reactor se deberá realizar en condiciones de criticidad exceptuando la puesta en marcha y las paradas de emergencia, donde será subcrítico.

### Componentes del núcleo del reactor

La parte del reactor donde se producirá y mantendrá la reacción nuclear de fisión en cadena se lleva a cabo en el núcleo del mismo.

Cada componente del núcleo del reactor tiene un papel importante en la generación de calor.

Deberemos tener en cuenta que Existen dos formas de diseñar un reactor, bien sea retardando o moderando los neutrones veloces o bien incrementando la proporción de átomos fisibles. Una vez retardados los neutrones empleando un moderar, obtendremos los neutros lentos resultantes denominados térmicos. Por ello, los reactores que se basan en esta técnica se les conoce como Reactores Térmicos.

Los reactores que emplean neutrones veloces o rápidos se les denomina Reactores Rápidos.

A continuación, se definirán los diferentes partes de las que está formado el núcleo del reactor:

### Combustible Nuclear

Se empleará un material fisionable en cantidades tales que se alcance la masa crítica<sup>16</sup>. En general, un elemento de combustible está constituido por una disposición cuadrangular de las varillas del combustible.

Sujetando los tubos guía a las rejillas de soporte de combustible se consigue que los centros de las varillas de combustible y los tubos guía estén a la misma distancia. Todos los elementos de combustible tienen el mismo diseño mecánico. Algunos contienen haces de barras de control y otros contienen venenos consumibles o fuentes neutrónicas (para el control de la reacción del que se hablo anteriormente)

Para asegurar la calidad de los elementos de combustible, se realizan numerosas inspecciones y ensayos tanto de materias primas como del producto final.

### Barras de control

Las haces de barras de control proporcionan una manera fácil y eficaz de poder parar una reacción en cadena si esta se produce demasiado rápido con la finalidad de realizar una parada de emergencia.

Se fabrican de materiales absorbentes de neutrones como será el caso de aleaciones de plata o cadmio para facilitar la captación de los neutrones libres.

La reactividad del núcleo aumenta o disminuye subiendo o bajando las barras de control, es decir, modificando la presencia de material absorbente de neutrones contenido en ellas en el núcleo.

Se encuentran total o parcialmente extraídas del núcleo excepto cuando se deberá actuar por seguridad, momento en el que la barra se introducirá completamente en el núcleo llevando al reactor a parada segura en pocos segundos.

---

<sup>16</sup> Óptima disposición del combustible y del resto de materiales del núcleo para mantener la reacción en cadena.

## Moderador

Los neutrones producidos en la fisión tienen una elevada energía en forma de velocidad. Conviene disminuir su velocidad de modo que aumente la probabilidad de que fisionen otros átomos y no se detenga la reacción en cadena.

Esto se consigue mediante choques elásticos de los neutrones con los núcleos del moderador.

Entre los moderadores más utilizados están el agua ligera, el agua pesada y el grafito.

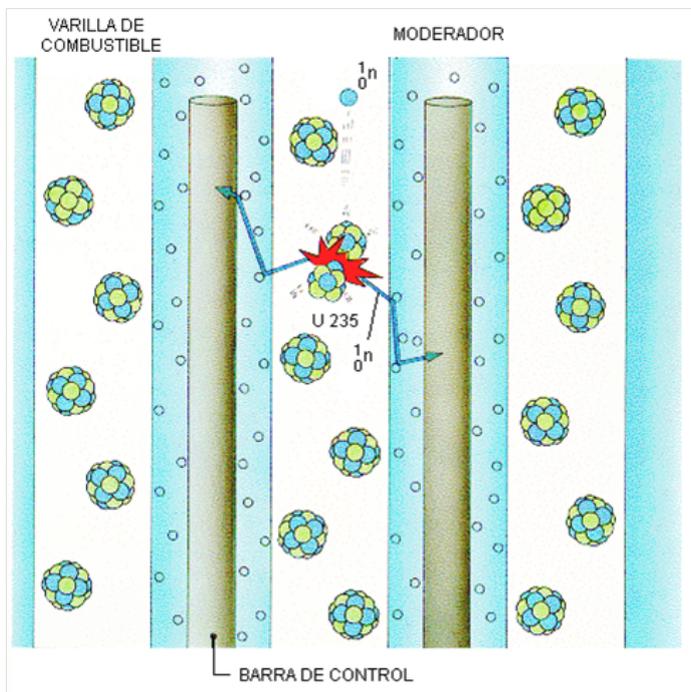


Imagen XXVIII. Detalles del núcleo de un Reactor Nuclear

## Refrigerante

Con la finalidad de emplear la energía desprendida por fisión en forma de calor, por el interior del reactor deberá pasar un refrigerante que absorba y transporte dicho calor.

Debe ser anticorrosivo, tener una gran capacidad calorífica y no debe absorber neutrones. Los refrigerantes más usuales son gases, como el anhídrido carbónico y el helio, y líquidos como el agua ligera y el agua pesada.

## Reflector

Si un neutrón colisiona con un núcleo, los neutrones salen despedidos en cualquier dirección, incluyendo fuera del área activa. Por esa razón, si rodeamos el material fisible con una sustancia no absorbente, que desvíe los neutrones de vuelta hacia el interior, aumentará el número de colisiones posibles.

La elección del material depende del tipo de reactor. Si tenemos un reactor térmico, el reflector puede ser el moderador, pero si tenemos un reactor rápido el material del reflector

debe tener una masa atómica grande para que los neutrones se reflejen en el núcleo con su velocidad original. Se suele emplear acero, berilio o grafito.

### Blindaje

Será necesario una protección que aisle al reactor para interceptar las emisiones, aislando a los trabajadores de la instalación de las radiaciones ocasionadas por los productos de fisión.

Los materiales más usados para construir este blindaje son el hormigón, el agua y el plomo.

### Tipos de reactores nucleares

Existen varios criterios para clasificar los diferentes tipos de reactores nucleares aunque la principal se realiza de acuerdo con su finalidad. De esta manera podemos dividirlos en reactores de potencia y reactores de investigación.

Los reactores de potencia producen energía en forma útil, convirtiendo el calor generado en el núcleo en alguna forma de trabajo mecánico. En esta categoría se encuentran la mayoría de reactores existentes actualmente que se emplean para la generación comercial de electricidad.

En cambio, los reactores de investigación aprovechan las radiaciones producidas como una herramienta para investigar. Adicionalmente, en muchos países se utilizan los reactores para impulsar submarinos y naves de superficie.

Procedemos a citar algunos de los reactores de potencia más significativos:

- El reactor de agua ligera, LWR.
- El reactor de agua presurizada, PWR.
- El reactor de agua pesada (D<sub>2</sub>O), HWR.
- El reactor de agua pesada presurizada, PHWR.
- Reactores de agua en ebullición, BWR
- El reactor de agua supercrítica, SCWR.
- Reactor canadiense deuterio-uranio, CANDU.

- Reactor de uranio natural, gas y grafito, GCR.
- Reactor avanzado de gas, AGR.
- Reactor refrigerado por gas a temperatura elevada, HTGCR.
- Reactor reproductor rápido, FBR.
- Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny, RBMK. Tipo de reactor casi en desuso. Este tipo de reactor estuvo involucrado en el accidente de Chernobyl en 1986.

