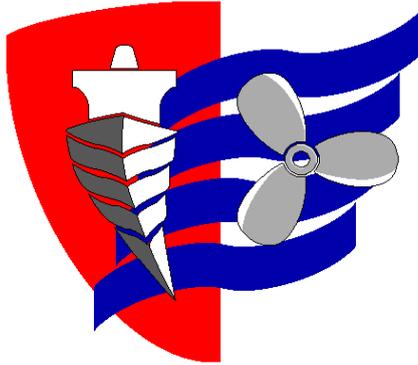


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

ENERGÍA NUCLEAR PARA LA PROPULSIÓN NAVAL

Nuclear energy for naval propelling

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Autora: Susana Díaz Vejo

Directora: Patricia Barroso Ruiz

Marzo 2018

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

**ENERGÍA NUCLEAR PARA LA
PROPULSIÓN NAVAL**

Nuclear energy for naval propelling

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Marzo – 2018

AGRADECIMIENTOS:

A todo el profesorado de la Escuela de Náutica que, de alguna manera, me ha ayudado y apoyado en este largo camino.

Emma, Sonia y demás compañeros/as de trabajo, gracias por estar siempre ahí.

Ana, Elena, gracias por vuestros ánimos, y por sacarme más de una sonrisa en algunas ocasiones en las que todo se ponía cuesta arriba.

A mis hermanas, Eva y Mariana, y hermano, Asier. Siempre supisteis que lo lograría.

A mis sobrinas, Jana y Victoria. Gracias por vuestro cariño y por distraerme en tantos momentos duros.

A ti, abuela. Te echo de menos...

Enri, Toño, muchísimas gracias por escucharme y apoyarme.

A mis padres, de todo corazón, muchísimas gracias, por todo. Por vuestro apoyo, vuestros ánimos... Sois los mejores.

En especial a ti, Marcos. Gracias por tu paciencia, tu cariño y tu ayuda. Por estar ahí, siempre. Tu apoyo ha sido imprescindible para poder recorrer este largo camino.

Y por supuesto, no podré olvidar nunca la ayuda incondicional de mis compañeros/as de universidad, especialmente a vosotros, Lourdes y Conde. Nunca os podré estar lo suficientemente agradecida. Sois increíbles.

ÍNDICE

RESUMEN.....	6
ABSTRACT	8
PALABRAS CLAVE:	10
KEYWORDS:	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1: EL TRANSPORTE MARÍTIMO: EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y SU IMPACTO AMBIENTAL. NORMATIVA SOBRE EMISIONES ATMOSFÉRICAS.....	15
1.1.- CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y CAMBIO CLIMÁTICO.	15
1.2.- EMISIONES ATMOSFÉRICAS ORIGINADAS POR LA ACTIVIDAD DEL TRANSPORTE MARÍTIMO Y SU IMPACTO AMBIENTAL.....	22
1.3.- IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA OCASIONADA POR LOS BUQUES.....	35
1.4.- REGULACIÓN SOBRE EMISIONES ATMOSFÉRICAS. NORMATIVA.	36
CAPÍTULO 2: PREVISIÓN DEL AGOTAMIENTO DEL PETRÓLEO.	41
2.1.- MODELO MATEMÁTICO DE HUBBERT. EL CÉNIT DEL PETRÓLEO.	41
CAPÍTULO 3: EL FUTURO DE LA ENERGÍA. BÚSQUEDA DE ALTERNATIVAS.	46
3.1.- INTRODUCCIÓN.	46
3.2.- BÚSQUEDA DE ALTERNATIVAS EN EL SECTOR MARÍTIMO.	48
3.3.- REFLEXIONES.....	82
CAPÍTULO 4: LA ENERGÍA NUCLEAR	83
4.1.- INTRODUCCIÓN	83
4.2.- DEFINICIONES.	85
4.3.- HISTORIA DE LA ENERGÍA NUCLEAR.	88
CAPÍTULO 5: REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.....	98
5.1.- INTRODUCCIÓN.	98
5.2.- ELEMENTOS DE LOS REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.	100
5.3.- CLASIFICACIÓN DE LOS REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.	103
5.4.- REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN MÁS UTILIZADOS.	106
5.5.- VENTAJAS DE LOS REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.	109
5.6.- INCONVENIENTES DE LOS REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.....	110
5.7.- DIFERENCIAS ENTRE REACTORES MARINOS (BUQUES) Y REACTORES EN TIERRA (CENTRALES NUCLEARES).	111

5.8.- GENERACIONES DE REACTORES NUCLEARES.	112
CAPÍTULO 6: APLICACIONES DE LA ENERGÍA NUCLEAR.....	114
6.1.- TECNOLOGÍA NUCLEAR.....	114
6.2.- GENERACIÓN NUCLEAR.	117
6.3.- PROPULSIÓN NUCLEAR CIVIL.....	123
6.4.- TRANSMUTACIÓN DE ELEMENTOS.....	124
6.5.- APLICACIONES DE INVESTIGACIÓN.....	124
CAPÍTULO 7: LA PROPULSIÓN NUCLEAR.....	125
7.1.- INTRODUCCIÓN	125
7.2.- BREVE HISTORIA DE LA PROPULSIÓN NUCLEAR.....	126
7.3.- PLANTAS DE PROPULSIÓN NAVAL NUCLEAR.....	132
7.4.- REACTORES NUCLEARES UTILIZADOS EN LA PROPULSIÓN NAVAL.....	133
7.5.- EL REACTOR DE AGUA A PRESIÓN (PWR).	134
7.6.- REACTOR DE ALTA TEMPERATURA REFRIGERADO POR GAS (HTGR)	154
CAPÍTULO 8: GESTIÓN DE RESIDUOS RADIOACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD.	
.....	185
8.1.- RESIDUO RADIOACTIVO.....	185
CONCLUSIONES.....	211
BIBLIOGRAFÍA.....	213

RESUMEN

Vivimos inmersos en una sociedad cada vez más demandante de energía, tanto para uso doméstico como industrial.

De todos es conocida la escasez de recursos naturales producida tanto por el vertiginoso aumento de la población mundial como por el elevado consumo energético de la población actual.

Las reservas de combustibles fósiles están llegando a su fin. Se estima que la esperanza de vida de recursos naturales tan demandados como el carbón, el petróleo o el gas natural sea de tan sólo unos 20 ó 30 años. Llegará un momento en el que su extracción sea más costosa que el beneficio energético que aporta.

Se calcula que el pico del petróleo ya tuvo lugar hace algunos años, y desde este momento las reservas del mismo están cayendo a un ritmo vertiginoso.

Esta sobreexplotación de los combustibles fósiles está acelerando su agotamiento, además de producir emisiones contaminantes de la atmósfera.

Lluvia ácida, SMOG, efecto invernadero y cambio climático son algunas de las consecuencias de los gases contaminantes emitido a la atmósfera durante la extracción y el consumo de los combustibles fósiles.

Los medios de transporte son grandes consumidores de estos combustibles. En concreto, en el ámbito marítimo, los buques emiten a la atmósfera elevadas concentraciones de gases de efecto invernadero y sustancias contaminantes de la atmósfera durante el desarrollo de su actividad.

Por ambas razones, tanto por el agotamiento de los combustibles fósiles como por las elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos emitidos durante su combustión, nos vemos en la obligación de buscar nuevas fuentes de energía que

sustituyan al uso de estos combustibles. Debemos encontrar nuevas alternativas a las tradicionales para la propulsión de los buques.

Si bien es cierto que a día de hoy hay numerosas investigaciones de innovadores sistemas que utilizan tanto las energías renovables como nuevos diseños de propulsores más eficientes, la realidad es que aún no se ha encontrado ninguna solución para dejar de utilizar en su totalidad los derivados del petróleo. Tan sólo se limitan a modelos que reducen el consumo de los mismos, generando además menos gases contaminantes; sin embargo, aunque se mejora la problemática actual, no se elimina por completo el problema del agotamiento del petróleo ni de la emisión de contaminantes a la atmósfera.

En este sentido, la posibilidad de la utilización de la energía nuclear para la propulsión de buques, tanto por su enorme potencial como fuente de energía como por la nula emisión de gases de efecto invernadero cobra gran importancia.

Aunque la propulsión nuclear ya se ha venido utilizando desde hace tiempo fundamentalmente para la propulsión de buques militares, sobretodo submarinos, en la propulsión civil se ha limitado a unos cuantos buques y algún prototipo. Está claro que aún hay mucho camino que recorrer; sin embargo, los nuevos diseños y prototipos de reactores nucleares modulares y de cuarta generación, así como los novedosos y revolucionarios sistemas de tratamiento de los residuos lo convierten en una propuesta muy esperanzadora.

Durante el desarrollo del presente trabajo se abordará la energía nuclear como energía propulsora de buques, estudiando sus tipos, sus ventajas e inconvenientes, los tipos de reactores nucleares más utilizados hasta la fecha en la propulsión naval y las propuestas más innovadoras tanto en el diseño de los nuevos reactores de cuarta generación como en los más novedosos sistemas de gestión de residuos nucleares.

ABSTRACT

We live immersed in a society that increasingly demands energy, both for domestic and industrial use.

The lack of natural resources is known for everybody, produced both by the vertiginous increase of the world population and by the high energy consumption of the current population.

Fossil fuel reserves are coming to an end. It is estimated that the life expectancy of natural resources such demanded as coal, oil or natural gas is only about 20 or 30 years. There will come a time when its extraction will be more expensive than the energy benefit it brings.

It is estimated that the oil peak already took place some years ago, and from this moment the reserves of it are falling at a dizzying rythm.

This overexploitation of fossil fuels is accelerating its depletion, in addition to produce polluting emissions to the atmosphere.

Acid rain, SMOG, greenhouse effect and climate change are some of the consequences of the polluting gases emitted into the atmosphere during the extraction and consumption of fossil fuels.

The means of transport are large consumers of these fuels. Specifically, in the maritime field, ships emit into the atmosphere high concentrations of greenhouse gases and pollutants in the atmosphere during their activity.

For those reasons, both the depletion of fossil fuels and the high concentrations of air pollutants emitted during their combustion, we are forced to look for new sources of energy to replace the use of these fuels. We must find new alternatives to the traditional ones for the propulsion of ships.

While it is true that today there are some investigations of innovative systems that use both renewable energies and new designs of more efficient propellants, the reality is that no solution has yet been found to completely stop using the

derivatives of the Petroleum. They are limited to models that reduce their consumption, generating also less polluting gases; however, although the current problem is being improved, the problem of the depletion of oil and the emission of pollutants into the atmosphere is not completely eliminated.

In this sense, the possibility of the use of nuclear energy for the propulsion of ships, both for its enormous potential as an energy source and for the non-emission of greenhouse gases, takes great magnitude

Although nuclear propulsion has been used for a long time mainly for the propulsion of military ships, especially submarines, civil propulsion has been limited to a few ships and some prototypes. It is clear that there is still a long way to go; however, the new designs and prototypes of modular and fourth generation nuclear reactors, as well as the innovative and revolutionary waste treatment systems, make it a very hopeful proposal.

During the development of this work, nuclear energy will be approached as a propulsive energy of ships, studying their types, their advantages and disadvantages, the types of nuclear reactors most used to date in naval propulsion and the most innovative proposals in the design of the new fourth-generation reactors as well as the newest nuclear waste management systems.

PALABRAS CLAVE:

Contaminación atmosférica, efecto invernadero, cambio climático, combustibles fósiles, energías renovables, reactor nuclear, fisión nuclear, fusión nuclear, residuos radioactivos.

KEYWORDS:

Atmospheric pollution, greenhouse effect, climate change, fossil fuels, renewable energy, nuclear reactor, Nuclear fission, nuclear fusion, radioactive waste.

INTRODUCCIÓN

No podemos obviar el hecho de que el clima global está siendo alterado de manera significativa en los últimos tiempos, como consecuencia del incremento de concentraciones de gases de efecto invernadero (fundamentalmente CO₂) en la atmósfera terrestre.

Algunos de los fenómenos asociados al cambio climático son la desertización, las sequías, la deforestación, las inundaciones o la fusión de los casquetes polares, lo que conllevará a la alteración y destrucción de la biodiversidad.

Además de provocar el calentamiento global, los gases de efecto invernadero también son responsables de la destrucción de la capa de ozono, capa que nos protege de la acción letal de los rayos ultravioletas del Sol, de la denominada lluvia ácida que destruye bosques, ríos y lagos, y de las partículas en suspensión que tan perjudiciales resultan para la salud del ser humano.

El incremento de concentración de estos gases en la atmósfera se debe principalmente al uso intensivo de combustibles fósiles en las actividades industriales y en el transporte. El desarrollo socioeconómico de las últimas décadas se ha fundamentado en una incesante actividad industrial que ha ignorado la conservación del entorno natural, con una explotación ilimitada de recursos y el beneficio como único criterio de la buena marcha económica.

En el sector del transporte marítimo, los motores de barcos convencionales que queman fuel oil o gas oil emiten altas concentraciones de sustancias nocivas, incluyendo metales pesados, hidrocarburos y azufre, así como materia particulada cancerosa. Se cree que hasta la mitad de la contaminación del aire relacionada con la materia particulada en zonas costeras, ríos y puertos proviene de la emisión de

los buques. El combustible diésel marino es 2700 veces más contaminante que el diésel de las carreteras.

Teniendo en cuenta que el transporte marítimo es responsable de más de la quinta parte del consumo mundial de combustible, es fácil ver que los contaminantes de los barcos afectan tanto al clima del planeta como a la salud de las personas, especialmente de aquellas que viven en zonas costeras. Hay que tener en cuenta que más del 70% del tráfico marítimo se produce dentro del límite de 250 millas de la costa.

Cada vez hay mayor interés y preocupación por la salud del medio ambiente, principalmente en lo referente a la emisión de gases contaminantes provenientes de la actividad humana. El aumento de la conciencia respecto al peligro que ocasionan las emisiones de gases nocivos junto con las restricciones cada vez más estrictas impuestas por las principales organizaciones, ha traído consigo la necesidad de tomar medidas encaminadas a revertir esta situación, mejorando la eficiencia de las instalaciones.

Como respuesta a todo esto, se han puesto en marcha una serie de compromisos gubernamentales, basados en la idea de un desarrollo sostenible, compatible con una explotación racional de los recursos del planeta que sea capaz de preservar el medio ambiente. En estos compromisos han participado la mayor parte de las potencias mundiales y han sido ratificados a través de diversos Protocolos o Convenios, entre los cuales destaca como pionero el famoso Protocolo de Kyoto. El objetivo de todos ellos es lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático, y en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurando que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitiendo que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

La Organización Marítima Internacional (OMI) a través del Anexo VI de su convenio MARPOL, y la UE con la creación de la European Maritime Safety Agency (EMSA) y la disposición de nuevas normativas regulando la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, han puesto de manifiesto la creciente preocupación internacional por la contaminación medioambiental, trasladando también a este sector, la tendencia general de buscar alternativas a los combustibles fósiles con la utilización de energías renovables.

Los países de la UE decidieron en 2007 acelerar la reducción de emisiones responsables del cambio climático. Se pactó disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2020 en un 20% por debajo de los niveles de 1990, e incrementar la cuota de fuentes de energías renovables en el cómputo global de energía a un 20%. También se propuso que los países desarrollados deberían reducir sus emisiones en un 60% para el año 2050.

Sin embargo, en el sector marítimo, un estudio de la Comisión Europea revela que, a pesar de todas estas medidas, se espera que para el año 2020, las emisiones de dióxidos de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas en suspensión, procedentes de los buques que navegan en áreas de la UE, se eleven con respecto a los niveles del año 2000 en un 40%, 45% y 55% respectivamente. Esto ha conducido a una revisión del Anexo VI de MARPOL con la intención de establecer limitaciones más severas a las emisiones a la atmósfera desde los buques.

A esta preocupación internacional por las emisiones de gases contaminantes desde los buques, se ha sumado el incremento imparable del precio del petróleo junto con la certeza del agotamiento del mismo. Debemos buscar desesperadamente la implantación de nuevas alternativas a los combustibles derivados del petróleo.

A lo largo del desarrollo del presente trabajo se hará un recorrido sobre las diferentes alternativas a los derivados del petróleo para la propulsión de los buques, tanto reales como prototipos. Entre ellas, se hablará del empleo del biodiesel, el aprovechamiento de las energías eólica y solar, el empleo de las pilas de combustible, el hidrógeno, mejoras estructurales, diferentes propulsores, etc.

Puesto que todas estas alternativas tan sólo contribuyen a reducir el empleo del petróleo, pero no a sustituirle completamente en la propulsión de buques, el grueso del trabajo versará sobre la aplicación de la energía nuclear para la propulsión de los buques, por considerarse una de las pocas opciones que podrían sustituir en su totalidad al empleo de los derivados del petróleo en la propulsión marina.

CAPÍTULO 1: EL TRANSPORTE MARÍTIMO: EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y SU IMPACTO AMBIENTAL. NORMATIVA SOBRE EMISIONES ATMOSFÉRICAS.

1.1.- CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y CAMBIO CLIMÁTICO.

1.1.1.- CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.

Por contaminación atmosférica entendemos la presencia en la atmósfera de sustancias nocivas en una cantidad tal que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y los demás seres vivos.



Imagen 1: Contaminación atmosférica. Fuente: www.renovablesverdes.com

Aunque puede ocurrir por causas naturales, como las erupciones volcánicas, los incendios forestales no provocados o la actividad de algunos seres vivos, la mayor parte de la contaminación actual (la más constante y dañina) se debe a las actividades del ser humano, sobre todo a los procesos industriales y a la quema de combustibles fósiles.



Imágenes 2 y 3: Contaminación atmosférica causada por la actividad humana. Fuentes: noticiasdecruceiros.com y Lifeder.com.

1.1.2.- CAMBIO CLIMÁTICO.

También conocido como “cambio global en el medio ambiente”, se refiere a la variación del clima de nuestro planeta generado por el efecto invernadero debido, fundamentalmente, a la acción del ser humano. A tal efecto, debemos resaltar que la temperatura media de la Tierra que ha crecido unos 0,6º C en los últimos 130 años.

Dada la enorme complejidad de los factores que afectan al clima es muy difícil saber si este ascenso de temperatura es debido a factores naturales o artificiales, aunque se establece una relación directa entre el incremento en la temperatura media del planeta y el aumento de las concentraciones de gases con efecto invernadero.

Por tanto, podemos afirmar que el hombre se ha convertido en uno de los agentes climáticos, mediante la deforestación de bosques para convertirlo en tierras de cultivo y pastoreo, la sobreexplotación de los recursos naturales y la emisión de gases de efecto invernadero, como CO₂ en fábricas y medios de transporte y metano en granjas de ganadería intensiva y arrozales, entre otros.

Actualmente las emisiones se han incrementado hasta tal nivel que parece difícil que se reduzcan a corto y medio plazo, por las implicaciones técnicas y económicas de las actividades involucradas. La alta demanda de energía por parte de los países desarrollados es la principal causa del calentamiento global, debido a que sus emisiones contaminantes son las mayores del planeta. Esta demanda de energía hace que cada vez más se extraigan y consuman los recursos energéticos como el petróleo, el carbón o el gas natural.

Los principales procesos asociados al cambio climático son la intensificación del efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono, la lluvia ácida y la pérdida de la biodiversidad.

En resumen, el cambio climático es una consecuencia del calentamiento global, provocado a su vez por el efecto invernadero.





Imagen 4: Cambio climático. Fuente: climaticocambio.com

1.1.2.1.- El efecto invernadero.

Este término se aplica al papel que juega la atmósfera en el calentamiento de la superficie terrestre. Gracias a algunos gases atmosféricos la temperatura media en la Tierra es de unos 15º C, y si la atmósfera no existiera sería de unos -18º C. Por lo tanto, el efecto invernadero hace que la temperatura media de la superficie de la Tierra sea 33º C mayor que la que tendría si no existieran gases con este efecto en la atmósfera.

Por lo tanto, este efecto es beneficioso y necesario, ya que posibilita la vida en la Tierra. Sin embargo, en la actualidad ha sido incrementado por factores antrópicos, es decir, debidos a la actividad humana.

El efecto invernadero que se origina de forma natural está compuesto en alrededor del 60 al 70% por vapor de agua. Después de él son importantes, por este orden, el dióxido de carbono, el metano, el ozono y los óxidos de nitrógeno.

En el último siglo la concentración de anhídrido carbónico y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera ha ido creciendo constantemente debido a la actividad humana y en los últimos decenios, por el uso masivo de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural, para obtener energía y por el uso de clorofluorcarbonados (CFC's).

Los gases con mayor influencia en el efecto invernadero son los siguientes:

GASES	ACCIÓN RELATIVA	CONTRIBUCIÓN REAL
CO2	1 (referencia)	76%
CFCs	15.000	5%
CH4	25	13%
N2O	230	6%

Imagen 5: Tabla concentración de gases de efecto invernadero. Fuente: propia.

Como se indica en la columna de acción relativa, un gramo de CFC produce un efecto invernadero 15.000 veces mayor que un gramo de CO₂, pero como la cantidad de CO₂ es mucho mayor que la del resto de los gases, la contribución real al efecto invernadero es la que señala la columna de la derecha. Otros gases como el oxígeno y el nitrógeno, aunque se encuentran en proporciones mucho mayores, no son capaces de generar efecto invernadero

Los efectos de este fenómeno no están comprobados, pero se estima que produciría el deshielo de las zonas polares, lo que subiría el nivel medio de los mares, cambiaría el clima global y regional, aumentaría los índices de mortalidad debido a inundaciones, tormentas, sequías y olas de calor, falta de agua potable, alteraría la vegetación natural y las cosechas; todo ello afectando enormemente a la civilización humana.

Se predice la extinción de animales y plantas, ya que los hábitats cambiarán tan rápido que muchas especies no se podrán adaptar a tiempo.

La Organización Mundial de la Salud ha advertido que la salud de millones de personas podría verse amenazada por el aumento de la malaria, la desnutrición y las enfermedades transmitidas por el agua. España, por su situación geográfica y características socioeconómicas, es muy vulnerable al cambio climático.

En definitiva, el cambio climático no es un fenómeno sólo ambiental sino de profundas consecuencias económicas y sociales. Los países más pobres, que están

peor preparados para enfrentar cambios rápidos, serán los que sufrirán las peores consecuencias.

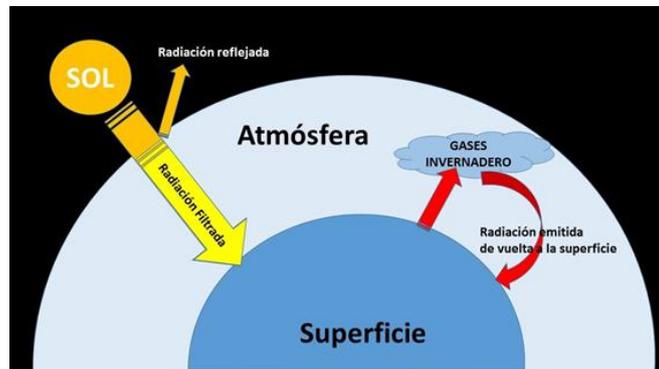


Imagen 6: Esquema sobre el efecto invernadero. Fuente: dciencia.es.

1.1.2.2.- Reducción del ozono.

El ozono es un gas que existe de forma natural en la atmósfera y que presenta su máximo nivel de concentración en la llamada capa de ozono de la estratosfera. Cuando se encuentra próximo al nivel de la corteza terrestre (ozono troposférico) es muy contaminante, contribuye a la formación de la humareda fotoquímica y de la lluvia ácida. Pero en las capas altas de la atmósfera, entre unos 15 y 50 km sobre el nivel de la superficie terrestre, forma la capa que protege a la Tierra de los letales rayos ultravioletas del Sol.

La medición de la reducción de la capa de ozono en la Antártica ha certificado la existencia de un agujero en la capa de ozono en aquella latitud que crece de forma continua. En el polo norte se prevé que puede abrirse un nuevo agujero en la capa de ozono, y también se han comprobado reducciones significativas en el hemisferio norte sobre los países más industrializados del mundo.

Algunos investigadores han calculado un descenso del 4% en el total del ozono entre 1.980 y 1.985, además, el descenso ha sido dos veces más rápido de lo explicable por la suma de todos los procesos conocidos hasta hoy: de los CFCS hasta el óxido de nitrógeno, pasando por la actividad solar.

El desgaste grave de la capa de ozono traerá consecuencias negativas debidas a la menor absorción de los rayos ultravioletas, lo que influye en la salud del hombre:

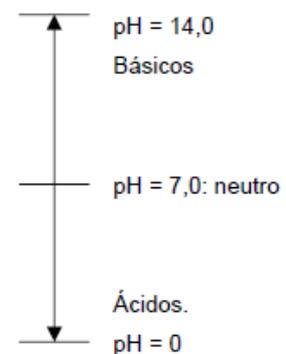
provocará el aumento de los casos de melanomas, cáncer de piel, cataratas oculares, supresión del sistema inmunitario en humanos y en otras especies. También afectará a los cultivos sensibles a la radiación ultravioleta, al ecosistema de los océanos y a la degradación de materiales polímeros.



Imagen 7: Capa de ozono. Fuente: rpp.pe/ciencia.

1.1.2.3.- La lluvia ácida.

El término acidez se refiere a un cierto valor del pH de una sustancia. El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno y está tabulado entre 0 y 14, por lo que un pH = 7,0 es neutro, los valores mayores al valor neutro se conocen como básicos y los menores como ácidos, como se muestra en el diagrama de la derecha.



Según el esquema anterior, es posible ver que mientras el pH de una sustancia es más cercano a 0 más ácida será dicha sustancia. Una sustancia es ácida si tiene ciertas características que la definen como tal: tener un sabor agrio, colorear de rojo el tornasol (que es un tinte vegetal) y reaccionar con ciertos metales desprendiendo hidrógeno. Mientras más ácida sea la sustancia mayor concentración de iones hidrógeno tendrá.

Una vez entendido el concepto de acidez, estamos en condiciones de definir la lluvia ácida.

Entendemos la lluvia ácida como la precipitación, normalmente en forma de lluvia, pero también en forma de nieve, niebla o rocío, que presenta un pH del agua inferior a 5,65, o sea, más ácido que el del agua pura, que es alrededor de 6,5. En lugares contaminados por ácido sulfúrico y ácido nítrico el pH de la lluvia varía entre 5 y 3, lo que implica la deposición de sustancias desde la atmósfera durante la precipitación hacia bosques, lagos, edificios, suelo, monumentos. Los contaminantes pueden depositarse también en forma seca, como gas o como pequeñas partículas, lo que se conoce como deposición.

La lluvia ácida es ocasionada principalmente por la quema de combustibles fósiles, liberando principalmente dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), siendo las principales fuentes emisoras de estos contaminantes las centrales térmicas. Estos contaminantes son liberados al quemar carbón y petróleo cuando se usan como combustible para producir calor o movimiento (motores de ciclos Otto y Diesel).

Cuando estos compuestos entran en contacto con la atmósfera, se convierten en ácidos muy contaminantes que corroen bosques, acidifican las aguas de los ríos y lagos, etc.

Estas precipitaciones también pueden darse en forma de hielo o nieve.



Imagen 8: Lluvia ácida. Fuente: Wikipedia.

1.2.- EMISIONES ATMOSFÉRICAS ORIGINADAS POR LA ACTIVIDAD DEL TRANSPORTE MARÍTIMO Y SU IMPACTO AMBIENTAL.

1.2.1.- PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

En la siguiente tabla se muestran los principales contaminantes atmosféricos, así como la fuente que los origina y algunos de los efectos que producen.

CLASE	COMPUESTO	FUENTE	EFFECTOS
Derivados del azufre	SO ₂	Industria, combustión combustibles fósiles.	
	SO ₃		
	SH ₂	Principalmente natural; también papeleras y refinerías.	
	SF ₆	Equipos eléctricos	E. Invernadero.
Derivados del carbono	CO ₂	Combustión combustibles fósiles, deforestación, erupciones.	Efecto invernadero (el que más participa en el calentamiento global).
	CO	Combustión materia orgánica, uso combustibles fósiles.	Mayor contaminante del aire.
	CH ₄	Producción arroz, ganado, basurales, quema leña.	Efecto invernadero
Halógenos	CFC	Refrigeración, propelentes.	Destrucción capa ozono
	Halocarbonos	Refrigeración, propelentes, extintores incendio.	
	HCl	Incineradores	Muy corrosivo y muy tóxico.
	PVC		
	PCB		
Derivados del nitrógeno	N ₂ O	Suelos, quema materia orgánica, uso combustibles fósiles	Efecto invernadero, destruye capa ozono, fuente del NO
	NO	Suelos, fertilizantes, quema combustibles	

	fósiles.		
Ozono	NO2	Gases de escape.	Polución del aire. Junto con vapor de agua de la atmósfera, forma NO3H, provocando lluvia ácida.
	O3	De forma natural y al entrar en contacto ciertos compuestos con la atmósfera.	
HC	Gasolina, benceno y otros	Combustión combustibles, industria del lavado.	
Partículas	...	Aerosoles, tormentas, combustión.	
Plomo	...	Tóxico para los seres vivos.	
Radiactividad	...	Centrales y explosiones nucleares.	

Imagen 9: Tabla principales contaminantes atmosféricos. Fuente: propia.

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), una **emisión atmosférica contaminante** es cualquiera constituida por alguno de los siguientes compuestos:

- Dióxido de carbono (CO₂);
- Metano (CH₄);
- Óxido nitroso (N₂O);
- Hidrofluorocarbonos (HFC);
- Fluorocarbonos (PFC);
- Hexafluoruro de azufre (SF₆);
- Óxidos de nitrógeno (NO_x);
- Compuestos orgánicos volátiles sin metano (NMVOC);
- Compuestos orgánicos volátiles (VOC);
- Monóxido de carbono (CO);
- Material en partículas (PM) y
- Óxidos de azufre (SO_x).

1.2.2.- PRINCIPALES PRODUCTORES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOS BUQUES.

Debido a la actividad comercial del transporte marítimo se acumulan en la atmósfera sustancias contaminantes, sobretodo óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, debido, fundamentalmente, a:

- **Gases de escape:** Emitidos por la maquinaria principal, las calderas y maquinaria de generación auxiliar, así como los gases liberados en las incineradoras.

Las emisiones procedentes de los gases de escape de los buques son potencialmente dañinas para la salud humana y pueden causar lluvia ácida, además de contribuir al calentamiento global.

- **Gases derivados del transporte de crudo:** Gases y compuestos orgánicos volátiles emitidos durante las operaciones de transporte de crudo.
- **Gases derivados de la utilización de productos refrigerantes:** Emitidos en la operación y mantenimiento de equipos refrigerantes y de aire acondicionado pertenecientes a cualquier tipo de buque, así como los emitidos por los sistemas de frío de contenedores refrigerados.



Imagen 10: Contaminación atmosférica ocasionada por los buques. Fuente: ftp.greatcircle.co

1.2.2.1.- Motores de combustión interna.

Las emisiones de los motores diesel marinos se componen fundamentalmente de oxígeno, nitrógeno, agua y dióxido de carbono por la cantidad y los óxidos de nitrógeno y de azufre junto al dióxido de carbono por afectar fuertemente a la salud humana y al medio ambiente, a pesar de que los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre, junto a los hidrocarburos, monóxido de carbono y material particulado suman sólo un 0,25% promedio del total de las emisiones.

Óxidos de nitrógeno (NOX).

En una combustión en un motor diesel, a mayor temperatura, mayor es la velocidad de producción de NO y, por lo tanto, más se produce. En cambio el NO₂ se ve favorecido a temperaturas más bajas, por lo que a temperaturas normales de combustión se forma una cantidad apreciable de NO y cantidades despreciables de NO₂, cuya formación se hace cada vez menos probable sobre los 727° C. Lo que indica que lo que se debe evitar es la formación de NO, que es un 95% de los NOX emitidos. Para esto existen 2 caminos fundamentales: evitar las altas temperaturas y el tiempo de permanencia de la mezcla en la alta temperatura.

Óxidos de azufre (SOX).

Las 2 principales fuentes de óxidos de azufre son la combustión del carbón y del petróleo, este último conteniendo cantidades variables de azufre dependiendo del derivado del petróleo de que se trate y de dónde provenga.

Las emisiones producto del uso del carbón como combustible son importantes pero tienden a disminuir y, debido a que este producto ya no se utiliza en los barcos.

De las emisiones de SOX, un 95% son SO₂ y el restante 5% son SO₃.

Monóxido de carbono (CO).

En motores diesel de carrera larga es función de la insuficiente cantidad de aire, esto es una relación pobre aire – combustible, y también es función de temperaturas de combustión bajas. Las emisiones de este gas son pequeñas debido a la alta relación aire – combustible.

Dióxido de carbono (CO₂).

Depende del porcentaje de carbono que contienen los combustibles y del consumo del motor, el carbono es entre un 83 y un 87% del total de compuestos del petróleo.

Hidrocarburos (HC).

La cantidad emitida depende del tipo de combustible. Su formación en la cámara de combustión depende principalmente de la combustión incompleta debido al exceso de aire, a una temperatura local baja y también a que la mezcla aire – combustible es baja y en menor medida a la evaporación de combustible y lubricante no quemado; esta evaporación es mayor en combustibles livianos (LFO) que en los pesados (HFO).

En general las emisiones de hidrocarburos son bajas en los motores diesel al compararlos con otras fuentes como resultado de la buena eficiencia de estas máquinas.

Material particulado.

Se origina por la combustión de combustible y de aceite con alto índice de cantidad de cenizas, así como también por depósitos en la cámara de combustión y en el sistema de gases de escape.

El material particulado que más se produce es el hollín, que es provocado en las zonas ricas en combustible como lo es la salida del inyector. Una parte de este hollín sobrevive al proceso de la combustión y no es oxidado, absorbiendo a los hidrocarburos que provienen del combustible y del lubricante. Las partículas además crecen por la oxidación de algo de azufre del combustible además de la adición de agua. Los combustibles pesados (HFO) que se usan en motores marinos contribuyen considerablemente con la emisión de partículas, típicamente más del 50% de la masa de partículas consiste de componentes de cenizas originados por estos combustibles.



Imagen 11: Motor de combustión interna alternativo de buque. Fuente: ingenieromarinero.com

1.2.2.2.- Calderas.

Proceso en el que se producen, principalmente, partículas sólidas, líquidas y gases más o menos tóxicos. Las emisiones procedentes de una caldera dependen fundamentalmente del tipo de combustible que se queme.

Las emisiones de las calderas que funcionan con combustibles fósiles (gas y petróleo) son importantes y muy similares a las que producen los motores de combustión interna. Estas emisiones pueden ser reducidas a través de una construcción más efectiva de quemadores y de las mismas calderas y por el uso de sistemas de control precisos.



Imagen 12: Caldera buque Leisure World. Fuente: <http://blogs.grupojoly.com>

1.2.2.3.- Incineradores.

El incinerador es una planta industrial en la que diversos tipos de residuos producidos a bordo son eliminados mediante la combustión. El proceso puede ser con o sin sistema de recuperación de calor; para motivos de la reducción de las emisiones es mejor que exista esta recuperación.

En un buque el incinerador quema desperdicios del combustible producidos a bordo, como líquido de sentinas, fango, combustible limpio y también sólidos inflamables tales como desperdicios de ropa, derivados de madera, papel, fango duro.

La quema de estos residuos produce más sustancias contaminantes peligrosas como metales pesados y ácidos por unidad de energía generada que cualquier otro combustible. Para no generar residuos peligrosos, en especial para determinado grupo de éstos (cianuros sólidos, líquidos orgánicos no halogenados, entre otros) la incineración se debe realizar a altas temperaturas, esto es a unos 900° C y debe contar además con unas cámaras de postcombustión que trabajen entre 1.000 y 1.100° C, con técnicas de lavado de gases. Las cámaras de postcombustión controlan la emisión de subproductos orgánicos no quemados (derivados del carbono) y los lavadores de gases les retiran la materia que quede en forma de partículas, gases ácidos y compuestos orgánicos residuales. Los gases que escapan a la atmósfera tienen una temperatura que está alrededor de los 400° C. En los incineradores de buques se produce la combustión por la inyección de combustible, que puede ir desde diesel hasta un combustible pesado (incluso algunos incineradores pueden ser operados con ambos combustibles), y por efecto de un electrodo de ignición, como las calderas.

Antes de quemar los desechos del combustible, éste se debe calentar en el tanque en que es almacenado con el fin de evaporar el agua que contiene, para que sean más fácilmente controlada la temperatura y la presión del gas de escape. También se remueve la suciedad desde el combustible haciéndolo pasar por un estrangulador antes de que ingrese al incinerador. Sustancias que se desean quemar como el aceite lubricante, que no es combustible, son mezcladas con los

desechos del petróleo, sin exceder el 10% de éste, para que este material incombustible sea disminuido en algunos grados. El Anexo VI de MARPOL 73/78 ha reglado esto.

La ventaja de los incineradores es que reducen considerablemente el volumen de residuos y se logra una recuperación de energía que se puede destinar a producción de electricidad o de calefacción. Las desventajas son que generan considerables malos olores y partículas en suspensión, fundamentalmente cenizas, además de otros contaminantes, dependiendo de la concentración y tipo del petróleo quemado.



Imagen 13: Incineradora de un buque. Fuente: NauticExpo.

1.2.2.4.- Combustibles marinos.

El combustible se usa en los buques, fundamentalmente, en los motores de combustión interna (principales y auxiliares), calderas e incineradores. En la actualidad el más utilizado en la industria naviera es el petróleo y sus derivados con cerca del 100%.

A modo de ejemplo se entrega la composición de cierto petróleo, la que varía de acuerdo a factores como la procedencia y el grado de refinación que tenga. Si es residual tendrá mayores porcentajes de azufre y de metales.

ELEMENTOS	PORCENTAJE
Carbono	85 – 87%
Hidrógeno	11- 15%
Azufre	0,1 – 6%
Oxígeno	0 – 0.5 %
Nitrógeno	0 – 0.7%
Metales	0 – 0.1 %

Imagen 14: Composición elemental del petróleo. Fuente: propia.

En cuanto a las características del petróleo, en él podemos encontrar: residuos carbonosos, agua y sedimentos, cenizas, sodio, vanadio y azufre, entre otros, dependiendo de su procedencia.

El Anexo VI del MARPOL 73/78 en su regulación 14 limita el contenido de azufre para los combustibles usados en buques, lo que provoca que antes de utilizar un cierto combustible se convierta en una necesidad conocer el porcentaje de azufre de él. Es por esto que el uso de combustibles con un alto índice de azufre es cada vez menor, lo que a su vez incrementa los costos operacionales en combustible debido al mayor precio de aquellos de mejor calidad con bajo índice de azufre. Los combustibles bajos en cantidad de azufre son, normalmente, de viscosidad baja; es por esto que se deben planificar cuidadosamente los niveles de mantenimiento ya que este nuevo combustible, menor en contenido de azufre, tendrá menor poder calorífico.

Clasificación de los combustibles marinos:

- Gas oil: pertenece a los “destilados puros”. Se trata de combustibles con un contenido relativamente bajo de azufre y propiedades de encendido parcialmente buenas.
- Marine diesel oil: destilados o carburantes mixtos. Se distinguen del anterior por valores, en general, más altos de la viscosidad, la densidad y el contenido de azufre, así como también por unas tolerancias notablemente mayores.
- Light marine fuel oil (LMFO) y marine fuel oil (MFO): son los “aceites pesados”. Son compuestos en esencia por aceites residuales.



Imagen 15: Procedimiento de toma de búnker. Fuente: MundoMarítimo.



Imagen 16: Toma de combustible en puerto. Fuente: ENAUSA.

1.2.2.5.- Equipos de refrigeración y de aire acondicionado.

En los equipos de refrigeración y de aire acondicionado se emplean fluidos que se conocen como refrigerantes, los que tienen como objetivo absorber calor, en el primer caso, o ser un agente enfriador, en el segundo. Algunas aplicaciones de estos fluidos en el área naval son trabajar como enfriadores de agua, solventes limpiadores de cañerías, en sistemas de aire acondicionado, refrigeración y congelación de alimentos.

Refrigerantes como el R-11, R-12, R-22 y el R-114 son los más usados en sistemas de aire acondicionado y de refrigeración en el área naval. El R-12 y el R-22 son usados en compresores recíprocos para los dos sistemas: refrigeración y aire acondicionado, mientras que el R-11 y el R-114 son usados en compresores centrífugos para plantas de aire acondicionado. Otros refrigerantes son el amoníaco, hidrocarburos (propano, etano, etileno, etcétera), dióxido de carbono, aire (en el acondicionamiento de aire de aviones) e incluso agua (en aplicaciones arriba del punto de congelación).

Para seleccionar el refrigerante a utilizar se deben tener en cuenta una serie de características como la volatilidad, la transferencia de calor, su estabilidad, punto de congelación, punto de evaporación, puntos de condensación y vaporización con las respectivas presiones, toxicidad y los efectos ambientales que pueda ocasionar. Es en este sentido que ha surgido preocupación por el uso del refrigerante más utilizado, los clorofluorcarbonos o CFC, que ocupan más del 90% del mercado en Estados Unidos y son más conocidos con el nombre comercial de Freón, siendo algunos de ellos el R-11, R-12, R-502, R-113, R-115, R-114, todos los que una vez liberados van a la estratosfera destruyendo a la capa de ozono y exponiendo a la Tierra a grandes radiaciones ultravioletas.