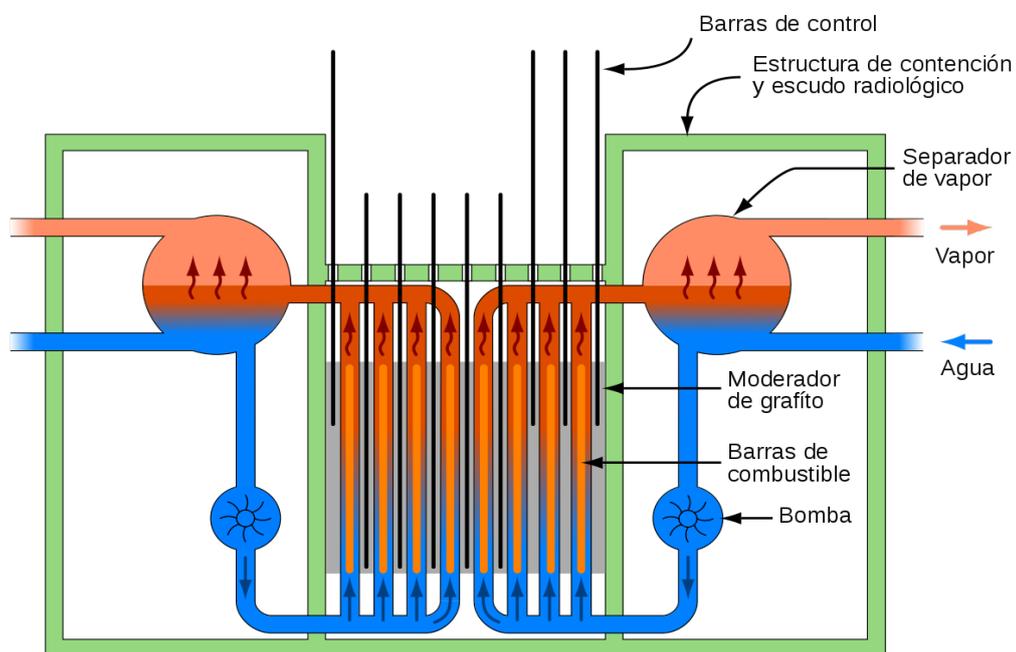


Imagen XXIX. Esquema Reactor RBMK

## Reactores del futuro

En la industria nuclear, el conocimiento científico y la tecnología avanzan continuamente, provocando que los requisitos y normas sobre seguridad evolucionen en base a los nuevos conocimientos y a la experiencia adquirida. Como curiosidad, podemos decir que el sector nuclear es uno de los sectores industriales más avanzados en tecnología, comparable a la industria aeronáutica y aeroespacial.

Si clasificamos a los reactores nucleares por el salto tecnológico que suponen, dan lugar a tres grandes grupos de los que hablaremos a continuación:

- *Centrales de Generación I y II*: Las primeras centrales nucleares, como Shippingport<sup>17</sup> y todas las centrales nucleares españolas estarían en este grupo.
- *Centrales de Generación III y III+*: Éstas son el resultado de desarrollos y mejoras evolutivas de las centrales de generación II. Reúnen la experiencia adquirida en aspectos de seguridad, fiabilidad, operabilidad y costes.
- *Centrales de Generación IV*: Engloba a una serie de proyectos, programas e iniciativas para el desarrollo y prueba de varios sistemas nucleares muy innovadores. Estos ofrecen ventajas muy marcadas con respecto a las centrales nucleares actuales pero se encuentran en fase de diseños en su mayoría.

La mayoría de los reactores en operación pertenecen a la Generación II, cuyos diseños incorporan la tecnología de los años anteriores a la década de los 70. A éstos se les realiza periódicamente modificaciones para la mejora de la seguridad, disminuyendo las paradas del reactor y obteniendo más energía del combustible, reduciendo las dosis radiológicas.

---

<sup>17</sup> Primera central de PWR de la historia

En los ochenta, se desarrollaron estructuras modulares para reducir el tiempo de construcción y el coste de la inversión, dando paso a la Generación III.

A partir de los noventa se incorporaron conceptos de seguridad pasiva con una nueva serie de reactores englobados en la Generación III+, disminuyendo el número de componentes y el coste de las centrales. La seguridad pasiva evita el empleo de sistemas auxiliares que se utilizan en caso de accidente mediante sistemas eléctricos, incorporando sistemas que actúan insertando agua por gravedad en caso de pérdida de refrigerante.

La vida útil de estos reactores se aumenta de cuarenta a sesenta años ya que tienen una mayor resistencia a los posibles accidentes y el combustible está diseñado para alcanzar altos quemados reduciendo los residuos radioactivos y obteniendo mayor energía final.

A principios del siglo XXI se inició la Generation IV International Forum, GIF, con la finalidad de desarrollar reactores disponibles a partir de 2025.

### Reactores de Generación III+

Estos reactores proporcionan una mejora evolutiva respecto a la Generación III. En estas mejoras se incluyen los sistemas de seguridad pasivos que actúan por sí mismos cuando la central se desvía de su modo normal de operación sin que nada tenga que activarlos ni empleando energía eléctrica externa.

Los reactores de esta generación se pueden subdividir en dos grupos:

- Reactores evolutivos de agua en ebullición, ABWR, BWR 90+, SWR-1000...
- Reactores avanzados de agua a presión, PWR System 80+, APWR, EPR...

### Reactores de Generación IV

Estos reactores constituyen un gran avance ya que, en lugar de ir en la misma dirección que la Generación III, mejorando lo existente, se pretende realizar nuevos diseños que entrarán en mercado en un periodo de tiempo de entre 10 y 25 años.

Para ello se han establecido nuevos principios que deben cumplirse:

- *Sostenibilidad*: Se centra en la reducción de residuos radiactivos, empleando combustible reciclado mejorando el empleo de recursos naturales. Los diseños deben promover la disponibilidad de sistemas a largo plazo y el aprovechamiento de combustible para la producción de energía en todo el mundo, minimizando el volumen y el periodo de gestión de los residuos radiactivos.
- *Economía*: Los diseños deben ofrecer más ventajas económicas que otras fuentes de energía durante el ciclo de vida útil y equiparar su nivel de riesgo financiero con el de otros proyectos energéticos.
- *Seguridad y fiabilidad*: Los diseños deben sobresalir por su seguridad y fiabilidad; reducir al mínimo la probabilidad de daños en el núcleo del reactor y su magnitud y eliminar la necesidad de adoptar medidas de emergencia fuera del emplazamiento.

Estos reactores emplean un ciclo cerrado de combustible en sus diseños, lo que obliga a tener un control sobre la dispersión del combustible para otros fines que difieran de la producción eléctrica.

Los principales diseños de reactores que se están estudiando son:

- Reactor rápido refrigerado por gas, GFR.
- Reactor de muy alta temperatura, VHTR.
- Reactor supercrítico refrigerado por agua, SCWR.
- Reactor rápido refrigerado por sodio, SFR.
- Reactor rápido refrigerado por aleación de plomo, LFR.
- Reactor de sales fundidas, MSR.

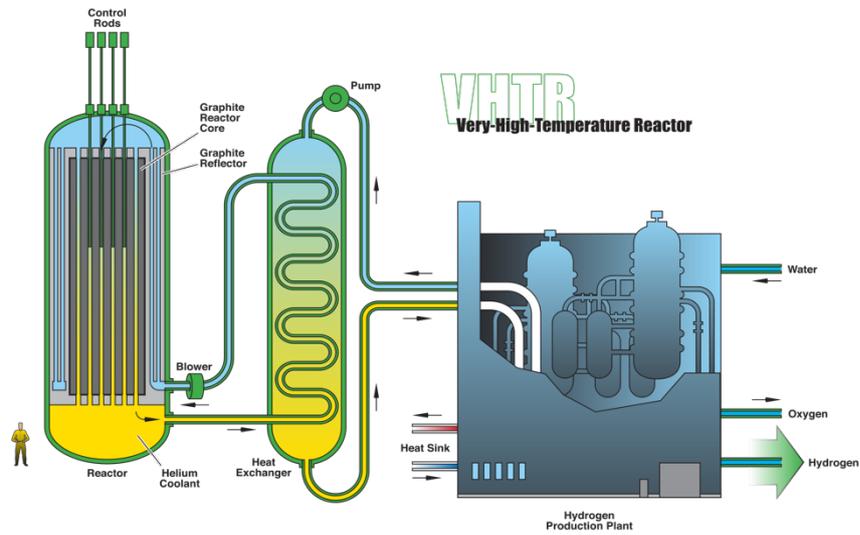


Imagen XXX. Reactor de Temperatura Muy Alta, VHTR de Generación IV

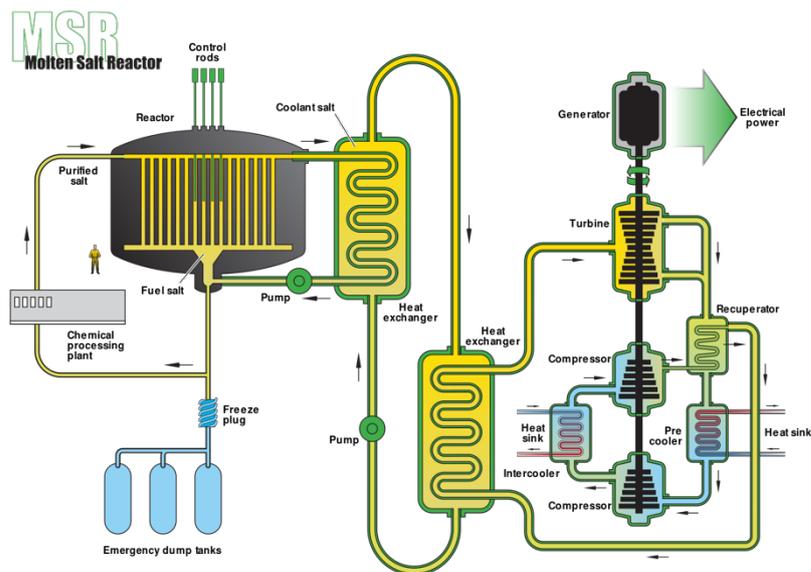


Imagen XXXI. Reactor de Sal Fundida, MSR de Generación IV



---

*Anexo 3.*

*Las Materias  
Primas*

---

## Combustible Nuclear

En la generación de energía nuclear se emplean materiales que contengan nucleidos fisionables y que puedan ser empleados en un reactor para que se desarrolle en él una reacción nuclear.

El combustible nuclear engloba tanto al material como al conjunto elaborado con dicho material nuclear es decir, las barras de combustible, las composiciones de material nuclear y el moderador o cualquier otra combinación.

El uranio es un combustible nuclear, como también lo es el óxido de uranio. En el primer caso nos referimos a un elemento químico, alguno de cuyos isótopos es fisionable; en el segundo, a un compuesto químico determinado que contiene tales isótopos.

Entendemos por isótopos fisionables aquellos nucleidos susceptibles de experimentar fisión. Para hablar con precisión, sería necesario especificar la energía de los neutrones que pueden hacer fisionar dicho isótopo ya que, por ejemplo, el U-238 no es fisionable por los neutrones térmicos, pero sí por los rápidos, aunque con pequeña probabilidad o sección eficaz. Se entiende por isótopo fisionable cualquier nucleido que fisiona tanto por la acción de los neutrones térmicos como de los rápidos.

El único isótopo fisionable que existe en la naturaleza es el uranio 235 que se encuentra en una proporción del 0,711% en el uranio natural.

El uranio es un elemento químico metálico de color plateado-grisáceo de la serie de los actínidos. Tiene el mayor peso atómico de entre todos los elementos que se encuentran en la naturaleza y es, aproximadamente, un 70% más denso que el plomo. El uranio se localiza principalmente en la corteza terrestre, es quinientas veces más abundante que el oro y no tiene otro uso más que como combustible nuclear.

### Etapas para la obtención

Procedemos a analizar los diferentes procesos que se llevan a cabo, desde la obtención de la materia prima hasta la llegada a la Central Nuclear, siguiendo los pasos que se observan en la imagen XXVII:

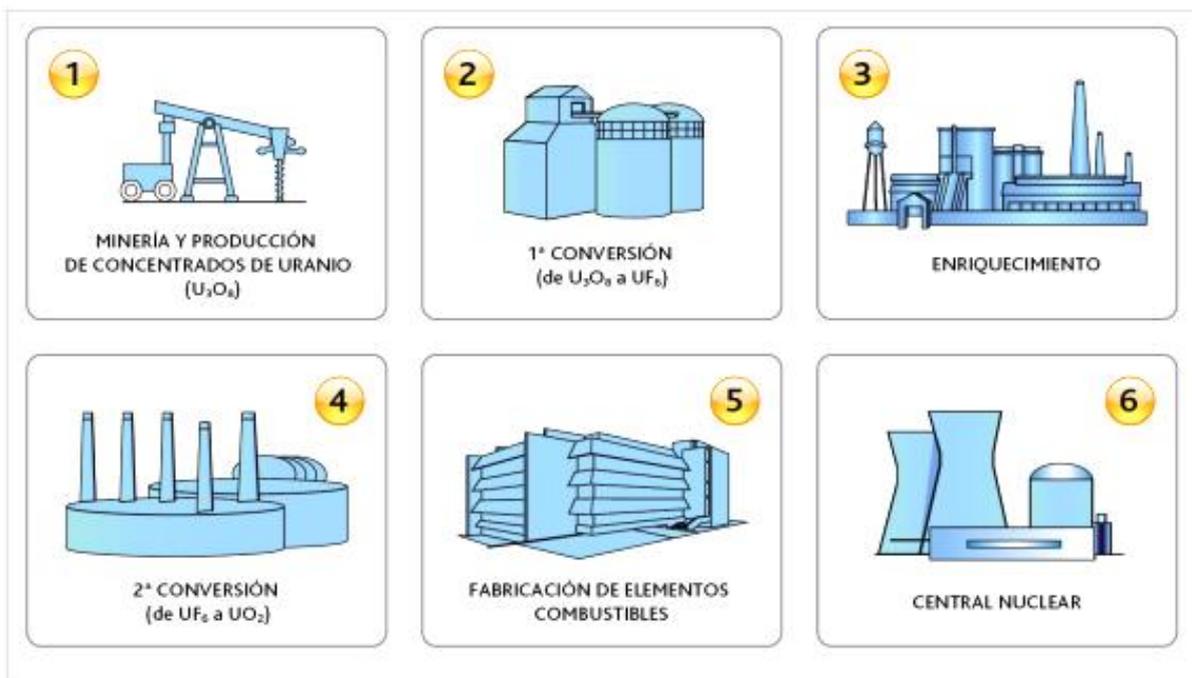


Imagen XXXII. Etapas del combustible nuclear

#### 1. Fase de exploración y minería

El uranio es abundante en la naturaleza pero se encuentra en proporciones muy pequeñas en las rocas de la corteza terrestre. Por esta razón, las rocas se trituran y muelen para facilitar los tratamientos químicos posteriores; lixiviación, clarificación y refinado. De esta forma se obtiene un sólido de color amarillo, comúnmente denominado yellow cake, Imagen XXXIII, formado mayoritariamente por  $U_3O_8$  y se seca para continuar con el proceso.