Para revertir los daños provocados por los CFC se ha ratificado el Protocolo de Montreal, tratado que impuso estrictos límites a la fabricación de estos compuestos y que presionó a que se diseñen sistemas que usen hidroclorofluorcarbonos (HCFC) o hidrofluorcarbonos (HFC), como el R-134 que se espera sustituya al R-12, u otros, como el fluorcarbono E-134, que antes no eran considerados por su mayor costo

frente a los CFC. Los HCFC tienen un efecto menos dañino hacia la capa de ozono, cerca del 5% de la capacidad de destrucción de los CFC, mientras que el E-134 no tiene este efecto. Es por esto que los HCFC están en una etapa en que pueden ser utilizados, pero hasta ciertas fechas, por ejemplo, de acuerdo al Protocolo de Montreal hasta el año 2.030 y de acuerdo al Anexo VI de MARPOL 73/78 hasta el 1 de enero del año 2.020 después de lo cual deberán ser reemplazados por los HFC o por los fluorcarbonos.

Otra posibilidad ante las nuevas normativas internacionales es el amoníaco, refrigerante muy utilizado durante comienzos del siglo XX y que se dejó de utilizar por ser muy tóxico, pero tiene mayor detectabilidad en el caso de una fuga y no daña a la capa de ozono.



Imagen 17: Planta de refrigeración de aire acondicionado. Fuente: ingmaritima.blogspot.com.es

1.2.2.6.- Equipos extintores de incendios.

En un buque existen elementos portátiles y fijos contra incendio. Los fijos utilizan en su gran mayoría CO₂, mientras que los portátiles pueden funcionar a base de agua: agua pura; agua húmeda o agua liviana (espuma o AFFF), a base de polvo químico seco: fosfatomonoamonio; bicarbonato de potasio; cloruro sódico; bicarbonato de sodio; grafito o carbonato de sodio o a base de gas: dióxido de carbono; halón 1211 o halón 1311. En los extintores de polvo químico seco se utiliza como propelente un gas, que es generalmente nitrógeno o dióxido de carbono, en los de agua se utiliza como propelente aire comprimido y los de halón utilizan al nitrógeno con este fin.

Los halones tienen un enorme efecto contaminante por estar formados por bromo (Br), flúor (F) y carbono (C) con una enorme capacidad destructora del ozono.

Algunos halones son el 1311 (que es el bromotriclorometano, CF₃Br), el halón 1301 o el halón 1211.

En el Protocolo de Montreal se acordó que los halones no fueran usados después del año 2000, por lo que este compuesto está hoy día fuera de uso.



Imagen 18: Extintores. Fuente: diariodenautica.com

1.3.- IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA OCASIONADA POR LOS BUQUES.

1.3.1.- IMPACTO EN LA SALUD HUMANA.

Las emisiones atmosféricas derivadas de la actividad del transporte marítimo internacional contienen partículas de materia que son transportadas a regiones costeras urbanas, afectando negativamente a la salud humana, causando enfermedades respiratorias tales como bronquitis, asma, neumonía, trastornos cardio-respiratorios y cáncer de pulmón. En concreto, estas dos últimas son las causantes de un importante número de muertes prematuras y están directamente asociadas a las concentraciones de partículas de materia de menos de 2.5 µm.

1.3.2.- IMPACTO EN LOS ECOSISTEMAS NATURALES; ACIDIFICACIÓN Y EUTROFIZACIÓN.

Las emisiones de NOx y SOx emitidas a la atmósfera por la flota mercante mundial contribuyen a aumentar la concentración de nitrógeno y azufre en los ecosistemas naturales, las cuales por encima de ciertos límites críticos pueden causar la acidificación y eutrofización (acumulación de residuos orgánicos en el litoral marino o en un lago, laguna, embalse, etc., que causa la proliferación de ciertas algas) de los mismos, así como de los ríos y lagos. La biodiversidad se ve de igual forma amenazada debido a un aporte excesivo de nitrógeno a los ecosistemas.

1.3.3.- CONTAMINACIÓN POR OZONO TROPOSFÉRICO.

El ozono troposférico, a cuyo aumento contribuyen las emisiones atmosféricas de CO, VOC, CH₄ y NO_x, liberados a la atmósfera desde las chimeneas de los buques, entre otros, además de producir un aumento del efecto invernadero del planeta, puede repercutir de forma negativa en la salud de las personas, las cosechas agrícolas y causar daño a edificios.

1.4.- REGULACIÓN SOBRE EMISIONES ATMOSFÉRICAS. NORMATIVA.

1.4.1.- PROTOCOLOS INTERNACIONALES.

En el año 1972 se celebró en Estocolmo (Suecia) la Conferencia sobre el Medio Humano en la que se comenzaron a discutir temas de índole ambiental, en especial respecto al efecto invernadero y también sobre la lluvia ácida, aspecto en el que el gobierno sueco puso de manifiesto cómo los óxidos de azufre, vertidos al aire por las instalaciones industriales que quemaban combustibles fósiles situadas lejos de sus fronteras dañaban los ecosistemas del país nórdico al ser arrastrados por los vientos, transformándose en la atmósfera en ácido sulfúrico, y precipitar en el suelo y en las aguas interiores en forma de lluvia ácida.

Veinte años después se realizó en Río de Janeiro la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD), conocida comúnmente como Cumbre de Río o Cumbre de la Tierra. El objetivo de la Cumbre, a la que asistieron representantes de 172 países, fue el de establecer los problemas ambientales existentes y proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo. Se aprobaron cinco acuerdos, de los cuales interesan:

- **La Agenda 21:** es un programa de acción para lograr el desarrollo sostenible y afrontar las cuestiones ambientales y de desarrollo de forma integrada a escala mundial, nacional y local.
- **Convención Marco sobre el Cambio Climático:** es un acuerdo para estabilizar las concentraciones de gases causantes del efecto invernadero en la atmósfera, hasta unos valores que no interfieran en el sistema climático mundial. En 1997, en la tercera reunión de la Convención Marco sobre el Cambio Climático en Kioto, se aprobó el Protocolo que establecía que los países desarrollados debían reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 5,2% para el año 2012, respecto a las emisiones del año 1990, lo que sin ninguna duda fue el precursor del Anexo VI del MARPOL 73/78.

- **La Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono de 1985** sienta las bases para una coordinación mundial que reúne esfuerzos y provee cooperación científica e intercambio de información a nivel internacional.
- Destaca el **Protocolo de Montreal de 1987**, ya que es el primer acuerdo global de trabajo conjunto de todas las naciones para reducir la producción de los químicos que dañan la capa de ozono. Se firma el compromiso de todos los países para reducir el uso de CFC y detener la producción de halones en el año 2000. Como consecuencia de este Protocolo la producción de CFC en los países desarrollados cesó casi por completo a finales de 1995. Han existido una serie de enmiendas a este Protocolo en las que se añadieron otras sustancias reductoras del ozono y se debe eliminar los HCFC en el año 2040. El Anexo VI del MARPOL 73/78 ha tomado los gases contaminantes prohibidos por este Protocolo para incluirlos en él.
- El Convenio que regula los asuntos relacionados con la contaminación ocasionada por los buques es el **MARPOL 73/78**, Convenio adoptado por la Organización Marítima Internacional (OMI) en su afán de reducir los efectos nocivos que provocan los buques en sus faenas. Este Convenio Internacional cuenta con el **Anexo VI** sobre **“Regulaciones para la Prevención de la Contaminación Atmosférica por Buques”**, acordado el año 1997 y que entró en vigor el año 2005.

1.4.2.- ANEXO VI DEL MARPOL.

La contaminación atmosférica produce un efecto acumulativo que contribuye a los problemas generales en la calidad del aire, afectando además al medio natural mediante la formación de la lluvia ácida.

En el Anexo VI del Convenio MARPOL, adoptado en 1997, se restringen los principales contaminantes atmosféricos contenidos en los gases de escape de los buques, en particular los óxidos de azufre (SO_x) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono.

En dicho Anexo también se regula la incineración a bordo, así como las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes de los buques tanque.

Tras la entrada en vigor del Anexo VI del Convenio MARPOL el 19 de mayo de 2005, el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC), en su 53º período de sesiones (julio de 2005), acordó revisarlo con el objeto de reducir sensiblemente los límites máximos de emisión a partir de las mejoras tecnológicas existentes y la experiencia adquirida a través de la implantación. Tras tres años de exámenes, el MEPC 58 (octubre de 2008) adoptó el Anexo VI revisado del Convenio MARPOL y el Código técnico conexo sobre los NOx 2008, que entraron en vigor el 1 de julio de 2010.

1.4.2.1- Anexo VI, revisado, del Convenio MARPOL.

Los principales cambios en el Anexo VI del Convenio MARPOL son la reducción progresiva de las emisiones de SOx, NOx y materia particulada a nivel mundial, y la creación de las zonas de control de las emisiones (ECA) con el fin de reducir aún más las emisiones de contaminantes atmosféricos en las zonas marítimas designadas.

En el marco del Anexo VI, revisado, del Convenio MARPOL, el límite máximo del contenido de azufre a nivel mundial se reducirá del actual 3,50% al 0,50%, con efectos a partir del 1 de enero de 2020, y con sujeción a un estudio de viabilidad que habrá de ultimarse a más tardar en 2018.

El MEPC 70 (Marine Environment Protection Committee, 70th sesión), celebrado en octubre de 2016 examinó una evaluación de la disponibilidad de fueloil para informar de la decisión que deben adoptar las Partes en el Anexo VI del Convenio MARPOL, y decidió que la norma de fueloil (el límite de 0,50% de contenido de azufre) deberá entrar en vigor el 1 de enero de 2020.

Los límites de SOx y materia particulada aplicables a las zonas marítimas designadas se redujeron, a partir del 1 de enero de 2015, a 0,10%.

También se incluye la reducción progresiva de las emisiones de NOx de los motores diésel marinos instalados en buques, con un límite de emisión del "Nivel II" para los

motores instalados en buques construidos el 1 de enero de 2011, o posteriormente, y un límite de emisión más estricto correspondiente al "Nivel III" para los motores instalados en buques construidos el 1 de enero 2016, o posteriormente, que naveguen en las ECA (zona de control de las emisiones de Norteamérica y zona de control de las emisiones del mar Caribe de los Estados Unidos). Los motores diésel marinos instalados en buques construidos el 1 de enero 1990, o posteriormente, pero antes del 1 de enero de 2000, deberán cumplir con los límites de emisión del "Nivel I" en caso de que una Administración haya certificado un método aprobado para ese motor.

El Código Técnico sobre los NOx, revisado, de 2008 incluye un nuevo capítulo que se basa en el planeamiento acordado para la regla de los motores existentes (anteriores a 2000), recogida en las disposiciones del Anexo VI del Convenio MARPOL, en virtud de las cuales se establece un método directo de medición y vigilancia, un procedimiento de certificación para los motores existentes y los ciclos de ensayo que han de aplicarse a los motores de nivel II y nivel III.

El MEPC 66 (abril de 2014), adoptó una serie de enmiendas a la regla 13 del Anexo VI del Convenio MARPOL con respecto a la fecha consignada en las normas relativas a los límites de emisión de NOx correspondientes al nivel III.

En las enmiendas se prevé que las normas relativas a los límites de emisión de NOx correspondientes al nivel III se aplicarán a un motor diésel marino instalado en un buque construido el 1 de enero de 2016, o posteriormente, que navegue en las zonas de control de las emisiones de Norteamérica o del mar Caribe de los Estados Unidos que están designadas para el control de las emisiones de NOx.

Además, las prescripciones correspondientes al nivel III se aplicarán a los motores diésel marinos instalados cuando naveguen en las zonas de control de las emisiones que puedan designarse en el futuro para el control de los NOx del nivel III. El nivel III se aplicaría a los buques que han sido construidos en la fecha de adopción de dicha zona de control de emisiones por el Comité de protección del medio marino, o

posteriormente, o en una fecha posterior que se especifique en la enmienda mediante la cual se designe la zona de control de las emisiones de NOx del nivel III.

Además, las prescripciones propias del nivel III no se aplican a un motor diésel marino instalado en un buque construido antes del 1 de enero 2021, de arqueo bruto inferior a 500 toneladas, de eslora igual o superior a 24 metros, que ha sido específicamente proyectado, y se utiliza exclusivamente, para fines recreativos

También se efectuaron revisiones de las reglas relativas a las sustancias que agotan la capa de ozono, los compuestos orgánicos volátiles (COV), la incineración, las instalaciones de recepción y la calidad del fueloil, a las cuales se añadieron reglas sobre la disponibilidad del fueloil.

Se espera que las disposiciones revisadas produzcan un notable beneficio para el medio atmosférico y la salud humana, especialmente para aquellas personas que viven en ciudades portuarias y comunidades costeras.

CAPÍTULO 2: PREVISIÓN DEL AGOTAMIENTO DEL PETRÓLEO.

2.1.- MODELO MATEMÁTICO DE HUBBERT. EL CÉNIT DEL PETRÓLEO.

Nuestra dependencia de energía fósil es abrumadora. Actualmente, el abastecimiento mundial de energía todavía está compuesto por más de un 80% de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), de los cuales cerca del 40% corresponde al petróleo. En cambio, las fuentes alternativas de energías renovables parecen todavía no estar disponibles para reemplazarlos, pues no constituyen ni el 4% del abastecimiento mundial de energía. Por lo tanto, estos datos parecen señalar una inevitable escasez mundial de energía que podría ocurrir demasiado pronto, con fatales consecuencias.

Es fácil ver que cuando la producción de petróleo disminuya progresivamente en el transcurso de este siglo, no habrá suficiente energía para hacer crecer la economía, con lo que entraremos en una crisis económica permanente, tal vez culminando en un colapso socio-económico en los países más dependientes de los combustibles fósiles.

El pico del petróleo (peak oil, en inglés) se refiere al alcance de su capacidad máxima de producción. Una vez sobrepasado este pico máximo la producción bajará progresivamente cada año hasta casi cero al fin de este siglo. Existen fuertes evidencias de que estamos cerca de ese pico de petróleo, o incluso puede ser que ya lo hayamos pasado.

2.1.1.- EL PICO DEL PETRÓLEO EN EEUU.

Marion King Hubbert (1903-1989) fue un geólogo petrolífero que trabajó en el laboratorio de investigaciones de Shell en Houston, Texas. En 1956 presentó un artículo ante el American Petroleum Institute en San Antonio, Texas, prediciendo el

pico de producción del petróleo en los EEUU alrededor de 1970. Como no podía ser de otra manera, fue fuertemente criticado y rechazado por sus colegas petroleros. Sin embargo, cuando llegó el año 1970, resultó que Hubbert tenía razón. Desde entonces, a pesar de los esfuerzos intensos para incrementarla, la producción de petróleo de los EEUU estaba bajando y a partir de 1993 las importaciones de petróleo de los EEUU superaron la extracción doméstica.

2.1.2.- EL MODELO MATEMÁTICO DE HUBBERT.

El modelo matemático de Hubbert fue diseñado para la predicción del nivel de extracción de petróleo a lo largo del tiempo. El modelo se basa en la teoría de que la extracción de un pozo petrolífero cualquiera sigue una curva con forma de campana de Gauss que refleja su producción, encontrándose su máximo productivo (cénit de producción) en su centro. Cuando la capacidad de extracción de un pozo alcanza ese punto, la extracción de cada barril de petróleo se hace progresivamente más cara, hasta que la producción deja de ser rentable al necesitarse gastar más cantidad de crudo que el que se obtiene de extraerlo, es decir cuando se necesita consumir el equivalente a un barril de petróleo o más, para obtener ese mismo barril de crudo del subsuelo. Esta teoría se extiende también a la producción nacional de los distintos países: si la curva de producción de un pozo siguiese una simple función gaussiana, la curva de producción de países enteros y, por extensión, la curva mundial, seguirían patrones similares.

Este modelo se basa en la producción histórica de crudo, las reservas disponibles, el consumo y la tecnología existente y predice la fecha de máxima producción para un campo petrolífero o, por extensión, para toda una región entera. El máximo de extracción es citado como el pico. Tras el pico la extracción entra en la fase de agotamiento. Se pueden identificar distintos estudios que pronostican el cénit de producción petrolífera en distintos años. Algunos de estos estudios consideran que el pico se ha alcanzado ya en el año 2006, mientras que otros los sitúan a mediados del siglo XXI. Sin embargo la mayoría de estudios parecen coincidir en que el cénit de producción se alcanzará entre el año 2030 y 2050 y el agotamiento definitivo del

petróleo sucederá entre principios y mediados del siglo XXII.

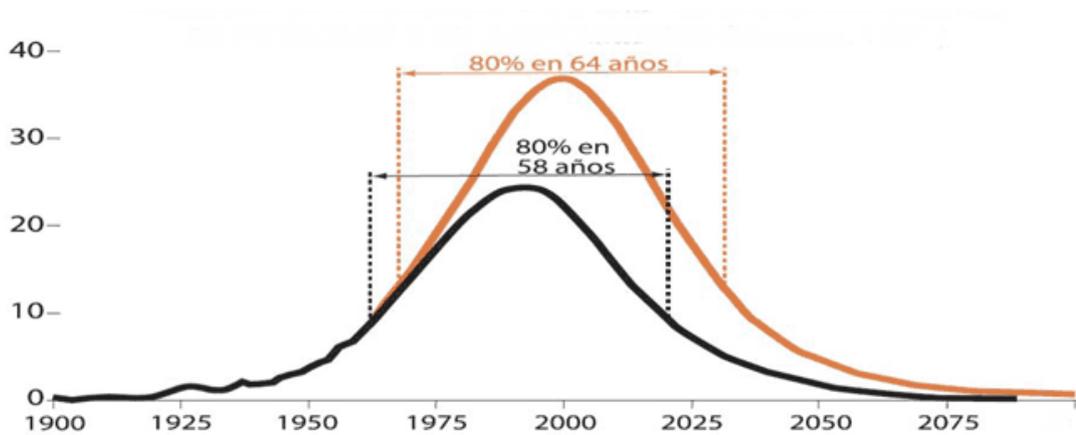


Imagen 19: Gráfica curva de Hubbert. Fuente: Scientific American

2.1.3.- EL PICO DEL PETRÓLEO MUNDIAL.

Además de predecir el pico del petróleo en los EEUU, Hubbert hizo cálculos del pico de petróleo mundial también. Sin embargo, no es fácil calcular este pico; el problema es que ya en los años 80 del siglo pasado los datos de producción de petróleo empezaron a ser secretos en muchos países y empresas petroleras, por el temor político y económico a que el fenómeno de peak oil sea revelado. Además, a partir de esta misma década las reservas oficiales de los países de la OPEP (Organización de Países y Exportadores de Petróleo) subieron de manera artificial son que hicieran nuevos hallazgos de petróleo. Fue un pacto para que los países individuales aumentaran artificialmente sus supuestas reservas para tener derecho a producir y exportar más petróleo. Desde entonces, las cifras oficiales ya no son fidedignas, mientras que las cifras reales son secretas. Para superar estos sospechosos datos, los geólogos petrolíferos estimaron los aumentos artificiales y los restaron de las cifras oficiales para deducir los datos reales de producción. Otras fuentes de datos incluyeron los datos de transporte, refinerías e importaciones de petróleo.

Hans Zandvliet realiza su propio cálculo del pico del petróleo mundial en base a los

datos de las emisiones de carbono fósil en el mundo, que discriminan entre los combustibles fósiles sólidos, líquidos y gaseosos. Así, las emisiones de carbono de líquidos fósiles son una buena representación de la producción de petróleo. Realizado el cálculo se llega al mismo resultado que las predicciones anteriores de Hubbert y otros expertos. En concreto, según el cálculo de Zandvliet, el pico de emisiones ocurrió en 2008, pudiéndose anticipar grandes disminuciones del petróleo a continuación.

Otro indicador de que estamos acercándonos al pico de petróleo es la historia de los descubrimientos de los campos de petróleo. Mediante un gráfico en el que se muestren los descubrimientos históricos de petróleo en el mundo se puede divisar la forma de una campana de Hubbert.

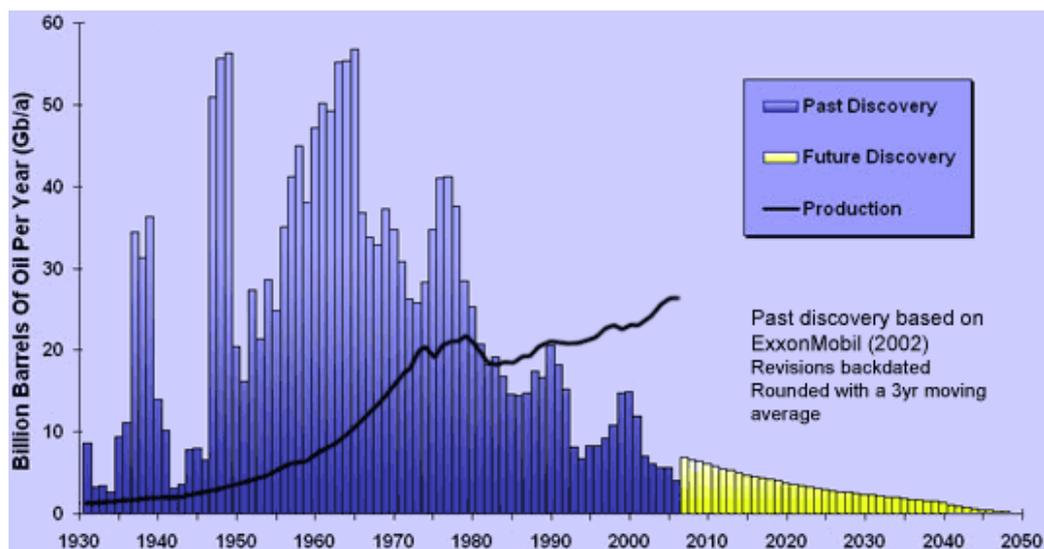


Imagen 20: Gráfico historia de los descubrimientos petrolíferos. Fuente: *El pico del petróleo y el destino de la humanidad*. Hans Zandvliet.

Tal y como señala el gráfico, el pico de descubrimientos ocurrió en los años 60 del siglo pasado, lo que significa que ya lo hemos pasado hace unos 50-60 años. Los descubrimientos actuales son mucho más modestos y ya no podemos esperar que revivan las décadas maravillosas del siglo pasado. Hoy día estamos consumiendo entre 4 y 6 barriles de petróleo al mismo tiempo que los petroleros están descubriendo un solo nuevo barril, con lo que se están agotando rápidamente las reservas conocidas.

Además, no se trata de hallazgos fáciles y baratos para explotar. Todavía existen enormes cantidades de petróleo que se puede extraer, pero no siempre vale la pena hacerlo. Si cuesta más energía extraer el petróleo que lo que se gana con el petróleo extraído, netamente se está perdiendo energía, y no vale la pena hacerlo.

Al inicio de los hallazgos de petróleo, las pequeñas torres de perforación fueron hechas de simplemente madera, las profundidades fueron no más que unos centenares de metros y el petróleo salió muy fácilmente. Sin embargo, estos campos ya se han agotado, y hoy día se están tocando campos más lejanos, más profundos y más inaccesibles. Además, esos campos de petróleo lejanos son más pequeños y más costosos en cuanto a extracción, resultando en barriles de petróleo muy caro o incluso sin ser rentable extraerlo.

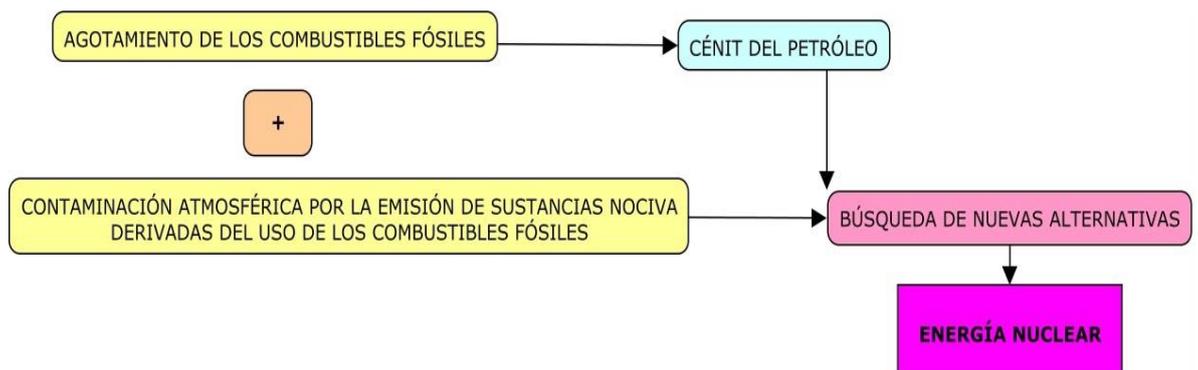


Imagen 21: Esquema búsqueda de alternativas. Fuente: propia.

CAPÍTULO 3: EL FUTURO DE LA ENERGÍA. BÚSQUEDA DE ALTERNATIVAS.

3.1.- INTRODUCCIÓN.

Los combustibles fósiles se deben dejar de utilizar por dos razones de peso: el agotamiento de estos combustibles, y la emisión de gases de efecto invernadero.

Los **agro-combustibles** suplantando la producción de alimentos, que ya están bajo mucha presión por crecimiento de la población mundial. Tampoco se pueden cortar más árboles para crear más tierras cultivables, por la alarmante pérdida de biodiversidad que ya se está registrando.

Las **centrales hidroeléctricas** existen desde hace varias décadas. Sin embargo, las presas constituyen obstáculos insuperables para los peces migratorios, y los lagos artificiales son grandes inundaciones que pueden desalojar poblaciones indígenas de sus tierras ancestrales, entre otros problemas.

Las **centrales geotérmicas** son una tecnología excelente alrededor de los bordes tectónicos y de los volcanes; sin embargo, fuera de estas zonas geotermales del mundo no es energéticamente rentable, por lo que desde una perspectiva global, la utilidad de esta tecnología es muy limitada.

El **hidrógeno** se menciona frecuentemente como la alternativa para los combustibles fósiles. Sin embargo, el hidrógeno no se encuentra de forma pura en la naturaleza. Hay que producirlo, principalmente mediante electrólisis del agua (utilizando energía eléctrica), con lo que esencialmente no es una fuente de energía, sino un medio para almacenar energía. La ventaja es que así se puede producir hidrógeno con la electricidad excedente de los paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas. A pesar de sus enormes posibilidades, aún existen grandes problemas por vencer:

- Al ser el hidrógeno el elemento más ligero, aunque un kg de H contiene

cerca de 3 veces más energía que un kg de gasolina, bajo una presión de 700 atmósferas el volumen es todavía 12 veces más grande, necesitándose un cilindro de hidrógeno algo más de 4 veces más grande que un tanque de gasolina para poder viajar la misma distancia.

- El hidrógeno consta de un protón y un electrón. El electrón puede viajar por los metales como una corriente eléctrica y el protón es soluble en los metales. Entonces el hidrógeno se escapa de los cilindros y gasoductos metálicos de almacenamiento y transporte.

En cuanto a la **energía solar**, aunque el fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839, las primeras células fotovoltaicas no fueron construidas hasta 1954. El desarrollo de esta tecnología no tenía mucha prioridad, ya que parecía de poca eficiencia y demasiado cara en comparación con el petróleo en esas décadas. Así, fue utilizada únicamente en ocasiones excepcionales como la astronáutica y lugares muy remotos (faros) sin tripulación. La eficiencia media de los paneles fotovoltaicos está situada entre el 12-18%, 24% en el mejor de los casos, 35-40% en laboratorios. Estos porcentajes demuestran que aún faltan décadas para desarrollar, introducir y popularizar estas tecnologías.

Paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas son muy dependientes del tiempo; sin sol ni viento no hay electricidad.

La ventaja de las **centrales nucleares** es que no emiten gases de efecto invernadero. Aunque funcionan a base de un mineral con reservas limitadas, pudiendo ocurrir una escasez de uranio, según diversos estudios, entre los años 2020 y 2050, junto con el problema de los desechos radiactivos, la 4ª generación de centrales nucleares se está diseñando de manera más segura, más eficiente, más barata y apta para funcionar en base a los desechos radioactivos de las centrales antiguas y las armas nucleares, es decir, podrían reducir los desechos radioactivos actuales mientras generan electricidad. Por ello, podría tratarse de una excelente alternativa al uso de los combustibles fósiles para la generación de electricidad, tanto en las centrales nucleares en tierra, como mediante el empleo de los nuevos reactores modulares de cuarta generación en los buques.

3.2.- BÚSQUEDA DE ALTERNATIVAS EN EL SECTOR MARÍTIMO.

3.2.1.- USO DEL HIDRÓGENO EN TURBINAS DE GAS.

El primer intento de utilizar hidrógeno como combustible se llevó a cabo en el año 1943 en la Universidad de Ohio, para alimentar un motor de aviación. Este experimento sentó las bases para la utilización de hidrógeno licuado (LH2) y oxígeno licuado (OL2) en los programas espaciales de la NASA.

No obstante, en el ámbito marítimo sólo existe un experimento llevado a cabo por la US Navy en el año 1977, en el que se consiguió la adaptación de una turbina de gas de 260 Kw en una lancha de 36 pies de eslora propulsada mediante hidrógeno gaseoso.

A día de hoy, el empleo de hidrógeno como combustible en buques se reduce a estudios, modelos teóricos y aplicaciones reducidas en pilas de combustible. Por tanto, no existen aún motores marinos de combustión interna alimentados por hidrógeno. Sin embargo, una de las opciones que más se están barajando es la del empleo del hidrógeno en turbinas de gas aeroderivadas. Las turbinas aeroderivadas ya se utilizan en buques de alta velocidad.

El hidrógeno presenta el problema de su almacenamiento. La forma más adecuada de almacenamiento a bordo es en forma licuada: mayor densidad energética y se solucionan los problemas del peso y tamaño de los sistemas de almacenamiento del gas a presión. Sin embargo, uno de los mayores desafíos presentados por el hidrógeno es la necesidad de encontrarse a temperaturas criogénicas para permanecer en fase líquida.

Utilizando hidrógeno, se emite menor cantidad de NOx que con los combustibles fósiles. Además, no emite CO2, ni CO, ni SO2 ni tampoco material en partículas; sin embargo, el vapor de agua generado en su reacción de combustión aumenta el efecto invernadero.

Aunque a día de hoy no existe ninguna regulación específica sobre el uso del hidrógeno como combustible a bordo de los buques, algunas sociedades de clasificación como la American Bureau of Shipping (ABS) ya han presentado ciertos requisitos que este tipo de buques deben reunir para operar de forma segura. Entre otros, destaca la necesidad de dotar al buque con sistemas de ventilación de emergencia. Además, debido a la elevada presencia del factor humano a la consecución de accidentes, la ABS recomienda que el empleo de estos sistemas sea automático.

Los sistemas de almacenamiento criogénico requerirán un exhaustivo control, con vistas a soportar el movimiento del buque en la mar.

El empleo de hidrógeno gaseoso en turbinas de gas y su almacenamiento criogénico es similar al empleado en los buques de transporte de gas natural licuado (GNL). Por ello, se prevé que las sociedades de clasificación recurran a las vigentes regulaciones sobre buques tanque o LNG para evaluar el empleo del hidrógeno como combustible y su almacenamiento criogénico.

3.2.2.- GAS NATURAL EN TURBINAS DE GAS Y MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Rolls Royce trabaja actualmente en el desarrollo de motores Bergen para el aprovechamiento de Gas Natural.

En cuanto a turbinas de gas, no existe actualmente ningún modelo comercialmente disponible adaptado al funcionamiento con Gas Natural exclusivamente. Sin embargo, sí existen turbinas duales que pueden operar tanto con combustibles fósiles diésel como con Gas Natural, como la MT 30, diseñada también por Rolls Royce.

Para su almacenamiento a bordo, el Gas Natural es licuado (enfriado a -163°C y presurizado).

En cuanto a emisiones atmosféricas contaminantes, el Gas Natural es un combustible más limpio que otros combustibles fósiles. Su contenido en azufre es prácticamente inexistente, y en Nitrógeno es de alrededor de un 3%. Genera menos emisiones de CO₂ que otros combustibles fósiles, y además no genera material en partículas.

Comparándolo con el diésel marino, la combustión del Gas Natural puede suponer un 30% menos de emisiones de CO₂, un 86% menos de emisiones NO_x, un 100% menos de emisiones SO_x y un 98% menos de material en partículas.

A día de hoy, los motores tanto duales como los de Gas Natural ofrecidos por Wärtsilä y Rolls Royce respectivamente se encuentran tecnológicamente y comercialmente ya disponibles. Otros fabricantes, como MAN, también ofrecen motores duales para buques de media y alta velocidad, y está trabajando desde 2010 en el desarrollo de motores de baja velocidad duales marinos. Rolls Royce tiene comercialmente disponible la turbina aeroderivada MT 30, hasta la fecha empleada únicamente en buques militares.

3.2.3.- PILAS DE COMBUSTIBLE.

Las pilas de combustible que mayor potencial han demostrado tener hasta la fecha para la marina naval a raíz de diversos experimentos son las pilas de alta temperatura del tipo MCFC y SOFC, y las de baja temperatura del tipo PEMFC.

3.2.3.1.- PEMFC

•

Pila de membrana de intercambio de protones, también llamada pila de membrana electrolítica polimérica. Presentan una baja temperatura de trabajo, de entre 50 y 120 °C.

En este tipo de pila de combustible, el hidrógeno circula por el lado del ánodo,

donde se disocia por la acción del catalizador en electrones y protones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, mientras que los electrones, debido al aislamiento del electrolito, son forzados a recorrer un circuito externo, creando así corriente eléctrica. Por el cátodo se hace pasar una corriente de aire cuyo oxígeno reacciona a nivel molecular con los protones del hidrógeno, dando lugar a la formación de vapor de agua, único residuo de la reacción.

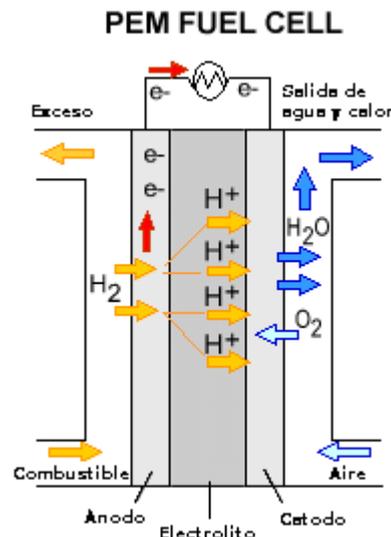


Imagen 22: Esquema de funcionamiento de una pila PEMFC. Fuente: Wikipedia.

3.2.3.2.- SOFC.

Pila de combustible de óxido sólido. Produce energía eléctrica por oxidación directa de un combustible. Su temperatura de operación está comprendida entre 500 y 1000°C. El electrolito puede ser un óxido o cerámica.

Entre sus principales ventajas, destacamos su mayor eficiencia, su estabilidad a largo plazo, la flexibilidad de combustible, las bajas emisiones que genera y su relativo bajo coste.

Su mayor desventaja es su elevada temperatura de operación.

Para su funcionamiento, se hace circular aire por el cátodo de forma que el oxígeno contenido en el mismo se reduce, dando lugar a iones de oxígeno. Estos iones se

desplazan por el electrolito hasta llegar al ánodo, donde producen la oxidación del combustible. Esta oxidación tiene como resultado un número par de electrones que se hacen circular por un circuito externo produciendo electricidad y un residuo de agua.

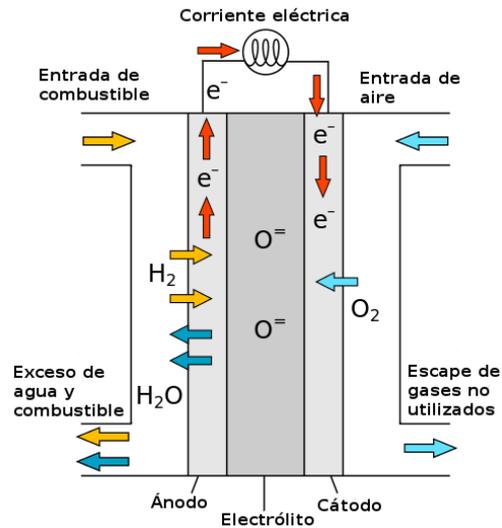


Imagen 23: Esquema de funcionamiento de una pila SOFC. Fuente: Wikipedia.

3.2.3.3.- MCFC.

Pila de carbonato líquido. Operan a temperaturas superiores a los 600°C. Se caracterizan por emplear combustibles distintos del hidrógeno, como el Gas Natural o el carbón, ya que debido a las altas temperaturas a las que operan pueden producir el hidrógeno de forma directa a partir de éstos.

Su principal desventaja es su durabilidad, reducida debido a las altas temperaturas de operatividad y la corrosividad del electrolito.

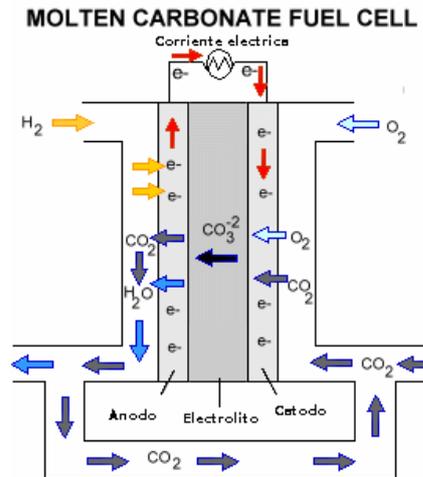


Imagen 24: Esquema de funcionamiento de una pila MCFC. Fuente: Wikipedia.

Tanto las pilas de combustible MCFC como las SOFC son ideales para su empleo en un sistema combinado con una turbina de gas. En su operación normal, el aire entra por una toma, discurre por un filtro que elimina parte de sus impurezas y es comprimido en el compresor de la turbina. El aire comprimido pasa a través del recuperador de calor, donde es precalentado para su entrada en la pila de combustible junto al Gas Natural, lugar en el que tendrán lugar las reacciones electroquímicas generadoras de la corriente eléctrica (DC). Los gases de escape presurizados resultantes de estas reacciones se expanden posteriormente en la turbina, originando el movimiento tanto del compresor como del generador de corriente alterna (AC). Tras su expansión, los gases transcurren por el recuperador y después son liberados a la atmósfera a una temperatura de unos 200°C. La energía eléctrica es producida conjuntamente por los generadores AC y DC usando el mismo flujo de combustible/aire.

Los experimentos realizados indican que en estos sistemas híbridos se logra una eficiencia eléctrica del 55% en plantas de baja potencia (250 Kw) y hasta un 60% en plantas de media potencia (1 Mw). En plantas de mayor potencia y con turbinas de gas más sofisticadas pueden ser eficiencias de hasta el 70%.

De todos los modelos aquí expuestos, este último ofrece las opciones más prometedoras para su aplicación en la marina mercante.

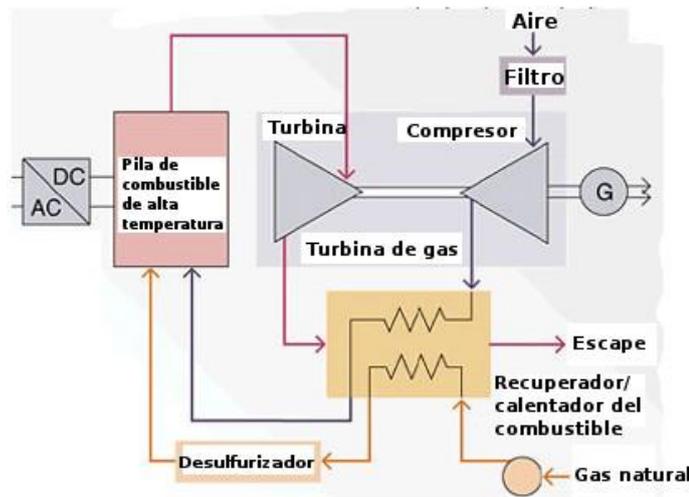


Imagen 25: Diagrama de funcionamiento de una pila de combustible de alta temperatura (SOFC) y turbina de gas. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible, J.A. Sánchez Girón.

Las pilas de alta temperatura tipo SOFC pueden funcionar tanto con hidrógeno como con Gas Natural como combustible. Las MCFC están diseñadas para funcionar con Gas Natural u otro combustible fósil.

El empleo de pilas de combustible no será limpio ni sostenible mientras el medio de obtención del hidrógeno no lo sea. Por el contrario, el empleo del Gas Natural como combustible proporciona ciertas ventajas, ya que la obtención y distribución del Gas Natural actualmente es menos costosa y tecnológicamente menos compleja que la del hidrógeno, además de poseer una naturaleza respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, su empleo como combustible en pilas no se puede considerar como una solución definitiva al problema de las emisiones de gases de efecto invernadero ni al del agotamiento de los combustibles fósiles.

Actualmente existen diversos proyectos de investigación y diseño de pilas de combustible aplicadas al sector marítimo, tanto para aplicaciones militares como civiles. Por otra parte, los proyectos y estudios realizados para pilas de combustible terrestre son cada vez más y, debido a su uso más extendido, han logrado mayores resultados que los proyectos navales. No obstante, todavía no hay ningún modelo de pila de combustible disponible para buques mercantes.

3.2.4.- TURBINA VORTICIAL JIRNOV.

Turbina de gas avanzada basada en un ciclo Brayton modificado que le permite alcanzar rendimientos entre el 58 y el 70%.