Imagen XXXIII. Yellow cake de uranio

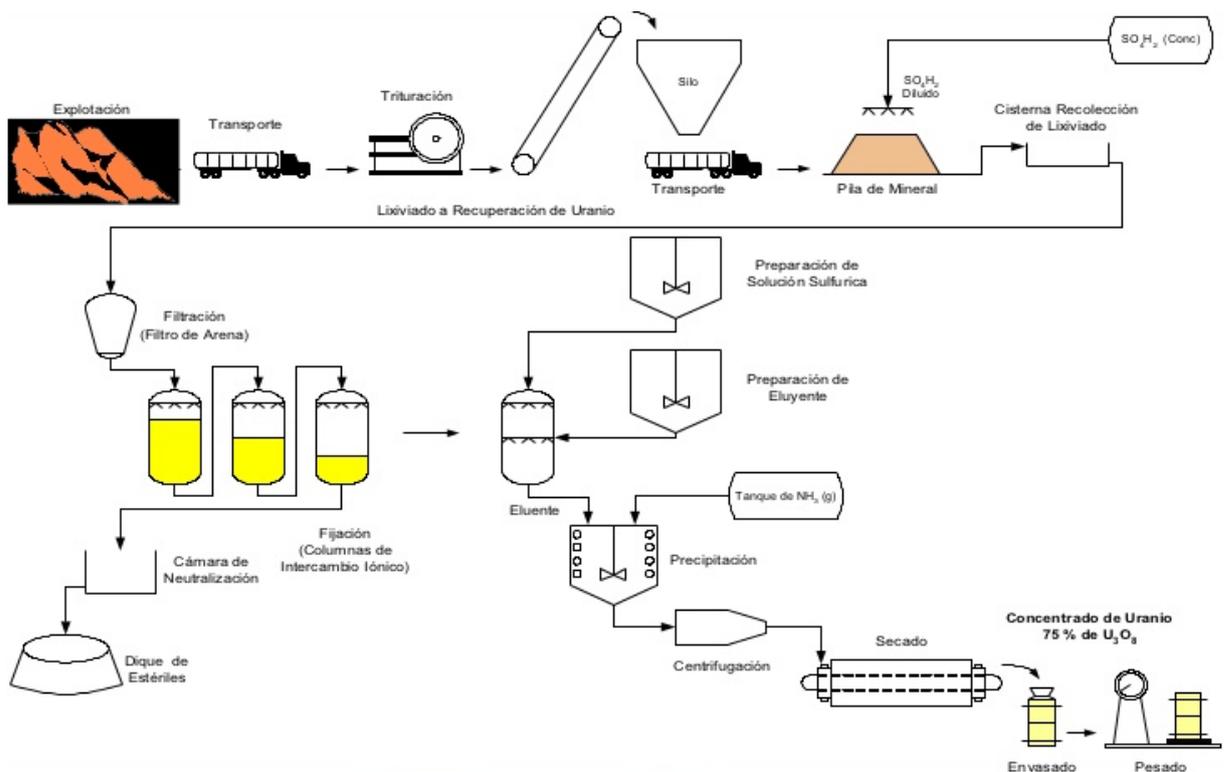


Imagen XXXIV. Diagrama de flujo de la obtención de concentrado de Uranio

## 2. Primera fase de conversión ( $\text{U}_3\text{O}_8$ a $\text{UF}_6$ )

Esta etapa consiste en que el concentrado de uranio,  $\text{U}_3\text{O}_8$ , debe ser convertido en hexafluoruro de uranio,  $\text{UF}_6$ , que se encuentra en fase gaseosa y es la forma requerida por la mayoría de las plantas de enriquecimiento de uranio para emplearse uranio como combustible nuclear.

En este diagrama observamos los pasos que realiza la industria para obtener el concentrado de uranio,  $\text{U}_3\text{O}_8$ , desde la fase de explotación.

## 3. Enriquecimiento

El isótopo fisionable U-235, que como ya sabemos es el 0,71% en el uranio natural, tiene una concentración inferior a la requerida para mantener una reacción nuclear en cadena en los reactores de agua ligera. Por ello, el  $\text{UF}_6$  natural debe ser enriquecido en el isótopo fisionable para que se pueda utilizar como combustible nuclear.

Los diferentes niveles de enriquecimiento dependerán del tipo de reactor en el que se empleará el combustible pero en un reactor de agua ligera, PWR, normalmente se enriquece hasta el 5% de U-235.

El enriquecimiento se consigue utilizando por lo general, difusión gaseosa o centrifugado de gas.

#### 4. Segunda fase de conversión (UF<sub>6</sub> a UO<sub>2</sub>)

Para su uso como combustible nuclear, el UF<sub>6</sub> ya enriquecido, se deberá convertir en polvo de dióxido de uranio, UO<sub>2</sub>. EL proceso de obtención del UO<sub>2</sub> partiendo de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> se puede observar en el diagrama de flujo de la *Imagen XXX*.

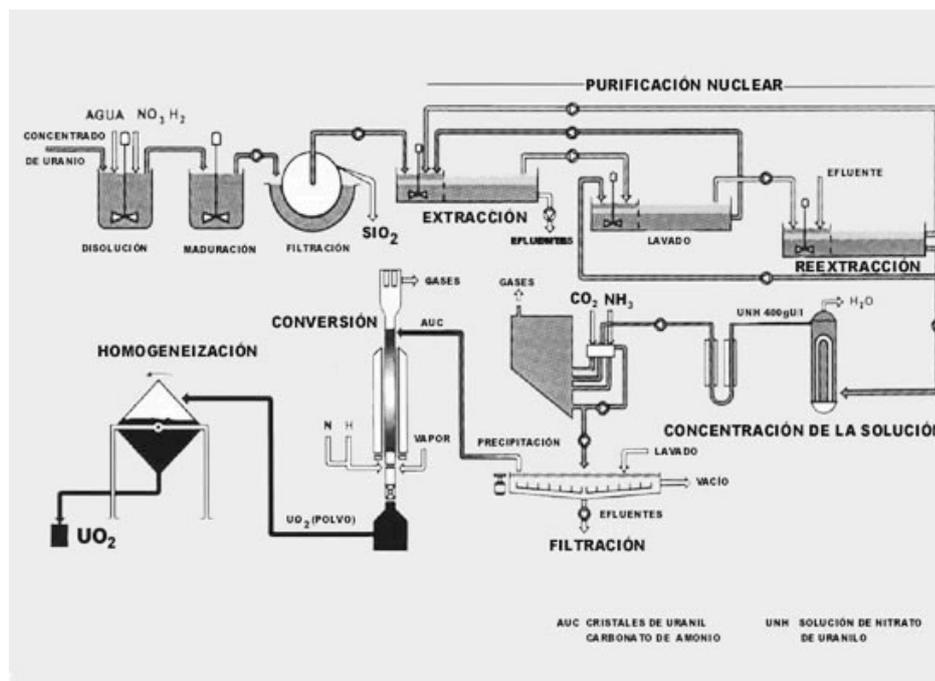


Imagen XXXV. Diagrama de flujo de la obtención del dióxido de uranio

La forma de distribución será compactando el polvo en unas pastillas como las que observamos en la *Imagen XXXV* que cuentan con unas características que las hacen estables a las temperaturas tan elevadas que deberán soportar en el interior del reactor.



*Imagen XXXVI. Pastillas de polvo de dióxido de uranio*

### *5. Fabricación de elementos combustibles*

Este paso consiste en la fabricación de barras de combustible para poder colocar dentro de ellas las pastillas de uranio. En dichas barras se almacenarán los productos de fisión que se liberan durante el quemado del combustible. Una vez preparadas las barras de combustible, se agrupan en ensamblajes especiales que forman los elementos combustibles.

En el caso de la obtención del combustible en España, esta sería la única etapa que se realizaría dentro del territorio. Concretamente en la fábrica de elementos combustibles de la que ya hablamos.

### *6. En la Central Nuclear*

Los elementos combustibles pierden efectividad a causa de la reducción del material fisionable y de la acumulación de productos de fisión. Por ello, es necesario sustituir parte de estos elementos por combustible nuevo, operación llamada recarga.

Cuando se retira el combustible utilizado del reactor, tan solo se ha utilizado el 5% de la energía inicialmente contenida. El combustible usado, por tanto, mantiene aún una gran capacidad energética remanente, susceptible de ser utilizada nuevamente en otros reactores. Una vez que el combustible acaba su vida útil en los reactores, tras operar durante dos o tres ciclos, unos tres o cinco años, todavía conserva el 95% del uranio, que está enriquecido hasta un nivel que depende del quemado final que tenga. El 1% es plutonio, el resto son actínidos menores, productos de vida larga, productos de vida corta y productos estables de fisión.

## Ciclo del Combustible Nuclear

El ciclo del combustible nuclear abarca desde la extracción del mineral de uranio hasta la última etapa de gestión del combustible irradiado, incluyendo otras etapas intermedias como el enriquecimiento del mineral, la fabricación de los elementos combustibles y su utilización en la central nuclear.

El combustible gastado descargado de los reactores de las centrales nucleares puede gestionarse de diversos modos. Cada uno de ellos recibe el nombre de ciclo y existen dos tipos de los que se hablará después de mostrar la *Imagen XXXVII*, que describe el ciclo del combustible completo empleando ambos ciclos. Las flechas verdes nos indican los pasos que realiza el combustible en el ciclo abierto y las negras, el ciclo cerrado.

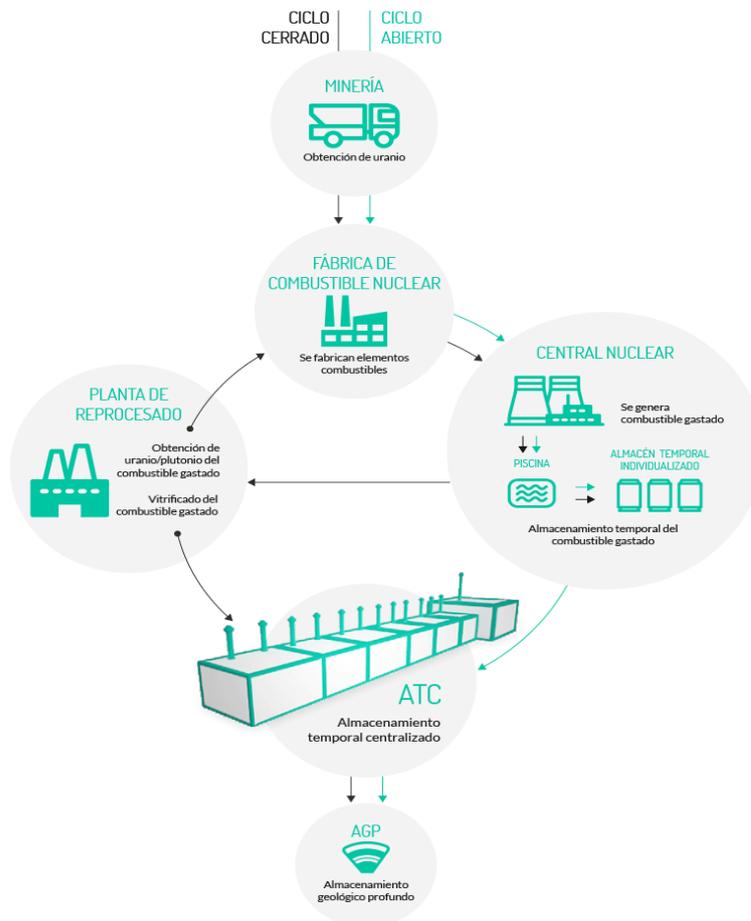


Imagen XXXVII. Descripción del ciclo de Combustible Nuclear

### Ciclo abierto

En este ciclo, al combustible gastado se le considera como residuo radiactivo de alta actividad y se gestiona como tal. Más adelante veremos la manera de almacenar estos residuos en las instalaciones temporales específicas para ellos.

Es decir, se procedería a la gestión final del combustible gastado como residuo en almacenes geológicos

### Ciclo cerrado

El ciclo cerrado consiste en la recuperación de aquellos componentes del combustible usado con potencial energético, fundamentalmente el uranio y el plutonio, para emplearlos de nuevo en un reactor. Este combustible formado por óxidos de plutonio y uranio, el combustible MOX del que se hablo anteriormente, puede volverse a reprocessar.

El resto de componentes del combustible gastado incluyendo los productos de fisión, activación y otros actínidos, se consideran residuo, se acondicionan y transportan a un almacén.

Su gestión final, al igual que en el ciclo abierto, requiere su alojamiento en un emplazamiento geológico profundo.



---

*Anexo 4.*

*Gestión de  
Residuos*

---

## Residuos Radioactivos

Un residuo radiactivo será aquel material o producto de desecho que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

España se decanta por clasificarlos desde el punto de vista de su gestión y sigue los criterios adoptados por el OIEA y la Comisión Europea, obteniendo los siguientes grupos:

- Los *residuos de baja y media actividad*, RBMA, que no generan calor, contienen radionucleidos emisores beta-gamma con un periodo de semidesintegración de menos de treinta años.

Actualmente son tratados, acondicionados y almacenados en las instalaciones de El Cabril junto al subconjunto de los *residuos de muy baja actividad*, RBBA.

- Los *residuos de alta actividad*, RAA, contienen radionucleidos emisores alfa, de vida larga, que reducen su actividad a la mitad en más de treinta años. Están formados básicamente por el combustible nuclear gastado.

Se incluyen también en este conjunto aquellos otros *residuos de media actividad*, RMA, que por sus características no son susceptibles de ser gestionados de forma final en las condiciones establecidas en El Cabril.

De los residuos radiactivos producidos en España, el 95 % son de baja y media actividad y el otro 5 % de alta actividad.

A modo de ejemplo, una Central Nuclear con un reactor de agua ligera, BWR, de 1.000 MWe de potencia da lugar a unos 10.000 m<sup>3</sup> de RBBA, unos 3.000 m<sup>3</sup> de RBMA y otros 110 m<sup>3</sup> de RMA. En general las centrales BWR generan mayor volumen que las PWR.

## Gestión de Residuos Radioactivos

El objetivo de la gestión de los residuos radiactivos es proteger a los seres humanos y al medio ambiente mediante la aplicación de tecnologías y medios de acuerdo con las normas legalmente establecidas.

España dispone de una notable infraestructura para llevar a cabo una gestión segura y eficaz de los residuos radiactivos desde los puntos de vista administrativo, técnico y económico-financiero. El sector nuclear español, es el único que dispone de un plan general para la gestión de residuos radiactivos.

La Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, bajo el nombre ENRESA, es responsable de todas las actividades sobre la gestión de residuos radiactivos y de las operaciones derivadas del desmantelamiento de instalaciones nucleares en nuestro territorio.

Sus funciones son reguladas por el Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos. En la actualidad está vigente el VI Plan Nacional de Residuos Radiactivos, PGRR, aprobado en 2006 por el Consejo de Ministros que lo revisa y actualiza periódicamente cuando lo requiere el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

### Tipos de almacenamiento

En España, el combustible nuclear, una vez utilizado en el reactor de una central nuclear, se retira del mismo y se almacena en:

- *Piscinas*: El almacenamiento del combustible irradiado en la piscina de la central nuclear que lo ha producido es un sistema seguro y probado desde hace décadas. La elección del agua como almacén inmediato se debe a su alto

coeficiente de transmisión del calor que permite el enfriamiento, sus buenas propiedades como blindaje, su transparencia y su manejabilidad.

- *Almacenes Temporales Individualizados, ATI*: Si se produce la saturación de la capacidad de almacenamiento de las piscinas, se procede a almacenar el combustible irradiado en un almacén temporal en seco.
- *Almacén Temporal Centralizado, ATC*: Para almacenar los residuos radiactivos de alta actividad y el combustible irradiado de las centrales nucleares españolas.

En el mundo, existe también otro tipo de almacenamiento denominado *Almacén Geológico Profundo, AGP*, que alberga residuos radiactivos de alta actividad a gran profundidad en el interior de formaciones geológicas estables.