En una TVJ, el aire ambiente se mezcla con el agua vaporizada dando lugar a un fluido de trabajo doble que simultáneamente se comprime en el compresor rotatorio isotérmico de desplazamiento positivo (1). El aire comprimido se separa de la mezcla con el agua en el separador vorticial (2) y discurre hasta el intercambiador-recuperador de calor vorticial, donde es precalentado mediante el empleo del calor residual de los gases de escape y posteriormente introducido en la cámara de combustión vorticial (3). La mezcla explosiva resultante de la combustión del aire con el combustible se expande adiabáticamente en la turbina de expansión rotatoria de desplazamiento positivo (4), generando trabajo mecánico que a su vez se aprovecha para hacer girar el rotor del compresor rotatorio isotérmico de desplazamiento positivo (1). Estos gases de escape son isobáricamente trasladados al recuperador-intercambiador de calor, aportando su energía calorífica residual al aire comprimido y siendo posteriormente evacuado por el escape (5).

El agua separada de la mezcla con el aire entra en el sistema de expansión y enfriamiento y es posteriormente descargada en un radiador-condensador (6), donde se enfría hasta alcanzar la temperatura ambiente. Después se inyecta en el compresor rotatorio isotérmico de desplazamiento positivo a través de los atomizadores (7) para generar el fluido de trabajo de doble fase. El fluido de doble fase se emplea en la compresión isotérmica del aire, completando de este modo el ciclo de funcionamiento del sistema.

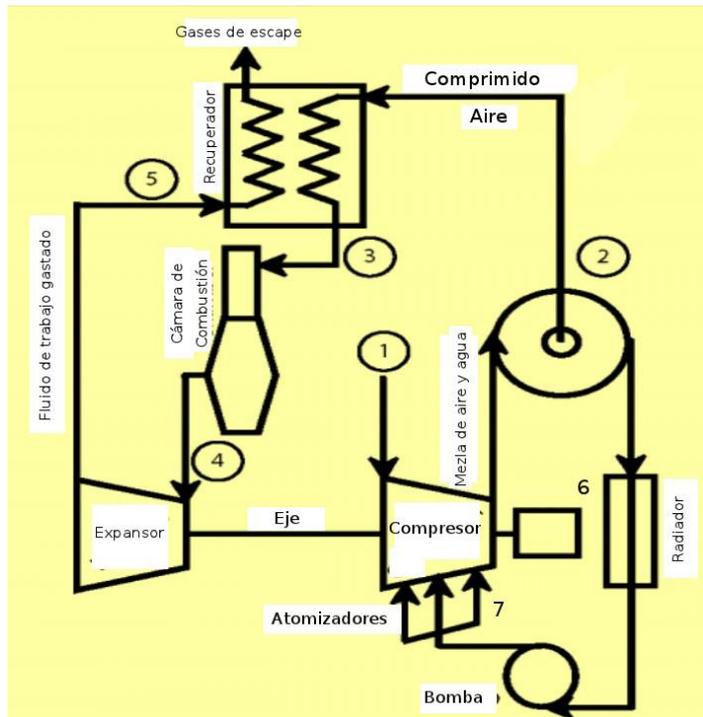


Imagen 26: Diagrama de funcionamiento de una turbina vortical Jirnov. Fuente: Hacia el buques de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

Entre las ventajas de este tipo de turbina destacamos:

- Alta eficiencia térmica.
- Capacidad de emplear diversos combustibles, entre ellos hidrógeno o GNL.
- Diseño sencillo y de fácil fabricación.
- Permite la reutilización de combustibles, como el exceso de hidrógeno de las pilas de combustible o los gases de evaporación de tanques de transporte de GNL.
- Menos emisiones de CO₂, NO_x, SO_x y material en partículas con cualquier combustible, al tener una mayor eficiencia térmica.

En el año 2003, el departamento de investigación de la marina estadounidense subvencionó con 100.000 \$ a la compañía General Vortex con el fin de construir el primer prototipo JIV, de 25 Kw. Fue un éxito, lo que consiguió a la compañía otra subvención de 1 millón de dólares para la construcción de otro prototipo de 125 Kw, el cual comenzó en 2006 y continúa hasta la fecha. Si resulta en otro éxito, se le entregará una tercera subvención de 3 millones de dólares para su producción industrial.

Su aplicación a la marina mercante todavía parece lejana, no sólo por su falta de producción sino por las potencias de trabajo actuales, que por el momento son escasas para cumplir con la demanda de cualquier buque.

3.2.5.- USO DE BIODIÉSEL.

El biodiesel es un hidrocarburo líquido producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales, siendo la colza, el girasol y la soja las materias primas más utilizadas. Su producción a partir de algas marinas aún está en fase de estudio y experimentación.

Se puede utilizar directamente en motores, adaptándolos adecuadamente, o bien mezclado con el gasóleo.

A comienzos de los 90 se crean en Europa varias plantas de biodiesel debido a la creciente preocupación social por proteger el medio ambiente. Durante las últimas décadas, en los países industrializados la tecnología de producción del biodiesel ha sido desarrollada satisfactoriamente, y su empleo en motores diésel ha sido probado con éxito. Sin embargo, aún persisten dos aspectos no resueltos que limitan una mayor expansión y difusión de su uso: por un lado, el alto costo de los aceites vegetales para la producción de biodiesel cuando se utilizan cultivos oleaginosos convencionales y, por otro, la logística para el aprovisionamiento de los insumos en el caso de la utilización de aceites combustibles usados.

Países como Alemania, Austria, Francia o Suecia son pioneros en la producción y uso de biodiesel en automóviles. En cuanto a marina mercante, las experiencias de empleo de biodiesel como combustible son muy reducidas. En 2007, el pesquero M/S Codepeca I realizó el primer viaje impulsado por sus motores diésel alimentados parcialmente con biodiesel. Otro prototipo, el Earthrace, sin fines comerciales, dio la vuelta al mundo utilizando únicamente biodiesel en sus motores. A parte de éstos, su aplicación no se ha realizado todavía en buques mercantes.



Imágenes 27 y 28: M/S Codepeca (izquierda) y Earthrace (derecha). Fuentes: Wikipedia y cosasexclusivas.com

El uso del biodiesel produce CO₂ en niveles más elevados que los de cualquier combustible convencional. Sin embargo, este aumento se ve compensado por el origen del biocombustible, pues la materia prima de la que procede el biodiesel necesita CO₂ para realizar la fotosíntesis.

De acuerdo al departamento de energía de los Estados Unidos, la producción y combustión del biodiesel supone un 75,8% menos de emisiones de CO₂ a la atmósfera que utilizando combustibles fósiles.

En cuanto a las emisiones de SO_x, NO_x, CO, HC y material en partículas, estas emisiones son prácticamente nulas, ya que su contenido en azufre es inexistente.

Según la Lloyd's Register, los siguientes aspectos son factores límite actualmente para el empleo del biodiesel en buques mercantes:

- No existencia de red, ni de distribución ni de almacenamiento de biodiesel para su empleo en buques.
- Falta de estándares de calidad que regulen las especificaciones del biodiesel, las condiciones de transporte, distribución y almacenamiento para su empleo en buques.
- Impacto social de su producción.

Por otra parte, un documento realizado por la compañía noruega ZERO para el Marine Environment Protection Committee (MEPC) en 2007 resalta los siguientes factores sobre el empleo de biodiesel en los buques de la marina mercante:

- El empleo de biodiesel en buques de la marina mercante no representa

ningún problema operacional para los motores convencionales ni los sistemas de tratamiento de combustibles. De la experiencia de la compañía MAN B & W DIESEL se ha concluido que un motor modificado para el empleo de biodiesel tendrá un coste de aproximadamente un 5% más que la versión convencional.

- El principal factor que a día de hoy dificulta el empleo de biodiesel en los buques de la marina mercante es la diferencia de precio del mismo con el diésel fósil.
- El empleo de biodiesel en el futuro vendrá condicionado por una reducción en el precio del biocombustible y una adecuada red de almacenamiento y distribución.

La compañía MAERSK está realizando actualmente pruebas con biodiesel como combustible.

3.2.6.- APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR.

El aprovechamiento de la energía solar en los buques, tanto mediante paneles fotovoltaicos como colectores térmicos, está limitada por el espacio disponible sobre cubierta. Es por ello que en buques portacontenedores o que carguen en cubierta apenas podrán beneficiarse de este sistema.

Cabe mencionar que su uso está limitado por factores climáticos y propios de la navegación a los que se verá expuesto, como son la exposición al agua de mar, las presiones, vientos o vibraciones estructurales.

Debido a su baja densidad energética, eficiencia y a la limitación de espacio existente en los buques, en la actualidad este sistema no puede considerarse como un medio energético principal de propulsión, aunque sí como un medio auxiliar.

Además del clima, la captación de la radiación solar está condicionada por las horas diurnas, lo que requiere de un sistema de almacenamiento de la energía captada

(baterías) o de un sistema de apoyo que supla la energía producida por los paneles solares.

Otra desventaja es el residuo generado por los paneles solares tras completar su vida útil, contaminante y difícilmente reciclable en la actualidad.

Hoy día, su mayor aplicación tiene lugar en el sector de la náutica deportiva, ya que su instalación es sencilla y su aporte energético suficiente para alimentar los sistemas auxiliares de navegación y otros dispositivos de a bordo.



Imágenes 29 y 30: Paneles solares en buques de recreo (izquierda) y veleros (derecha). Fuente: damiasolar.com y es.dreamstime.com.

Algunos prototipos alimentados totalmente por energía solar son, el Solar Proa, embarcación deportiva con capacidad de hasta 6 tripulantes, o el M/S Turanor Planet Solar, primer catamarán autosuficiente e impulsado únicamente por energía eléctrica generada en sus 537 m² de paneles solares.



Imágenes 31 y 32: Solar Proa (izquierda) y M/S Turanor Planet Solar (derecha). Fuentes: ecofriend.com y gearpatrol.com

En el ámbito de la marina mercante, el primer buque equipado con paneles solares,

el M/V Auriga Leader, un ro-ro con capacidad para 6400 vehículos, equipado con 328 paneles solares instalados en la cubierta principal han conseguido ahorrar combustible en un 10% aproximadamente.



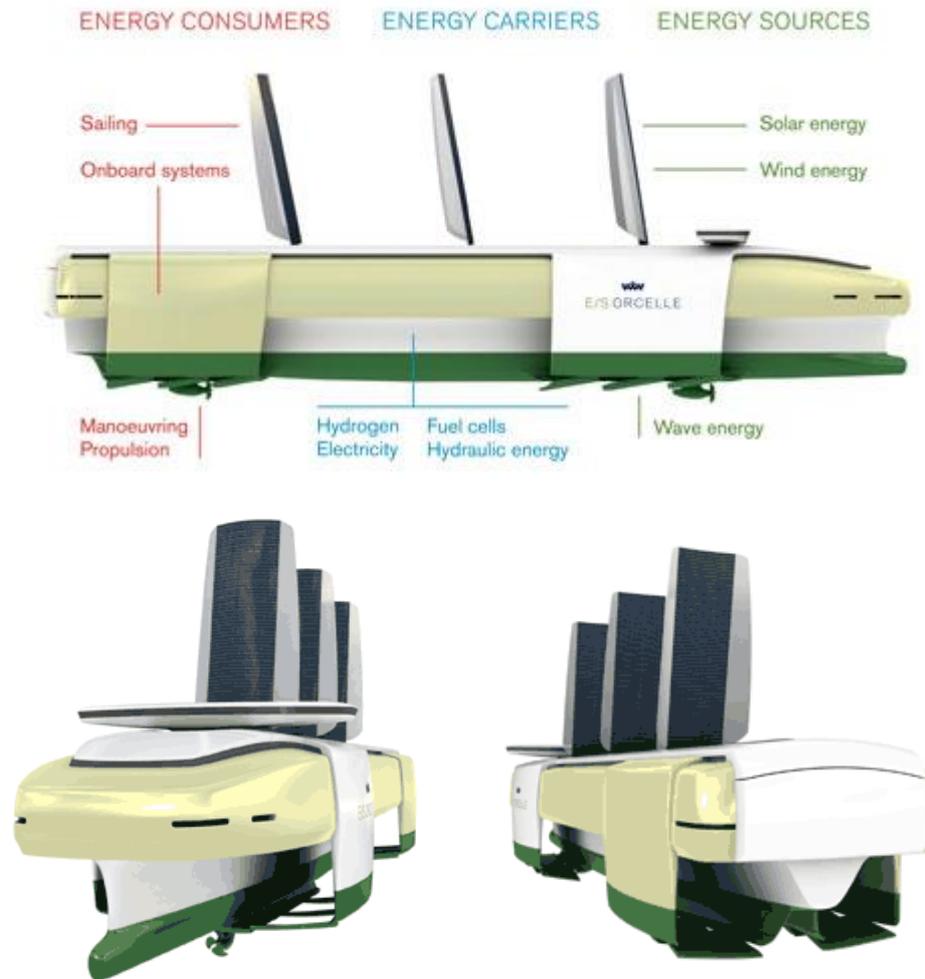
Imágenes 33 y 34: M/V Auriga Leader. Fuente: <http://yachtcenter.com.ve> y Wikipedia.

Actualmente existen diversas compañías que manufacturan paneles solares instalables en buques. En concreto, la compañía Solar Sailor presenta como su producto más innovador las velas solares, que consisten en velas tradicionales rígidas dotadas de paneles solares y montada sobre un dispositivo giratorio que permite su orientación en diferentes direcciones.



Imágenes 35 y 36: Prototipos de buque de pasaje (izquierda) y tanque (derecha) Solar Sail. Fuente: bluebird-electric.net y treehugger.com.

El prototipo E/S Orcelle es un buque cuya pretensión es la de navegar únicamente empleando fuentes de energía renovables; entre los dispositivos que lleva incorpora velas solares.



Imágenes 37 y 38: E/S Orcelle (prototipo). Fuente: Marinelog.com.

3.2.7.- APROVECHAMIENTO DEL VIENTO.

3.2.7.1.- Cometa tractora SkySail.

Se trata de un dispositivo para el aprovechamiento del viento, en forma de paracaídas independiente, firme a la cubierta de castillo del buque y a varios metros de altura de ésta, describiendo un movimiento de remolque impulsado por el viento respecto al buque.

La cometa tractora puede operar con vientos de fuerza entre 3 y 8 de la escala Beaufort, pero nunca podrá ser lanzada, aunque sí recogida, con vientos por debajo de fuerza 3.

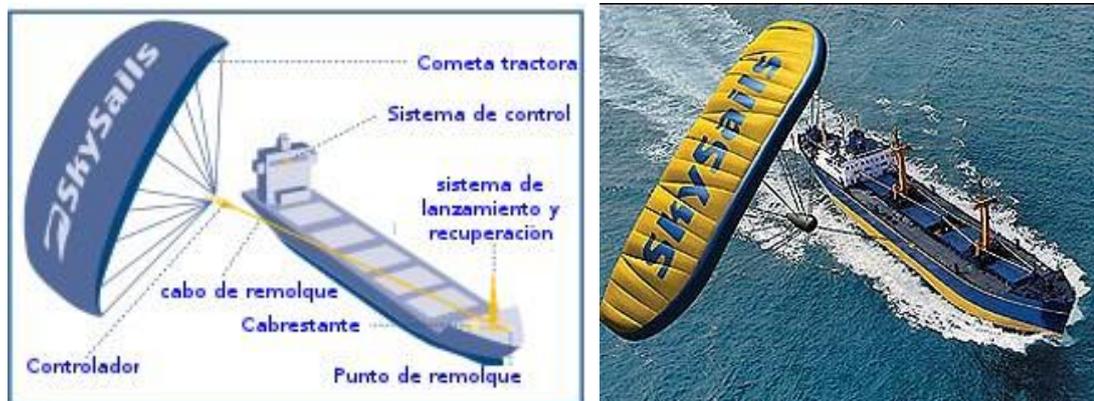
Puesto que se basa en complementar la propulsión principal del buque, es tratado como un sistema de propulsión auxiliar.

Entre sus ventajas, destacamos:

- Alta capacidad de propulsión.
- La escora producida por la cometa tractora es mínima y despreciable en términos de la seguridad del buque y su operatividad.
- Funcionamiento automático.
- Control de empuje dinámico, pudiendo variar la posición de la cometa tractora, asegurando el control sobre la misma y su adaptabilidad a los distintos vientos que puedan soplar.
- Mínimo espacio requerido para su instalación.
- Empleo de energía renovable, y no genera emisiones de gas contaminantes ni de efecto invernadero.

Algunas de sus desventajas:

- Irregularidad de los vientos.
- Restricción de empleo.
- Actualmente, hay pocos modelos disponibles.



Imágenes 39 y 40: cometa tractora. Fuentes: SkySail.

3.2.7.2.- Diseño aerodinámico del casco para utilizarlo como vela gigante.

El Vindskip se basa en un diseño totalmente aerodinámico capaz de usar ambos perfiles del carguero como velas, convirtiendo el barco en una versión moderna de los clásicos veleros pero a escala industrial y con capacidad para almacenar hasta 7.000 automóviles (la capacidad promedio de los buques actuales).

En el diseño se puede apreciar fácilmente como imita la forma de una vela. Las ondulaciones de sus laterales utilizarán el viento generado desde el barco en movimiento e impulsarán la nave durante su trayecto.

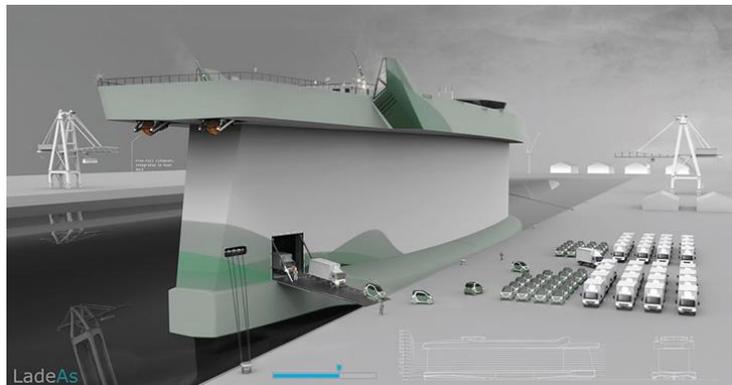


Imagen 41: Vindskip. Fuente: cadenadesuministro.es.

Terle Lade, el diseñador responsable de su creación, cuenta con un pasado de marino de competiciones en el que se ha basado para desarrollar el Vindskip. Según él, este gigantesco velero se parece en cuanto a su funcionamiento más a un avión que a un carguero tradicional, ya que este buque casi puede navegar de ceñida, a un ángulo tan alto como 18 grados, utilizando el viento aparente (ciento a bordo) para generar el impulso, de la misma forma en la que un avión despegar cuando alcanza cierta velocidad. Así, el vacío que se crea en el sotavento del barco es suficiente como para impulsarlo hacia adelante.

Su diseñador asegura que el barco mercante híbrido, el cual aún tendría un motor que funcionaría con gas natural licuado, podría ahorrar combustible en un 60% y reducir las emisiones en un 80%.

Además, el barco se basa en un sistema de navegación creado por el Centro de Servicios y Logística Marina Fraunhofer que calcula la ruta óptima de navegación basándose en predicciones meteorológicas y de vientos que se actualizan a diario. Con este sistema, introduces cuando quieres partir y cuando quieres llegar a tu destino y el programa calcula, en base a previsiones meteorológicas, la mejor ruta. Según su creador, el coste de cada Vindskip estará en torno a los 50 millones de dólares y espera que el primero surque los mares para 2019.



Imagen 42: Buque de carga Vindskip. Fuente: <http://cnnespanol.cnn.com>.

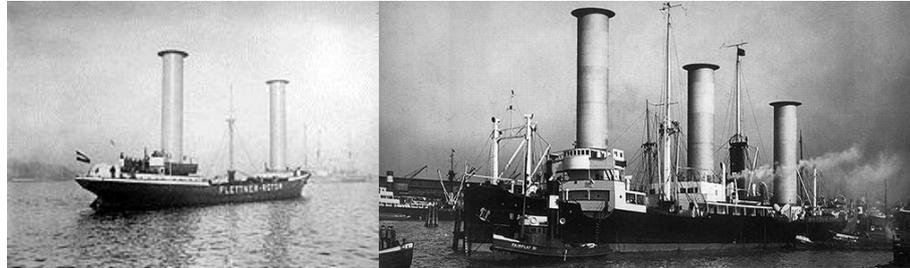
3.2.7.3.- Rotor FLETTNER.

Cilindro vertical giratorio que, instalado en la cubierta de un buque contribuye a su empuje propulsor mediante el aprovechamiento de un fenómeno físico conocido como Efecto Magnus.

El Efecto Magnus es el fenómeno físico por el que la rotación de un objeto afecta a la trayectoria del mismo a través de un fluido, que en el caso de los rotores será el aire.

Aunque desde su descubrimiento y puesta en práctica en 1925 por Angus Flettner en la goleta Buckau y en 1926 en el Bárbara por los astilleros de Bremen, los rotores Flettner no consiguieron ser competitivos ni tecnológica ni económicamente hablando y nunca se aplicaron a buques con fines comerciales, a día de hoy

podemos encontrarnos con algunos proyectos innovadores, como el catamarán Uni-Kat Flensburg o el buque E Ship 1, destinado al transporte de turbinas eólicas y maquinaria similar.



Imágenes 43 y 44: Goleta Buckau (izquierda) y Barbara (derecha). Fuente: Wikipedia.



Imágenes 45 y 46: Uni-Kat Flensburg (izquierda) y E Ship 1 (derecha). Fuentes: bluebird-electric.net y elobservador.com.uy.

El empleo de los rotores Flettner en la actualidad se reduce a ejemplos prácticamente anecdóticos, pero ya existe, sin embargo, una aplicación comercial destinada a su instalación y funcionamiento en buques mercantes. Este diseño particular cuenta con todas las ventajas de los rotores Flettner clásicos y contrarresta sus principales inconvenientes. Se trata de los rotores Flettner plegables, consistentes en un rotor Flettner tradicional y un sistema automático que facilita su plegado sobre la cubierta principal.



Imágenes 47 y 48: Rotor Flettner plegable. Fuente: Windagain.

A pesar de sus mejoras, los rotores Flettner presentan una serie de desventajas:

- Aunque el empuje adicional creado por los rotores supone un ahorro de propulsión en el buque, y por tanto menor trabajo realizado por el motor principal, lo que se traduce en un consumo de combustible menor y por ello una reducción en la cantidad de emisiones atmosféricas contaminantes, no eliminan el problema del agotamiento de los recursos fósiles ni las emisiones de gases contaminantes.
- Puesto que estos rotores giran gracias a unos motores eléctricos accionados por la energía producida por el motor principal del buque, no poseen autonomía de operación.
- En buques que cargan en cubierta, comprometen el espacio disponible en la misma, reduciendo la capacidad de carga del buque o imposibilitando el transporte de mercancías de mucha longitud.
- Debido al carácter irregular y variable de los vientos, así como su distinta distribución en la atmósfera terrestre, los rotores Flettner presentan un funcionamiento no constante, y su eficacia dependerá de la zona y época del año en que navegue, lo que hace que su aplicación sea limitada.

3.2.7.4.- Velas rígidas o Wingsails.

Se trata de una superficie rígida con un perfil similar al de un ala, fabricado con materiales rígidos, y sostenidas en mástiles orientables mecánicamente.

Existen diferentes modelos:

- Walker wingsails: conjunto de velas rectangulares soportadas cada una en un tubo vertical individual que a su vez va unido a un eje central.
- Modular sailing rings: dispositivo propulsor auxiliar consistente en una vela semi-rígida inspirada en la forma del ala de un murciélago, capaz de plegarse de forma automática y estibarse en un compartimento instalado en cubierta a tal efecto. Aún no están disponibles comercialmente.

- Velas rígidas: los primeros modelos ya se dieron en los años 70. Se trata del modelo de vela rígida más sencillo que existe, consistente en una superficie alar compuesta de un material rígido, firme a un mástil orientable mecánicamente. Con ellas, podemos llegar a alcanzar un ahorro de combustible de hasta el 50%. Este tipo de velas sólo se encuentran disponibles comercialmente para embarcaciones de recreo y deportivas.
- Velas solares: vela rígida dotada de paneles solares instalados en su superficie y montada sobre un dispositivo giratorio que permite su orientación en diferentes direcciones. Han sido patentadas y comercializadas por la empresa australiana Solar Sail, y se han instalado en pequeños buques de pasaje. Aún no se conoce con exactitud su rendimiento.



Imágenes 49, 50, 51 y 52: M/V Ashington (arriba, izquierda) con Walker wingsails, modular sailing rig (arriba, derecha), M/V Shin Aitoku Maru (abajo, izquierda), equipado con dos velas rígidas, y prototipo de velas solares (abajo, derecha). Fuentes: maritimejournal.com, desenchufados.net y Wikipedia.

Algunas de las desventajas de las velas rígidas son:

- Su instalación a bordo de los buques está limitada por el espacio disponible en cubierta, lo que vendrá dado por el tipo de buque y su actividad. Imposible su instalación en buques de cubierta reducida y en aquéllos que carguen sobre ella.
- Obstaculiza las oprga y descarga, y añade altura al puntal del buque, lo que puede llegar a comprometer su estabilidad o el paso del mismo por debajo de puentes o pasos elevados.
- Aunque se reduce el consumo de combustible del buque hasta un 40-50% con vientos favorables, reduciéndose así las emisiones atmosféricas, el rendimiento dependerá del viento imperante, lo que vendrá condicionado por factores como la zona de navegación, la estación del año e incluso la derrota efectuada por el buque.

A parte de lo mencionado en el apartado anterior, pueden identificarse una serie de barreras que impiden un mejor y más extenso desarrollo de las velas rígidas:

Barreras técnicas

- En vientos desfavorables, los largos mástiles en conjunción con la superficie de la vela pueden causar escoras indeseadas en el buque.
- Las operaciones de carga y descarga pueden verse dificultadas, lo que puede llegar a impedir su realización o incrementar sus costes.
- Resulta necesaria una optimización de la derrota efectuada por un buque equipado con velas rígidas para hacer mejor uso de los vientos favorables. Las rutas ideales deberían ser comprobadas y contrastadas cada 24 horas con el último parte meteorológico disponible.

Barreras económicas

- Coste de inversión adicional en buques de nueva construcción y en la explotación de buques de vieja construcción equipados con velas rígidas.
- Dependiendo del dispositivo puede hacerse necesaria la intervención

adicional de personal de a bordo para el manejo del mismo.

- Bajo condiciones de viento no favorables al avance del buque, las velas pueden suponer un incremento de la resistencia aerodinámica del mismo, aumentando la potencia necesaria para su avance, lo que resulta en un mayor consumo de combustible y mayor cantidad de emisiones atmosféricas.

Barreras legislativas

- Límites en la altura de los mástiles: algunas zonas como el canal de Panamá restringen la altura de los mástiles a 60 m.
- Falta de legislación en el apoyo y fomentación de estos medios y en la restricción de emisiones de CO₂.

3.2.8.- APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDEOMOTRIZ.

Se trata de aprovechar la fuerza de las olas, transformando su energía cinética en un empuje adicional para el buque, lo que podría permitir hacer menos uso de la potencia de la máquina, logrando de este modo una reducción en el consumo de combustible y por tanto en la cantidad de emisiones liberadas a la atmósfera. También podría aprovecharse su energía para la generación de energía eléctrica.

3.2.8.1.- Suntory Mermaid II.

El primer y único prototipo de dispositivo aprovechador de las olas de tamaño real fue el instalado en la embarcación tipo catamarán Suntory Mermaid II, diseñado por Yutaka Terao, de la universidad de Tokai, Japón. La embarcación se hizo a la mar a mediados de marzo del 2008 en Japón, y llegó a Hawai, recorriendo 6000 Km impulsada únicamente por el empuje generado por las olas y alimentando los sistemas de navegación con energía eléctrica obtenida por medio de unos paneles solares.

El mecanismo consiste en un par de aletas horizontales unidas a un eje que permite su libre movimiento siguiendo el perfil de las olas en un movimiento oscilatorio que

hace que la embarcación avance. El eje vertical es soportado por 3 apéndices verticales fijos al casco del barco.

Todavía no se ha construido un dispositivo similar para buques mercantes.



Imágenes 53 y 54: Suntory Mermaid II. Fuentes: treehugger.com e inhabitat.com.

El buque E/S Orcele, prototipo de buque cuya actividad se basa en criterios de sostenibilidad y respeto al medio ambiente, siendo propulsado únicamente por medios basados en energías renovables del que ya se habló en el apartado de las velas solares, entre sus múltiples dispositivos de captación de energía, como velas rígidas o paneles solares, se encuentra un conjunto de aletas destinadas al aprovechamiento de la energía de las olas, tanto para generar empuje como para la generación de electricidad.

3.2.8.2. Active foil propeller.

Propulsor laminar activo consistente en un apéndice de perfil alar instalado en la quilla del buque, posibilitando modificar el ángulo de ataque respecto a la superficie del mar para lograr el máximo empuje posible. Su principio de funcionamiento se basa en aprovechar la energía cinética oscilatoria de las olas y deflectarla hacia atrás, generando un empuje que desplace al buque.

En base a recientes estudios, en navegación con olas irregulares se obtuvieron reducciones de consumo de combustible superiores al 60% bajo velocidades de 10 a 12 nudos, menor a menores velocidades.

Su principal desventaja es la longitud de los propulsores; cuando no se emplean

suponen apéndices adicionales al casco, lo que aumenta su resistencia al avance e impedimentos o dificultades en las operaciones de atraque o abarloadoamiento, por lo que deben ser retractados y estibados en compartimentos diseñados a tal efecto, lo que resulta ser costoso y complejo.

3.2.8.3.- Sistema y método propulsor para barcos mediante olas de mar.

Sistema patentado por Manuel Muñoz Saiz, similar al anterior. Aprovecha la energía cinética oscilatoria de las olas y la defleca hacia atrás para su aprovechamiento. Este sistema consiste en un conjunto de parejas de conductos curvados o acodados que se colocan en los laterales del casco del buque, los cuales dirigen el flujo de agua ascendente y descendente de las olas hacia atrás, resultando en una reacción o propulsión positiva de la nave, independientemente de la dirección o procedencia de dichas olas.

De cada pareja de conductos, uno de ellos tiene la entrada en la zona inferior, desviando el flujo ascendente hacia atrás, mientras que el otro tiene la entrada en la zona superior, desviando el flujo descendente igualmente hacia atrás.

Este sistema todavía no ha sido probado experimentalmente, ni existen modelos numéricos que permitan predecir su comportamiento, por lo que su eficacia aún no ha sido plenamente demostrada. Se hace necesario cuantificar el empuje adicional que puede aportar al buque, así como el incremento de la resistencia al avance.

3.2.9.- PROPULSORES.

3.2.9.1.- Propulsión eléctrica.

Tipo de propulsión en el que el propulsor resulta directamente accionado por un motor eléctrico, que a su vez es alimentado por uno o varios motores diésel (propulsión diésel-eléctrica), turbinas de gas (propulsión turbo-eléctrica) o pilas de combustible.

Su introducción en la marina mercante se inició con el petrolero ruso Vandal, en 1903, con propulsión diésel-eléctrica.

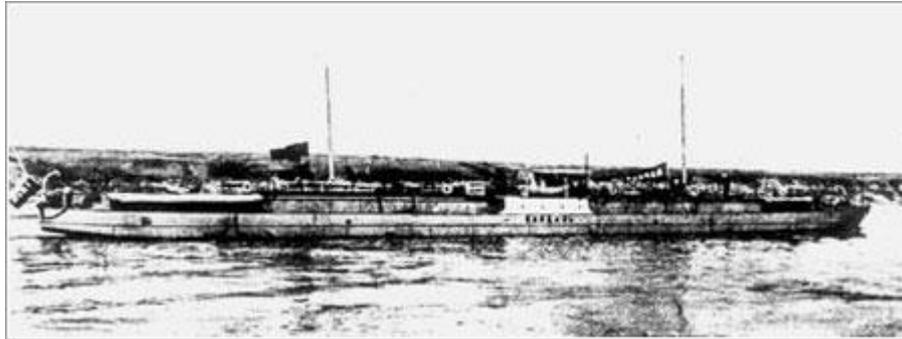


Imagen 55: Petrolero ruso Vandal. Fuente: Wikipedia.

Entre las ventajas de la propulsión eléctrica, destacamos:

- Menor consumo de combustible, debido principalmente al control de la velocidad variable de la hélice y a la puesta en marcha y parada automática de los motores diésel, garantizando que la carga del motor se mantenga lo más próxima posible a su punto de trabajo óptimo dentro de los límites de funcionamiento.
- Optimización del espacio del buque, al no requerir ejes de transmisión intermedios ni tuberías de alimentación, ya que el motor eléctrico va acoplado directamente al propulsor y la transmisión eléctrica se realiza por medio de cables.
- Disposición de toda la potencia marcha atrás, al poder invertir la marcha del motor eléctrico.
- Reducción del ruido y las vibraciones, debido a la ausencia de engranajes y líneas de transmisión intermedias.
- Flexibilidad de diseño.
- Mayor reserva de potencia en caso de avería en un grupo generador.

Algunas desventajas:

- Elevado coste de los equipos y su instalación.
- Mayor volumen ocupado.

Con la introducción de los motores eléctricos superconductores, la propulsión eléctrica se verá mejorada. Se trata de motores eléctricos que disponen en su diseño de materiales superconductores en lugar de materiales convencionales. Estos motores desarrollan mayor potencia, tienen menor peso y volumen y mayor eficiencia (hasta un 97%). Además, actualmente se encuentran disponibles comercialmente. Sus mayores desventajas son su elevado coste y limitada disponibilidad.

3.2.9.2.- Propulsión magneto-hidrodinámica.

Este tipo de propulsión nunca ha sido ni militar ni comercialmente desarrollada, debido principalmente a las limitaciones existentes, a su elevado coste y a su gran tamaño. Solamente un buque experimental, el Yamato I llegó a estar equipado con dos propulsores magneto-hidrodinámicos prototipos. A pesar de que se demostró su funcionamiento satisfactoriamente en el año 1992, el Yamato I no llegó a estar comercialmente operativo.



Imagen 56: Yamato I. Fuente: ar15.com.

El propulsor magneto-hidrodinámico es un tipo de dispositivo donde el empuje es generado por agua impulsada a reacción debido a la interacción entre un campo magnético y un campo eléctrico.

Diversos estudios han establecido como la eficiencia total de propulsión más

elevada hasta la fecha un 23%. Por ello, por el momento este sistema de propulsión no puede rivalizar con cualquiera de los métodos convencionales empleados actualmente en la marina mercante.

Su principal limitación radica en la generación de un campo magnético lo suficientemente intenso como para incrementar la potencia obtenida y el rendimiento. Debido a esta muy baja eficiencia propulsora, muy por debajo de los propulsores convencionales, estos dispositivos no son competitivos comercialmente.

Es importante destacar, además, que el rendimiento es aún menor en zonas de agua dulce, debido a que al tener una cantidad de sal disuelta menor posee una menor conductividad eléctrica, repercutiendo en la potencia generada por el propulsor.

A pesar de sus limitaciones, recientes estudios demuestran la actual viabilidad de este dispositivo de propulsión debido a una mejora de la tecnología, especialmente en la que a superconductores se refiere.

3.2.10.- HÉLICES CLT.

Se trata de hélices de forma convencional, pero que disponen en sus extremos de unas placas de cierre que facilitan la distribución radial del empuje.

Con el empleo de este tipo de hélice, se obtienen ahorros en el consumo del combustible entre un 7 y un 12%.

Su única desventaja es el coste inicial, mayor que el de una hélice convencional. Sin embargo, posteriormente puede compensarse con el ahorro de combustible. Estas hélices se pueden instalar en cualquier tipo de buque.



Imagen 57: Hélice CLT. Fuente: diariodenautica.com.

3.2.11.- HÉLICES CONTRA-ROTATIVAS EN DISPOSITIVO AZIMUTAL.

Consisten en un par de hélices acopladas al mismo eje pero enfrentadas una a la otra y con un sentido de giro opuesto. La hélice dispuesta más en el exterior del casco recupera parte de la energía del flujo rotacional provocado por la hélice inmediata al codaste y la convierte en empuje, lo que se traduce en una mayor eficiencia propulsora y una reducción en el diámetro de los propulsores.



Imagen 58: Hélices contrarrotativas Fuente: sectormaritimo.es.

3.2.12.- OTROS PROPULSORES.

3.2.12.1.- Hélices de paletas Grim. Grim Vane Wheel.

Dispositivo helicoidal de 6 o más palas alrededor de su núcleo, que gira libremente sobre un pequeño eje situado a popa de un propulsor convencional.

Su objetivo es el de extraer energía de la corriente producida por el propulsor convencional y convertirla en empuje adicional. La parte de las paletas de la hélice de Grim actúa como una turbina, mientras que la exterior como una hélice convencional.

Su diámetro suele ser un 15-20% mayor que el propulsor principal, y gira a una velocidad un 30-50% inferior.

A día de hoy, su comercialización es muy escasa, y no existen modelos precisos de predicción de su comportamiento.



Imágenes 59 y 60: Grim Vane Wheel. Fuente: marinewiki.org y Wikipedia.

3.2.12.2.- Wale tail Wheel.

Dispositivo de propulsión cicloidal de eje horizontal con palas dispuestas paralelamente a su eje de rotación. Instalado en el codaste de popa.

Su nombre proviene del movimiento que describe, similar al que haría una ballena

con su cola.

En la actualidad, son escasas las experiencias en buques reales con este dispositivo, y no hay suficientes modelos de predicción de su comportamiento. Su comercialización es prácticamente inexistente.

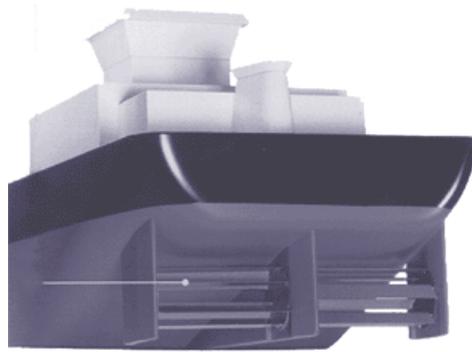


Imagen 61: Wale tail Wheel. Fuente: boatdesign.net.

3.2.12.3.- Propulsores oscilatorios/ondulantes.

Se basan en estudios de formas de propulsión marina de inspiración marina.

A pesar de su gran potencial, el diseño y desarrollo de propulsores oscilatorios/ondulantes no dispone todavía de la madurez empírica y técnica suficiente como para pensar en su aplicación a corto plazo en buques mercantes.

3.2.12.4.- Eyector de onda de choque. Pursuit Marine Drive.

Propulsor consistente en una tobera situada en el exterior del casco y bajo el agua, que expulsa vapor generado en la cámara de máquinas, produciendo, al mezclarse con el agua, un chorro eyectado similar al producido por los propulsores ordinarios de propulsión a chorro.

Una de las ventajas de este tipo de propulsión es que, al funcionar con vapor, la energía empleada para la generación del mismo puede obtenerse de medios en los que normalmente se desperdiciaría (por ejemplo, el calor de los gases de escape de una turbomáquina), lo que exime al propulsor de tener un generador con

alimentación independiente y conduce al aumento de la eficiencia energética de la maquinaria principal, una reducción en su consumo y una menor cantidad de emisiones atmosféricas.

Además, debido a la sencillez del propulsor y a la ausencia de engranajes o ejes en el mecanismo, su coste de fabricación y mantenimiento es reducido.

Su principal limitación en cuanto a su aplicación a corto plazo en buques mercantes es su diseño y desarrollo, ya que este tipo de propulsores no disponen todavía de la madurez empírica no técnica suficiente. En cuanto a su aplicación comercial, el único intento realizado hasta la fecha fue el de la empresa Pursuit Dynamics, que concluyó sin éxito.

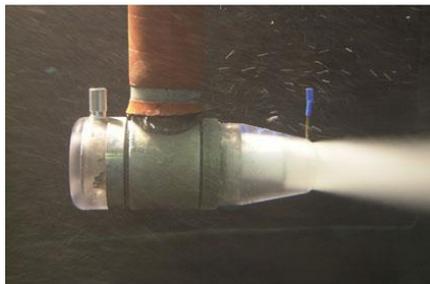


Imagen 62: Pursuit Marine Drive. Fuente: tfd.chalmers.se.

3.2.13.- MEJORAS ESTRUCTURALES.

3.2.13.1.- Lubricación con aire.

Consiste en el cubrimiento de parte de la obra viva del buque con una corriente de aire paralela al casco, con el objeto de formar una cavidad que reduzca la resistencia por fricción existente entre el casco y el agua. Se trata de buques tipo Air Cavity Ship (ACS).

La reducción de la resistencia al avance obtenida en buque de este tipo de tamaño real es de entre el 15 y el 40% en el mejor de los casos, mientras que la potencia necesaria para mantener activa la cavidad de aire es menos del 3% de la potencia total de la maquinaria principal del buque.

Para usar de forma exitosa la lubricación con aire, la quilla y el pantoque del buque deben poseer un perfil adecuado que permita minimizar el gasto de energía necesaria para mantener la cavidad de aire activa.

Aún esta tecnología no ha entrado en el mercado, pero actualmente se están llevando a cabo diversos estudios y experiencias.



Imágenes 63 y 64: Prototipos de ACS. Fuentes: rexresearch.com y marineinsight.com.

3.2.13.2.- Optimización de la forma y dimensiones del buque.

Desde optimizar las líneas del casco hasta las formas de proa (bulbo) o el correcto diseño de las formas de popa contribuirán a reducir la resistencia al avance y por tanto resultar en un ahorro del combustible de un 10-15%.

3.2.13.2.- Adecuación de la situación de la línea de ejes.

En aquellos buques equipados con hélices convencionales situadas en líneas de eje externas, su disposición siguiendo el transcurso del flujo de agua de proa a popa resulta en una menor resistencia al avance y propicia un flujo con distorsiones al propulsor. Se hace también necesaria la instalación de arbotantes adaptados a la forma de la corriente. Todo esto podría resultar en una disminución del consumo de combustible de aproximadamente el 2% en un ferry típico.

3.2.13.3.- Empleo de materiales más ligeros, como el aluminio.

3.2.13.4.- Reducción del incremento de resistencia debido a aberturas practicadas en el casco, que distorsionan el flujo de agua de proa a popa.

Por ejemplo, poner rejillas en los túneles de las hélices de proa.

El diseño y la correcta situación de las aberturas practicadas en el casco puede disminuir la demanda de potencia en un 5% aproximadamente.

3.2.14.- SISTEMAS AUXILIARES Y COMPLEMENTARIOS.

3.2.14.1.- Sistema de recuperación de calor residual.

Aprovechar la energía térmica de los gases de escape convirtiéndolos en energía eléctrica aprovechable para la alimentación de los servicios eléctricos del buque.

El aprovechamiento de los gases de escape puede proporcionar entre el 10-20% de la potencia suministrada por el motor, lo que puede suponer un ahorro del combustible de aproximadamente el 10%.

3.2.14.2.- Torre de lavado.

Dispositivo a través del cual circulan los gases de escape de un motor o generador con el fin de reducir su contenido en SOx y material en partículas.

3.2.14.3.- Sistema de recirculación de los gases de escape.

Método para reducir las emisiones de NOx en motores de combustión interna, consistente en reducir la temperatura de combustión a fin de mantenerla por debajo del umbral térmico de formación de NOx. Para ello se hace recircular el aire de escape por el motor mezclado con aire ambiente.

Pueden existir diversas configuraciones, entre ellas el sistema de agua en combustible, que consiste en mezclar agua con el combustible gasóleo, posibilitando la reducción de emisiones de NOx. Se ha comprobado que añadiendo un 50% de agua a una cantidad determinada de combustible gasóleo estas emisiones pueden reducirse entre un 30-35%, aunque aumentan las emisiones de CO2 entre un 1-2%. También se logra reducir la cantidad de material particulado.

3.3.- REFLEXIONES.

En el caso de la propulsión naval, prácticamente el 100% de los buques son movidos mediante combustibles fósiles. A pesar de que se están investigando diversos sistemas utilizando energías renovables, a día de hoy la inmensa mayoría no son más que meros prototipos, siendo aún necesarios muchos años de investigación para suplir las carencias y fallos de estos novedosos sistemas. Recordemos que los paneles fotovoltaicos o las turbinas eólicas son muy dependientes del Sol y del viento. Los agrocombustibles no son factibles, debido a la pérdida de biodiversidad, entre otros factores. Además, debemos recordar que todos estos sistemas no solucionan el problema del agotamiento de los combustibles fósiles ni la contaminación atmosférica, aunque sí lo atenúan.

Quizás una buena alternativa a los combustibles fósiles, además de la energía nuclear, pudiera ser la utilización del hidrógeno, como ya se comentó. Aquí vuelve a entrar en juego el papel de la energía nuclear, ya que una de las aplicaciones más prometedoras de ésta es su utilización para la producción de hidrógeno, de la que posteriormente hablaremos, en el capítulo dedicado a las aplicaciones de la energía nuclear.

Por todo lo anterior, cabe destacar la importancia del desarrollo de la energía nuclear, tanto de la actual fisión como de la fusión nuclear.

En los capítulos posteriores del trabajo se pasará a hablar sobre este tipo de energía, su recorrido histórico, definiciones, cómo se produce, ventajas, inconvenientes, principales aplicaciones y su uso en la propulsión naval.

CAPÍTULO 4: LA ENERGÍA NUCLEAR

4.1.- INTRODUCCIÓN

La energía nuclear o energía atómica es la energía que se libera espontánea o artificialmente en las reacciones nucleares. Se basa en la magnitud de la energía con la que están unidos los componentes de los núcleos de los átomos. La energía que mantiene unidos a los protones y neutrones del núcleo de un átomo es mucho mayor que la energía que mantiene unidos los átomos de una molécula; por ello, una reacción nuclear libera mucha más energía que una reacción química. Así, la energía liberada en una reacción nuclear es millones de veces mayor que la liberada por una reacción química.

Estas reacciones se dan en los núcleos de algunos isótopos de ciertos elementos químicos, siendo la más conocida la fisión del uranio-235 (^{235}U), con la que funcionan los reactores nucleares, y la más habitual en la naturaleza, en el interior de las estrellas, la fusión del par deuterio-tritio ($2\text{H}-3\text{H}$). Sin embargo, para producir este tipo de energía aprovechando reacciones nucleares pueden ser utilizados muchos otros isótopos de varios elementos químicos, como el torio-232, el plutonio-239, el estroncio-90 o el polonio-210 (^{232}Th , ^{239}Pu , ^{90}Sr , ^{210}Po ; respectivamente).

Como dato, podemos afirmar que la energía producida por la fisión de un kg de uranio-235 (reacción nuclear) es equivalente a la energía que se puede obtener de la combustión de aproximadamente 2.000 toneladas de petróleo (reacción química).

La explicación la encontramos en la famosa Ley enunciada por Albert Einstein en la que se relaciona masa y energía, $E=MC^2$, donde:

E= energía liberada, y

M= diferencia o incremento de masa.

C= velocidad de la luz.

Según esta Ley, la masa se puede transformar en energía y la energía en masa. Así, cuando en un proceso se pierde masa, ésta no desaparece, sino que se transforma en energía y una pequeña cantidad de masa es capaz de liberar gran cantidad de energía, ya que la velocidad de la luz al cuadrado tiene una gran magnitud, y al multiplicarlo por la masa, resulta una energía muy grande en comparación con la masa transformada.

Existen algunos átomos muy pesados, en los cuales es posible que el núcleo se pueda dividir en dos partes más pequeñas. Este proceso llamado de “Fisión Nuclear” libera una enorme cantidad de energía en forma de calor, que puede ser aprovechada en una central termoeléctrica para producir electricidad o en una planta de propulsión en un buque.

Los dos sistemas más investigados y trabajados para la obtención de energía aprovechable a partir de la energía nuclear de forma masiva son **la fisión nuclear y la fusión nuclear**. La energía nuclear puede transformarse de forma descontrolada, dando lugar al armamento nuclear; o controlada en reactores nucleares en los que se produce energía eléctrica, energía mecánica o energía térmica. Tanto los materiales usados como el diseño de las instalaciones son completamente diferentes en cada caso.

A parte de estos dos sistemas (Fisión y Fusión), a mediados de los 50 comienzan en Estados Unidos las primeras investigaciones encaminadas a estudiar las aplicaciones nucleares en el espacio, surgiendo los generadores termoeléctricos de radioisótopos (RTG), en los que se aprovechan los distintos modos de desintegración (alfa y beta) para generar electricidad en sistemas de termopares a partir del calor transferido por una fuente radiactiva.

La principal característica de la energía nuclear es la alta calidad de la energía que puede producirse por unidad de masa de material utilizado en comparación con cualquier otro tipo de energía conocida, pero sorprende la poca eficiencia del proceso, ya que se desaprovecha entre un 86 y un 92% de la energía que se libera.

4.2.- DEFINICIONES.

4.2.1.- LA FISIÓN NUCLEAR.

La fisión es una reacción nuclear (en el núcleo atómico) que tiene lugar cuando un núcleo pesado de un átomo se divide en dos o más núcleos más pequeños, además de algunos subproductos como neutrones libres (2 ó 3; 2,5 de media), fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa (núcleos de helio) y beta (electrones y positrones de alta energía).

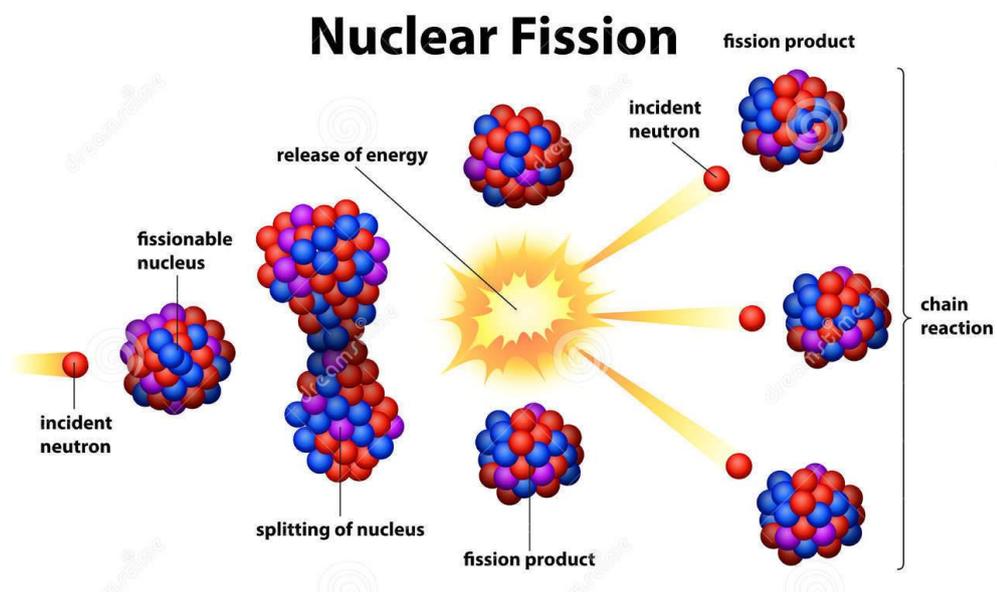


Imagen 65: Fisión Nuclear. Fuente: es.dreamstime.com

El proceso de Fisión Nuclear empleado actualmente en los Reactores de las centrales termoeléctricas y las plantas de propulsión de los buques consiste en dividir un átomo pesado como el de Uranio o el Plutonio en dos átomos más ligeros, mediante el bombardeo del mismo con neutrones; la suma final de las masas de estos últimos átomos más la de los neutrones desprendidos y los subproductos de la reacción es menor que la masa del átomo original; la diferencia de estas masas es la energía liberada (recordemos, $E=MC^2$). Esta energía se libera en forma de calor, el cual es utilizado para generar vapor que actúe sobre una turbina.

4.2.2.- LA FUSIÓN NUCLEAR.

La Fusión Nuclear tiene lugar cuando dos núcleos atómicos ligeros se combinan para formar uno pesado, más neutrones. Con este proceso se libera energía, la cual corresponde a la diferencia entre la energía de los enlaces del núcleo pesado producido y la suma de las energías de enlace de los dos núcleos ligeros. La diferencia de masa entre el átomo obtenido y los átomos iniciales es mayor que en la Fisión; por lo tanto, se libera una cantidad de energía muchísimo mayor que en el proceso de Fisión.

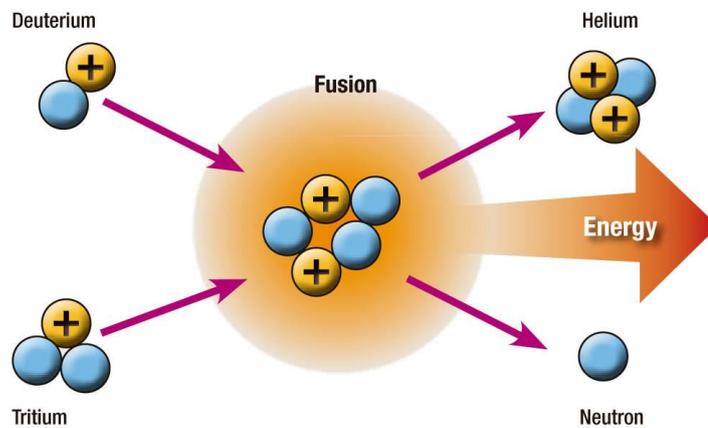


Imagen 66: Fusión Nuclear. Fuente: energia-nuclear.net

Es una fuente de energía prácticamente inagotable, ya que el deuterio se encuentra en el agua de mar y el tritio es fácil de producir a partir del neutrón que escapa de la reacción.

Este proceso ocurre de forma natural en el Sol y las estrellas en general, produciéndose reacciones nucleares de Fusión debido a la elevadísima temperatura de éstas, las cuales están compuestas principalmente por Hidrógeno y Helio.

El problema de la Fusión Nuclear radica en que al estar los núcleos de los átomos cargados positivamente, al acercarlos éstos se repelen. Para solucionarlo, los aceleramos en un acelerador de partículas y los hacemos chocar entre sí, pero se utiliza más energía en acelerarlos que la que se obtiene con las reacciones.

Es por ello que la Fusión Nuclear está aún en fase experimental, debido a que no es un proceso viable, al invertir más energía en el proceso que la que se obtiene, como ya se ha comentado.

Las dos técnicas que se están actualmente investigando son la Fusión por Confinamiento inercial y la Fusión por Confinamiento Magnético, que difieren en el método empleado para alcanzar las condiciones de tiempo, densidad y temperatura necesarias para que pueda alcanzarse la fusión controlada de forma continua.

La **Fusión por confinamiento inercial** intenta solucionar el problema comprimiendo esferas de combustible (deuterio-tritio) mediante haces de láseres o de partículas, obteniéndose densidades muy elevadas, de manera que los núcleos están muy cercanos entre ellos, y por efecto túnel se fusionan dando energía.

Hasta la década de los 70 no se desarrollaron láseres con las potencias necesarias para conseguir iniciar la reacción.

En la actualidad se investiga en varios centros, pero a nivel nacional.

En la Fusión por **confinamiento magnético** se calienta el combustible (deuterio-tritio actualmente) hasta temperaturas de millones de grados (hasta convertirle en plasma) de manera que los choques entre núcleos sean por agitación térmica. Al estar a tan alta temperatura el combustible se disocia en partículas con cargas positivas y negativas, pudiéndose controlar mediante campos magnéticos.

También mediante campos electromagnéticos se confina el plasma en una región lo más pequeña y alejada de las paredes del recipiente que sea posible, aumentando de forma continua la densidad y la temperatura.

4.3.- HISTORIA DE LA ENERGÍA NUCLEAR.

4.3.1.- DE LAS REACCIONES NUCLEARES.

En 1896, Henri Becquerel descubrió que algunos elementos químicos emitían radiaciones. Junto con Marie Curie y otros, descubrieron que estas radiaciones eran diferentes de los ya conocidos Rayos X, y que poseían propiedades distintas, denominando a los tres tipos que consiguieron descubrir alfa, beta y gamma.

Pronto se vio que todas ellas provenían del núcleo atómico que descubrió Rutherford en 1911.

En 1956 Clyde Cowan descubre el neutrino, partícula descrita de forma teórica en 1930 por Pauli, con lo que se puede explicar la radiación beta.

En 1932 James Chadwick descubrió la existencia del neutrón que Wolfgang Pauli había predicho en 1930.

Inmediatamente después, Fermi, tras el descubrimiento del neutrón, realizó una serie de experimentos en los que bombardeaba distintos núcleos con estas nuevas partículas. En estos experimentos observó que cuando utilizaba neutrones de energías bajas, en ocasiones el neutrón era absorbido emitiéndose fotones.

Para averiguar el comportamiento de esta reacción repitió el experimento sistemáticamente en todos los elementos de la tabla periódica. Así descubrió nuevos elementos radiactivos, pero al llegar al uranio obtuvo resultados distintos.

En 1938, en Alemania, Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassmann verificaron los experimentos de Fermi, consiguiendo explicar el nuevo fenómeno al suponer que el núcleo de uranio al capturar el neutrón se escindía en dos partes de masas aproximadamente iguales. De hecho detectaron bario, de masa aproximadamente la mitad que la del uranio. Posteriormente se averiguó que esa escisión (o fisión) no se daba en todos los isótopos del uranio, sino solo en el ^{235}U . Y más tarde aún se

supo que esa escisión podía dar lugar a muchísimos elementos distintos.

En Francia, Joliot Curie descubrió que además del bario, se emitían neutrones secundarios en esa reacción, haciendo factible la reacción en cadena. Se había llevado a cabo el descubrimiento de la fisión.

También en 1932 Mark Oliphant teorizó sobre la fusión de núcleos ligeros (de hidrógeno), describiendo poco después Hans Bethe el funcionamiento de las estrellas basándose en este mecanismo.

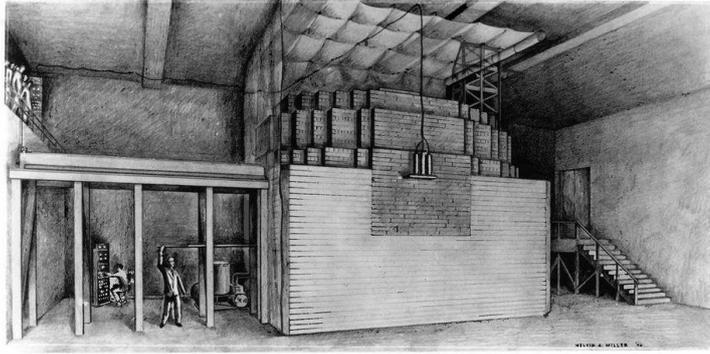


Imagen 67: Otto Hahn y Lise Meitner. Fuente:

4.3.2.- DE LA FISIÓN NUCLEAR.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el Departamento de Desarrollo de Armamento de la Alemania Nazi desarrolló un proyecto de energía nuclear (Proyecto Uranio) con vistas a la producción de un artefacto explosivo nuclear. Albert Einstein, en 1939, firmó una carta al presidente Franklin Delano Roosevelt de los Estados Unidos, escrita por Leó Szilárd, en la que se prevenía sobre este hecho.

El 2 de diciembre de 1942, como parte del proyecto Manhattan dirigido por J. Robert Oppenheimer, el italiano Enrico Fermi construyó el primer reactor de fisión nuclear del mundo hecho por el ser humano (existió un reactor natural en Oklo): el Chicago Pile-1 (CP-1).



Chicago Pile I (CP-1), World's First Reactor



Imágenes 68 y 69: dibujo del CP-1 (izquierda) y Enrico Fermi (derecha). Fuentes:Wikipedia y atomicheritage.org.

Como parte del mismo programa militar, se construyó un reactor mucho mayor en Hanford, destinado a la producción de plutonio, y al mismo tiempo, un proyecto de enriquecimiento de uranio en cascada. El 16 de julio de 1945 fue probada la primera bomba nuclear (nombre en clave Trinity) en el desierto de Alamogordo. En esta prueba se llevó a cabo una explosión equivalente a 19.000.000 de kg de TNT (19 kilotonnes), una potencia jamás observada anteriormente en ningún otro explosivo.

Ambos proyectos desarrollados finalizaron con la construcción de dos bombas, una de uranio enriquecido y una de plutonio (Little Boy y Fat Man) que fueron lanzadas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima (6 de agosto de 1945) y Nagasaki (9 de agosto de 1945) respectivamente. El 15 de agosto de 1945 acabó la segunda guerra mundial en el Pacífico con la rendición de Japón. Por su parte el programa de armamento nuclear alemán (liderado este por Werner Heisenberg), no alcanzó su meta antes de la rendición de Alemania el 8 de mayo de 1945.

Posteriormente se llevaron a cabo programas nucleares en la Unión Soviética (primera prueba de una bomba de fisión el 29 de agosto de 1949), Francia y Gran Bretaña, comenzando la carrera armamentística en ambos bloques creados tras la guerra, alcanzando límites de potencia destructiva nunca antes sospechada por el ser humano (cada bando podía derrotar y destruir varias veces a todos sus enemigos).

Ya en la década de 1940, el almirante Hyman Rickover propuso la construcción de

reactores de fisión no encaminados esta vez a la fabricación de material para bombas, sino a la generación de electricidad. Se pensó, acertadamente, que estos reactores podrían constituir un gran sustituto del diésel en los submarinos. Se construyó el primer reactor de prueba en 1953, botando el primer submarino nuclear (el USS Nautilus (SSN-571)) el 17 de enero de 1955 a las 11:00. El Departamento de Defensa estadounidense propuso el diseño y construcción de un reactor nuclear utilizable para la generación eléctrica y propulsión en los submarinos a dos empresas distintas norteamericanas: General Electric y Westinghouse. Estas empresas desarrollaron los reactores de agua ligera tipo BWR y PWR respectivamente.

Estos reactores se han utilizado para la propulsión de buques, tanto de uso militar (submarinos, cruceros, portaaviones,...) como civil (rompehielos y cargueros), donde presentan potencia, reducción del tamaño de los motores, reducción en el almacenamiento de combustible y autonomía no mejorados por ninguna otra técnica existente.

Los mismos diseños de reactores de fisión se trasladaron a diseños comerciales para la generación de electricidad.

Los únicos cambios producidos en el diseño con el transcurso del tiempo fueron un aumento de las medidas de seguridad, una mayor eficiencia termodinámica, un aumento de potencia y el uso de las nuevas tecnologías que fueron apareciendo.

Entre 1950 y 1960 Canadá desarrolló un nuevo tipo, basado en el PWR, que utilizaba agua pesada como moderador y uranio natural como combustible, en lugar del uranio enriquecido utilizado por los diseños de agua ligera. Otros diseños de reactores para su uso comercial utilizaron carbono (Magnox, AGR, RBMK o PBR entre otros) o sales fundidas (litio o berilio entre otros) como moderador. Este último tipo de reactor fue parte del diseño del primer avión bombardero (1954) con propulsión nuclear (el US Aircraft Reactor Experiment o ARE). Este diseño se abandonó tras el desarrollo de los misiles balísticos intercontinentales (ICBM).

Otros países (Francia, Italia, entre otros) desarrollaron sus propios diseños de reactores nucleares para la generación eléctrica comercial.

En 1946 se construyó el primer reactor de neutrones rápidos (Clementine) en Los Álamos, con plutonio como combustible y mercurio como refrigerante. En 1951 se construyó el EBR-I, el primer reactor rápido con el que se consiguió generar electricidad. Además de generar la primera electricidad en el mundo a partir de la energía atómica, el EBR-I fue también el primer reactor de reproducción que utilizó como combustible el plutonio.

En 1996, el Superfénix o SPX, fue el reactor rápido de mayor potencia construido hasta el momento (1200 MWe). En este tipo de reactores se pueden utilizar como combustible los radioisótopos del plutonio, el torio y el uranio que no son fisibles con neutrones térmicos (lentos).

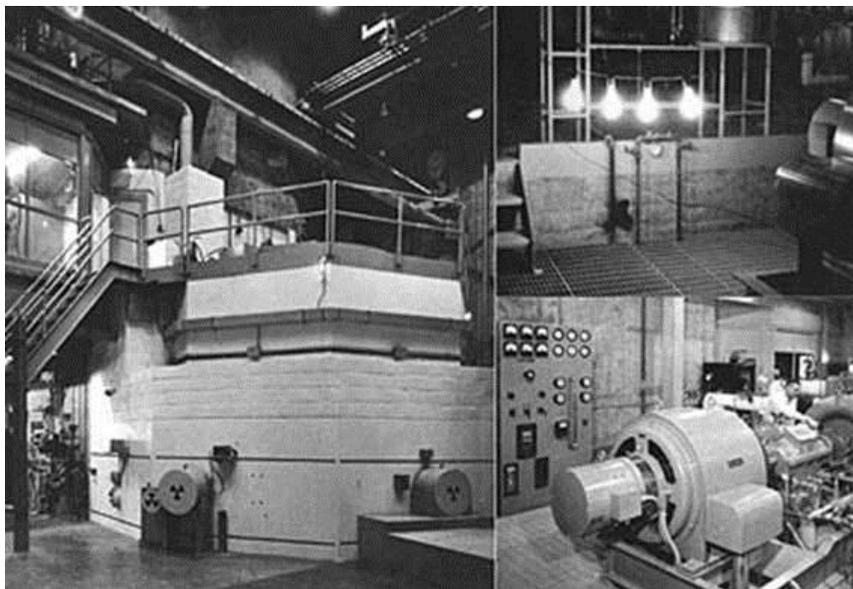


Imagen 70: La primera producción de energía nuclear eléctrica en el Laboratorio Nacional de Argonne tuvo lugar el 20 de diciembre de 1951, cuando cuatro bombillas se encendieron con la electricidad generada del reactor EBR-1. Fuente: Wikipedia.

En la década de los 50 Ernest Lawrence propuso la posibilidad de utilizar reactores

nucleares con geometrías inferiores a la criticidad (reactores subcríticos cuyo combustible podría ser el torio), en los que la reacción sería soportada por un aporte externo de neutrones. En 1993 Carlo Rubbia propone utilizar una instalación de espalación en la que un acelerador de protones produjera los neutrones necesarios para mantener la instalación. A este tipo de sistemas se les conoce como Sistemas Asistidos por Aceleradores (en inglés Accelerator driven systems, ADS sus siglas en inglés), y se prevé que la primera planta de este tipo (MYRRHA) comience su funcionamiento brevemente, en el centro de Mol (Bélgica).

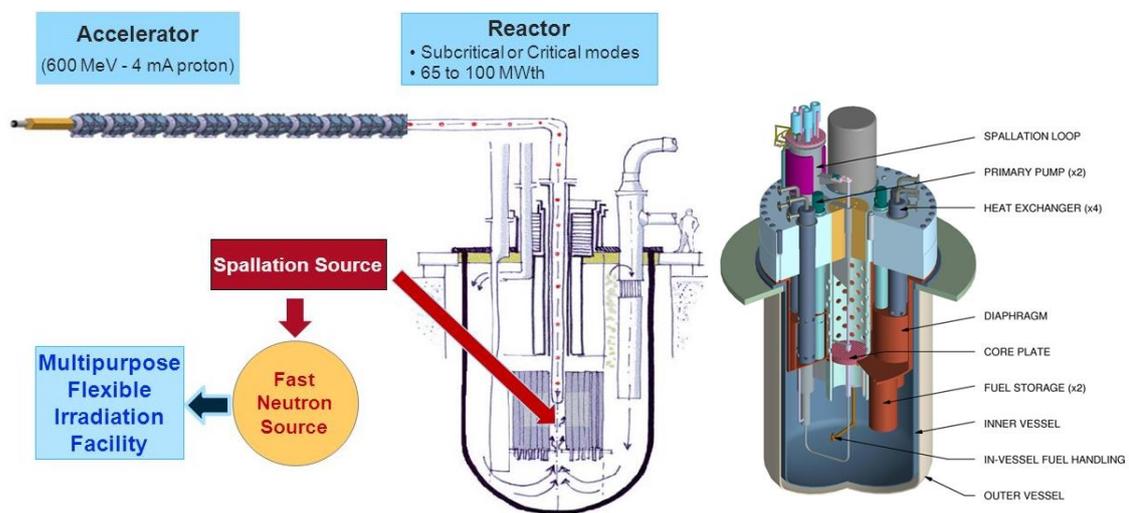


Imagen 71: Myrrha – Accelerator Driven System. Fuente: Bellona.org.

4.3.3.- DE LA FUSIÓN NUCLEAR.

Hasta el principio del S.XX no se entendió la forma en que se generaba energía en el interior de las estrellas para contrarrestar el colapso gravitatorio de estas. No existía reacción química con la potencia suficiente y la fisión tampoco era capaz. En 1938 Hans Bethe logró explicarlo mediante reacciones de fusión, con el ciclo CNO, para estrellas muy pesadas. Posteriormente se descubrió el ciclo protón-protón para estrellas de menor masa, como el Sol.

En los años 1940, como parte del proyecto Manhattan, se estudió la posibilidad del

uso de la fusión en la bomba nuclear. En 1942 se investigó la posibilidad del uso de una reacción de fisión como método de ignición para la principal reacción de fusión, sabiendo que podría resultar en una potencia miles de veces superior. Sin embargo, tras finalizar la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo de una bomba de estas características no fue considerado primordial hasta la explosión de la primera bomba atómica rusa en 1949, RDS-1 o Joe-1.



Imágenes 72 y 73: RDS-1 (primera bomba atómica rusa). Fuente: Wikipedia.

Este evento provocó que en 1950 el presidente estadounidense Harry S. Truman anunciara el comienzo de un proyecto que desarrollara la bomba de hidrógeno. El 1 de noviembre de 1952 se probó la primera bomba nuclear (nombre en clave Mike, parte de la Operación Ivy o Hiedra), con una potencia equivalente a 10.400.000.000 de kg de TNT (10,4 megatones). El 12 de agosto de 1953 la Unión Soviética realiza su primera prueba con un artefacto termonuclear (su potencia alcanzó algunos centenares de kilotones).

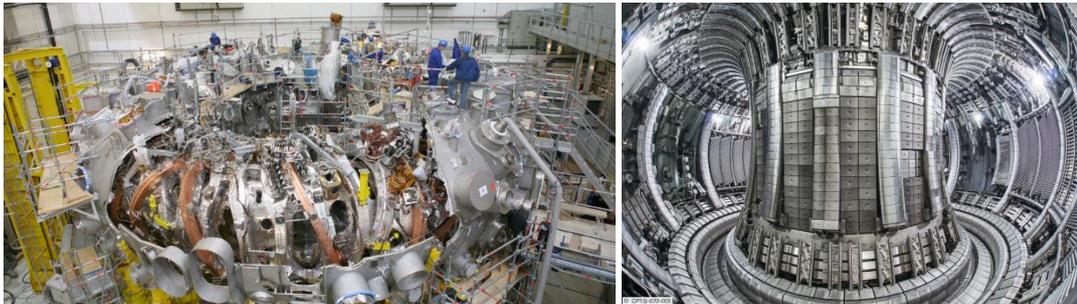


Imágenes 74 y 75: Bomba de Hidrógeno. Fuente: <http://omicron.lespanol.com> y antena3.com

Las condiciones que eran necesarias para alcanzar la ignición de un reactor de fusión controlado, sin embargo, no fueron derivadas hasta 1955 por John D.

Lawson. Los criterios de Lawson definieron las condiciones mínimas necesarias de tiempo, densidad y temperatura que debía alcanzar el combustible nuclear (núcleos de hidrógeno) para que la reacción de fusión se mantuviera. Sin embargo, ya en 1946 se patentó el primer diseño de reactor termonuclear.

En 1951 comenzó el programa de fusión de Estados Unidos, sobre la base del Stellarator. En el mismo año comenzó en la Unión Soviética el desarrollo del primer Tokamak, dando lugar a sus primeros experimentos en 1956. Este último diseño logró en 1968 la primera reacción termonuclear cuasi-estacionaria jamás conseguida, demostrándose que era el diseño más eficiente conseguido hasta la época.



Imágenes 76 y 77: Stellarator (izquierda) y Tokamak (derecha). Fuente: arstechnica.com y iter.org.

Para demostrar que la fusión nuclear es factible, en 1986, se formó un consorcio internacional llamado ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, en español Reactor Termonuclear Experimental Internacional) y su emplazamiento está en Cadarache (Francia).

Su objetivo es probar todos los elementos necesarios para la construcción y funcionamiento de un reactor de fusión nuclear que serviría de demostración comercial, además de reunir los recursos tecnológicos y científicos de los programas de investigación desarrollados hasta entonces.



Imagen 78: Instalaciones del ITER, Francia. Fuente: bbvaopenmind.com

El diseño de ITER intentará resolver los problemas existentes para conseguir un reactor de fusión de confinamiento magnético, basado en el Tokamak (siglas rusas que en castellano significan "Cámara toroidal y bobina magnética"), una cámara de 24 m de altura y 28 de diámetro con una capacidad de 837 m³. Para lograr la fusión, se debe confinar un plasma muy caliente durante un determinado periodo de tiempo. Es necesario calentar un gas mezcla de deuterio y tritio a temperaturas aproximadamente 100 millones de grados centígrados, pasando a un estado llamado plasma. Este reactor produce fuertes campos magnéticos producidos por grandes imanes superconductores que serán utilizados para confinar el plasma en una vasija del reactor que tiene forma de aro.

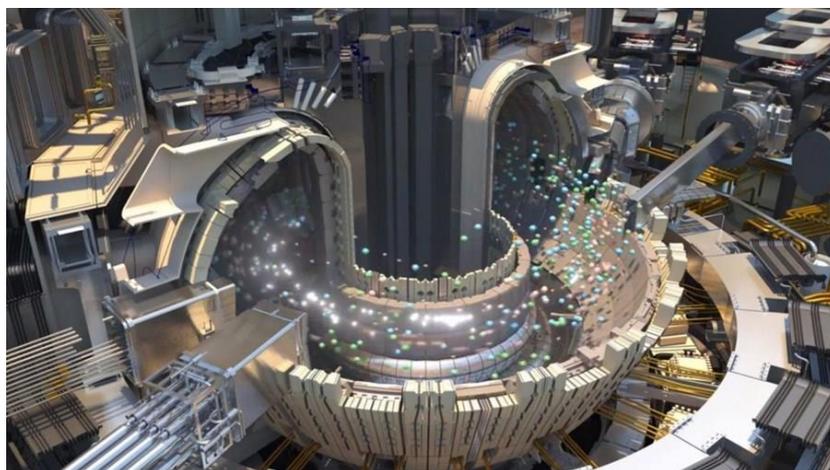


Imagen 79: Proyecto ITER. Fuente: foronuclear.org.

En 1962 se propuso otra técnica para alcanzar la fusión basada en el uso de láseres para conseguir una implosión en pequeñas cápsulas llenas de combustible nuclear (de nuevo núcleos de hidrógeno). Sin embargo hasta la década de los 70 no se desarrollaron láseres suficientemente potentes. Sus inconvenientes prácticos hicieron de esta una opción secundaria para alcanzar el objetivo de un reactor de fusión. Sin embargo, debido a los tratados internacionales que prohibían la realización de ensayos nucleares en la atmósfera, esta opción (básicamente microexplosiones termonucleares) se convirtió en un excelente laboratorio de ensayos para los militares, con lo que consiguió financiación para su continuación.

Así se han construido el National Ignition Facility estadounidense y el Láser Megajoule francés, que persiguen el mismo objetivo de conseguir un dispositivo que consiga mantener la reacción de fusión a partir de este diseño. Ninguno de los proyectos de investigación actualmente en marcha predicen una ganancia de energía significativa, por lo que está previsto un proyecto posterior que pudiera dar lugar a los primeros reactores de fusión comerciales (DEMO para el confinamiento magnético e HiPER para el confinamiento inercial).



Imágenes 80 y 81: National Ignition Facility (izquierda) y Láser Megajoule (derecha). Fuente: Wikipedia y <http://tengasepresente.blogspot.com.es>.

CAPÍTULO 5: REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.

5.1.- INTRODUCCIÓN.

Un reactor nuclear es un dispositivo en donde se produce una reacción nuclear controlada. Se puede utilizar para la obtención de energía en las denominadas centrales nucleares, la producción de materiales fisionables, como el plutonio, para ser usados en armamento nuclear, la propulsión de buques o satélites artificiales o incluso en investigación.

Una central nuclear puede tener varios reactores. Actualmente sólo producen energía de forma comercial los reactores nucleares de fisión, aunque existen reactores nucleares de fusión experimentales.

Se trata, por tanto, de una instalación física donde se produce, mantiene y controla una reacción nuclear en cadena; por ello, en un reactor nuclear se utiliza un combustible adecuado que permita asegurar la normal producción de energía generada por las sucesivas fisiones.

La potencia de un reactor de fisión puede variar desde unos pocos KW térmicos a unos 4500 KW térmicos (1500 MW eléctricos).

En cuanto a su emplazamiento, deben ser instalados en zonas cercanas al agua, como cualquier otra central térmica, para refrigerar el circuito, además de estar situados en zonas sísmicamente estables para evitar accidentes. En el caso de los reactores utilizados en los buques, el agua como refrigerante le tienen asegurado en cualquier condición.

Poseen grandes medidas de seguridad, y aunque no emiten gases que dañen la atmósfera, producen residuos radiactivos que duran decenas de miles de años, y que deben ser almacenados para su posterior uso en reactores avanzados y así

reducir su tiempo de vida a unos cuantos cientos de años.

Los reactores nucleares son los dispositivos en los que se produce una reacción de “Fisión Nuclear Controlada”, de la cual es posible el aprovechamiento de la energía producida por la rotura de enlaces de los núcleos de los átomos radiactivos. Esta división o Fisión Nuclear se obtiene bombardeando con neutrones los núcleos del elemento. Los neutrones emitidos en cada fisión, una vez reducida su velocidad por medio de una sustancia situada entre los elementos del combustible, denominada moderador (elemento con un Z pequeño, como por ejemplo el H, C o Li), producen el bombardeo de otros núcleos, provocando su fisión y dando así lugar a una reacción en cadena.

Una **reacción en cadena** ocurre como sigue: un acontecimiento de fisión empieza lanzando 2 ó 3 neutrones en promedio como subproductos. Estos neutrones se escapan en direcciones al azar y golpean otros núcleos, incitando a estos núcleos a experimentar fisión. Puesto que cada acontecimiento de fisión lanza 2 o más neutrones, y estos neutrones inducen otras fisiones, el proceso se acelera rápidamente y causa la reacción en cadena. El número de neutrones que escapan de una cantidad de uranio depende de su área superficial. Solamente los materiales fisibles (o fisionables) son capaces de sostener una reacción en cadena sin una fuente de neutrones externa. Para que la reacción en cadena de fisión se lleve a cabo es necesario adecuar la velocidad de los neutrones libres, ya que si impactan con gran velocidad sobre el núcleo del elemento fisible, puede que simplemente lo atraviese o lo impacte, y que este no lo absorba.

La **masa crítica** es la mínima cantidad de material requerida para que el material experimente una reacción nuclear en cadena. Se ha de maximizar la posibilidad de que un neutrón libre sea capturado por un núcleo fisionable. La masa crítica de un elemento fisionable depende de su densidad y de su forma física (barra larga, cubo, esfera, etc.). Puesto que los neutrones de la fisión se emiten en direcciones al azar, para maximizar las ocasiones de una reacción en cadena, los neutrones deberán

viajar tan lejos como sea posible y de esa forma maximizar las posibilidades de una reacción en cadena. Así, una esfera es la mejor forma y la peor es probablemente una hoja aplanada, puesto que la mayoría de los neutrones volarían de la superficie de la hoja y no chocarían con otros núcleos.

También es importante la densidad del material. Si el material es gaseoso, es poco probable que los neutrones choquen con otro núcleo porque hay demasiado espacio vacío entre los átomos y un neutrón volaría probablemente entre ellos sin golpear nada. Si el material se pone bajo alta presión, los átomos estarán mucho más cercanos y la probabilidad de una reacción en cadena es mucho más alta.

5.2.- ELEMENTOS DE LOS REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.

Un reactor nuclear de fisión está compuesto principalmente por los siguientes elementos:

5.2.1- COMBUSTIBLE.- ISÓTOPO FISIONABLE (DIVISIBLE) O FÉRTIL (CONVERTIBLE EN FISIONABLE POR ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA).

Aunque el combustible suele estar en forma sólida, depende del tipo de reactor: Uranio-235, Uranio-238, dióxido de uranio cerámico ligeramente enriquecido, uranio en tubos de aleación de magnesio, plutonio-239, torio-232, o mezclas de éstos (MOX: mezcla de óxidos de uranio y plutonio), o dióxido de uranio enriquecido o natural en tubos de aleación de zirconio.

El combustible habitual en los reactores refrigerados por agua ligera es el dióxido de uranio enriquecido, sometiendo, por tanto, a este nucleido a un proceso de enriquecimiento.

El uranio natural contiene 0.72% de uranio 235 que se puede fisurar y 99.28% de

uranio 238, el cual no se fisiona. Al uranio enriquecido, se le eleva artificialmente la concentración del uranio 235 entre un 3 -5%, disminuyéndose la del uranio 238 al 97% y 95% respectivamente.

5.2.2.- MODERADOR.

Disminuyen o frenan la velocidad de los neutrones producidos en la fisión, para que tengan la oportunidad de ser absorbidos por otros átomos fisionables y no se termine la reacción en cadena.

Como regla general, a menor velocidad del neutrón, mayor probabilidad de fisión con otros núcleos del combustible en los reactores que utilizan uranio-235 como combustible.

Entre los moderadores más utilizados están el agua ligera, el agua pesada, el grafito o sodio metálico, entre otros.

5.2.3.- REFRIGERANTE.

Conduce el calor generado por el combustible hasta un intercambiador de calor, o bien directamente a la turbina generadora de energía eléctrica o propulsión.

El refrigerante debe ser anticorrosivo, tener una gran capacidad calorífica y no debe absorber los neutrones.

Los refrigerantes más usuales son gases, como el anhídrido carbónico y el helio; líquidos como el agua ligera y el agua pesada, y metales líquidos como el sodio, mercurio, plomo...

5.2.4.- MATERIAL DE CONTROL.

Hace que la reacción en cadena se pare. Mantiene la intensidad de la reacción en

cadena que ocurre en el interior del reactor dentro de los límites deseados y de conformidad con la cantidad de energía térmica que se quiera producir.

Generalmente se usan en forma de barras o bien disueltas en el refrigerante. El interior de las barras de control se encuentra lleno de una sustancia con la propiedad de capturar neutrones, como el cadmio o el boro, y debido a esto la función de control se establece. Si se desea disminuir la intensidad de la reacción nuclear que ocurre dentro del reactor, basta con insertar las barras de control entre los ensambles de combustible del núcleo, en la medida de la disminución deseada.

5.2.5.- REFLECTOR.

Reduce el escape de neutrones, aumentando así la eficiencia del reactor. El medio reflector que rodea al núcleo debe tener una baja sección eficaz de captura.

Los reflectores más usados son: agua ligera, agua pesada, grafito, uranio natural.

5.2.6.- BLINDAJE.