En la actualidad hay un gran interés por técnicas cuyo objetivo básico es disminuir el volumen de los residuos radiactivos, a través de la separación y transmutación, conseguir un mayor aprovechamiento del combustible irradiado, mediante reproceso, y obtener nuevos reactores que necesitan menos combustible nuclear para operar.

El reciclado y eliminación de actínidos mediante las técnicas de separación y transmutación, SyT es considerada en todo el mundo, y en particular en países europeos, como una de las estrategias más prometedoras para reducir el inventario de los residuos radiactivos, lo que contribuiría a hacer de la energía nuclear una energía sostenible.

Estas técnicas implican la utilización de métodos físicos y químicos para separar los radionúclidos más peligrosos del combustible gastado, mediante la separación, y su transformación nuclear en elementos menos peligrosos o elementos de vida más corta, mediante transmutación.



Imagen XXXVIII. Separación y transmutación de residuos radiactivos

## Plan General Residuos Radiactivos

Con fecha 23 de junio de 2006, el Consejo de Ministros aprobó el VI Plan General de Residuos Radiactivos, actualmente vigente. Según el artículo 5.2 del Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos: "En el Plan se recogerán las estrategias, actuaciones necesarias y soluciones técnicas a desarrollar en España en el corto, medio y largo plazo, encaminadas a la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos, al desmantelamiento y clausura de instalaciones nucleares y al resto de actividades relacionadas con las anteriores, incluyendo las previsiones económicas y financieras y las medidas e instrumentos necesarios para llevarlas a cabo."

## Financiación de la gestión y desmantelamiento

El coste total para *la gestión de residuos radiactivos y desmantelamiento de las instalaciones* se estima en 18.492 millones de euros<sup>18</sup>, que se extiende hasta el año 2080.

La gestión de los residuos radiactivos se financia a través del Fondo para la financiación de las actividades del PGRR, el cual estará integrado, entre otros conceptos, por las cantidades procedentes de la recaudación de diversas tasas.

Este Fondo solo se puede destinar a costear las actuaciones previstas en el PGRR y al concluir el periodo de gestión de los residuos radiactivos y del desmantelamiento de las instalaciones contempladas las cantidades totales en él ingresadas deberán cubrir los costes incurridos de tal manera que el saldo final resultante sea cero.

---

<sup>18</sup> Datos recogidos del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, MINETUR, del Gobierno de España a 31 de Diciembre de 2015.



---

*Anexo 5.*

*La Tecnología  
Nuclear*

---

## Aplicaciones de la tecnología Nuclear

El principal uso de la tecnología Nuclear se basa en la producción de energía eléctrica. Sin embargo, existen muchas aplicaciones en otros campos donde se emplea la tecnología Nuclear de una forma directa o indirecta, muchas veces desconocidos para el público.

Las diferentes aplicaciones de la energía nuclear son fundamentales en la vida cotidiana y, además en el futuro, serán más importantes gracias a las investigaciones que aumentan las posibilidades de aplicación y justifican su empleo.

Trabajando con diferentes isótopos de un mismo elemento, se puede utilizar la tecnología nuclear para otras aplicaciones en diversos campos de los que se hablará brevemente a continuación:

### Industria

La tecnología Nuclear adquiere una gran importancia en el sector industrial ya que, en la actualidad, casi todas las ramas de la industria utilizan radioisótopos y radiaciones de diversas formas.

El uso de las radiaciones se aplica en un amplio campo de actividades, como en el control de calidad de las materias primas, o en el control de calidad de productos fabricados en serie. Se realizan experimentos con trazadores<sup>19</sup> para obtener una información exacta y detallada del estado de los equipos industriales, permitiendo investigar en diversas variables

---

<sup>19</sup> Sustancias radiactivas que se introducen en un determinado proceso industrial para detectar la trayectoria de los mismos gracias a su emisión radiactiva.

del proceso de forma que se obtiene información para prolongar la vida de los equipos industriales.

La tecnología nuclear también se utiliza en la fabricación de plásticos y en la esterilización de productos de un solo uso empleando la polimerización por radiación. La irradiación con fuentes intensas es considerada como una operación para mejorar la calidad de determinados productos. Así como las radiografías que emplean rayos gamma o neutrones como método no destructivo permitiendo comprobar la calidad en soldaduras, piezas metálicas o cerámicas, entre otros, sin dañar o altera la composición del material.

## Hidrología

La escasez y degradación del agua son causas de preocupación en todo el mundo. Si no se optimizan los recursos hídricos podría producirse una reducción del crecimiento económico y surgir ciertos riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Gracias al uso de las técnicas nucleares es posible desarrollar diversos estudios relacionados con recursos hídricos.

La hidrología isotópica es una técnica nuclear que se utiliza tanto isótopos estables como radiactivos para seguir los movimientos del agua en el ciclo hidrológico. Los isótopos pueden utilizarse para investigar las fuentes de agua subterráneas y determinar su origen, su forma de recarga, si existe riesgo de intrusión o contaminación por agua salada y si es posible utilizarlas de manera sostenible.

Tanto el hidrógeno como el oxígeno, que son los elementos constitutivos del agua, contienen principalmente isótopos ligeros. En las fases de evaporación y condensación, la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en una molécula de agua sufren pequeños cambios. En los océanos es donde se genera la mayor parte del vapor de agua en la atmósfera, por lo que cuando se produce, los isótopos más pesados se condensan primero y caen en forma de lluvia antes que los más ligeros. Por consiguiente, mientras más alejada de la costa

sea la precipitación, menor será la cantidad de isótopos pesados que contenga. Los isótopos de oxígeno e hidrógeno, los isótopos contaminantes, como trazas metálicas o compuestos químicos, son tan singulares como una huella dactilar por lo que ofrecen pistas sobre sus orígenes. Entre los isótopos radiactivos empleados destacan el tritio, el Carbono-14, el Oxígeno-18 y el Cloro-36.

Se pueden emplear técnicas nucleares para la desalinización del agua de mar, produciendo agua dulce sin perturbar el medio ambiente. También se emplean isótopos del boro, para tratar la contaminación de aguas subterráneas y el Kriptón-85 y el Helio-3 para perfeccionar los métodos de medida de isótopos que ayuden a precisar la edad del agua.

### Minería

A través de la utilización de sondas nucleares se puede determinar la física y la química de los suelos, lo que permite conocer si un estrato reúne las condiciones favorables para albergar minerales o combustibles.

### Medicina

La medicina nuclear se define como la rama de la medicina que emplea los isótopos radiactivos, las radiaciones nucleares, las variaciones electromagnéticas de los componentes del núcleo atómico y técnicas biofísicas afines, para la prevención, diagnóstico, terapéutica e investigación médica. Asimismo, la medicina nuclear incluye el estudio de los fenómenos biológicos originados por la utilización de los isótopos radiactivos, así como el empleo de ciclotrones y reactores nucleares en la producción de radionucléidos de uso médico, y la aplicación de sistemas de reconstrucción de imágenes y de elaboración de datos.

En el mundo occidental industrializado, las técnicas de diagnóstico y tratamiento se han vuelto tan corrientes, fiables y precisas que aproximadamente uno de cada tres pacientes es sometido a alguna forma de procedimiento radiológico terapéutico o de diagnóstico.

Su campo de acción comprende la prevención, la investigación y el diagnóstico para conseguir un mejor conocimiento y comprensión de la estructura y función del cuerpo humano en estado de salud o de enfermedad.

Como ejemplo, se puede examinar el funcionamiento de la tiroides, el pulmón, el hígado y el riñón, así como el volumen y circulación sanguíneos. También, se utilizan radiofármacos como el Cromo-51 para la exploración del bazo, el Selenio-75 para el estudio del páncreas y el Cobalto-57 para el diagnóstico de la anemia.