Evita la fuga de radiación gamma y neutrones rápidos. Los materiales más usados para construir este blindaje son el agua, el plomo, el acero y el hormigón.

5.2.7.- ELEMENTOS DE SEGURIDAD.

Deben disponer de múltiples sistemas de seguridad, tanto activos (responden a señales eléctricas) como pasivos (actúan de forma natural, por gravedad, por ejemplo). La contención de hormigón que rodea a los reactores es la principal de ellas. Evitan que se produzcan accidentes, o que, en caso de producirse, haya una liberación de radiactividad al exterior del reactor.

5.3.- CLASIFICACIÓN DE LOS REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.

Desde el punto de vista de **su uso**, los reactores nucleares se clasifican en:

- Reactores de potencia: utilizados para la producción de energía termoeléctrica y en plantas de propulsión naval.
- Reactores experimentales: utilizados para efectuar estudios, investigaciones y experimentos.

Atendiendo al **combustible** nuclear utilizado:

- Reactores nucleares de Uranio natural.
- Reactores nucleares de Uranio enriquecido.
- Reactores nucleares mixtos, de óxidos de Uranio y Plutonio.

Según la **velocidad** de los neutrones:

- Reactores rápidos.
- Reactores térmicos.

Según el **moderador** utilizado:

- Reactores nucleares de agua pesada.
- Reactores nucleares de agua ligera.
- Reactores nucleares de grafito.

Según el **refrigerante** utilizado:

- Reactores refrigerados por gas (Helio, fundamentalmente).
- Reactores refrigerados por agua (ligera o pesada).
- Reactores refrigerados por metal líquido.
- Otros: reactores refrigerados por sales fundidas, por vapor de agua, etc.

La diferencia básica entre los distintos diseños de reactores nucleares de fisión es el combustible que utilizan. Esto influye en el tipo de moderador y refrigerante utilizado. De entre todas las posibles combinaciones entre tipo de combustible, moderador y refrigerante, sólo algunas son viables técnicamente, y sólo unas cuantas se han utilizado hasta el momento en reactores de uso comercial para la generación de electricidad.

Combustible	Moderador	Refrigerante	
Uranio natural	Grafito	Aire	
		CO ₂	
		H ₂ O (agua ligera)	
		D ₂ O (agua pesada)	
	D ₂ O (agua pesada)	Compuestos orgánicos	
		H ₂ O (agua ligera)	
		D ₂ O (agua pesada)	
		Gas	
	Uranio enriquecido	Grafito	Aire
			CO ₂
H ₂ O (agua ligera)			
D ₂ O (agua pesada)			
Sodio			
D ₂ O (agua pesada)		Compuestos orgánicos	
		H ₂ O (agua ligera)	
		D ₂ O (agua pesada)	
		Gas	
H ₂ O (agua ligera)		H ₂ O (agua ligera)	

Imagen 82: Cuadro-resumen combinación combustible, moderador y refrigerante en los reactores nucleares. Fuente: Hacia el buques de actividad sostenibles. J.R. Sánchez Girón.

Así, una clasificación comercial muy utilizada es la de clasificar los reactores nucleares por la combinación moderador/refrigerante utilizado.

Según esto, los tipos básicos de reactores nucleares de fisión son:

- **LWR** (Light Water Reactors; reactores de agua ligera). Utilizan como refrigerante y moderador el agua. Como combustible uranio enriquecido. Los más utilizados son los **PWR** (Pressure Water Reactor o reactores de agua a presión) y los **BWR** (Boiling Water Reactor o reactores de agua en ebullición).
- **CANDU** (Canada Deuterium Uranium, Canadá deuterio uranio). Utilizan como moderador y refrigerante agua pesada (compuesta por dos átomos de deuterio y uno de oxígeno). Como combustible utilizan uranio natural.
- **FBR** (Fast Breeder Reactors o reactores rápidos realimentados). Utilizan neutrones rápidos en vez de térmicos para la consecución de la fisión. Como combustible utiliza plutonio, y como refrigerante sodio líquido. Este reactor no necesita moderador.
- **AGR** (Advanced Gas-cooled Reactor, reactor refrigerado por gas avanzado). Usa uranio como combustible. Como refrigerante utiliza CO₂ y como moderador grafito.
- **RBMK** (Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny, reactor de canales de alta potencia). Su principal función es la producción de plutonio, y como subproducto genera energía eléctrica. Utiliza grafito como moderador y agua como refrigerante. Uranio enriquecido como combustible. Puede recargarse en marcha. El reactor de Chernóbil era de este tipo.
- **ADS** (Accelerator Driven System, sistema asistido por aceleración). Utiliza una masa subcrítica de torio, en la que se produce la fisión solo por la introducción, mediante aceleradores de partículas, de neutrones en el reactor. Se encuentran en fase de experimentación, y se prevé que una de

sus funciones fundamentales sea la eliminación de los residuos nucleares producidos en otros reactores de fisión.

	REACTOR	COMBUSTIBLE	MODERADOR	REFRIGERANTE
LWR	PWR	Uranio enriquecido	Agua ligera	Agua ligera
	BWR	Uranio enriquecido	Agua ligera	Agua ligera
	CANDU	Uranio natural	Agua pesada	Agua pesada
	AGR	Uranio enriquecido	Grafito	CO2
	RBMK	Uranio natural o enriquecido	Grafito	Agua ligera
	Otros	Uranio enriquecido	Grafito	Agua ligera
	Reactores de neutrones rápidos (FBR)	U, Pu y Th	No	Metales líquidos

Imagen 83: Tabla-resumen de los tipos de reactores de fisión más conocidos. Fuente: propia.

5.4.- REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN MÁS UTILIZADOS.

Hasta la fecha, los reactores nucleares más utilizados son **reactores de uranio enriquecido y agua a presión como refrigerante y moderador de neutrones (PWR)**, con las evoluciones propias de la tecnología a lo largo de los años pero manteniendo las limitaciones intrínsecas a este tipo de reactor.

Podemos afirmar que el factor limitante en este tipo de reactores es su baja rentabilidad económica, debida fundamentalmente a:

- Grandes presiones requeridas en el PWR para mantener el refrigerante en estado líquido.
- Exhaustivo control de las condiciones químicas del PWR para reducir los efectos mecánicos y radioquímicos de los productos de corrosión.

En el caso de la propulsión naval, lo anterior se traduce en gran volumen y peso, restando capacidad al buque y aumentando los costes y el mantenimiento.

El predominio del PWR en la propulsión nuclear se debe a la temprana elección del agua como refrigerante, por sus cualidades como moderador, capacidad de transferencia de calor, disponibilidad y costo, versatilidad para bombeo, y su relativa estabilidad química en operación.

A pesar de ser idóneo, como ya se ha comentado, para la propulsión de buques de guerra y submarinos, por su peso específico y volumen se aprecia prohibitivo para propulsar buques mercantes.

Un **reactor de agua en ebullición (BWR)** (boiling water reactor), es un tipo de reactor nuclear de agua ligera, diseñado por General Electric a mediados de los cincuenta, y en el que el agua común se utiliza como refrigerante y moderador. Ésta alcanza la ebullición en el núcleo, formando vapor que se utiliza para impulsar la turbina que mueve el generador eléctrico.

La potencia del reactor se controla de dos formas:

- Mediante barras de control, introducidas por la parte inferior de la vasija del reactor. Este método se utiliza para controlar la potencia en el arranque del reactor y cuando éste trabaja hasta el 70% de la potencia.
- Mediante flujo de agua, es decir, variando el flujo del agua a través del núcleo, para controlar la potencia cuando el reactor está trabajando entre el 70 y el 97%.

Este diseño no ha encontrado justificación en el ambiente marítimo, pues al tener el agua en el reactor dos fases (líquida y vapor), un incremento en la presión del vapor tendrá como resultado una disminución súbita de la proporción de vapor con respecto al agua en el interior del reactor; este aumento de agua llevará a una mayor moderación de neutrones y, en consecuencia, a un aumento de la potencia de salida del reactor. Además, este tipo de reactor demanda blindar toda la planta, requiriéndose una vasija de presión mucho más grande que en los reactores PWR, lo cual redundaría en mayor coste y mayor volumen y peso de la instalación. No debemos olvidar la contaminación de la turbina por productos de la fisión.

En los **reactores refrigerados por metal líquido (LMR)**, se aprovecha la gran capacidad de transferencia de calor de los metales fundidos. Se trata de reactores compactos y livianos que no requieren operar a alta presión; sin embargo, no han proliferado por dificultades con su estabilidad química.

Un reactor que puede resultar apto para la propulsión naval es el **refrigerado por algún gas y moderado por grafito**. Esta es una evolución del primer reactor nuclear artificial, el reactor CP- 1 (Chicago Pile-1) de Enrico Fermi. Este tipo de reactor ha sido utilizado ampliamente en generación eléctrica, en particular en el Reino Unido, donde tempranamente se exploró el reactor tipo Magnox (llamados así por sus vainas de magnesio-aluminio-berilio), y luego en los **reactores avanzados refrigerados por gas (AGR)**, mientras la mayoría de los países se concentraba en la línea de reactores PWR. A pesar de este predominio, varios países construyeron reactores refrigerados por gas, incluyendo el **reactor a gas de alta temperatura (HTGR)**, para mayor eficiencia térmica.

El **reactor refrigerado por gas helio**, en la versión **GT-MHR** (reactor modular acoplado directamente a una turbina de helio) utiliza un ciclo térmico Brayton, y puede ser una buena opción para la propulsión de buques por tratarse de una planta más compacta que las actuales plantas nucleares. De este tipo de reactor pasaremos a hablar en profundidad en un apartado posterior.

5.5.- VENTAJAS DE LOS REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.

- Apenas emiten contaminantes al aire (aunque periódicamente purgan pequeñas cantidades de gases radiactivos).
- Los residuos producidos son muchísimo menores en volumen y más controlados que los residuos generados por las plantas alimentadas por combustibles fósiles. Las centrales térmicas convencionales (utilizan combustibles fósiles) se emiten gases de efecto invernadero (CO₂ principalmente), gases que producen lluvia ácida (SO₂ principalmente), carbonilla, metales pesados, miles de toneladas anualmente de cenizas, e incluso material radiactivo natural concentrado (NORM). En una central nuclear, los residuos sólidos generados son del orden de un millón de veces menores en volumen que los contaminantes de las centrales térmicas.
- El uranio enriquecido utilizado en la mayor parte de los reactores nucleares no sirve para construir un arma nuclear ni para usar uranio procedente de ellas. Para ello se diseñan los reactores en ciclos de alto enriquecimiento o bien se usan diseños como reactores tipo RBMK usados para la generación de plutonio.
- Últimamente se investigan centrales de fisión asistida, donde parte de los residuos más peligrosos serían destruidos mediante el bombardeo con partículas procedentes de un acelerador (probablemente protones) que por espalación producirán neutrones que a su vez provocarían la transmutación de esos isótopos más peligrosos. Esta sería una especie de central de neutralización de residuos radiactivos automantenida. El rendimiento de estas centrales sería, en principio, menor, dado que parte de la energía generada se usaría para la transmutación de los residuos.

5.6.- INCONVENIENTES DE LOS REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.

- La percepción de peligro en la población, debido, fundamentalmente a:
 - Posibles accidentes en una central atómica.
 - Ataques terroristas.
 - Peligrosidad de los residuos y su alto poder contaminante del Medio Ambiente.
 - Basureros nucleares.
 - Posible desviación de los residuos para la producción de armas de destrucción masiva.
- Los reactores nucleares generan residuos radiactivos. Algunos de ellos con un semiperiodo elevado, como el americio, el neptunio o el curio, y de alta toxicidad. Estos residuos tienen una vida de cientos e incluso miles de años.
- Algunas centrales también sirven para generar material adicional de fisión (plutonio) que puede usarse para la creación de armamento nuclear.
- La probabilidad de que un accidente similar al sucedido en Chernobyl se repita es indeterminable. Los accidentes nucleares más graves han sido: Mayak (Rusia) en 1957, Windscale (Gran Bretaña) en 1957, Three Mile Island (EE.UU) en 1979, Chernobyl (Ucrania) en 1986, Tokaimura (Japón) en 1999 y Fukushima (Japón) en 2011. Y la lista es extensa en el caso de accidentes serios como filtraciones, y/o pérdida de material radiactivo.
- A estos accidentes se les suma la pérdida económica que generan los basureros nucleares y el temor de una disposición inadecuada de los residuos nucleares, vinculado a un factor económico. Cuando se calcula el costo del Kwh generado en una planta atómica, no se incluyen los costos de los basureros nucleares. De incluirse este costo, el Kwh sería el más caro de todos los sistemas de producción de energía. Por esta razón hay pocos basureros nucleares que cumplan los requisitos mínimos de seguridad.

5.7.- DIFERENCIAS ENTRE REACTORES MARINOS (BUQUES) Y REACTORES EN TIERRA (CENTRALES NUCLEARES).

En primer lugar, debemos tener en cuenta que, mientras que los reactores terrestres producen miles de megavatios de potencia, un reactor típico de propulsión marina no produce más de unos pocos cientos de megavatios.

Un reactor marino debe ser físicamente pequeño, por lo que deben de generar una mayor potencia por unidad de espacio. Esto significa que sus componentes están sujetos a mayores tensiones que las de un reactor terrestre.

Además, los sistemas mecánicos en un reactor marino deberán funcionar sin problemas en las condiciones adversas encontradas en el ambiente marino, como la vibración, los balances o las cabezadas.

El mecanismo de parada de un reactor marino no puede basarse en la gravedad para bajar las barras de control, tal y como se hace en uno terrestre.

Los reactores nucleares marinos tienen peor mantenimiento, debido a la corrosión ocasionada por el agua de mar.

El combustible de un reactor nuclear marino está normalmente más enriquecido que el de un reactor en tierra, lo que disminuye el peso del combustible, aumenta la potencia del reactor y la vida útil de la carga.

En cuanto a la construcción, para los elementos del núcleo y alrededores, en los reactores nucleares navales se suele emplear una aleación de metal/zirconio en

lugar de óxido de uranio cerámico, que a menudo se utiliza en los reactores montados en tierra.

En cualquier caso, para la construcción de los elementos del núcleo han de utilizarse materiales que sean capaces de soportar una gran cantidad de radiación sin que les afecte.

5.8.- GENERACIONES DE REACTORES NUCLEARES.

- **Reactores de I Generación:** son las primeras plantas construidas en las décadas de 1940 y 1950, en general prototipos. Como ejemplos se mencionan a: Shippingport, Dresden y Fermi. La mayor parte de estas instalaciones han dejado ya de funcionar.
- **Reactores de II Generación:** son los que se diseñaron y construyeron en las décadas de 1960 y 1970. Corresponden a la mayoría de los reactores en funcionamiento en la actualidad. Normalmente son plantas de generación de electricidad. Suelen ser conocidos por sus siglas en inglés: LWR, PWR, BWR, CANDU, RBMK, etc.
- **Reactores de III Generación:** son los que se están diseñando desde 1990, y unos pocos entraron a operar a partir de 1996. Se los conoce también como *reactores avanzados*, por ser una evolución de las líneas más exitosas de la segunda generación, aunque existen algunos diseños completamente nuevos, como el **PBMR** (reactor modular de lecho de bolas), que utiliza helio como refrigerante y combustible TRISO, que contiene el moderador de grafito en su composición.
Sólo se han puesto en marcha algunos en Japón, y se están construyendo algunos otros.

- **Reactores de IV Generación:** El Foro Internacional de la Generación IV (GIF) es un grupo internacional de organismos gubernamentales, cuyo objetivo es facilitar la cooperación bilateral y multilateral para el desarrollo de nuevos reactores nucleares de futuro, conocidos como la Generación IV.

En su reunión de septiembre de 2002, en Tokio, se anunció un acuerdo entre los 10 países miembros (Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Sudáfrica, Corea, Suiza, Reino Unido y Estados Unidos), por el cual se han escogido seis tecnologías de nuevos reactores y sus ciclos de combustible, que representan el futuro de la energía nuclear, para que sean desarrollados conjuntamente antes del año 2030. Estas seis tecnologías incluyen los reactores rápidos refrigerados por gas, los reactores rápidos refrigerados por plomo, los reactores de sales fundidas, los reactores rápidos refrigerados por sodio, los reactores supercríticos refrigerados por agua y los reactores de muy alta temperatura.

Probablemente en los próximos años se construyan los primeros prototipos que permitirán probar su factibilidad tecnológica. Hay expectativa de que produzcan mucho menos residuo nuclear, venciendo de esta manera una de las mayores flaquezas de la tecnología actual. Y obviamente, con sustanciales mejoras en la seguridad, con concepciones nuevas y al mismo tiempo más económicas o competitivas, aspecto importante para la generación de electricidad.

CAPÍTULO 6: APLICACIONES DE LA ENERGÍA NUCLEAR.

6.1.- TECNOLOGÍA NUCLEAR.

6.1.1.- BOMBA ATÓMICA.

6.1.1.1.- Bomba de fisión.

Dos tipos: las que utilizan uranio altamente enriquecido o las que utilizan plutonio. Ambas se fundamentan en una reacción de fisión en cadena descontrolada, y sólo se han empleado en un ataque real en Hiroshima y Nagasaki, al final de la Segunda Guerra Mundial.

Para que este tipo de bombas funcionen es necesario utilizar una cantidad del elemento utilizado superior a la Masa Crítica (mínima cantidad de material requerida para que el material experimente una reacción nuclear en cadena).

6.1.1.2.- Bomba de fusión.

Llamada Bomba Termonuclear, Bomba H o Bomba de Hidrógeno. Este tipo de bomba no se ha utilizado nunca contra ningún objetivo real. Pueden ser miles de veces más potentes que las de fisión (en realidad, no existe un límite a la potencia de estas bombas).

Las bombas de hidrógeno utilizan una bomba primaria de fisión que genera las condiciones de presión y temperatura necesarias para comenzar la reacción de fusión de núcleos de hidrógeno. Los únicos productos radiactivos que generan estas bombas son los producidos en la explosión primaria de fisión, por lo que a veces se le ha llamado bomba nuclear limpia.

6.1.2.- BUQUES MILITARES DE PROPULSIÓN NUCLEAR.

Durante la segunda guerra mundial se comprobó que el submarino podía ser un arma decisiva, pero poseía un grave problema: su necesidad de emerger tras cortos períodos para obtener aire para la combustión del diésel en que se basaban sus motores (la invención del snorkel mejoró algo el problema, pero no lo solucionó). El Almirante Hyman G. Rickover fue el primero que pensó que la energía nuclear podría ayudar con este problema.

Los desarrollos de los reactores nucleares permitieron un nuevo tipo de motor con ventajas fundamentales:

1. No precisa aire para el funcionamiento del motor, ya que no se basa en la combustión.
2. Una pequeña masa de combustible nuclear permite una autonomía de varios meses (años incluso) sin repostar. Por ejemplo, los submarinos de Estados Unidos no necesitan repostar durante toda su vida útil.
3. Un empuje que ningún otro motor puede equiparar, con lo que pudieron construirse submarinos mucho más grandes que los existentes hasta el momento. El mayor submarino construido hasta la fecha son los de la clase Akula rusos (desplazamiento de 48 mil toneladas, 175 m de longitud).

Estas ventajas condujeron a buques que alcanzan velocidades de más de 25 nudos, que pueden permanecer semanas en inmersión profunda y que además pueden almacenar enormes cantidades de munición (nuclear o convencional) en sus bodegas. De hecho las armadas de Estados Unidos, Francia y el Reino Unido sólo poseen submarinos que utilizan este sistema de propulsión.

En los submarinos se han utilizado reactores de agua a presión, de agua en ebullición o de sales fundidas. Para conseguir reducir el peso del combustible en estos reactores se usa uranio con altos grados de enriquecimiento (del 30 al 40% en los rusos o del 96% en los estadounidenses). Estos reactores presentan la ventaja de

que no es necesario (aunque sí es posible) convertir el vapor generado por el calor en electricidad, sino que puede utilizarse de forma directa sobre una turbina que proporciona el movimiento a las hélices que impulsan el buque, mejorando notablemente el rendimiento.

Se han construido una gran variedad de buques militares que usan motores nucleares y que, en algunos casos, portan a su vez misiles de medio o largo alcance con cabezas nucleares:

- Cruceros. Como el USS Long Beach (CGN-9), 2 reactores nucleares integrados tipo C1W.
- Destruyores. Como el USS Bainbridge (CGN-25) fue el buque de propulsión nuclear más pequeño jamás construido, usa 2 reactores nucleares integrados tipo D2G.
- Portaaviones. El más representativo es el USS Enterprise (CVN-65), construido en 1961 y aún operativo, que utiliza para su propulsión 8 reactores nucleares tipo A2W.
- Submarinos balísticos. Utilizan la energía nuclear como propulsión y misiles de medio o largo alcance como armamento. La clase Akula son de este tipo, utilizando 2 reactores nucleares tipo OK-650 y portando además de otro armamento convencional 20 misiles nucleares RSM-52, cada uno con 10 cabezas nucleares de 200 kilotones cada una.
- Submarinos de ataque. Como el USS Seawolf (SSN-21) de la clase Seawolf que usa un reactor nuclear integrado PWR tipo S6W. Alcanza una velocidad de 30 nudos.
- Estados Unidos, Gran Bretaña, Rusia, China y Francia poseen buques de propulsión nuclear.

6.1.3.- AVIONES MILITARES DE PROPULSIÓN NUCLEAR.

Tanto Estados Unidos como la Unión Soviética se plantearon la creación de una flota de bombarderos de propulsión nuclear. De este modo se pretendía mantenerlos cargados con cabezas nucleares y volando de forma permanente cerca

de los objetivos prefijados. Con el desarrollo del Misil balístico intercontinental (ICBM) a finales de los 50, más rápidos y baratos, sin necesidad de pilotos y prácticamente invulnerables, se abandonaron todos los proyectos.

Los proyectos experimentales fueron:

- Convair X-6. Proyecto estadounidense a partir de un bombardero B-36. Llegó a tener un prototipo (el NB-36H) que realizó 47 vuelos de prueba de 1955 a 1957, año en el que se abandonó el proyecto. Se utilizó un reactor de fisión de 3 MW refrigerado con aire que solo entró en funcionamiento para las pruebas de los blindajes, nunca propulsando el avión.
- Tupolev Tu-119. Proyecto soviético a partir de un bombardero Tupolev Tu-95. Tampoco pasó de la etapa de pruebas.

6.2.- GENERACIÓN NUCLEAR.

6.2.1.- PRODUCCIÓN DE CALOR PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD.

Probablemente, la aplicación práctica más conocida de la energía nuclear es la generación de energía eléctrica para su uso civil, en particular mediante la fisión de uranio enriquecido. Para ello se utilizan reactores en los que se hace fisión o fusión de un combustible. El funcionamiento básico de este tipo de instalaciones industriales es similar a cualquier otra central térmica, sin embargo poseen características especiales con respecto a las que usan combustibles fósiles:

- Se necesitan medidas de seguridad y control mucho más estrictas. En el caso de los reactores de cuarta generación estas medidas podrían ser menores, mientras que en la fusión se espera que no sean necesarias.
- La cantidad de combustible necesario anualmente en estas instalaciones es varios órdenes de magnitud inferior al que precisan las térmicas convencionales.
- Las emisiones directas de CO₂ y NO_x en la generación de electricidad, principales gases de efecto invernadero de origen antrópico, son nulas;

aunque indirectamente, en procesos secundarios como la obtención de mineral y construcción de instalaciones, sí se producen emisiones.

6.2.1.1- A partir de la fisión.

Tras su uso exclusivamente militar, se comenzó a plantear la aplicación del conocimiento adquirido a la vida civil. El 20 de diciembre de 1951 fue el primer día que se consiguió generar electricidad con un reactor nuclear (en el reactor estadounidense EBR-I, con una potencia de unos 100 kW), pero no fue hasta 1954 cuando se conectó a la red eléctrica una central nuclear (fue la central nuclear soviética Obninsk, generando 5 MW con solo un 17% de rendimiento térmico). El primer reactor de fisión comercial fue el Calder Hall en Sellafield, que se conectó a la red eléctrica en 1956. El 25 de marzo de 1957 se creó la Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM), el mismo día que se creó la Comunidad Económica Europea, entre Bélgica, Francia, Alemania, Italia, Luxemburgo y los Países Bajos. Ese mismo año se creó el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Ambos organismos con la misión, entre otras, de impulsar el uso pacífico de la energía nuclear.

Su desarrollo a nivel mundial experimentó un gran crecimiento, fundamentalmente en Francia y Japón, donde la crisis del petróleo de 1973 influyó definitivamente. En 1979 el accidente de Three Mile Island provocó un aumento muy considerable en las medidas de control y de seguridad en las centrales. En 1986 el accidente de Chernóbil, en un reactor RBMK de diseño ruso que no cumplía los requisitos de seguridad que se exigían en occidente acabó radicalmente con este crecimiento.

En 1965 se construyó la primera central nuclear en España, la Central Nuclear José Cabrera, en Guadalajara, la cual funcionó durante 38 años sin incidentes. Actualmente en nuestro país se encuentran en funcionamiento 6 centrales nucleares, todas ellas en la península, 2 de las cuales disponen de 2 reactores cada una (Almaraz y Ascó), por lo que suman 8 reactores de agua ligera, con una potencia total instalada de 7.728MWe.



Imagen 84: Central nuclear José Cabrera (Zorita). Fuente: Wikipedia.

6.2.1.2.- A partir de la fusión.

Al igual que la fisión, tras su uso exclusivamente militar, se propuso el uso de esta energía en aplicaciones civiles. En particular, los grandes proyectos de investigación se han encaminado hacia el desarrollo de reactores de fusión para la producción de electricidad. El primer diseño de reactor nuclear se patentó en 1946, aunque hasta 1955 no se definieron las condiciones mínimas que debía alcanzar el combustible (isótopos ligeros, habitualmente de hidrógeno), denominadas criterios de Lawson, para conseguir una reacción de fusión continuada. Esas condiciones se alcanzaron por vez primera de forma cuasiestacionaria el año 1968.

La fusión se plantea como una opción más eficiente (en términos de energía producida por masa de combustible utilizada) segura y limpia que la fisión, útil para el largo plazo. Sin embargo faltan aún años para poder ser utilizada de forma comercial (la fusión no será comercial al menos hasta el año 2050). La principal dificultad encontrada, entre otras muchas de diseño y materiales, consiste en la forma de confinar la materia en estado de plasma hasta alcanzar las condiciones impuestas por los criterios de Lawson, ya que no hay materiales capaces de soportar las temperaturas impuestas. Para ello, se han diseñado dos alternativas para alcanzar los criterios de Lawson, que son el confinamiento magnético y el confinamiento inercial, de las cuales ya se habló en un capítulo anterior.

Aunque ya se llevan a cabo reacciones de fusión de forma controlada en los distintos laboratorios, en estos momentos los proyectos se encuentran en el estudio de viabilidad técnica en centrales de producción eléctrica como el ITER o el NIF. El proyecto ITER, en el que participan entre otros Japón y la Unión Europea, pretende construir una central experimental de fusión y comprobar su viabilidad técnica. El proyecto NIF, en una fase más avanzada que ITER, pretende lo mismo en Estados Unidos usando el confinamiento inercial.

Una vez demostrada la viabilidad de conseguir un reactor de fusión que sea capaz de funcionar de forma continuada durante largos períodos, se construirán prototipos encaminados a la demostración de su viabilidad económica.

6.2.2.- PRODUCCIÓN DE CALOR PARA USO DOMÉSTICO E INDUSTRIAL.

El interés en el aprovechamiento del calor generado en los reactores nucleares cobra importancia desde el aumento en los precios del petróleo y la escasez de las reservas del mismo.

Actualmente, se consideran tres grandes campos de aplicación para el calor nuclear:

- La utilización directa del calor en los procesos industriales que requieran una temperatura superior a 800°C. Reactores HTR.
- La utilización del vapor en diversas industrias que requieran una temperatura principalmente del orden de los 200 a 300°C. Reactores LWR.
- La utilización del calor residual y de baja temperatura, procedente de las centrales nucleares, para desalación del agua de mar y para calefacción urbana o de grandes zonas. Cualquier central térmica.

Otras aplicaciones industriales de la alta temperatura son inyectar vapor a alta presión a fin de mejorar la recuperación del petróleo, refinar carbón y lignito, etc. Actualmente se está trabajando en el empleo de reactores de muy alta temperatura para la generación del calor.

6.2.3.- PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA.

Según el informe “Energy Technology Perspectives 2008” de la Agencia Internacional de la Energía, el hidrógeno es el combustible de transporte con mayor potencial en el largo plazo. Sin embargo, según la propia Agencia, pueden existir aplicaciones comerciales listas en 2020 basadas en hidrógeno si la producción de éste se acopla a los reactores nucleares de IV Generación, que pueden generar temperaturas superiores a los 900°C en el fluido de enfriamiento.

Una de las principales vías de producción es la electrólisis de alta temperatura. Emplea electricidad de origen nuclear y vapor generado por aprovechamiento del exceso de calor que porta el helio con el que se enfría el reactor.

A pesar de las desventajas del hidrógeno nuclear, que son inherentes a su origen nuclear (generación de residuos nucleares potencialmente peligrosos, seguridad en el funcionamiento, desmantelamiento de las instalaciones, etc.), las ventajas del hidrógeno nuclear, desde el punto de vista energético son muchas:

- Se logra una gran reducción de la carga de gases de efecto invernadero.
- Aumenta considerablemente el uso de energía útil, siendo el balance energético muy positivo.
- El potencial económico de la vía nuclear es, en general, mejor que cualquier origen renovable del hidrógeno.

Una de las mayores aplicaciones del hidrógeno es su utilización en las pilas de combustible, para la propulsión de vehículos por carretera (coches, autobuses, camiones...). Casi todos los fabricantes de automóviles ya tienen prototipos que funcionan con pilas de combustible. Debemos resaltar el hecho de que el uso de la pila de combustible la hace especialmente recomendable para su uso urbano, debido a su ausencia de emisiones.

Otro posible campo de aplicación del hidrógeno es la combustión directa en

motores alternativos o turbina de gas. El hidrógeno puede jugar un importante papel usado en mezclas con otros combustibles (solo no, por su elevada temperatura de combustión), ya que al incrementarse la estabilidad de la llama permite el empleo de mezclas ultra-pobres que presentan grandes ventajas desde el punto de vista de las emisiones.

Por todo ello, el hidrógeno se presenta como una energía limpia y una gran alternativa al empleo de los combustibles fósiles

6.2.4.- DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR.

La desalinización del agua salada o de fuentes subterráneas se puede realizar de manera económica y a gran escala gracias a la energía nuclear.

A día de hoy, la desalinización es el método más prometedor de afrontar la escasez de agua, pero no es posible aumentar la capacidad de desalinización sin poner en funcionamiento nuevas fuentes de energía lo suficientemente potentes.

Para generar grandes volúmenes de agua se suelen aplicar tres tecnologías principales:

- La ósmosis inversa.
- La destilación instantánea por multi-etapas.
- La destilación de efectos múltiples.

Las tres requieren grandes cantidades de energía y costes de generación muy elevados. Por ello, la combinación de una central nuclear con una instalación de desalinización es lo más prometedor a nivel económico.

Existen y han existido instalaciones que utilizan la energía nuclear para la desalinización: Kazajstán, Rusia (hay 4 operativas y otras 4 en construcción).

Diversos expertos coinciden en que el uso de la energía nuclear para la desalinización ofrece beneficios medioambientales en comparación con las plantas fósiles: no hay emisiones de CO₂ y no se generan cenizas ni residuos.

6.3.- PROPULSIÓN NUCLEAR CIVIL.

La energía nuclear se utiliza desde los años 50 como sistema para dar empuje (propulsar) distintos sistemas, desde los submarinos (el primero en utilizar la energía nuclear), hasta naves espaciales en desarrollo en este momento.

6.3.1.- BUQUES NUCLEARES CIVILES.

Tras el desarrollo de los buques de propulsión nuclear de uso militar se hizo pronto patente que existían ciertas situaciones en las que sus características podían ser trasladadas a la navegación civil.

Se han construido cargueros y rompehielos que usan reactores nucleares como motor.

6.3.2.- PROPULSIÓN AEROESPACIAL.

Aunque existen varias opciones que pueden utilizar la energía nuclear para propulsar cohetes espaciales, solo algunas han alcanzado niveles de diseño avanzados.

El cohete termonuclear, por ejemplo, utiliza hidrógeno recalentado en un reactor nuclear de alta temperatura, consiguiendo empujes al menos dos veces superiores a los cohetes químicos.

Otra de las posibilidades contempladas es el uso de un reactor nuclear que alimente a un propulsor iónico.

Otros métodos, los denominados de propulsión nuclear pulsada, o el uso de RTG como fuente para un cohete de radioisótopos.

6.3.3.- AUTOMÓVIL NUCLEAR.

La única propuesta conocida es el diseño conceptual lanzado por Ford en 1958, el Ford Nucleon. Nunca fue construido. En su diseño se proponía el uso de un pequeño reactor de fisión que podía proporcionar una autonomía de más de 8.000 Km.



Imágenes 85 y 86: Maqueta del Ford Nucleon. Fuente: 8000vueltas.com

Otra opción es el uso del hidrógeno en células de combustible como combustible para vehículos de hidrógeno. Se está investigando el uso de la energía nuclear para la generación del hidrógeno necesario mediante reacciones termoquímicas o de electrólisis con vapor a alta temperatura.

6.4.- TRANSMUTACIÓN DE ELEMENTOS.

- Producción de plutonio, utilizado para la fabricación de combustible de otros reactores o de armamento nuclear.
- Creación de diversos isótopos radiactivos, como el americio utilizado en los detectores de humo, o el cobalto-60, y otros utilizados en tratamientos médicos.

6.5.- APLICACIONES DE INVESTIGACIÓN.

- Su uso como fuente de neutrones y de positrones.
- Desarrollo de tecnología nuclear.

CAPÍTULO 7: LA PROPULSIÓN NUCLEAR

7.1.- INTRODUCCIÓN

La propulsión nuclear es, básicamente, la generación de energía calorífica en un lugar “reactor” mediante procesos de fisión controlados del combustible nuclear, utilizándose esta energía calorífica para producir el vapor que posteriormente trabajará en las turbinas que propulsarán al buque.

Algunas de las ventajas de este sistema, como ya se citó, son la enorme durabilidad de los reactores, el casi inagotable combustible nuclear, la prácticamente ilimitada autonomía de funcionamiento de sus sistemas y el no requerir de espacios para almacenar hidrocarburos para la propulsión, además de reducir enormemente sus costos de operación por este concepto (no requiere hacer bunker).

Entre las desventajas que encontramos a este sistema de propulsión, podemos citar los inmensos costos de instalación de estas plantas, lo sofisticado de esta tecnología, la costosa fabricación y mantenimiento de los reactores y demás sistemas de la planta y el enorme peso y volumen de estas complejas plantas propulsoras, por no citar las rigurosas medidas de seguridad que requieren, así como la gestión de los residuos nucleares generados. Además, debemos tener presente que no todos los países cuentan con la capacidad tecnológica y las posibilidades financieras para su implementación y soporte.

Por todo ello, este sistema ha estado limitado a grandes buques con misiones de despliegue a nivel global y gran capacidad para portar armas, que requieran gran autonomía, altas velocidades y grandes potencias de sus sistemas propulsores, como es el caso de los Portaaviones y los Submarinos.

A pesar de que se han construido una gran variedad de buques militares, la propulsión nuclear en buques civiles ha quedado relegada a unos pocos buques experimentales y a cuatro prototipos construidos, de los que pasaremos a hablar en el punto siguiente.

7.2.- BREVE HISTORIA DE LA PROPULSIÓN NUCLEAR.

Desde mediados del siglo pasado se comenzó a utilizar la energía nuclear para la propulsión de buques.

La energía nuclear de potencia nació en el submarino SSN Nautilus, en 1955, bautizado así en homenaje al submarino del mismo nombre de la novela de Julio Verne, "20.000 leguas de viaje submarino". Dicho submarino estaba propulsado mediante un reactor PWR de uranio enriquecido, utilizando agua a presión como refrigerante y moderador de neutrones.

Su primera salida a la mar tuvo lugar el 20 de enero de 1955 desde los astilleros de la Electric Boat en Groton (Connecticut). Con 91 metros de eslora y más de 3.000 TPM., la propulsión nuclear le proporcionó una autonomía sin precedentes hasta esa fecha (varias semanas de inmersión y hasta 140.000 km a la velocidad de crucero: 23 nudos).

El 4 de febrero de 1957, el "Nautilus" alcanzó las 60.000 millas marinas (111.120 km) en inmersión, que se corresponden con las 20.000 leguas de la novela de Julio Verne.

El 3 de agosto de 1958, a las 11.15, el "Nautilus" se convierte en el primer barco que navega bajo el casquete polar del Polo Norte.

Fue retirado del servicio en 1980 y declarado Lugar Histórico en 1982, antes de ser transformado en navío museo.



Imagen 87: SSN Nautilus, durante su primera salida a la mar el 20 enero 1955. Fuente: Wikipedia.

Debemos remontarnos hasta 1957, en Rusia, para conocer el primer buque civil de propulsión nuclear, el Nuclear Ship Lenin (NS Lenin), un rompehielos de unas 16.000 toneladas de desplazamiento y provisto inicialmente con dos reactores OK-150 de agua presurizada (PWR), de 90 MW de potencia que, a través de cuatro turbinas proporcionaban energía eléctrica a las tres hélices propulsoras del buque, alcanzando el mismo una velocidad máxima de 18 nudos.

Durante toda su vida útil, 31 años, el NS Lenin sufrió tan sólo dos averías; a raíz de su segunda avería se sustituyeron los dos reactores OK-150 por dos reactores de nueva generación OK-900, también de agua presurizada y de 171 MW de potencia cada uno. A pesar de ello, el NS Lenin demostró su rentabilidad económica, al satisfacer la elevada demanda de potencia requerida en su operación y venciendo las dificultades de aprovisionamiento existentes en la zona ártica.

Debido al éxito de este buque, se creó la clase Arktika, que a día de hoy cuenta con cuatro rompehielos operativos y dos retirados tras una vida media de 23 años.

El Lenin fue dado de baja en 1989 debido a que su casco se mostraba gastado por la fricción con el hielo.



Imágenes 88 y 89: NS Lenin (izquierda) y reactor nuclear del mismo buque (derecha). Fuente: Wikipedia.

En 1959 se bota el primer buque civil mercante, el NS Savannah, de 10.059 toneladas de desplazamiento y provisto con un PWR de 74 MW de potencia.

Su viaje inaugural fue el 31 de enero de 1962. Buque de pasajeros y carga general,

pintado en rojo y blanco. Contaba con una sala de cine, bar en la terraza y piscina. Las cabinas no tenían cortinas, sino que sus ventanas estaban polarizadas, diseñadas para reducir el deslumbramiento, alineadas de cara a los camarotes.

A pesar de no sufrir ningún accidente ni avería de importancia, su rentabilidad económica fue escasa, ya que disponía de poco espacio de carga y los gastos de mantenimiento eran elevados. Por ello, operó tan sólo durante 5 años. Podemos afirmar que el NS Savannah se diseñó con la intención de promover el uso pacífico de la energía nuclear y ostentar el potencial tecnológico de Estados Unidos y no como buque comercialmente competente.



Imágenes 90 y 91: NS Savannah. Fuente: maritime.org



Imágenes 92 y 93: Sala de máquinas del NS Savannah (izquierda) e interior del buque (derecha).

Fuente: bbc.com



Imagen 94: Vista desde el puente de mando. Fuente: bbc.com

Los dos siguientes intentos en la incursión nuclear de la Marina Mercante fueron el buque alemán NS Otto Hahn, en servicio desde 1968 hasta 1979, y el buque japonés NS Mutsu, en programa experimental desde 1970 hasta 1992.

El primero de ellos se trataba de un buque mixto, para llevar pasajeros y carga de mineral. A pesar de no sufrir ninguna avería mencionable, el NS Otto Hahn tuvo escasa rentabilidad económica, al ser sus costes de mantenimiento muy elevados.

El buque iba equipado con un reactor PWR construido por la filial germana del constructor del reactor del NS Savannah, la German Babcock & Wilcox, que proporcionaba una potencia de 38 MW, que era suficiente para que el buque llegase hasta los 16 nudos de velocidad con un único propulsor.



Imagen 95: Reactor del NS Otto Hahn. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

El buque de carga japonés, provisto de un reactor tipo PWR y potencia de turbina de 7,5 MW, pudiendo alcanzar una velocidad de 16,5 nudos, fue utilizado únicamente para la realización de pruebas, no llegando a transportar ninguna mercancía durante toda su vida.

Se pensó en que estaría listo para 1972, pero serios problemas con la coraza del reactor causaron sucesivas demoras por razones de seguridad. Luego de largas reparaciones el buque hizo algunos viajes cortos experimentales, aunque plagados de averías e incidentes.

En su viaje inaugural en 1974, el Mutsu comenzó con fugas de material radiactivo a 800 kilómetros de la costa de Japón. Se le permitió regresar al puerto de Ohminato para reparaciones, a pesar de las protestas de pescadores y residentes.

Puesto que el coste de mantenimiento del programa experimental fue muy elevado y los resultados insatisfactorios, se dio prácticamente por finalizada la carrera nuclear en la marina mercante.



Imágenes 96 y 97: NS Otto Hahn (izquierda) y NS Mutsu (derecha). Fuentes: research.kobe-u.ac.jp y radiationworks.com.

Podemos concluir afirmando que la propulsión nuclear ha sido utilizada en las Armadas de países con desarrollo nuclear, concentrándose en submarinos (debido a su exigencia de independencia del aire) y en grandes portaaviones (por su alta demanda de potencia). En el caso de los cruceros, la propulsión nuclear sustituyó a la propulsión a vapor (ambas instalaciones son realmente parecidas, con la salvedad de sustituir las calderas tradicionales por reactores e intercambiadores de calor). Sin embargo, tras la consolidación de las turbogás, la energía nuclear no se utilizará en cruceros a menos que la demanda de potencia al eje sea muy elevada (unos 100 MWs) o bien que los combustibles se encarezcan mucho o parezcan reactores más simplificados y baratos que los actuales.

En el ámbito comercial la experiencia con reactores nucleares ha sido escasa, concentrada, como ya se ha visto, en un buque rompehielos, dos cargueros y uno experimental.

Parece claro que hasta la fecha la propulsión nuclear sólo parece justificarse para altas demandas de potencia o trayectos muy largos.

La principal razón de esta lenta evolución de los reactores nucleares está relacionada con la seguridad. Por un lado, un posible descontrol de la potencia o una pérdida en la refrigeración del reactor pueden ocasionar que se eleve la temperatura del mismo y se destruya, permitiendo el escape de material radiactivo al Medio Ambiente. Por otro lado, se requiere de un pesado y voluminoso blindaje que evite la exposición de los operadores a la radiación.

Ambas razones hacen que los reactores sean caros y pesados, que requieran equipos y sistemas de control caros y complejos de operar y mantener, además de resultar un punto débil en cuanto a seguridad por las posibles averías en los mismos o complejidad de manejo.

No debemos olvidar, además, la necesidad de mantener varios servicios en funcionamiento una vez apagado el reactor, ya que el corazón del mismo queda caliente y es necesario proveerle de un flujo de refrigeración durante un largo periodo de tiempo.

Todo ello unido, por un lado, a la alarmista opinión pública, y por el otro, a su relación indirecta con las armas nucleares, ha impedido a la tecnología nuclear evolucionar lo suficiente.

7.3.- PLANTAS DE PROPULSIÓN NAVAL NUCLEAR.

El funcionamiento de una planta de producción de energía a base de combustibles sólidos radiactivos aplicada a la industria naval es prácticamente el mismo que el de las plantas nucleares terrestres. La reacción nuclear de fisión que se provoca en el interior del reactor produce el calor necesario para el calentamiento del agua hasta su grado de ebullición, con la consiguiente producción de vapor en grandes cantidades, vapor que acciona las turbinas encargadas de hacer girar un eje que, acoplado a las hélices por medio de un reductor de velocidad o caja de cambios, constituye el sistema propulsor del buque. Otros sistemas nucleares utilizan el trabajo de la turbina para el accionamiento de sistemas turbo-eléctricos encargados del funcionamiento de los generadores utilizados para el suministro de energía eléctrica a los motores que hacen girar las hélices.

Dependiendo de las características del buque se puede montar un solo reactor o varios reactores. El portaaviones estadounidense "USS Enterprise" disponía de ocho reactores nucleares para su funcionamiento.



Imágenes 98 y 99: USS Enterprise. Fuente: Wikipedia.

Por tanto, una planta de propulsión nuclear es básicamente una planta a vapor que utiliza “Reactores Nucleares” en lugar de calderas para la generación del vapor. El vapor de agua es generado indirectamente a través de intercambiadores de calor, a partir del fluido de refrigeración del reactor.

El fluido que refrigera el núcleo del reactor y retira el calor de éste es denominado comúnmente “Fluido Refrigerante”. Se utiliza en un circuito primario cerrado, ya que este fluido está contaminado y, por consiguiente, no puede entrar en contacto con los demás componentes del sistema, requiriéndose un circuito secundario limpio que intercambie calor con el primario y produzca el vapor que va a trabajar en las turbinas. Este intercambio tiene lugar en el intercambiador de calor.

Sin embargo, en este caso, el combustible nuclear posee un contenido energético específico tan elevado que asegura la operación de la planta por varios años sin requerir cambio o recarga.

7.4.- REACTORES NUCLEARES UTILIZADOS EN LA PROPULSIÓN NAVAL.

Para la propulsión naval, sobretodo en submarinos, se utilizan reactores de agua a presión (PWR), reactores de agua en ebullición (BWR) y reactores de sales fundidas, fundamentalmente, aunque sin duda, los más ampliamente utilizados son los PWR.

Hoy día, se está trabajando en los reactores de cuarta generación. De entre los seis prototipos propuestos, el reactor rápido refrigerado por gas es uno de los más desarrollados y está siendo ampliamente estudiado y probado de forma experimental. Se pretende que estos reactores produzcan muchos menos residuos nucleares, que cuenten con sustanciales mejoras en los sistemas de seguridad y que sean más económicos y competitivos.

En los siguientes puntos pasaremos a explicar los reactores nucleares PWR y los reactores de alta temperatura refrigerados por gas. Los primeros, como ya se ha comentado, por tratarse de los reactores más utilizados hasta la fecha para la propulsión de buques, y los segundos por tratarse de reactores actualmente en investigación, de IV generación, con mejoras tanto en la eficiencia térmica como en los sistemas de seguridad, entre otras, que podrían ser la mejor opción para la propulsión nuclear en buques.

7.5.- EL REACTOR DE AGUA A PRESIÓN (PWR).

El reactor de agua a presión es el reactor nuclear más utilizado en el mundo. Se ha desarrollado principalmente en Estados Unidos, R.F. Alemania, Francia y Japón.

En este reactor, el núcleo se mantiene a presión para que el agua no alcance su punto de ebullición en el interior. El agua se utiliza como moderador y como refrigerante. El combustible es uranio enriquecido, en forma de óxido.

En un buque a propulsión nuclear, como por ejemplo un submarino, el reactor genera calor a través de una reacción de fisión en cadena controlada del combustible nuclear. El calor generado por la reacción nuclear se transmite al agua a presión que circula por el llamado circuito primario, en contacto con las barras de combustible alojadas en el vaso del reactor. Este circuito se haya a una elevada presión (de 150 a 160 bares), mantenida gracias a un presurizador, para evitar que el agua pueda transformarse en vapor pese a alcanzar temperaturas cercanas a los 600K (315°C). Debido a que deben ser compactos y con una gran densidad energética, las plantas nucleares navales actualmente emplean combustible nuclear (U-235) altamente enriquecido, hasta más del 90% en el caso de los reactores de diseño norteamericano. A través de un intercambiador de calor el calor del circuito primario se transfiere al agua que circula por el llamado circuito secundario, que se transforma en vapor a alta presión. Este circuito trabaja a presiones menores, alrededor de 60 bares, y el agua/vapor alcanza una temperatura de unos 275°C en la entrada a la turbina. Ambos circuitos están aislados el uno del otro de forma que el agua de circuito secundario no se contamine con los radionucleótidos contenidos por el agua de circuito primario. Este vapor mueve una o más turbinas que generan bien electricidad, bien energía mecánica a través de una caja de transmisión para mover el eje de la hélice. Una vez pasa por la turbina, el vapor es enfriado en un condensador y vuelve al estado líquido, siendo bombeado de nuevo hacia el generador del calor, habitualmente después de ser precalentado. El agua del circuito secundario es repuesta de forma regular, normalmente usando agua de mar tratada por una planta desalinizadora.

El agua contenida en el circuito primario no sólo sirve para absorber el calor generado por la reacción nuclear, sino que es usada como agente moderador de la propia reacción nuclear al “enlentecer” los neutrones generados al colisionar con los átomos de hidrógeno del agua, permitiendo una operación muy estable debido a la relación entre la temperatura/densidad del agua y la velocidad de la reacción en cadena, de forma que esta tiende a enlentecerse a medida que aumenta la temperatura del agua del circuito primario. Junto al empleo de las barras de control, este mecanismo forma parte del sistema de control del reactor. Generalmente, en caso de accidente las barras de control automáticamente son introducidas en el reactor disminuyendo drásticamente su potencia térmica.

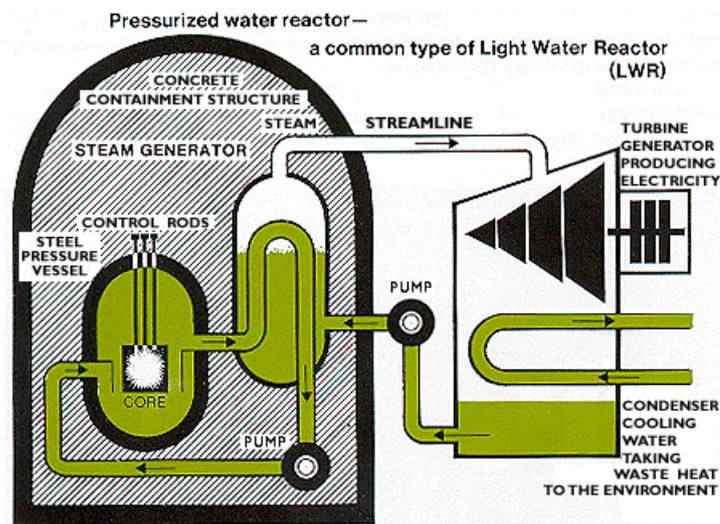


Imagen 100: Reactor PWR. Fuente: quimica-ingenieriaenergia.wikispaces.com

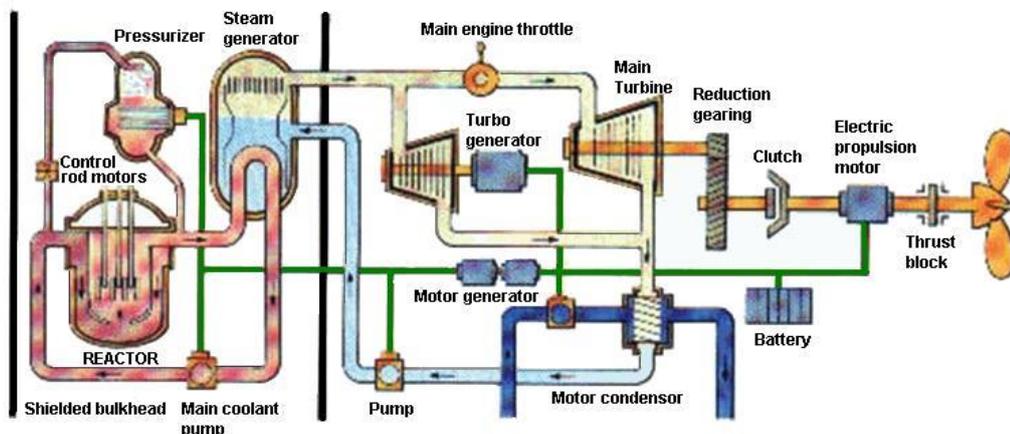


Imagen 101: Esquema de una Planta de Propulsión Nuclear con Reactor PWR. Fuente: foronaval.com.

7.5.1.- COMPONENTES.

En general, una Planta de Propulsión Nuclear con Reactor de Agua a Presión (PWR) consta de los siguientes componentes:

7.5.1.1.- Núcleo del reactor.

Parte central del Reactor que contiene el combustible nuclear, el material moderador y el fluido refrigerante.

Combustible:

El combustible que se utiliza en reactores PWR es un óxido de uranio, donde el uranio U-235 se encuentra enriquecido en valores que van de 2 a 4 %.

Tras su enriquecimiento, el dióxido de uranio (UO₂) en polvo se cuece a alta temperatura en un horno de sinterizado para poder endurecer el material y permitir la fabricación de pastillas (en inglés, pellets) de dióxido de uranio enriquecido. Estos pellets se ponen en vainas fabricadas con una aleación metálica de zirconio resistente a la corrosión.

Estas vainas se llenan además con helio a fin de mejorar la conducción térmica (entre el pellet y la vaina).

Las vainas de combustible así terminadas se agrupan en elementos combustibles que son utilizados para formar el núcleo del reactor.

Un elemento combustible típico de un PWR tiene entre 200 y 300 vainas cada uno (generalmente 14 x 14 a 17 x 17 vainas), y el núcleo de un reactor PWR tiene entre 150 y 250 elementos combustibles que, en total, contienen entre 80 y 100 toneladas de uranio. El elemento combustible tiene alrededor de 4 m de longitud.

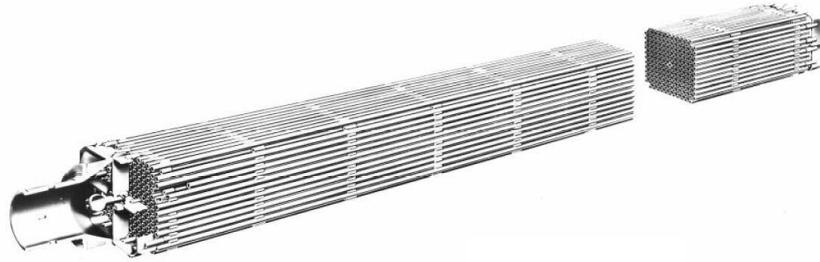


Imagen 102: Elemento combustible del PWR, diseñado y construido por Babcock and Wilcox. Fuente: Wikipedia.

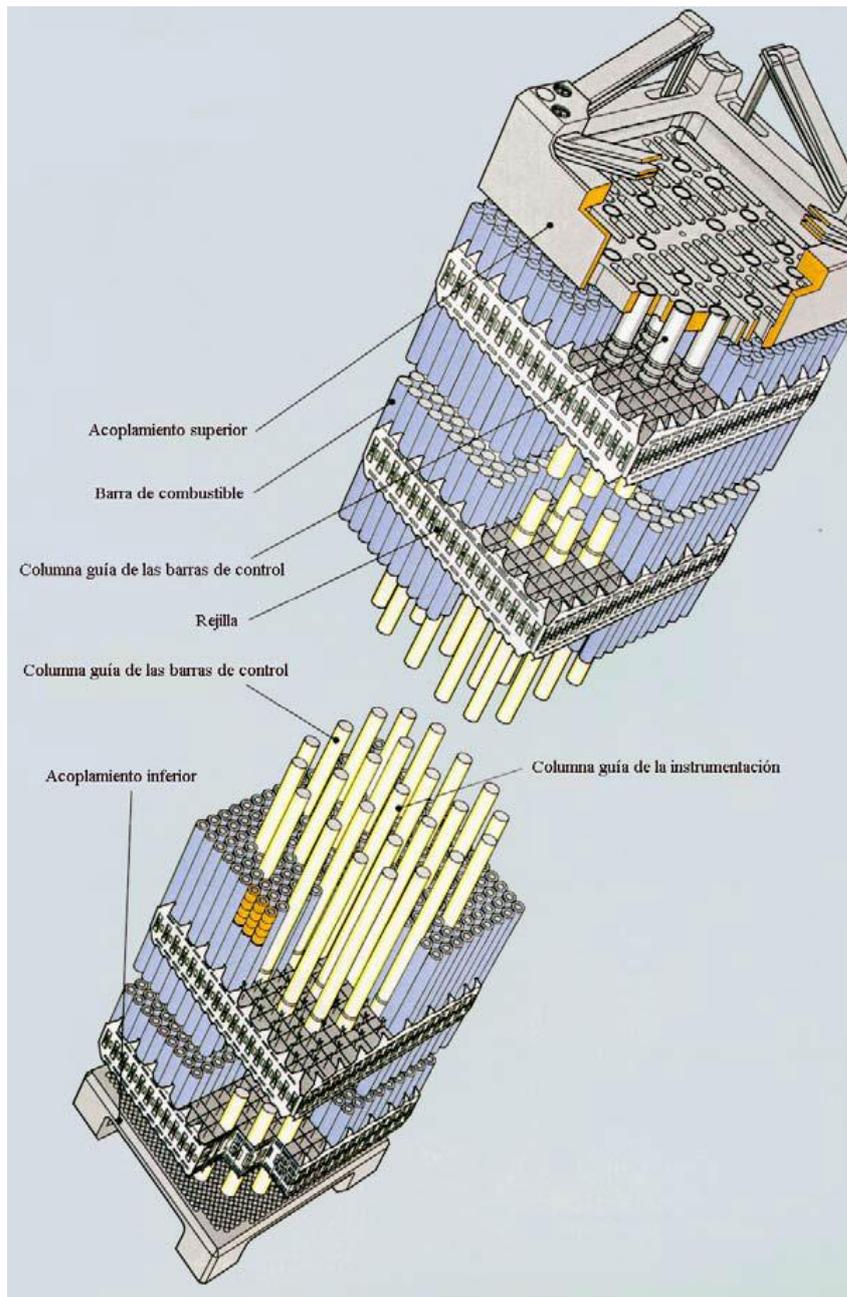


Imagen 103: Elemento de combustible de un reactor PWR. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

Moderador:

Los reactores PWR, como todos los diseños de reactores térmicos, requieren que los neutrones rápidos producidos por las fisiones en el combustible del reactor pierdan energía, esto es, disminuyan su velocidad (a este proceso se lo denomina moderación) con el fin de poder mantener la reacción en cadena. Dado que la masa de núcleos de hidrógeno que se encuentran en una molécula de agua es parecida (en realidad es algo mayor) a la masa de un neutrón, los neutrones van perdiendo velocidad a medida que chocan con las moléculas de agua.

El efecto de moderación será mayor en la medida que la densidad del agua sea mayor (ya que al haber mayor cantidad de moléculas de agua por unidad de volumen, entonces mayor será la probabilidad de que un neutrón choque con una molécula).

En los PWR el agua que se usa como refrigerante, también actúa como material moderador. El uso de agua como moderador es una importante característica de seguridad de los reactores PWR, ya que, en caso de un incremento en la temperatura del moderador (por ejemplo, durante una subida incontrolada de la potencia del reactor), la densidad del agua disminuye, reduciendo el efecto de moderación y por lo tanto, reduciendo la probabilidad de que los neutrones rápidos pierdan velocidad y alcancen la velocidad necesaria para inducir una nueva fisión (y por lo tanto resultando en una reducción de la potencia del reactor). Este efecto hace que los reactores PWR sean muy estables.

Fluido refrigerante.

El refrigerante 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. Incluso hay algunos compuestos orgánicos y metales líquidos como el sodio, que también se empleen para este fin.

En reactores tipo PWR se utiliza agua ordinaria como refrigerante. El agua alcanza temperaturas del orden de los 315 °C (~600 °F). El agua permanece fundamentalmente en fase líquida (si bien hay ebullición nucleada en la zona del núcleo) debido a la alta presión a la que funciona el circuito primario (usualmente alrededor de los 16 MPa/150 atm). El agua del primario se utiliza para calentar el agua del circuito secundario que se convierte en vapor saturado en el generador de vapor para ser usado en la turbina (en la mayoría de los diseños la presión del secundario es de 60 atm y la temperatura del vapor es de 275 °C, como ya se comentó anteriormente).

7.5.1.2.- Contenedor y tapa superior del núcleo del reactor.

El contenedor provee la estructura y el soporte del núcleo del reactor. Está diseñado de acero de gran espesor para poder resistir las altas presiones y temperaturas generadas en su interior.

En la parte superior, el contenedor tiene una tapa removible denominada “Tapa Superior”, la cual está asegurada al contenedor con pernos especiales; en esta tapa se encuentran los alojamientos de las barras de control.

Barras de control.

La potencia del reactor en los PWR tanto comerciales como militares, se controla normalmente variando la concentración de ácido bórico en el refrigerante del circuito primario. El boro es un absorbente de neutrones muy eficaz y, por lo tanto, incrementando o reduciendo la concentración de boro en el reactor se afecta la población de neutrones en el reactor.

Además, el reactor utiliza barras de control que se insertan desde arriba en los elementos combustibles y se utilizan normalmente solo para las operaciones de arranque y apagado del reactor.

Los haces de barras de control proporcionan un medio rápido para el control de la reacción nuclear, permitiendo efectuar cambios rápidos de potencia del reactor y su parada eventual en caso de emergencia. Están fabricadas con materiales absorbentes de neutrones (carburo de boro o aleaciones de plata, indio y cadmio, entre otros) y suelen tener las mismas dimensiones que los elementos de combustible. 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.

Para que un reactor funcione durante un periodo de tiempo tiene que tener un exceso de reactividad, que es máximo con el combustible fresco y va disminuyendo con la vida del mismo hasta que se anula, momento en el que se hace la recarga del combustible.

En funcionamiento normal, un reactor nuclear tiene las barras de control total o parcialmente extraídas del núcleo, pero el diseño de las centrales nucleares es tal que ante un fallo en un sistema de seguridad o de control del reactor, siempre actúa en el sentido de seguridad de reactor introduciéndose totalmente todas las barras de control en el núcleo y llevando el reactor a parada segura en pocos segundos.

En el caso de reactores navales, la potencia se regula únicamente por medio de barras de control, y no mediante la concentración de boro en el circuito primario.



Imagen 104: Barras de control. Fuente: tecnoparador.es.

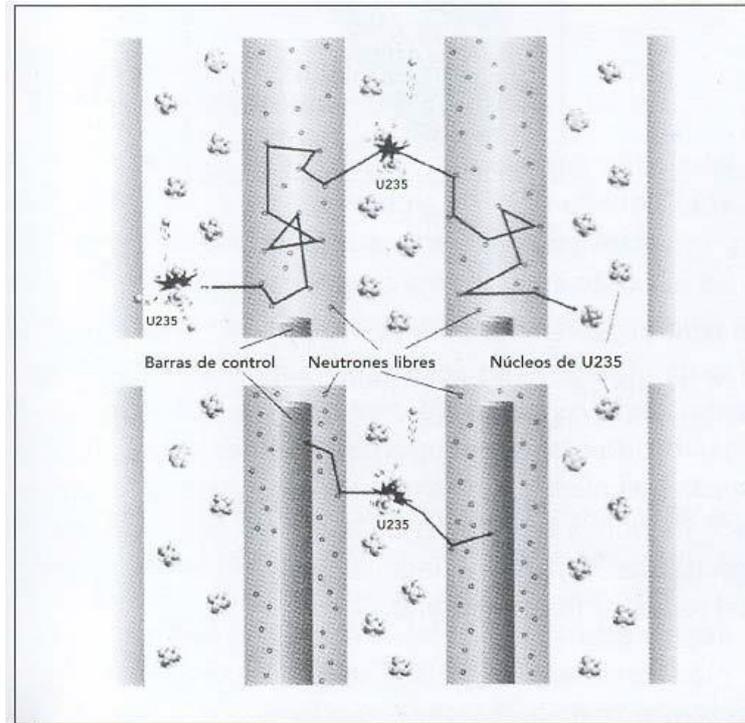


Imagen 105: Las barras de control capturan los neutrones libres. Fuente: foronuclear.com.

7.5.1.3.- Presurizador.

En los reactores que emplean como refrigerante el agua, no es deseable que ésta se evapore produciendo vapor, ya que este afecta el proceso de fisión y, además, produce cavitación en la bomba del refrigerante; por este motivo, se requiere mantenerla a alta presión.

La función del Presurizador es precisamente mantener el agua refrigerante líquida mediante presión para evitar su evaporación. Este elemento consiste en un tanque cilíndrico a alta presión, el cual contiene el agua refrigerante en el fondo y en la parte superior, mantiene una capa de vapor. La presión y temperatura al interior del Presurizador es producida por resistencias eléctricas.

7.5.1.4.- Generador de vapor.

Básicamente, es un intercambiador de calor en el cual el refrigerante del reactor proporciona la energía calorífica necesaria para transferirla al agua del circuito

externo al reactor (circuito secundario) y transformarla en vapor.

Este intercambiador generalmente es de tipo tubular, en el cual el refrigerante entra por el fondo a través de los tubos en forma de U y el vapor generado sale por la parte superior tras pasar por unos deflectores y separadores de agua que reducen su humedad antes de ser enviado a las turbinas.

7.5.1.5.- Bomba del fluido refrigerante.

Es una bomba que tiene la función de hacer recircular el refrigerante por el circuito interno del reactor (circuito primario).

7.5.1.6.- Cobertura de protección.

Cuando el reactor esté en operación, se genera gran cantidad de radiación. Es necesaria una protección para aislar a los trabajadores de la instalación de las radiaciones ocasionadas por los productos de fisión. Por ello, se coloca un blindaje alrededor del reactor para interceptar estas emisiones.

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

Dentro de un buque, igualmente, esta cobertura tiene la función de reducir los niveles de radiación dentro del compartimento del reactor y, además, prevenir la interferencia con el funcionamiento de otros equipos e instrumentos y proteger a la tripulación fuera de este compartimento manteniendo controlados los niveles de radiación a bordo.

Esta cobertura en los buques con Plantas de Propulsión Nuclear es bastante extensa, y contribuye en gran medida al peso y al volumen de la Planta de Propulsión.

7.5.1.7.- Reflector.

En una reacción nuclear en cadena, un cierto número de neutrones tiende a escapar de la región donde ésta se produce. Esta fuga neutrónica puede minimizarse con la existencia de un medio reflector, aumentando así la eficiencia del reactor. El medio reflector que rodea al núcleo debe tener una baja sección eficaz de captura para no reducir el número de neutrones y que se reflejen el mayor número posible de ellos.

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 (dispersión inelástica).

7.5.1.8.- Sistema de Inyección de Seguridad, SIS.

Actúa cuando se produce un LOCA (Loss of Coolant Accident) inyectando agua borada en el reactor para evitar el aumento de temperatura en las vainas de combustible.

Consta de tres fases:

1. ***Inyección pasiva de los acumuladores:*** El agua borada está almacenada a unos 45 bares en unos tanques, de los cuales hay uno por cada lazo. El agua está retenida gracias a unas válvulas que se abren si la presión en los taques es mayor que en el sistema de refrigeración primario. Al producirse el LOCA, provocará una despresurización en el primario y las válvulas se abrirán, inyectando el agua borada en la rama fría del SRR (Sistema de Refrigeración del Reactor). Esto proporciona un enfriamiento rápido del núcleo cuando se producen grandes roturas.
2. ***Inyección de seguridad activa:*** Esta fase se realiza mediante 2 sistemas, el sistema de baja presión, SBP, y el de alta, SAP: El SBP inyecta agua borada en

el SRR en el caso de roturas grandes. Se compone de 2 o 3 trenes de almacenamiento del agua de recarga. El SAP inyecta agua en el caso de roturas pequeñas, en las que la pérdida de carga y presión es lenta. La inyección activa se acciona cuando varios elementos de la instrumentación electrónica detectan baja presión en el presionador, aumento de la presión de la contención, enfriamiento excesivo del refrigerante, o en una de las líneas de vapor.

3. Cuando el nivel del Tanque de Almacenamiento del Agua de Recarga cae a un cierto nivel, las bombas ya no succionan del mismo sino del sumidero del recinto de contención, y entonces la segunda fase del SIS termina. Comienza entonces **la recirculación del agua a través de las ramas calientes de los lazos principales de refrigeración** para evitar así la ebullición del agua en el núcleo y la consiguiente deposición de boro en las vainas.

7.5.2.- FUNCIONAMIENTO.

Los PWR se denominan así porque el agua natural o ligera, que actúa como refrigerante y moderador del reactor nuclear, está a una presión superior a la saturación con el fin de impedir su ebullición. La presión media del refrigerante es de 157 at y su temperatura de 327°C a la potencia normal.

En este tipo de centrales hay tres circuitos bien diferenciados:

El circuito primario es el del agua que se hace circular por el reactor y por el haz tubular de los generadores de vapor, cuyos elementos principales son:

- Vasija del reactor.
- Generador de vapor
- Bomba del refrigerante del reactor
- Presionador

En el circuito secundario el agua se calienta y se vaporiza en el generador de vapor y pasa en forma de vapor por la turbina y se condensa en el condensador.

Este circuito comprende los elementos:

- Generador de vapor
- Turbina-generador eléctrico
- Condensador

El circuito terciario es el del agua de refrigeración del condensador, y puede ser en circuito cerrado o abierto.

7.5.2.1.- Circuito primario.

La vasija del reactor es un recipiente de acero especial de varias toneladas de peso. En ella está el núcleo del reactor compuesto por pastillas de dióxido de uranio ligeramente enriquecido (2-4%) en U-235, confinados en vainas de zircaloy (aleación de Zr), los cuales se agrupan en forma cuadrangular, formando los elementos combustibles. La fisión nuclear produce una gran cantidad de calor que pasa del combustible al agua de refrigeración incrementando su temperatura en unos 350°C.

El agua de refrigeración actúa también como moderador de la energía de los neutrones en la reacción nuclear de fisión en cadena.

El reactor se controla por medio de las barras de control y por ácido bórico disuelto en el refrigerante (como ya sabemos, en el caso de buques tan sólo mediante las barras de control). Tanto las barras de control como el boro son buenos absorbentes de neutrones y tienden a hacer menos reactivo el núcleo, de forma que ajustando cada barra de control que se inserta en el núcleo puede variarse el nivel de potencia de reactor e incluso pararlo.

El agua a presión calentada en la vasija circula al generador de vapor, o cambiador de calor, donde pasa por el haz de tubos e intercambia su calor con el agua que los rodea transformándola en vapor.

Los generadores de vapor aseguran una separación física entre el agua del refrigerante del reactor del circuito primario y el ciclo del vapor secundario. El haz tubular está formado por un número elevado de tubos de pared delgada para conseguir una superficie de intercambios adecuada y una buena transmisión de calor de acuerdo al diseño termohidráulico.

El agua enfriada que sale del generador por la zona fría del circuito es impulsada hacia el reactor por una bomba, cerrando así el circuito primario.

En todo el sistema del refrigerante del reactor, circuito primario, se controla la presión, mediante un elemento denominado “presionador” que está conectado a uno de los lazos de refrigeración. Es un cilindro de acero que en funcionamiento normal de la central, un 60% de su volumen está ocupado por agua y un 40% de vapor. Interiormente lleva unas resistencias eléctricas para mantener el agua a temperatura de saturación. La existencia de las fases líquido-vapor permite atenuar el cambio de volumen del agua, debido a una variación de la temperatura del refrigerante, mediante la creación de más vapor o disminución de éste y corregir de esta forma la variación de presión en el primario.

Todo el circuito primario va dentro del edificio de contención. Este edificio de pared cilíndrica va rematado de una cúpula semiesférica o semielíptica. La estructura de la obra puede ser de hormigón armado o pretensado e incluso de acero. Las paredes interiores van recubiertas de chapas de acero soldadas, que aseguran la más completa estanqueidad. La estructura de la contención puede ser de tipo simple o doble. Este edificio tiene que estar diseñado para cargas normales y para cargas debidas a accidentes, tanto internos como externos, así como las cargas de servicio (de construcción, de ensayo, terremoto básico de diseño) y las cargas factoriales que incluyen las cargas de presión y temperatura como consecuencia del accidente máximo de diseño, terremoto con parada segura, etc.

La finalidad de este edificio de contención es impedir la salida de los productos de

fisión, tanto en condiciones normales como de accidente, así como actuar de barrera biológica.

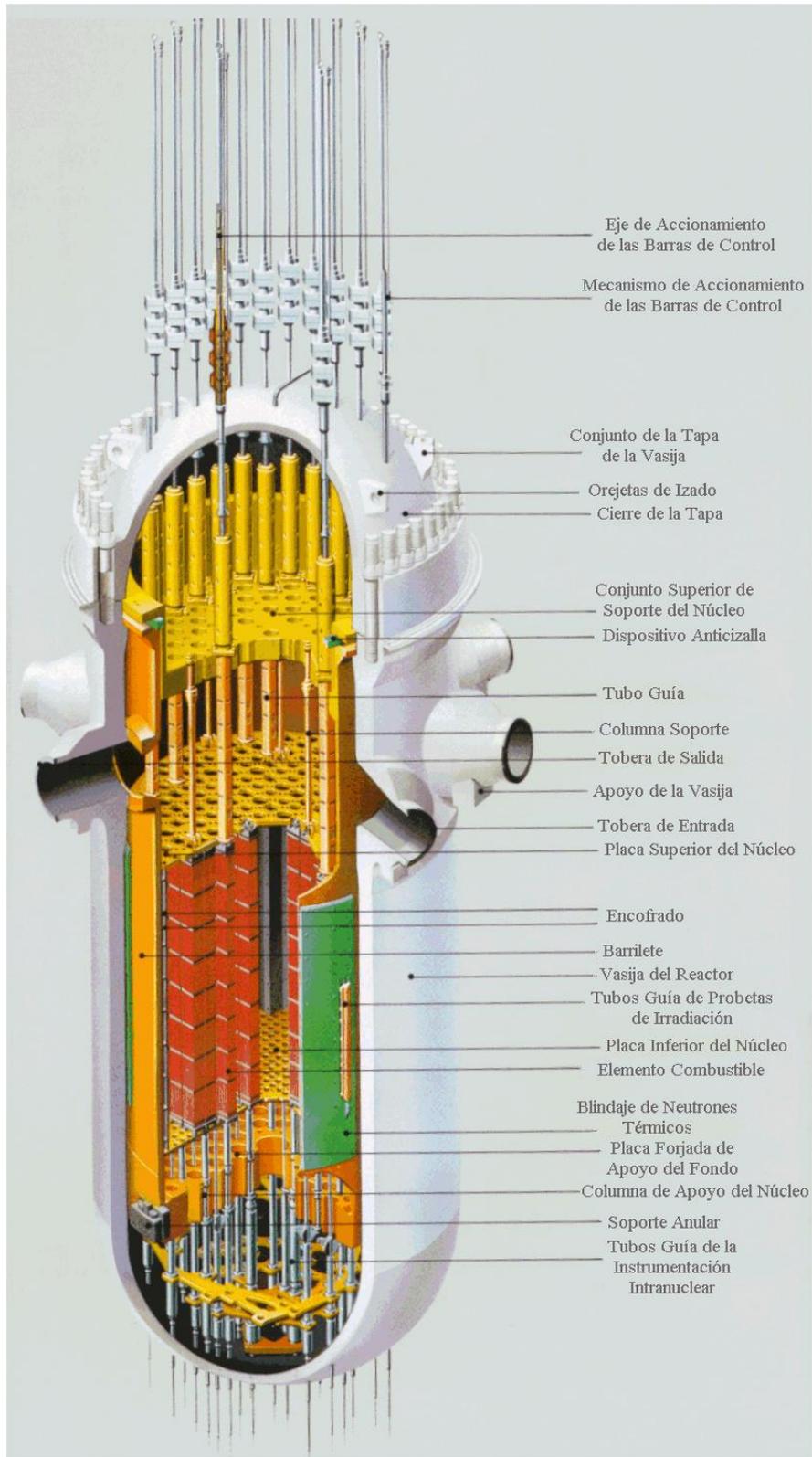


Imagen 106: Vasija del reactor PWR. Fuente: *Hacia el buque de actividad sostenible*. J.R. Sánchez Girón.

7.5.2.2.- Circuito secundario.

La separación física de los circuitos primario y secundario se realiza a través del generador de vapor que, en su parte del secundario, está formado por una carcasa que actúa de barrera de presión alrededor del haz de tubos (primario) y de una parte superior donde se aloja el separador de humedad del vapor.

El agua de alimentación entra en el generador por la tobera correspondiente y el agua baja a través del espacio anular entre la carcasa y la camisa del haz tubular y sube entre los tubos del haz donde absorbe el calor que le transfiere el agua que circula por el interior de los tubos hasta convertirse en vapor. Este vapor va mezclado con agua, por lo que debe eliminarse ésta en el separador de humedad ya que la turbina requiere vapor con un nivel reducido de humedad.

El vapor “seco” llega a la turbina, acciona los álabes de la misma y hace girar el generador eléctrico acoplado a ella produciendo energía eléctrica.

La turbina tiene una sección de alta presión y varias de baja presión. El vapor, al salir de la turbina de alta presión, tiene una cantidad de humedad, de nuevo, que hay que quitar para mejorar el rendimiento de la turbina. Esto se consigue pasando el vapor por un recalentador de humedad. El vapor recalentado se transfiere a las turbinas de baja presión, cuyo número depende de la potencia eléctrica de la central.

El vapor, una vez que ha pasado por la turbina, se enfría en el condensador que es un cambiador de calor de grandes dimensiones. El agua condensada se recoge en una cámara llamada “pozo caliente”, desde donde es impulsada por las bombas correspondientes a un sistema de precalentamiento y, de ahí, a los generadores de vapor, cerrándose el ciclo.

7.5.2.3.- Circuito terciario.

Para enfriar el vapor en el condensador se requiere una gran cantidad de agua. Esta agua puede provenir del mar, lagos o ríos, devolviendo el agua a su origen pero algo más caliente. A este sistema de refrigeración se le denomina de “ciclo abierto”.

En un sistema de “ciclo cerrado”, el agua pasa a una torre de refrigeración donde se evapora una pequeña parte, se refrigera el resto y vuelve a entrar en el ciclo.

La Administración ha impuesto unas limitaciones en el calentamiento del agua vertida después de ser utilizada en la refrigeración del condensador, de forma que una vez mezclada esta agua con la del caudal del medio se mantengan las condiciones ambientales requeridas.

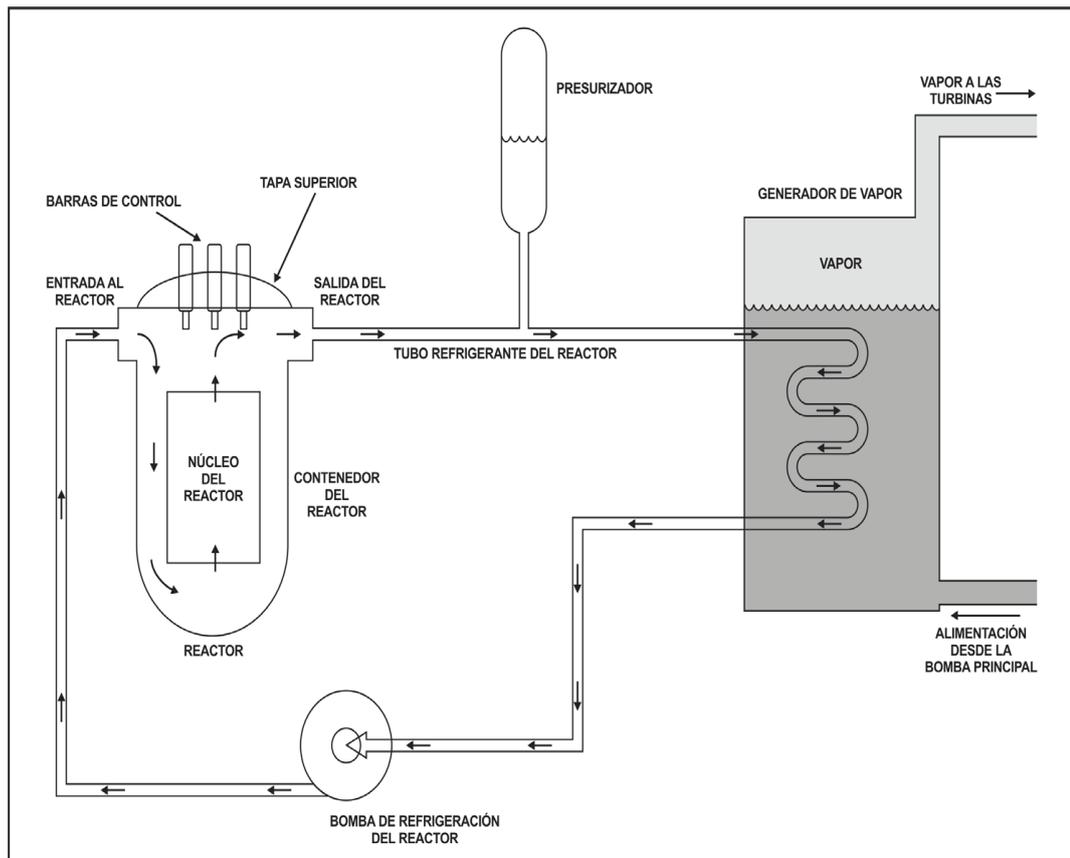


Imagen 107: Diagrama de una Planta de Propulsión Nuclear con Reactor de Agua a Presión PWR. Fuente: Introducción a las plantas de propulsión naval. C. de F. Carlos BARRIONUEVO Ojeda.

7.5.3.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS REACTORES PWR.

7.5.3.1.- Ventajas.

- Los reactores tipo PWR son muy estables debido a su tendencia a reducir su potencia ante incrementos de temperatura; esto ayuda a reducir la posibilidad de perder el control de la reacción en cadena.
- Los PWR pueden ser operados con un núcleo que contiene menos material fisible que el necesario para alcanzar la condición de criticidad con neutrones instantáneos. Esto reduce la posibilidad de que el reactor tenga una subida incontrolada de la potencia y es una de las características de seguridad de los PWR.
- Puede verse también como ventaja el hecho de que al utilizar uranio enriquecido como combustible, los PWR pueden utilizar agua ordinaria como moderador en lugar de necesitar agua pesada cuya producción es costosa. Nota: esta ventaja es relativa, ya que el proceso de enriquecimiento de uranio también es un proceso costoso (ver también desventajas).

7.5.3.2.- Inconvenientes.

- El agua del sistema refrigerante primario tiene que ser presurizado a altas presiones para mantener el agua en fase líquida a las temperaturas de trabajo del reactor. Esto pone requerimientos exigentes sobre las tuberías y el recipiente de presión del reactor y por lo tanto incrementa los costos de construcción. También eso incrementa el riesgo ante un accidente con pérdida de refrigerante del sistema primario.
- Los PWR no pueden cambiar el combustible gastado mientras están operando. Esto limita la eficiencia del reactor y también implica que tiene

que salir de operación por periodos más largos que otros tipos de centrales nucleares.