### Arte

Como ejemplos de la aplicación de la tecnología nuclear al arte podemos citar para la conservación del patrimonio la impregnación con un monómero y su posterior irradiación gamma para producir la consolidación de la pieza por polimerización a la vez que se eliminan los insectos contaminantes de la obra por esterilización.

También se emplea la técnica del Carbono-14 para la determinación de la antigüedad o análisis no destructivos para la autenticidad de distintas obras de arte de acuerdo a los elementos microconstituyentes de la materia prima que varían según el autor y las épocas.

### Exploración Espacial

Una de las principales aplicaciones de la tecnología Nuclear, junto a la Medicina, es la navegación espacial.

Los generadores isotópicos de electricidad son instrumentos que contienen un radionucleido encapsulado herméticamente cuyas radiaciones son absorbidas en las paredes de la cápsula de forma análoga a una fuente de calor. A esta fuente se acopla un circuito

eléctrico para generar una corriente eléctrica que alimenta los instrumentos. La fuente será de larga duración si el periodo de semidesintegración del radioisótopo es largo.

Los viajes no tripulados a planetas exteriores del sistema solar de la Tierra se han realizado mediante misiones provistas de equipos robóticos alimentados con la electricidad producida por el radioisótopo Plutonio-238 que tiene un período de semidesintegración de 87,74 años y que no es fisionable como otros isótopos del plutonio por lo que solo se puede obtener del combustible irradiado de uranio.

## Cosmología

Actualmente, las edades de las estrellas se basan en sus masas, composiciones químicas, temperaturas y su comparación de cómo varían con el tiempo según el tipo particular de estrella.

En el caso de las rocas, el método más seguido de datación es el que se basa en comparar en al uranio y al plomo ya que las rocas ígneas<sup>20</sup> incorporan pequeñas cantidades de uranio en sus estructuras cristalinas. Este uranio contiene Uranio-238, periodo 4.500 millones de años y Uranio-235, periodo 704 millones de años. Ambos decaen hasta una forma estable de plomo.

Para rocas más jóvenes y objetos de origen humano, se emplean otros radioisótopos. Uno de ellos se basa en la desintegración del potasio a argón. La parte más importante de la historia humana, unos 60.000 años, está escrita en los isótopos de carbono, el Carbono-12 estable y el carbono-14 con un periodo de 5.730 años.

---

<sup>20</sup> Aquellas rocas creadas a partir del enfriamiento y la solidificación del magma.

## Alimentación

En la actualidad, más de treinta y cinco países permiten la irradiación de algunos alimentos por lo que las técnicas nucleares juegan un papel fundamental en la conservación de alimentos.

Como por ejemplo, la exposición de los alimentos a una dosis de radiación gamma predeterminada y controlada. De esta manera se aprovecha la energía de las radiaciones para la eliminación de insectos, gérmenes patógenos y retrasa la maduración de frutas. Esta técnica es aceptada y recomendada por la OIEA, entre otros, ya que consume menos energía que los métodos convencionales y puede reemplazar o reducir radicalmente el uso de aditivos y fumigantes en alimentos.

A los alimentos irradiados también se les conoce como alimentos ionizados o tratados con radiación ionizante y no se han de confundir con los alimentos radiactivos, pues no emiten radiactividad. Es importante señalar, que la técnica de irradiación no genera efectos secundarios en la salud humana, siendo capaz de reducir en forma considerable el número de organismos y microorganismos patógenos presentes en variados alimentos de consumo masivo.

## Medio Ambiente

Diversas técnicas nucleares se han aplicado con éxito a problemas de contaminación como los causados por el dióxido de azufre, las descargas gaseosas a nivel del suelo, en derrames de petróleo, en desechos agrícolas, en contaminación de aguas y en la contaminación generada por las ciudades. Se emplean técnicas isotópicas que interactúan con las radiaciones ionizantes de la materia.

La aplicación de isótopos permite determinar las cantidades exactas de las sustancias contaminantes y lugares en que se presentan así como sus causas. Además, el tratamiento con haces de electrones permite reducir las consecuencias medioambientales y sanitarias del

empleo a gran escala de combustibles fósiles, y contribuye de manera más efectiva que otras técnicas a resolver problemas como el efecto invernadero y la lluvia ácida.

La técnica nuclear más conocida en este área recibe el nombre de Análisis por Activación Neutrónica y consiste en irradiar una muestra para obtener a posteriori los espectros gamma que ella emite. De esta manera se obtiene información espectral que permite identificar los elementos presentes en la muestra y las concentraciones de los mismos.

### Efecto Invernadero

El calentamiento global se debe a la liberación de gases durante la combustión del carbón y de materias orgánicas como el petróleo, la madera y la basura. La energía nuclear permite el uso de análisis isotópicos que calculan las emisiones de dióxido de carbono en una zona industrial.

Un método innovador y sencillo para calcular las emisiones de dióxido de carbono, consiste en la observación de las plantas que crecen en una zona industrial, que captan Carbono-14 radiactivo procedente de las radiaciones cósmicas en forma de dióxido de carbono, y que también incorporan el emitido por las industrias, por lo que determinando la proporción de carbono radiactivo y no radiactivo se puede determinar la emisión total de dióxido de carbono en la zona.

## Investigación y Desarrollo Nuclear

Para mantener las capacidades futuras de producción de energía nuclear que permitan su utilización en escenarios de sostenibilidad, se mantienen programas de investigación a nivel mundial que aseguran la continuidad del uso de esta fuente.

En España la investigación y desarrollo tecnológico en el ámbito de la energía nuclear han sido una preocupación constante de todas las entidades responsables que desarrollan sus propios proyectos y programas de investigación, colaborando activamente en los internacionales.

En 2007 se creó la Plataforma Tecnológica de Energía de Fisión, CEIDEN, para coordinar los diferentes planes y programas nacionales de I+D. Orientadas a la operación segura fiable y económica de las instalaciones nucleares actuales y del ciclo de combustible nuclear, y al desarrollo de posibles nuevos proyectos nucleares.



Imagen XXXIX. Retos de la plataforma CEIDEN

Hasta la fecha, la plataforma tiene más de cien miembros nacionales que van desde Organismos Institucionales, empresas e, incluso, universidades y colaboraciones procedentes de varias partes del mundo.

El Consejo Gestor está formado por el MINETUR, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), el CIEMAT y el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO).

Las características de la I+D nuclear que propone el CEIDEN son:

- *Colaborativa*: Participación de diversas empresas, centros y universidades.
- *Entorno abierto*: Promover el intercambio fluido de conocimiento entre los órganos colaboradores.
- *Internacional*: Las colaboraciones entre diferentes países y organismos.
- *Desarrollo de grandes proyectos de alto coste*: La plataforma financia hasta trece millones de euros, aportados por los participantes miembros del mismo.
- *Escenario multidisciplinar*: Se pretende desarrollar proyectos en diferentes áreas tales como materiales, electrónica, mecánica de fluidos, automatismos, etc.
- *Nuevas tecnologías*: Especial énfasis en las Centrales de Generación IV, la Transmutación y la Fusión.