- El agua caliente del primario con ácido bórico disuelto es corrosivo para el acero inoxidable, causando que los productos de corrosión (que son radiactivos) circulen por el circuito primario. Esto limita la vida útil del reactor y además requiere de sistemas especiales para el filtrado de los productos de corrosión, lo cual incrementa el costo del reactor.
- El agua ordinaria (agua ligera) es más absorbente de neutrones que el agua pesada. Por lo tanto al utilizar agua ordinaria como moderador es necesario utilizar uranio enriquecido como combustible, lo cual incrementa el costo del combustible. En el caso de los reactores que usan agua pesada, es posible utilizar uranio natural como combustible, pero el costo en este caso está en la producción del agua pesada.

7.5.4.- DISEÑOS AVANZADOS DEL PWR.

7.5.4.1.- EPR.

El European Pressurized Reactor (Reactor Europeo Presurizado, EPR) es un reactor de agua presurizada de tercera generación, con una potencia de 1600 MWs., diseñado y desarrollado principalmente por Francia y Alemania.

Se trata de los nuevos reactores nucleares que sustituirán próximamente a los reactores PWR (en algunos países pretenden este cambio para el año 2020).

El reactor puede usar como combustible óxido de uranio enriquecido al 5%, uranio reprocesado y óxido de plutonio y uranio mezclado al 100%.

Incluye mejoras respecto al tradicional PWR:

- Mayor seguridad. Incorporarán nuevos y avanzados sistemas de seguridad, como por ejemplo el doble muro de hormigón con un total de 2,6 m. de grosor.
- Menor consumo de combustible.
- Mayor competitividad económica, al introducir mejoras en los diseños anteriores de reactores PWR.
- Aumento de la capacidad de generación de electricidad.
- Vida útil estimada de unos 60 años.

El diseño del EPR posee varias medidas de protección, tanto activas y pasivas, para prevenir accidentes:

- Cuatro sistemas de enfriamiento de emergencia, que proporcionan la refrigeración requerida para enfriar el calor generado por el decaimiento y que continua entre 1 a 3 años después del apagado inicial del reactor (un 300% de redundancia).
- Contenedor a pruebas de fugas alrededor del reactor.
- Un contenedor y área de enfriamiento extra si un núcleo derretido logra escapar del reactor (ver edificio de contención).
- Una muralla de hormigón de dos capas con un espesor total de 2,6 metros, diseñada para resistir el impacto de un avión y la sobrepresión interna.



Imagen 108: Reactor EPR. Fuente: www.new.aveva.com

7.5.4.2.- AP1000.

Mejora del diseño del AP600, y su diseño es más compacto y menos caro de construir que cualquier otra planta de generación III. El diseño también disminuye el número de componentes, incluyendo tuberías, cables y válvulas. Además, posee un sistema de refrigeración pasiva del núcleo. La estandarización y el licenciamiento de tipo también deberían ayudar a reducir el tiempo y costo de la construcción.

Debido a su simplificado diseño comparado a los PWR de generación II de Westinghouse, el AP1000 tiene:

- 50% menos de válvula relacionadas con seguridad
- 35% menos de bombas
- 80% menos de tuberías relacionadas a seguridad
- 85% menos de cables de control
- 45% menos de volumen de edificio sísmico

Hay dudas acerca del peligro asociado con la posible oxidación a través del forro de acero de la estructura de contención. En el diseño del AP1000, el forro y el cemento están separados, y si el acero es atravesado por el óxido, no existe un contención de respaldo detrás de este, y si el domo es atravesado por el óxido, el diseño podría expulsar contaminantes radioactivos y la planta entregaría una dosis de radiación a las personas que es 10 veces más alta que el límite impuesto por la NRC.

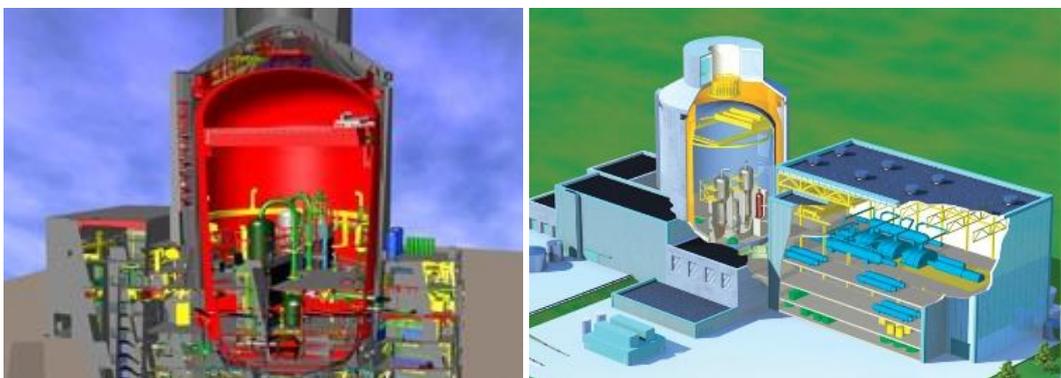


Imagen 109: Reactor AP-1000. Fuente: revistadyna.com y world-nuclear-news.org.

7.6.- REACTOR DE ALTA TEMPERATURA REFRIGERADO POR GAS (HTGR)

Los reactores HTGR usan gas Helio como refrigerante, grafito como moderador y alcanzan temperaturas de hasta 950°C dentro del reactor. Estas altas temperaturas permiten que el reactor pueda ser usado como una fuente de calor industrial, además de generar electricidad mediante el ciclo Brayton con una eficiencia térmica cercana al 50%.

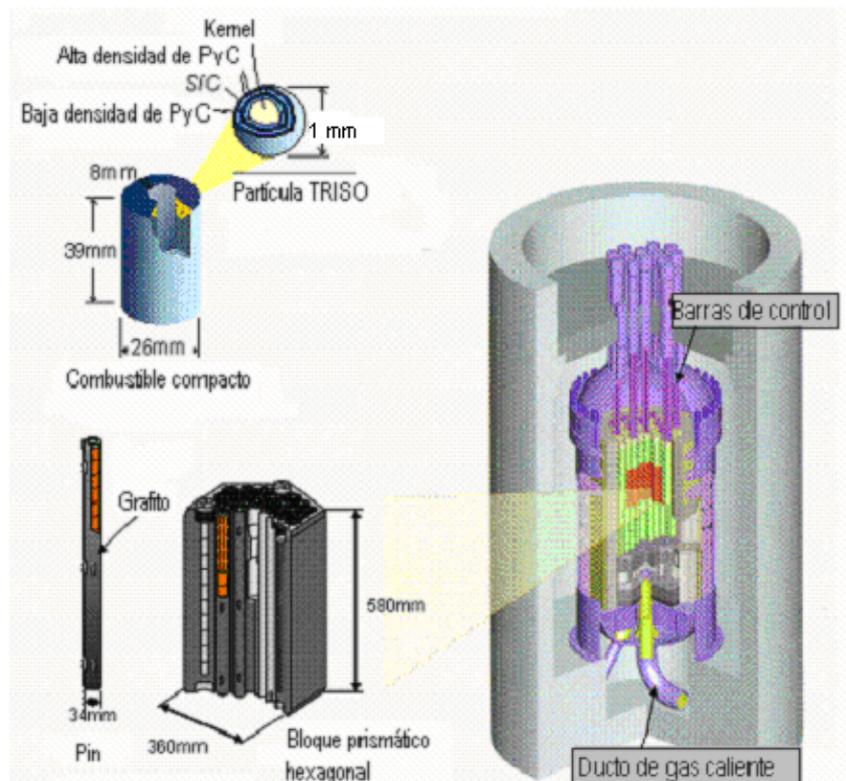


Imagen 110: Estructura del reactor HTGR.

El combustible para estos reactores se encuentra en forma de partículas esféricas llamadas TRISO (dióxido de uranio enriquecido encapsulado en esferas de grafito), de menos de un milímetro de diámetro. Cada partícula tiene un núcleo de óxido o de carburo de uranio, con uranio enriquecido hasta el 17% de U-235 (normalmente menos). Éste es rodeado por capas de carbono y silicio, dando una retención a los productos de fisión, los cuales se mantienen estables hasta una temperatura de 1600°C o más.

Existen dos variantes del reactor HTGR, ambas refrigeradas por Helio y con combustible de uranio-grafito:

- PBMR (Pebble Bed Modular Reactor, reactor modular de lecho de bolas), donde las partículas son colocadas en forma de cama de esferas.
- GT-MHR (Gas Turbine-Modular Helium Reactor), donde las partículas son colocadas en bloques prismáticos hexagonales de grafito.

7.6.1.- EL REACTOR PBMR (“PEBBLE BED MODULAR REACTOR”, REACTOR MODULAR DE CAMA DE ESFERAS).

7.6.1.1.- Introducción.

El PBMR es un reactor de alta temperatura HTGR moderado por grafito y enfriado por Helio, capaz de crear hasta un tercio más de energía que un reactor convencional y además hacerlo de forma menos contaminante e intrínsecamente segura. Se trata, por tanto, de una planta de generación nuclear pequeña, segura, limpia, eficiente, barata y adaptable. Es una de las seis clases de reactores nucleares de las iniciativas de cuarta generación, actualmente en desarrollo en Sudáfrica, China y Japón.

Posee un sistema de conversión de potencia de turbina de gas de ciclo cerrado.

Compuesto esencialmente por una vasija de acero que contiene como combustible partículas TRISO, que permite temperaturas de salida altas y tiene seguridad pasiva. El combustible consiste en partículas de dióxido de uranio (U235) de medio milímetro de diámetro recubiertas de varias capas de silicato de carbono o grafito que se denominan TRISO. Unas 15.000 unidades de éstas son encapsuladas dentro de una esfera de grafito de 60 milímetros de diámetro (tamaño similar al de una bola de billar) denominadas 'pebbles', que pueden funcionar por encima de los 1.600° C y que son refrigeradas por gas Helio dentro de la vasija del reactor. El

núcleo del reactor contiene aproximadamente 360.000 de esas esferas.



Imagen 111: Bola de grafito (pebble) para un reactor PBMR. Fuente: Wikipedia.

El calor generado en el reactor es convertido en electricidad a través de una turbina, o bien acciona un propulsor directamente acoplado a ésta, para el caso de la propulsión.

El uso del helio como refrigerante y un específico tratamiento del uranio permiten al reactor disponer de un inherente sistema a prueba de accidentes radioactivos (el reactor se para en caso de detectar algún problema), disminuyendo por tanto, el coste de las caras medidas de contención y mecanismos de seguridad de los reactores convencionales. Las virtudes de este nuevo reactor también vienen dadas por su geometría y pequeño tamaño, una quinta parte menor que los comunes, lo que permitiría su transporte en tren o carretera. Adicionalmente, la estandarización de sus componentes y facilidad en su gestión y ensamblaje, facultan su producción en masa, pudiendo alcanzar economías a escala. En definitiva, el PBMR es más seguro, más limpio, más pequeño y más barato que las plantas de energía nuclear convencionales.

7.6.1.2.- Modo de operación.

El sistema principal de energía del PBMR consta de dos secciones centrales: el reactor, donde la energía térmica es generada por una reacción nuclear y se emplea grafito como moderador y helio como refrigerante; y la unidad de conversión de energía, donde la energía térmica es convertida en trabajo mecánico y después en

energía eléctrica por medio de un ciclo termodinámico de gas directo Brayton, con un pre-enfriador y un enfriador medio refrigerado por agua, para transferir el calor generado en el núcleo del reactor, y convertirlo en energía eléctrica por medio de un turbogenerador de gas.

La vasija de presión vertical de acero (reactor) tiene 6,2 metros de diámetro y 27 metros de alto, y está rodeada de una capa gruesa de ladrillos de grafito que sirve como reflector externo para los neutrones generados por la reacción nuclear y un medio pasivo de transferencia de calor. La capa de grafito es perforada con agujeros verticales para alojar los elementos de control. El Helio es usado como refrigerante y medio de transferencia de energía para conducir a una turbina de gas de ciclo cerrado y un sistema generador. La geometría de la región de combustible es anular y se localiza alrededor de la columna central de grafito. Esto último sirve como un reflector nuclear adicional.

El núcleo del PBMR mide 3.7 m de diámetro y 9 m de altura y consta de 2 zonas: la zona interna, constituida por una columna fija de grafito, como ya se mencionó, y la zona externa o anular, que contiene aproximadamente 456,000 esferas de combustible y es donde la reacción nuclear ocurre. El helio fluye a través de la cama de esferas y remueve el calor generado por la reacción nuclear. Este helio es el mismo gas usado como fluido de trabajo en la unidad de conversión de energía, de aquí el ciclo directo de gas del PBMR.

Para remover el calor generado por la reacción nuclear, el refrigerante de helio entra en la vasija del reactor a una temperatura de 500° C y una presión de 9 MPa. El gas desciende entre las esferas de combustible caliente, saliendo por el fondo de la vasija a una temperatura de 900°C. Posteriormente el gas caliente entra en la turbina que está conectada mecánicamente a un generador a través de una caja de cambios de reducción de velocidad en un lado y a los compresores de gas por el otro lado. El líquido refrigerante sale de la turbina con alrededor de 500°C y 2.6 MPa. Un recuperador de alta eficiencia es utilizado después de la turbina de potencia. El helio, que es enfriado en el recuperador, pasa a través del pre-

enfriador, el compresor de baja presión, el enfriador intermedio y el compresor de alta presión antes de ser retornado a través del recuperador y seguidamente vuelto a la vasija del reactor.

La conversión de la energía tiene lugar mediante un ciclo Brayton. El ciclo ideal Brayton consiste en dos procesos isoentrópicos y dos isobáricos como se muestra en la Figura.

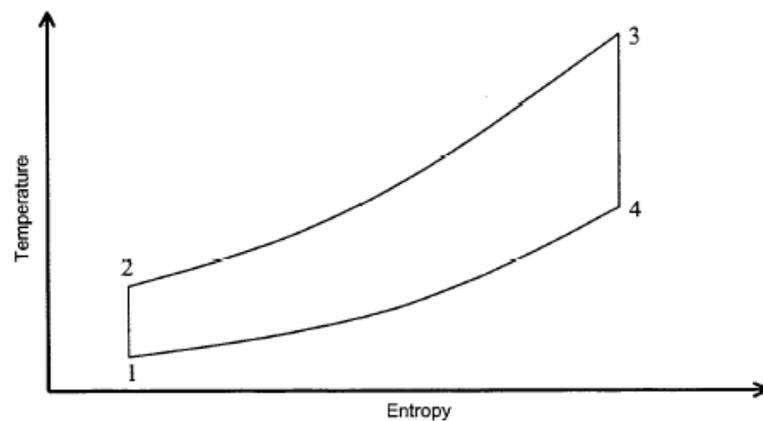


Imagen 112: Ciclo Brayton ideal. Fuente: La planta de generación de energía eléctrica PBMR. Pérez Soria, Santacruz Isunza y Martín del Campo.

En (1), el gas a baja presión y temperatura es comprimido en un proceso isoentrópico hacia una presión y temperatura más altas (2). De (2) a (3), el gas es calentado en un proceso isobárico (a presión constante) hacia el ciclo máximo de temperatura. De (3) a (4), el gas a alta presión y caliente es expandido isoentrópicamente en una turbina hacia una presión y una temperatura más bajas. El ciclo es completado de (4) a (1) enfriando el gas a presión constante. La eficiencia del ciclo ideal Brayton puede ser mejorada al usar una porción del calor rechazado durante el proceso de enfriamiento (4 a 1) para precalentar el gas antes de que entre al calentador. Otro método para mejorar la eficiencia es usar una compresión multietapa con enfriamiento interno. El PBMR utiliza ambos métodos, y el ciclo modificado en el cual el PBMR se basa está referido como el ciclo de recuperación de Brayton. Otra característica distintiva de este ciclo de recuperación es el uso de helio como fluido de trabajo.

A continuación, esquematizamos el ciclo de operación de una planta PBMR.

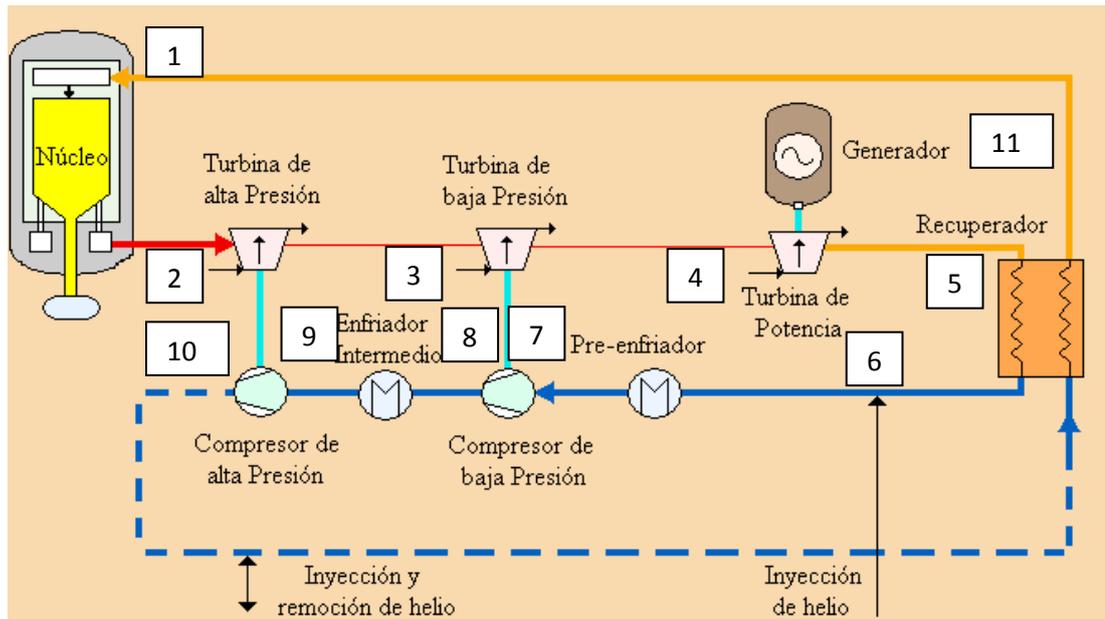


Imagen 113: Esquema del ciclo de operación del PBMR. Fuente: Diseño y Construcción del Simulador Universitario de Nucl eoeléctrica PBMR. Valle Hernández.

1 a 2: El helio entra en el reactor a una temperatura de 500 °C aproximadamente y a una presión de 8.4 MPa y desciende entre las esferas calientes de combustible tomando el calor de ellas ya que han sido calentadas por la reacción nuclear.

Posteriormente el helio sale del reactor a una temperatura de 900 °C aproximadamente.

2 a 3: El helio se expande en la turbina de alta presión. Esta turbina forma parte del turbo de alta presión y éste, a su vez, maneja el compresor de alta presión.

3 a 4: Enseguida el helio fluye a través de la turbina de baja presión la cual es parte de la unidad turbo de baja presión, la que a su vez maneja el compresor de baja presión.

4 a 5: El helio se expande en la turbina que acciona al generador.

5 a 6: En este punto el helio se mantiene a una alta temperatura. Fluye a través del lado primario del recuperador donde transfiere calor al gas de baja temperatura que va regresando al reactor.

6 a 7: El helio que pasa por el lado primario del recuperador es enfriado por medio de un pre-enfriador. Esto aumenta la densidad del helio y mejora la eficiencia del compresor.

7 a 8: El helio es comprimido por el compresor de baja presión.

8 a 9: El helio es enfriado. Este proceso aumenta la densidad y mejora la eficiencia del compresor.

9 a 10: El compresor a alta presión comprime el helio a 8.5 MPa.

10 a 11: El vapor frío y a alta presión de helio fluye a través del recuperador donde es pre-calentado antes de regresar al reactor.

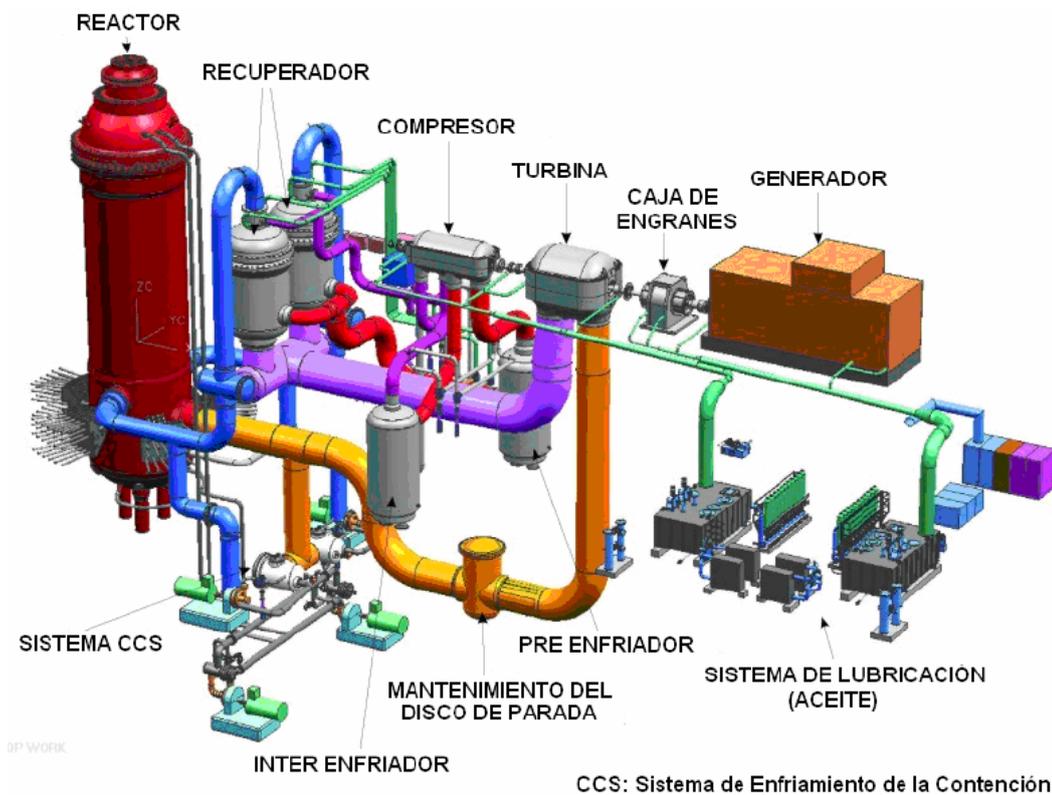


Imagen 114: Planta de generación de electricidad con reactor PBMR. Fuente: larouchepub.com.

La potencia del reactor puede ser ajustada cambiando la presión en el sistema.

La operación a alta presión y a alta temperatura en el reactor proporciona una alta eficiencia térmica. Mientras un reactor típico de agua ligera tiene una eficiencia de aproximadamente el 33%, en un diseño básico del PBMR la eficiencia es del 41%.

Dos sistemas de control de reactividad son previstos para apagar el reactor. Uno de estos sistemas tiene 24 barras de control en el reflector externo, mientras que el otro consta de pequeñas esferas de absorción que son vertidas en las 8

perforaciones del reflector central. Por el contrario, para el encendido del reactor debemos hacerle crítico, propiciando las fisiones nucleares en el núcleo y circulando el refrigerante por medio de la motorización del equipo turbo-generador. Posteriormente el calor es removido por el pre-enfriador y el enfriador intermedio.

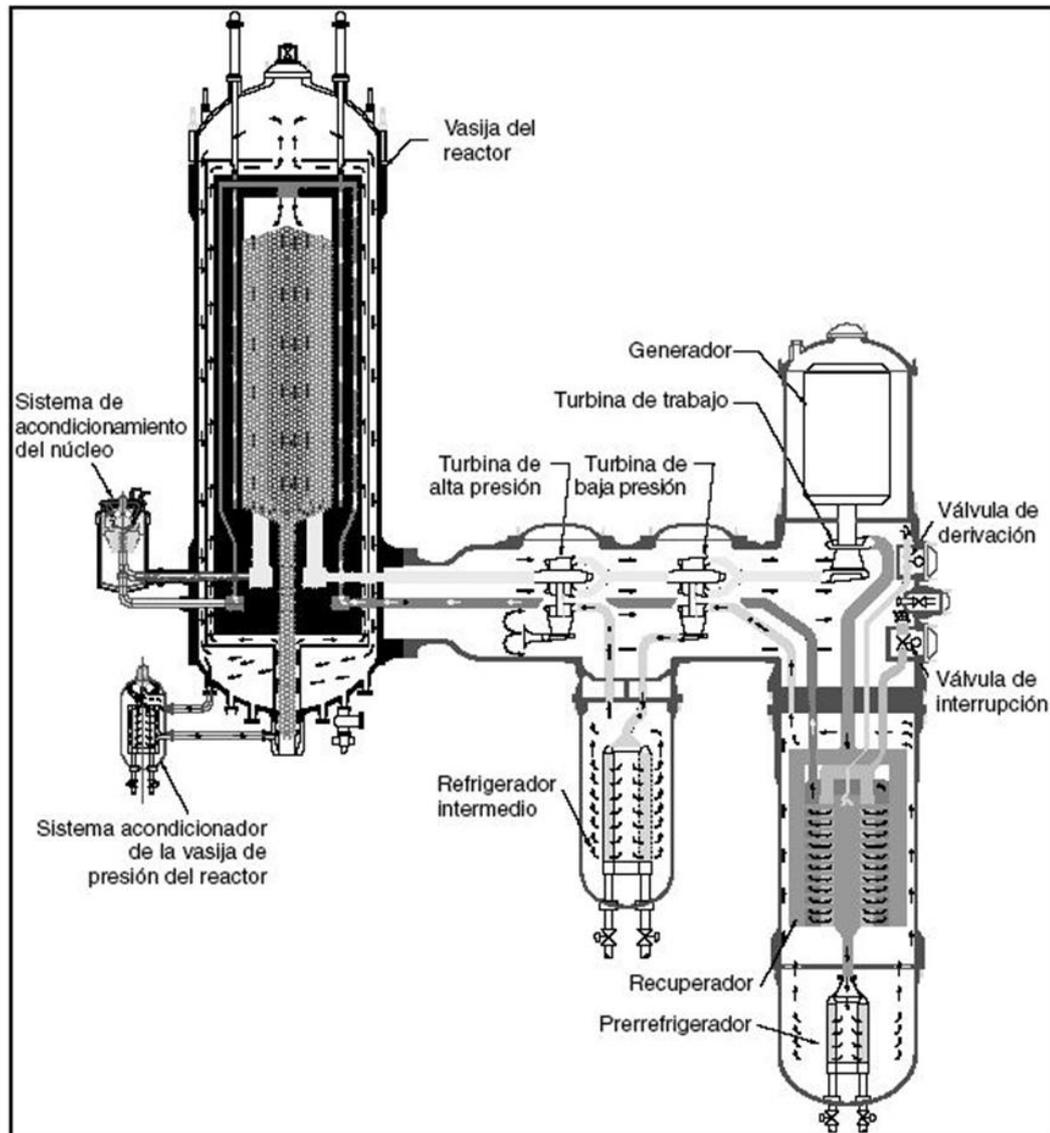


Imagen 115: Vista transversal del reactor PBMR. Fuente: www.larouchepub.com

7.6.1.3.- Combustible.

Como ya se ha comentado, el combustible para este tipo de reactor es el TRISO (partículas isotrópicas de Uranio bajamente enriquecido contenidas en una esfera de grafito modulado).

Estas bolas de grafito pirolítico, del tamaño de una pelota de tenis, contienen en su interior miles de partículas microscópicas de combustible TRISO (unas 15.000). Un núcleo de dióxido de uranio rodeado por capas recubiertas; la primera capa es carbón poroso, seguida de una delgada capa de carbón pirolítico (forma muy densa de carbón); posteriormente se cubre con una capa de carburo de silicio (material refractario fuerte) y finalmente otra capa de carbón pirolítico.

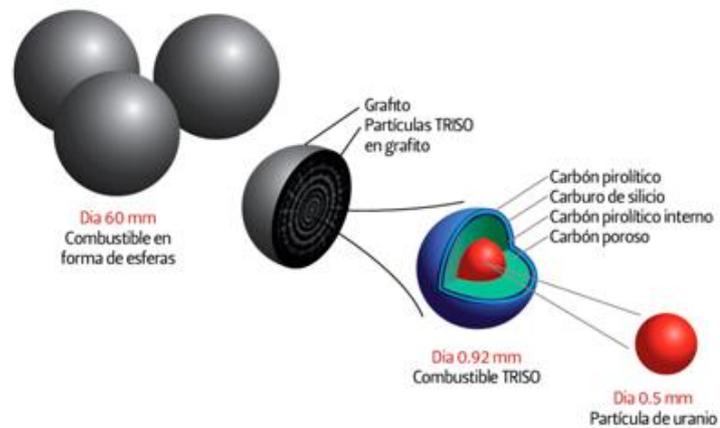


Imagen 116: Componentes de un combustible nuclear de alta temperatura. Fuente: conacytprensa.mx

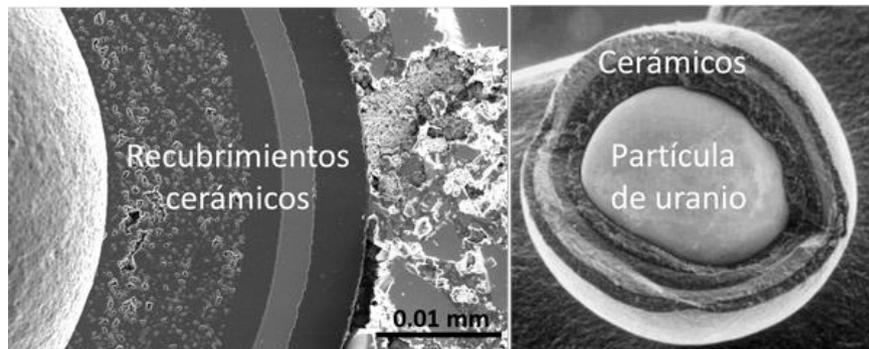


Imagen 117: Detalles de un combustible nuclear microencapsulado de 1 mm de diámetro. Fuente: *Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.*

El carbón poroso acomoda cualquier deformación mecánica que el núcleo de dióxido de uranio pueda hacer durante el tiempo de vida del combustible, así como los productos de fisión gaseosos difundidos fuera del núcleo. Las capas de carbón pirolítico y carburo de silicio proveen una barrera impenetrable diseñada para contener los productos de fisión.

Estas partículas recubiertas, de aproximadamente 1 milímetro de diámetro, son después mezcladas con polvo de grafito y una resina fenólica en esferas de 50 milímetros de diámetro. Posteriormente una capa de 5 milímetros de ancho de carbono es adherido para formar una zona de “no combustible” y las esferas resultantes son filtradas y recocidas para hacerlas duras.

Finalmente, las bolas esféricas de combustibles son maquinadas a un diámetro uniforme de 60 milímetros. Cada bola de combustible contiene cerca de 9 gr. de uranio. El total de uranio en una carga de combustible es de 4.1 toneladas métricas, y el total de masa de una bola de combustible es de 210 gr.

El grafito es usado por los reflectores. Una columna de reflector central está localizada en el centro del núcleo y un reflector externo afuera de él. El grafito también es usado en el núcleo del reactor por sus características estructurales y su habilidad de frenar los neutrones a la velocidad requerida para que la reacción de fisión nuclear sea llevada a cabo.

Con el fin de tener una reacción en cadena autosostenible, el Uranio es enriquecido en el combustible de PBMR en aproximadamente el 10% en Uranio-235, por ser el isótopo de uranio que mayormente se fisiona.

El reabastecimiento en línea es otro de los elementos clave del PBMR. Los elementos de combustible fresco son adicionados en la parte superior del reactor, mientras que el combustible usado es removido en el fondo, mientras el reactor está en funcionamiento.

Después de cada pasada por el núcleo del reactor, las esferas de combustible son medidas para determinar la cantidad de material físil restante. Si una esfera todavía contiene una cantidad usable de material físil, es regresado a la parte superior del reactor para otro ciclo. Cada ciclo toma 6 meses. Cada esfera pasa a través de reactor alrededor de 6 veces y dura cerca de 3 años antes de que sea removido.

La energía por unidad de masa que se extrae al combustible (llamado “quemado”), es mucho más grande en el PBMR que en los reactores de potencia convencionales. El material físil que puede ser extraído del combustible gastado del PBMR es extremadamente inatractivo para propósitos de proliferación nuclear u otro uso indeseable.

El combustible es transportado al contenedor de combustible gastado en el edificio del reactor a través de un sistema de manejo de combustible. El contenedor de combustible gastado consta de 10 tanques, cada uno con un diámetro de 3.2 metros y una altura de 18 metros. Un tanque puede contener 600,000 esferas.

El tiempo de construcción de un módulo PBMR es alrededor de 24 meses y cuenta con un tiempo de vida de operación de la planta de 40 años.

7.6.2.- EL REACTOR GT-MHR.

7.6.2.1.- Introducción.

Un reactor nuclear adecuado para la propulsión de un buque podría ser el reactor GTMHR, un reactor refrigerado por gas helio y acoplado directamente a una turbina de gas donde éste realiza el trabajo que se convertirá en propulsión, utilizando el ciclo térmico Brayton.

Se basa en la tecnología de los reactores de gas de alta temperatura (HTGR) desarrollada en los últimos 45 años y probada en hasta siete centrales nucleares. Además. Este reactor satisface los objetivos propuestos por el Generation IV International Forum y ha despertado el interés de varias empresas para generar electricidad debido a la afinidad entre el combustible y el refrigerante, que posibilita una eficiencia térmica del orden del 47% frente al 32% un PWR convencional y evita la degradación mecánica de las barreras de contención del combustible.

La mayor eficiencia térmica es debida a la expansión del gas refrigerante en una turbina de potencia, y de ahí su adaptabilidad a su empleo en un buque, ya que este trabajo puede convertirse directamente en empuje mediante el accionamiento del propulsor.

Conceptualmente, esta planta es similar a la compuesta por una turbina de gas aeroderivada, con la diferencia de que sustituye los quemadores de ésta por un reactor nuclear, y que opera con helio en ciclo cerrado, en vez de aire en ciclo abierto, lo cual permite una reducción en la carga de compresión. Para elevar la eficiencia térmica se utiliza un recuperador de calor, que reduce el tamaño del reactor aportando energía residual desde las turbinas, más un preenfriador, y un interenfriador para reducir la potencia de compresión.

Por todo ello, este sistema de energía nuclear avanzado ofrece alto nivel de eficiencia térmica, gran seguridad, alta resistencia a la proliferación, bajos impactos ambientales, beneficios en el manejo de desechos y costos de generación eléctrica competitivos.

El GT-MHR requiere avances significativos en investigación y análisis del desempeño del combustible en materiales sometidos a altas temperaturas, así como en aleaciones de alta temperatura. Además, debido a la escasez de datos experimentales requiere el desarrollo de modelos para el diseño y análisis del combustible. Sin embargo, el GT-MHR se proyecta como un reactor económicamente competitivo por sus altas temperaturas de operación, alta eficiencia térmica de su ciclo Brayton, por su alto nivel de quemado de combustible y por sus bajos requisitos de operación y mantenimiento.

7.6.2.2.- Descripción de la planta.

El GT-MHR (ver figura inferior) consiste en una vasija (1) que contiene un reactor modular refrigerado por helio (MHR) y que va acoplada directamente a otra vasija (2) que contiene una turbina de gas de ciclo Brayton (GT) donde el mismo helio que

sirve de refrigerante se expande, convirtiendo su energía térmica en energía cinética, y pudiendo accionar directamente el eje del elemento propulsor. La utilización de helio se debe precisamente a su elevada afinidad entre servir de refrigerante y combustible, permitiendo un alto grado de quemado del combustible nuclear en el reactor sin que la integridad de su contenedor se vea comprometido y logrando una eficiencia térmica en la turbina muy superior al 32% de un reactor convencional de agua presurizada (PWR).

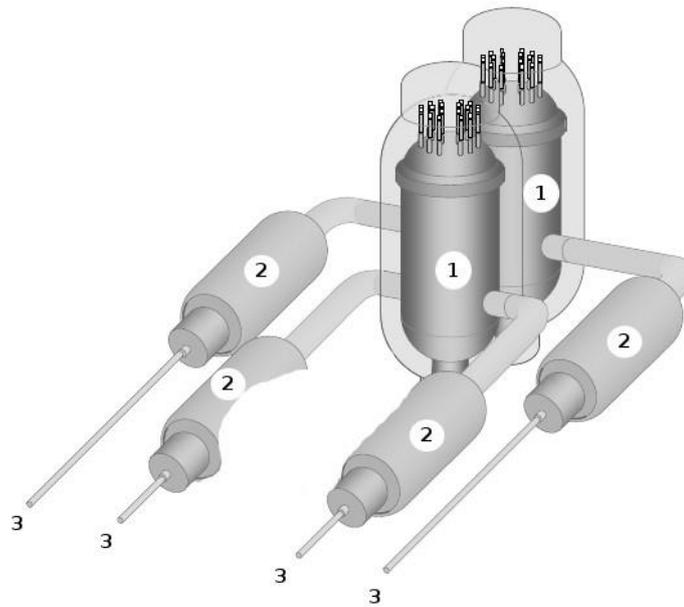


Imagen 118: Esquema GT-MHR. Fuente: *Hacia el buque de actividad sostenible*. J.J.R. Sánchez Girón.

Elementos de la vasija del reactor.

Reactor.

El reactor del MHR lo constituyen el núcleo, la envoltura de reflectores de grafito y la envoltura de acero del conjunto.

El núcleo del MHR está formado por un conjunto de contenedores de combustible nuclear de forma hexagonal, y rodeado por reflectores de grafito sólido soportados verticalmente mediante una placa radial y lateralmente por la envoltura de acero del reactor.

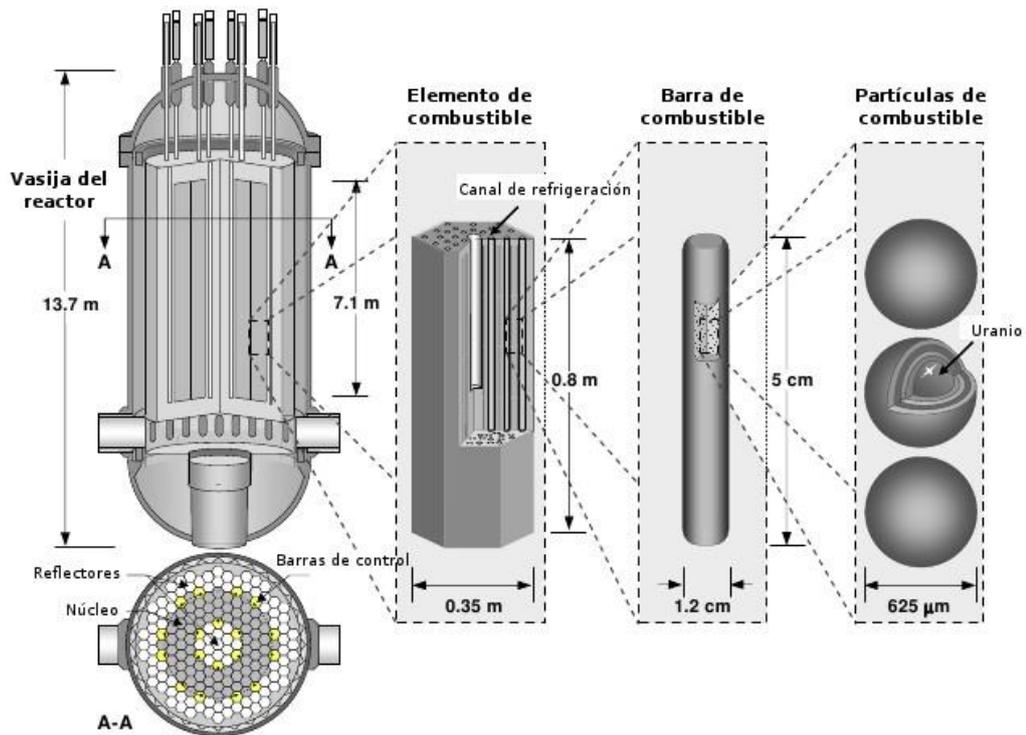


Imagen 119: GT-MHR. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

COMBUSTIBLE.

Cada elemento de combustible corresponde al tipo TRISO (Tristructural-Isotropic coated particles). Consiste en una matriz de grafito hexagonal-prismático de 0.8 metros de alto por 0.35 metros de ancho con 94 barras de combustible con 3000 células de combustible y 108 canales de refrigeración. Las partículas de combustible tienen 1.2 centímetros de diámetro y 5 centímetros de alto y contienen en su interior un núcleo esférico de uranio encapsulado tras varias capas de revestimiento refractario (grafito poroso, carburo de silicio y carbón pirolítico) que forman a su alrededor una vasija impermeable en miniatura de 0.6 milímetros de diámetro resistente a la liberación de productos de fisión metálicos y gaseosos. En concreto proporciona una estructura resistente a altas temperaturas y capaz de retener productos de fisión incluso cuando se ve expuesto a estas altas temperaturas: el revestimiento no se empieza a degradar hasta no haber alcanzado temperaturas próximas a 2000°C. Las temperaturas habituales de operatividad del reactor no exceden los 1250°C y en caso de pérdida de refrigeración se mantienen por debajo de los 1600°C.