---

*Anexo 6.*

*Legislación  
Nuclear*

---

## Normas Internacionales

### Legislación comunitaria

- Tratado constitutivo de la Comunidad Europea de la Energía Atómica, EURATOM.
- Anexos del Tratado EURATOM
- Directiva 89-618, del Consejo, de 27 de noviembre de 1989, relativa a la información de la población sobre las medidas de protección sanitaria aplicables y sobre el comportamiento a seguir en caso de emergencia radiológica (DEROGADA POR LA DIRECTIVA 2013/59)
- Reglamento 1493/93/Euratom, sobre traslados de sustancias radiactivas entre Estados Miembros. Sobre traslados de sustancias radiactivas entre Estados Miembros.
- Directiva 96/29/Euratom del Consejo de 13 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. (DOCE 29/06/1996) de 13 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. (DOCE 29/06/1996) (DEROGADA POR LA DIRECTIVA DE 2013/59)
- DIRECTIVA 2003/122/EURATOM DEL CONSEJO, de 22 de diciembre de 2003, sobre el control de las fuentes radiactivas selladas de actividad elevada y de las fuentes huérfanas de 22 de diciembre de 2003, sobre el control de las fuentes radiactivas selladas de actividad elevada y de las fuentes huérfanas
- Reglamento 302/2005 de la Comisión de 8 de febrero de 2005 relativo a la aplicación del control de seguridad de Euratom (DOCE 26-02-05). 8 de febrero de 2005 relativo a la aplicación del control de seguridad de Euratom (DOCE 26-02-05).
- DIRECTIVA 2006/117/EURATOM, del Consejo de 20 de noviembre de 2006, relativa a la vigilancia y al control de los traslados de residuos radiactivos y combustible nuclear gastado, que sustituye a la Directiva 92/3/euratom, de 3 de febrero de 1992.
- Directiva 2009/71/EURATOM, por la que se establece un marco comunitario sobre la seguridad en las centrales nucleares de 25 de junio de 2009, por la que se establece un marco comunitario sobre la seguridad en las centrales nucleares

- Directiva 2011/70/Euratom, por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos de 19 de julio de 2011, por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos
- Directiva 2013-59-EURATOM del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom.

#### En materia de salvaguardias

- Acuerdo entre la Comunidad Europea de Energía Atómica y el Organismo Internacional de Energía Atómica en ejecución de lo dispuesto en los párrafos 1 y 4 del Artículo III del Tratado sobre la no Proliferación de las Armas Nucleares. Formato
- Protocolo Adicional al Acuerdo de Salvaguardias.
- Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares (TNP).

#### En materia de Responsabilidad Civil

- Convenio de 29 de julio de 1960 sobre la responsabilidad civil en materia de energía nuclear, modificado por los Protocolos de 1964, 1982 y de 2004
- Convenio de 31 de enero de 1963, complementario al convenio de París, modificado por los Protocolos de 1964, de 1982 y de 2004
- Ley 12/2011, de 27 de mayo, sobre responsabilidad civil por daños nucleares o producidos por materiales radiactivos.

#### En materia de Seguridad Nuclear

- Convención sobre Seguridad Nuclear, ratificada (Viena, 1994).
- Convención conjunta sobre seguridad nuclear en la gestión de combustible gastado y en la gestión de residuos radiactivos (Viena, 1997).

#### En materia de notificación de accidentes

- Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares (entrada en vigor en 1986).
- Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica (entrada en vigor en 1987).

#### En materia de Protección Física

- Convención sobre protección física de los materiales nucleares, firmada en 1980.
- Enmienda a la Convención firmada en 2005, afecta a materiales e instalaciones nucleares.
- Decisión de la Unión Europea sobre la firma de la Convención.
- Recomendación de la Comisión Europea sobre la aplicación de un sistema de contabilidad de los materiales nucleares.
- Informe del Director General del Organismo Internacional de la Energía Atómica sobre la última enmienda de la Convención.
- Real Decreto 1308/2011, de 26 de septiembre, sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares, y de las fuentes radiactivas.

## Normas Estatales

### Leyes

- Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear (BOE 04/05/1964).
- Ley 54/1997, de 27 noviembre, del sector eléctrico (BOE 28/11/1997)
- Ley 15/1980, de 22 abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear (BOE 25/04/1980)
- Ley 14/1999, de 4 de mayo, de Tasas y Precios Públicos por servicios prestados por el Consejo de Seguridad Nuclear (BOE 05/05/1999)
- Ley 11/2009, de 26 de octubre, por la que se regulan las Sociedades Anónimas Cotizadas de Inversión en el Mercado Inmobiliario (BOE 27/10/2009).
- Disposición final novena de la Ley 11/2009 que modifica la disposición adicional sexta de la Ley 54/1997, que regula la financiación del Fondo para la gestión de las actividades del PGRR.
- Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible (BOE 05/03/2011).
- Disposición adicional decimoquinta de la Ley 2/2011 por la que se modifica la disposición adicional sexta de la Ley 54/1997 sobre la regulación del Fondo para la gestión de las actividades del PGRR
- Ley 12/2011, de 27 de mayo, sobre responsabilidad civil por daños nucleares o producidos por materiales radiactivos (BOE 28/05/2011).

### Otras Normas

- Real Decreto 97/2014, de 14 de febrero (BOE 27/02/2014).
- por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español.
- Real Decreto 1464/1999, de 17 de septiembre (BOE 05/10/1999).
- sobre actividades de la primera parte del ciclo del combustible nuclear.

- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio (BOE 26/07/2001).
- por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.
- Real Decreto 1206/2003, de 19 de septiembre (BOE 08/10/2003).
- para la aplicación de los compromisos contraídos por el Estado español en el Protocolo adicional al Acuerdo de salvaguardias derivado del Tratado sobre la no proliferación de las armas nucleares.
- Real Decreto 229/2006, de 24 de febrero (BOE 28/02/2006).
- sobre el control de fuentes radiactivas encapsuladas de alta actividad y fuentes huérfanas.
- Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre (BOE 31/12/1999).
- por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas.
- Real Decreto 243/2009, de 27 de febrero (BOE 02/04/2009).
- por el que se regula la vigilancia y control de traslados de residuos radioactivos y combustible nuclear gastado entre Estados miembros o procedentes o con destino al exterior de la Comunidad.
- Real Decreto 1085/2009, de 3 de julio (BOE 18/07/2009).
- por el que se aprueba el Reglamento sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico.
- Real Decreto 1308/2011, de 26 de septiembre (BOE 07/10/2011).
- sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares, y de las fuentes radiactivas.
- Real Decreto 1440/2010, de 5 de noviembre (BOE 22/11/2010).
- por el que se aprueba el Estatuto del Consejo de Seguridad Nuclear.
- Orden IET/1946/2013, de 17 de octubre (BOE 23/10/2013).
- por la que se regula la gestión de los residuos generados en las actividades que utilizan materiales que contienen radionucleidos naturales.
- Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero (BOE 08/03/2014).
- para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos.

## Legislación instalaciones radiactivas

- Ley 25/64, de 29 de abril, de Energía Nuclear (BOE 4.5.64)
- Ley 54/97, 27 Noviembre, del sector eléctrico, que la modifica (BOE 28.11.97).
- Ley 15/80, 22 de abril, de creación del CSN (BOE 25.4.80).
- Ley 14/99, 4 de mayo, de tasas y precios públicos por servicios del CSN (BOE 6.5.99).
- Real Decreto 1836/99, de 3 de Diciembre, Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas (BOE 31.12.99).
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes (BOE 12.2.92).

## Normativa de transporte

- Real Decreto 35/2008 (BOE: 18.02.2008), por el que se modifica el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas aprobado por Real Decreto 1836/99, de 3 de Diciembre.
- Real Decreto 97/2014, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español.
- Acuerdo Europeo sobre transporte de mercancías peligrosas por carretera(ADR).
- Real Decreto 412/2001, sobre transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril.
- Reglamento relativo al transporte Internacional de mercancías peligrosas por ferrocarril (RID).
- Código Marítimo Internacional de mercancías peligrosas (IMDG).
- Instrucciones Técnicas para el Transporte sin riesgos de Mercancías Peligrosas por vía aérea (OACI), aprobadas mediante RD 1749/1984, de 1 de agosto y modificado por Orden FOM/3553/2011 de 5 de diciembre.

- Real Decreto 243/2009, de 27 de febrero, por el que se regula la vigilancia y control de traslados de residuos radiactivos y combustible nuclear gastado entre Estados miembros o procedentes o con destino al exterior de la Comunidad.