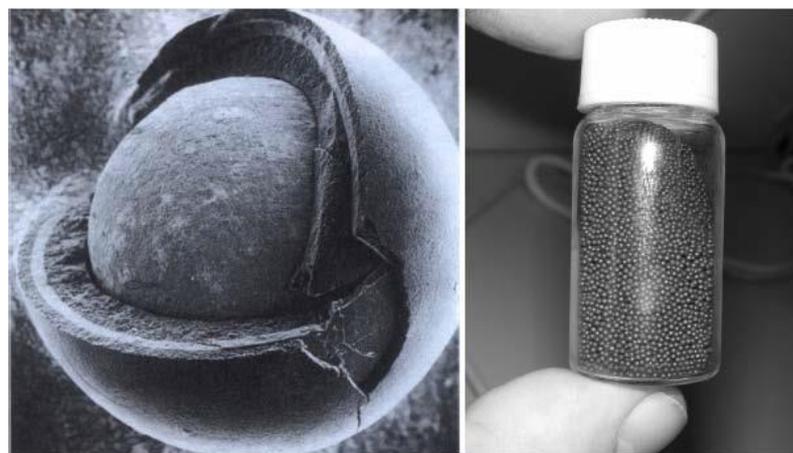
El sistema de recubrimiento de las partículas de combustible TRISO proporciona, además de la contención de los productos de fisión durante el funcionamiento del reactor, una excelente barrera para la contención de los radionucleidos cuando el combustible sea depositado en un almacenamiento geológico profundo de combustible gastado. Los recubrimientos son ideales para un sistema de gestión de residuos de barrera múltiple. Las mediciones de tasas de corrosión de los TRISO indican que el sistema de revestimiento debería mantener su integridad un millón de años o más en un depósito geológico profundo.

Los bloques de grafito reflector son acomodados dentro y fuera del núcleo activo.

El sistema del reactor del GT-MHR contiene 727 toneladas métricas de grafito distribuidas de la siguiente manera:

- 700 t de grafito en el material de los bloques.
- 27 t de grafito que se mezcla con óxidos de plutonio o de uranio para construir los elementos combustibles. El grafito representa cerca del 86% del volumen de los elementos del combustible.

La siguiente figura muestra la vista en microscopio de esta partícula.



Imágenes 120 y 121: Vista en microscopio electrónico de una partícula TRISO: Núcleo kernel (pebble) compuesto por UOX o MOX o UC, Capa de carbón pirolítico, Capa de Carburo de silicio impermeable, Capa de grafito puro. A lado: Botella con partículas TRISO. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.



Imagen 122: Combustible TRISO. Fuente: *Hacia el buque de actividad sostenible*. J.R. Sánchez Girón.

En la figura inferior, se muestra el núcleo del reactor GT-MHR y la forma en la que se acomoda el combustible.

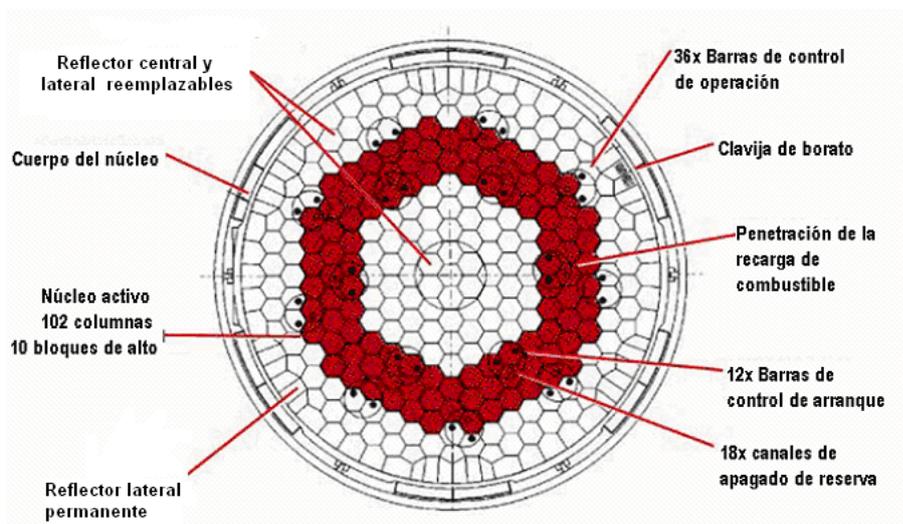


Imagen 123: Núcleo anular GT-MHR. Fuente: *Hacia el buque de actividad sostenible*. J.R. Sánchez Girón.

REFRIGERANTE.

En un reactor GT-MHR se utiliza helio en estado gaseoso como refrigerante. El helio en fase gaseosa presenta las propiedades de un gas noble y se comporta como tal, es decir, es inerte y monoatómico; de forma que no se vuelve radioactivo ni

reacciona con otras sustancias. Su conductividad térmica (0,152 W) y su alto calor específico (5193 J) lo convierten en un buen refrigerante y conductor de calor.

MODERADOR.

El reactor GT-MHR utiliza el grafito contenido en el combustible y en los reflectores como moderador de neutrones a fin de conseguir y mantener una reacción nuclear en cadena eficaz.

Barras de control.

Las barras utilizadas para el control de la reacción nuclear en cadena se encuentran distribuidas entre las barras de combustible y los reflectores.

Los mecanismos de operación de las mismas se encuentran en la parte superior externa de la vasija de contención del reactor.

Sistema de refrigeración auxiliar.

Consiste en un serpentín refrigerante de emergencia situado en el seno de la vasija (EE, figura) comunicado con el mar mediante válvulas de seguridad. En caso de fallo de la refrigeración se establece una circulación de agua fría en el seno del reactor que evacua la energía térmica residual de los reactores al mar. Ya que el helio es un gas inerte, aunque el agua entrara en contacto con éste, no se volverá radiactiva.

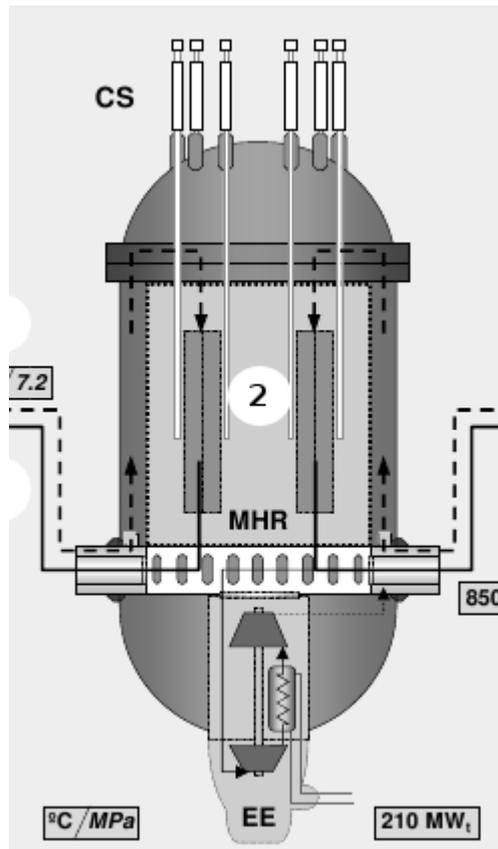


Imagen 124: Vasija del reactor. Fuente: Hacia e buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

Elementos de la vasija de conversión de potencia.

Combustible.

El reactor GT-MHR utiliza el mismo helio usado en la refrigeración como combustible debido a su afinidad para realizar esta función. El helio tiene un bajo peso molecular (4.0026u) por lo que requiere una relación de compresión relativamente baja para alcanzar su rendimiento óptimo a 300°C menos que una turbina de gas convencional de ciclo abierto, lo cual expone a los álabes de la turbina a una carga termodinámica mucho menor. Otra de las características que lo convierten en un buen combustible es su baja densidad (0.1785 kg/m³) lo que permite lograr flujos elevados sin restricción por aproximación a la velocidad del sonido lo cual suele ser un factor limitante en las turbinas convencionales.

Turbina de compresión y potencia.

Recuperador de calor.

Aporta energía térmica residual desde la vasija del conversión de potencia al reactor de forma que aumenta la eficiencia térmica sobre una de ciclo simple y permite reducir el tamaño del reactor.

Turbina de compresión y de potencia.

Recuperador de calor.

Preenfriador e interenfriador.

Ayudan a la reducción de la compresión del gas a la salida de las turbinas.

Compresor de alta y de baja presión.

En la imagen inferior se muestra la distribución de los elementos de la vasija de conversión de potencia.

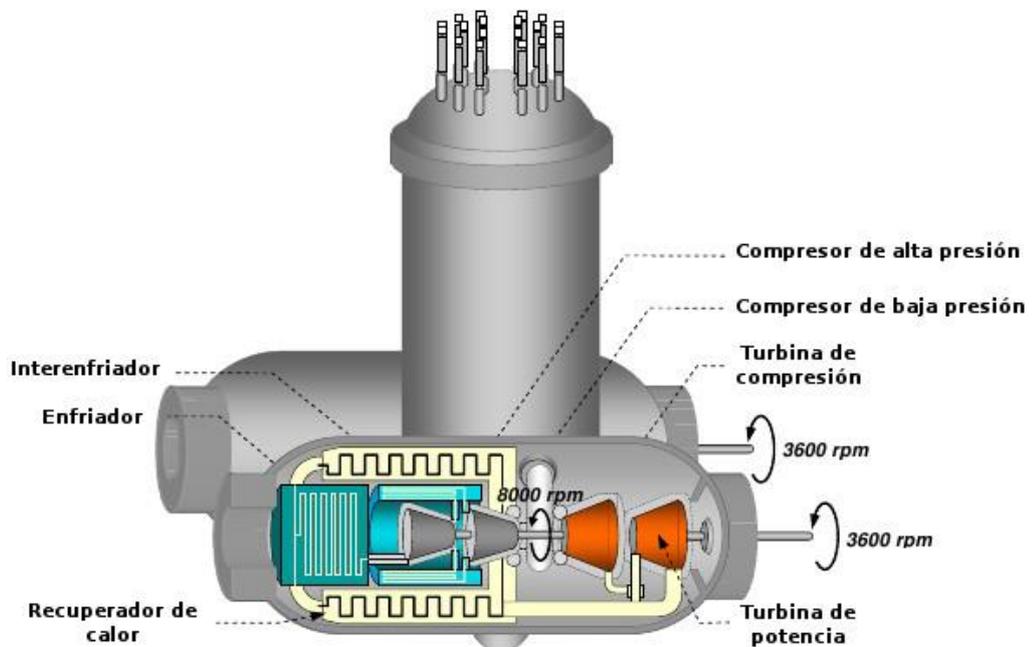


Imagen 125: Elementos de la vasija de conversión de potencia.

7.6.2.3.- Funcionamiento.

El refrigerante helio es calentado en el núcleo del reactor, que fluye hacia abajo a través de los canales de refrigeración en elementos de combustible de grafito y después pasa al sistema de conversión de potencia. El sistema de conversión de potencia contiene una turbina de gas que opera a una temperatura aproximada de 850 [°C] y una presión de 7.02 [MPa], para generar electricidad. Esta turbina consta de una turbina de compresión (GTc) y una turbina de potencia (GTP), expandiendo en la primera su volumen y convirtiendo en la segunda su energía térmica en energía cinética haciendo girar los álabes de la turbina a 3600 rpm.

El helio sale de la turbina fluyendo a través del lado caliente del recuperador a 510 [°C] y 2.64 [MPa], donde parte de su calor es absorbido y enviado al reactor para elevar su eficiencia térmica. Del recuperador, el helio fluye a través del pre-enfriador en donde es drásticamente enfriado a 26 [°C] y 2.57 [MPa].

Después el refrigerante de helio fluye a través del compresor de baja y alta presión respectivamente, interactuando con el inter-enfriador. Para recuperar la caída de presión causada por la expansión térmica y la fricción, el helio pasa a través de un compresor de alta (CL) y baja presión (CT), donde aumenta su presión y temperatura. A la salida del compresor de alta presión, el helio fluye a través del lado frío y de alta presión del recuperador, donde el refrigerante es recalentado a 490 [°C] y 7.07 [MPa], para regresar al núcleo del reactor y comenzar de nuevo el ciclo.

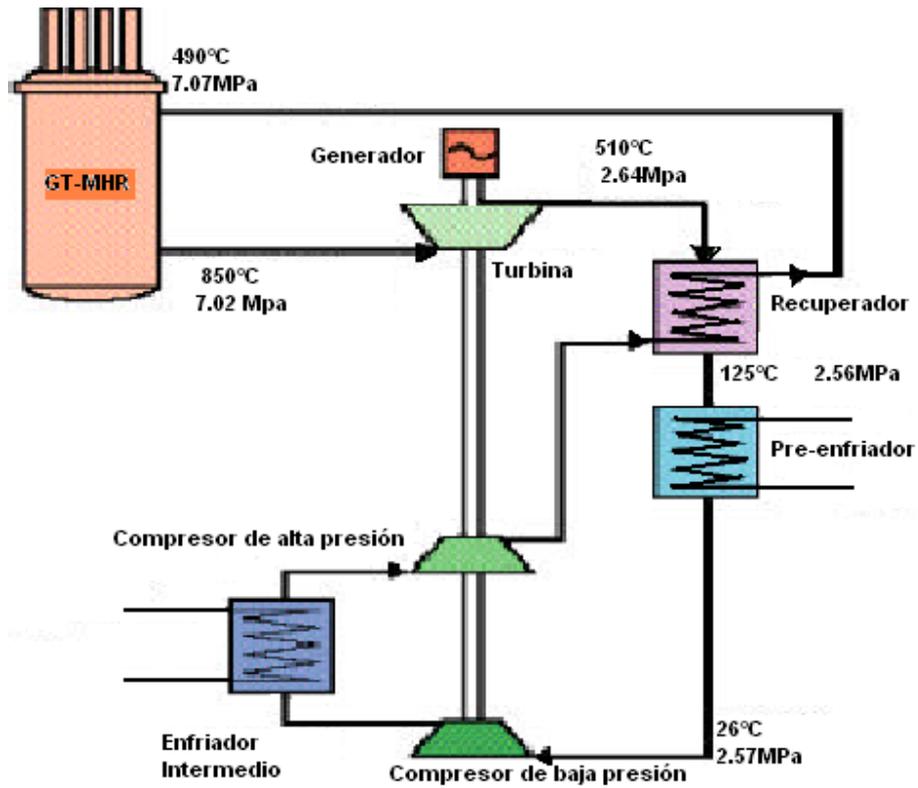


Imagen 126: Esquema de flujo del refrigerante del GT-MHR. Fuente: General Atomics.

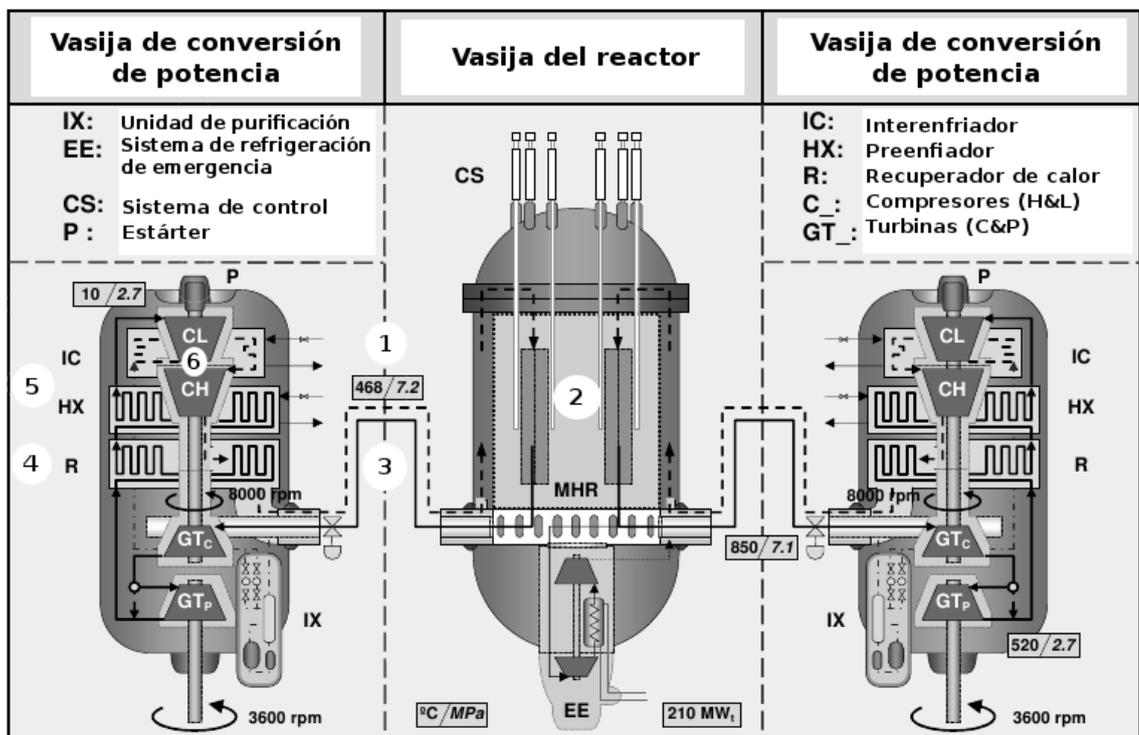


Imagen 127: Diagrama del funcionamiento del reactor GT-MHR. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

7.6.2.4.- Seguridad del reactor GT-MHR.

El GT-MHR es un reactor de seguridad pasiva y a prueba de fundición del núcleo. El nivel general de seguridad de la planta es único entre la tecnología de los reactores nucleares.

El reactor GT-MHR presenta una serie de características, tanto en su versión terrestre como en su versión marina, que lo hacen intrínsecamente seguro:

- El empleo de helio en una única fase como refrigerante: presenta las propiedades de un gas noble siendo inerte y no volviéndose radiactivo. Sus características de gas inerte no solo limitan casi totalmente su reactividad sino que además suponen un menor desgaste por corrosión a los materiales del reactor y de los elementos conversores de potencia.
- Núcleo de grafito: proporciona una alta capacidad térmica, lo que contribuye a mantener la temperatura e impedir la fusión del núcleo, posee una baja respuesta térmica; el calentamiento y enfriamiento del núcleo no sucede de forma inmediata permitiendo tiempo para efectuar medidas correctoras que restauren el funcionamiento normal del reactor, y firme estabilidad estructural ante altas temperaturas.
- Partículas de combustible en capas reflectantes, las cuales retienen los productos de fisión a temperaturas más elevadas que las de operaciones rutinarias e incluso temperaturas críticas bajo condiciones de accidente.
- Coeficiente de temperatura de reactividad negativa (efecto de ensanchamiento doppler) lo cual supone la desactivación del núcleo cuando está expuesto a temperaturas superiores a las de operaciones rutinarias.

- Baja densidad energética del combustible (5.5 MW/m³) geometría hexagonal prismática lo que supone que el núcleo no se verá expuesto a una fusión del núcleo aún cuando experimente una pérdida parcial de refrigeración o pérdida total del refrigerante, pues permiten la convección y radiación del calor residual sin que el núcleo alcance temperaturas superiores a las de rotura de las partículas de combustible.

En la figura inferior puede apreciarse la máxima temperatura alcanzada por el núcleo con pérdida total y parcial del refrigerante así como el tiempo de enfriamiento del mismo.

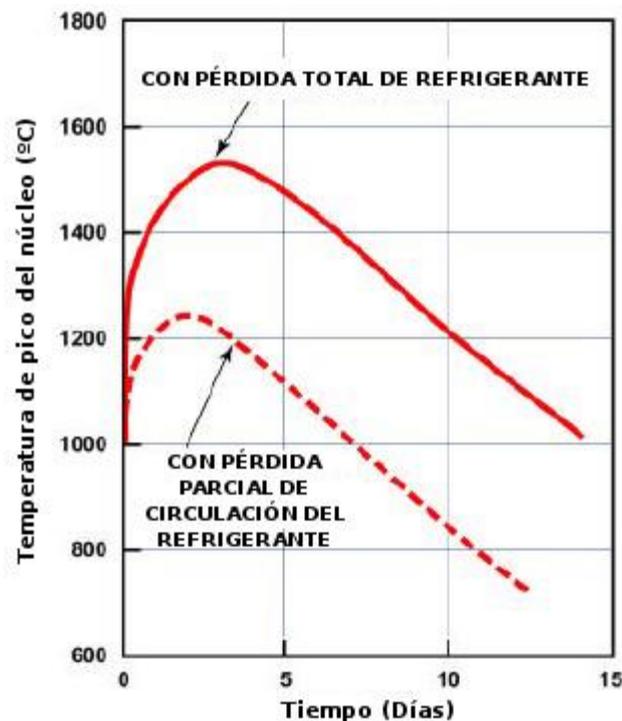


Imagen 128: Temperatura del núcleo y tiempo de enfriamiento. Fuente: General Atomics.

El GT-MHR tiene diversos sistemas de eliminación de calor; posee también un sistema de conversión de energía y un sistema de refrigeración de apagado que pueden ser utilizados para la remoción del calor de decaimiento. En el caso de que ninguno de estos sistemas activos esté disponible, un medio pasivo independiente está previsto para la remoción del calor de decaimiento del núcleo; se trata del sistema de refrigeración de la cavidad del reactor (RCCS, por sus siglas en inglés) que rodea la vasija del reactor.

La remoción del calor de decaimiento de manera pasiva, la baja densidad de potencia del núcleo y la configuración del núcleo anular se han diseñado de tal manera que el calor de decaimiento puede ser removido por conducción de calor, radiación térmica y convección natural, sin sobrepasar la temperatura límite de las partículas de combustible. El calor de decaimiento del núcleo es conducido a la vasija de presión y transferido por radiación desde la vasija hacia el RCCS.

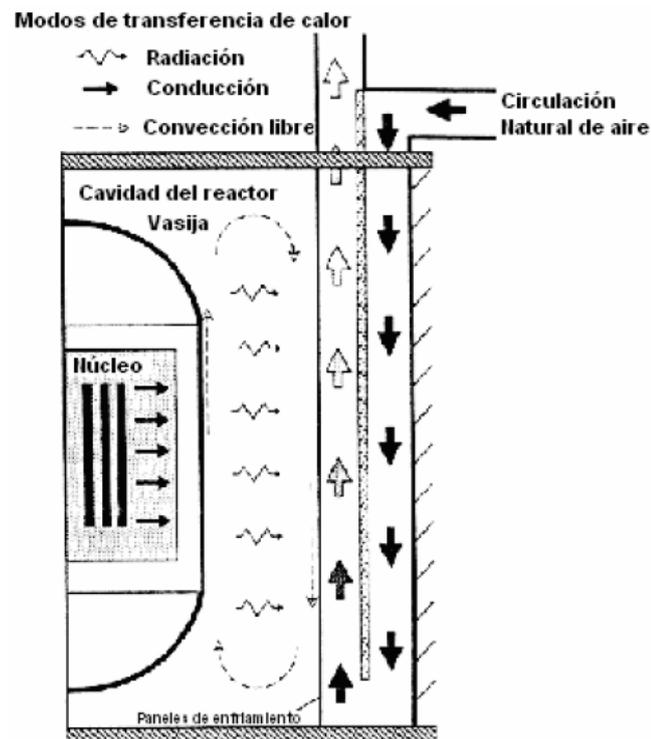


Imagen 129: Radiación pasiva, convección natural y conducción del calor residual del silo de contención. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

Incluso, asumiendo que el RCCS fallara, la conducción de calor del núcleo, la radiación térmica de la vasija y la conducción en las paredes del silo y la tierra que lo rodea (en el caso del modelo en tierra), es suficiente para mantener el núcleo a temperaturas por debajo del límite de diseño. Como resultado de ello, los radionucleidos se mantienen dentro de las partículas de combustible recubiertas, sin la necesidad de utilizar sistemas accionados por electricidad. Estas características de seguridad y diseño llevan a que el reactor pueda soportar la pérdida de circulación de refrigerante y mantener la temperatura del combustible por debajo de los límites dañinos (es decir, el sistema es a prueba de fusión).

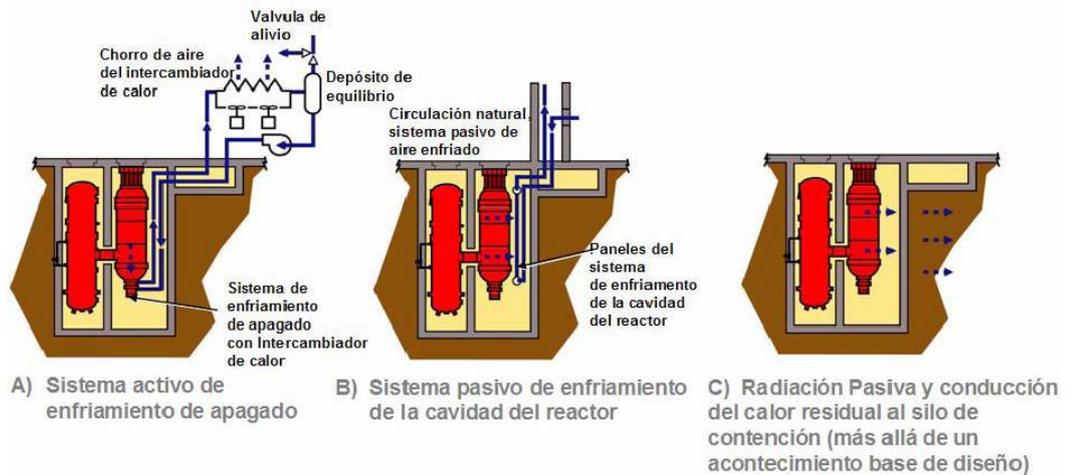


Imagen 130: Eliminación del calor residual cuando el sistema de conversión de potencia no es accesible. Fuente: *Hacia el buque de actividad sostenible*. J.R. Sánchez Girón.

La gran capacidad térmica de la estructura de grafito del núcleo es una característica inherente importante que contribuye significativamente al mantenimiento de la temperatura del combustible por debajo de los límites de operación.

La reactividad del núcleo es controlada por dos sistemas: por las barras de control y por el sistema de apagado de reserva, que utiliza pequeñas esferas de boro que circulan por los canales de apagado; dicho diseño redundante apaga al reactor ante cualquier condición anormal.

En relación a estas propiedades y según la clasificación de niveles de seguridad, el reactor GT-MHR se considera de nivel 1, es decir reactor sin necesidad de sistemas activos en caso de fallo de los subsistemas. Inmune a fallos de la estructura principal o errores del operador. No obstante, en su versión marina, el reactor GT-MHR se ve expuesto a riesgos adicionales que deben de ser especialmente considerados para adecuar su diseño y mejorar su seguridad, a saber:

- Entrada de agua: La entrada de agua puede afectar al control de la reactividad de la reacción nuclear (el agua posee las características de un buen moderador) y en caso de rotura del recubrimiento de las células de

combustible facilitaría la dispersión de productos radiactivos y la propia agua se volvería radioactiva al entrar en contacto con los mismos.

- Rotura de los álabes de la turbina o el compresor: Puede ocurrir por una velocidad de rotación excesiva, defectos de fabricación, y deformación o fatiga. La rotura de los álabes de la turbina o el compresor puede causar diferencias de presión que provoquen altas velocidades del flujo, cargas estructurales por exceso de presión e incluso reversión en la dirección del flujo y pérdidas del refrigerante. En caso de suceder, los efectos podrían reducirse pudiendo desengranar la turbina de potencia y mediante un diseño de la vasija de conversión de potencia adecuado. Sin embargo, la carga estándar a la que se ven sujetas los álabes de la turbina y compresor son menores a los de una turbina de gas convencional.
- Abordaje, varada o hundimiento: Estos son accidentes potenciales para cualquier tipo de barco, sea cual sea la propulsión que utilicen; no obstante son los más frecuentes. Para evitar daños al medio ambiente en cualquiera de estos casos los aspectos más a tener en cuenta son el diseño estructural de la planta y del buque. En caso de hundimiento el reactor debería de tener la posibilidad de equilibrar la presión a fin de evitar su destrucción por colapso (sobrepresión), sin embargo el recubrimiento de las partículas de combustible podría mantener la tasa de expulsión de productos radiactivos baja de forma que no se altere el nivel de radiación medio ambiental habitual.

7.6.2.5.- Resistencia del reactor a la proliferación nuclear, terrorismo y piratería.

El reactor GT-MHR presenta pocas probabilidades de contribuir a la proliferación nuclear debido principalmente a las características únicas de su combustible TRISO y su baja densidad energética:

- La cantidad de material fisible (plutonio y uranio) por elemento de combustible gastado en un reactor GT-MHR es baja (aproximadamente 50 veces más bajo que un reactor de agua ligera).
- El contenido de plutonio (material cuya posibilidad de proliferación es la más preocupante) por elemento de combustible gastado en un reactor GT-MHR es baja en cantidad y calidad debido a la alta temperatura a la que se ven expuestos los elementos de combustible, haciéndolo poco atractivo para su uso en armas.
- No existe en la actualidad proceso tecnológico alguno que permita separar el material fisible residual en un elemento de combustible TRISO.
- El sistema de capas envolventes del combustible TRISO proporciona una contención segura frente a los productos resultante de la fisión nuclear permitiendo su almacenamiento geológico seguro.

No obstante, y a pesar de que el combustible TRISO presenta una alta resistencia a su reutilización en el desarrollo de armamento nuclear, el número de buques mercantes que pudiesen estar equipados con este tipo de reactor y su poca protección los convierten en objetivos extremadamente vulnerables a los ataques de terrorismo y especialmente, considerando el crecimiento de la misma, a la actividad pirata. Un buque equipado con un reactor nuclear es susceptible de ser utilizado como un arma: si bien las reacciones que se producen en el interior del núcleo del reactor difieren de las una bomba nuclear y por tanto no es posible de ninguna manera generar una explosión a partir del mismo, si se logra la destrucción del reactor, en concreto del elemento combustible, se verterían al medio ambiente un elevado número de sustancias radioactivas con efectos desastrosos para la su integridad y la de la salud humana. A pesar de que esta última actividad no es sencilla (la envoltura contenedora de las partículas de combustible no comienza a fragmentarse hasta verse expuesta a temperaturas cercanas a los 2000°) si es posible y por tanto constituye un riesgo.

Este riesgo se presenta como un factor limitante al empleo de la energía nuclear en la marina mercante mientras no se garantice la total protección de los buques que naveguen por zonas de actividad pirata o no se haya asegurado el control y tráfico seguro por las mismas, y los buques no dispongas de la suficiente inmunidad ante la susceptibilidad convertirse en objeto de amenazas o atentados terroristas.

7.6.2.6.- Impacto ambiental del reactor GT-MHR.

Las reacciones nucleares producidas en el núcleo del reactor GT-MHR no producen ninguna emisión de productos atmosféricos contaminantes. Si la planta propulsora de un buque estuviera únicamente constituida por reactores MHR, las emisiones atmosféricas del buque serían entonces nulas. No obstante, y en base a diversos estudios, la configuración más óptima, en términos económicos resulta la de una planta GTMHR con una turbina de gas adicional funcionando con combustible fósil.

La descarga térmica (desecho de calor) del GT-MHR es la mitad de la de los reactores de agua ligera, por unidad de electricidad generada, debido a que el GT-MHR tiene una eficiencia térmica 50% mayor a la de los reactores de agua ligera. Si este calor residual se descargara mediante sistemas de agua de rechazo de calor como en una planta de energía convencional, el GT-MHR requeriría la mitad de cantidad de agua de refrigeración por unidad de electricidad producida. Como alternativa, debido a su significativo menor calor residual, éste puede ser rechazado directamente a la atmósfera mediante sistemas de rechazo de calor refrigerado por aire, tal que no se necesiten recursos de refrigeración por agua.

El GT-MHR produce menos residuos de metales pesados radiactivos que otras opciones, debido a la alta eficiencia térmica de la planta y del alto quemado de combustible.

No obstante, la planta GT-MHR sí genera residuos de naturaleza radiactiva. En concreto, la cantidad anual de estos residuos se estima entre 4,7 y 5,3 toneladas de residuos de alta actividad y entre 0,18 y 0,21 toneladas de residuos persistentes

dependiendo respectivamente de la configuración escogida. Los residuos nucleares de alta actividad se caracterizan por tener una elevada actividad específica en emisores de vida corta, contener radionucleidos emisores alfa de vida larga en concentraciones apreciables y generar calor. La larga vida de este tipo de residuos, unido a una generación importante de calor, condicionan todas las operaciones de su gestión, como son el manejo, transporte, acondicionamiento y almacenamiento.

Debido a la existencia de radionucleidos de vida muy larga, han de pasar decenas de miles de años hasta que la actividad de este tipo de residuos quede al nivel del fondo natural, por lo que se requerirá un almacenamiento tal que garantice el aislamiento de estos residuos durante períodos de tiempo de este orden de magnitud. De igual modo, si bien su impacto es menor, los residuos persistentes no pueden ser eliminados, por lo que de igual manera, han de aislarse y almacenarse.

7.6.2.7.- Competitividad económica del GT-MHR.

El GT-MHR tiene ventajas económicas con respecto a las nuevas plantas nucleares de reactores de agua y a plantas de gas de ciclo combinado. La competitividad económica del GT-MHR es una consecuencia del uso directo del sistema de conversión de potencia del ciclo Brayton y del diseño de seguridad pasiva. El ciclo Brayton directo ofrece una alta eficiencia de conversión térmica y elimina amplios equipos de conversión de potencia requeridos por el ciclo de conversión de potencia Rankine. La reducción de la complejidad en equipos de conversión reduce el capital y los costos de operación y mantenimiento (O & M). En la siguiente tabla se muestran algunos indicadores del reactor GT-MHR.

El GT-MHR tomará tecnológicamente, mucho de lo que ya se conoce de los reactores de gas de alta temperatura HTGR, la llamada "parte convencional" compuesta por compresores, intercambiadores, turbinas de gas, etc., pero necesita aún investigación y desarrollo en combustibles y en materiales sometidos a altas temperaturas. Una de las características más atractivas de este reactor de alta temperatura radica en tener una alta eficiencia termodinámica y en la posibilidad

de tener procesos de co-generación, como la producción de hidrógeno.

7.6.2.8.- Resistencia a la proliferación del GT-MHR.

Tanto el combustible nuevo como el combustible gastado del GT-MHR tienen una alta resistencia a la proliferación. El combustible fresco del GT-MHR la presenta debido a que tiene una baja fracción de volumen de combustible dentro del volumen de grafito. Además, de la dificultad técnica para recuperar los materiales dentro de los revestimientos del combustible. El combustible gastado por su parte posee características de resistencia a la proliferación mejores que las de cualquier otro reactor de potencia debido a que:

1. La cantidad de material fisible (plutonio y uranio) por elemento combustible gastado de GT-MHR es baja debido a la baja fracción de volumen de combustible.
2. El plutonio contenido en el combustible gastado del GT-MHR, el cual es el material de mayor importancia para la proliferación, es sumamente bajo tanto en la cantidad por bloque de combustible gastado, como en calidad, debido al alto quemado de combustible. Además, la mezcla isotópica de plutonio del combustible gastado se degrada mucho más que la del reactor de agua ligera, haciéndolo especialmente poco atractivo para su uso en armas.
3. No hay un proceso desarrollado, ni la capacidad en cualquier lugar del mundo para la separación de material residual fisible del combustible gastado del GT-MHR.

7.6.2.9.- Estado de la técnica.

A día de hoy no existe todavía ningún reactor GT-MHR terrestre construido y en funcionamiento, ni por tanto su versión marina. Para asegurar la tecnología de este tipo de reactores se necesita primero un proyecto de demostración donde se puedan despejar las incertidumbres existentes en su diseño: aspectos de su seguridad general, condiciones operativas del combustible, diseño de la vasija de conversión de potencia y de la de contención. En la versión marina del GT-MHR, las principales incertidumbres que necesitan ser solventadas conciernen a los rodamientos magnéticos de la vasija de conversión de potencia y a los (dry seal) así como el funcionamiento de los intercambiadores de calor. La combinación de estas incertidumbres suponen una serie de riesgos que dificultan la obtención de fondos para la construcción de un reactor prototipo.

Actualmente los principales países participantes en el desarrollo de este tipo de reactor son Francia, Alemania, Japón, China, Rusia; motivados aparentemente por creciente perseverancia y competencia tecnológica mostrada por Sur África. Este esfuerzo conjunto es apoyado y asistido por la agencia internacional de energía atómica (IAEA).

Se estima que un proyecto de desarrollo de un GT-MHR marino podría realizarse de la misma forma, en base a un esfuerzo conjunto y coordinado. Sin embargo, para la construcción y evaluación de un GT-MHR marino, es necesario conocer primero su funcionamiento y respuesta como reactor terrestre, especialmente en el aspecto más concerniente a la reacción nuclear y su control, por lo que el desarrollo de este tipo de propulsión va estrechamente ligado a la evolución del primero, lo que hace pensar que dicha tecnología propulsora no se encontrará disponible hasta más allá del 2030.

CAPÍTULO 8: GESTIÓN DE RESIDUOS RADIOACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD.

8.1.- RESIDUO RADIOACTIVO.

Cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por las autoridades competentes:

- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).
- Ministerio de Industria y Energía.

Es decir, se trata de residuos que contienen elementos químicos radiactivos que no tienen un propósito práctico. Emiten radiación alfa, beta y gamma, además de generar calor como consecuencia de la desintegración radiactiva.

Es frecuentemente el subproducto de un proceso nuclear, como la fisión nuclear, originado en las centrales tanto en la producción de energía eléctrica como en el desmantelamiento de las mismas. No obstante, también puede generarse durante el procesamiento de combustible para los reactores o armas nucleares, o en las aplicaciones médicas como la radioterapia o la medicina nuclear.

8.1.1.- CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS RADIOACTIVOS.

- **Residuos desclasificables o exentos:** No poseen una radiactividad que pueda resultar peligrosa para la salud de las personas o el Medio Ambiente, en el presente o para las generaciones futuras. Pueden tratarse como materiales convencionales.
- **Residuos de baja actividad:** Son los generados por los hospitales y la industria, así como el tratamiento del combustible nuclear. Constan de papel, trapos, herramientas, ropa, filtros, etc., que suelen contener

pequeñas cantidades de radiación de corta duración (un periodo de semidesintegración de hasta 30 años). Deben almacenarse en almacenamientos superficiales (confinamientos superficiales o almacenamiento en instalaciones subterráneas de baja profundidad).

- **Residuos de media actividad:** Contienen cantidades más altas de radiactividad que los anteriores y, en algunos casos, requieren protección. Incluyen resinas, productos químicos y lodos del reactor nuclear, así como los materiales contaminados de desmantelamiento del reactor. Suelen ser solidificados en hormigón o alquitrán para su eliminación, en almacenamientos superficiales (confinamientos superficiales o almacenamiento en instalaciones subterráneas de baja profundidad). Su periodo de semidesintegración es también de hasta 30 años.
- **Residuos de alta actividad:** Son los producidos por los reactores nucleares. Todos aquellos materiales emisores de radiactividad alfa y aquellos materiales emisores beta o gamma que superen los niveles impuestos por los límites de los residuos de media actividad. Son todos aquellos cuyo proceso de semidesintegración supera los 30 años. Contienen productos de fisión y elementos transuránicos generados en el núcleo del reactor. Son altamente radiactivos y, a menudo térmicamente calientes. Los residuos de alta actividad suponen más del 95% de la radiación total producida en el proceso de generación de electricidad nuclear. Entre estos residuos se encuentran el plutonio 240, que tarda aproximadamente 6600 años en desintegrarse, y el neptunio 237, con una vida media de 2.130.000 años. Deben almacenarse en almacenamientos geológicos profundos (AGP) o en almacenamientos temporales prolongados (ATP).

El almacenamiento temporal prolongado permite guardar el combustible entre 100 y 300 años, y puede llevarse a cabo con la tecnología existente en la actualidad a través de los almacenes temporales centralizados.

En cuanto al almacenamiento geológico profundo, aún ha de probarse que sea efectivo para periodos extremadamente largos o al menos similares a los del almacenamiento temporal prolongado. Pese a no existir una regulación internacional específica al respecto, sí que hay consenso acerca de que el almacenamiento geológico profundo es la mejor opción una vez que la tecnología ofrezca totales garantías.

El ATC, sin embargo, no ofrece una solución definitiva al problema, sino que queda pendiente para generaciones futuras. Se trata, por tanto, de una opción de gestión temporal y no final. Aun así, mientras se terminan de perfilar los proyectos para los AGP, es la opción viable. La investigación no se detiene y para 2035 está prevista la creación de un almacén geológico en España.

8.1.2.- ALMACENAMIENTO DE LOS RESIDUOS.

Un *cementerio nuclear* es cualquier lugar utilizado para almacenar residuos radiactivos producidos en reacciones nucleares, independientemente de su naturaleza y el tipo de residuo almacenado.

Bajo el término genérico *cementerio nuclear* se encuentran las distintas ubicaciones que se han buscado para alojar este tipo de materiales, y que han sido condicionadas por el tipo de radiación de los residuos.

Son considerados cementerios nucleares los almacenes de residuos de baja y media actividad, los almacenes temporales centralizados, los almacenes geológicos profundos y las zonas del fondo oceánico utilizadas para el vertido de residuos radiactivos, denominados en ocasiones almacenes submarinos.

8.1.2.1.- Almacenamiento de residuos de baja y media actividad.

Los almacenes de residuos de baja y media actividad suelen ubicarse en la

superficie o a poca profundidad, y en ocasiones aprovechando minas abandonadas. Albergan todo tipo de residuos de baja y media actividad, y están diseñados con un sistema de barreras múltiples, tanto naturales como artificiales, en zonas geológicamente estables e impermeables. Además, los residuos se ubican en contenedores, para evitar su contacto con el exterior.

En el caso de España, se almacenan en la superficie, en celdas de hormigón donde se ubican los contenedores con los residuos debidamente acondicionados. El Cabril, en la Sierra Albarraña (Córdoba), es la instalación de almacenamiento de residuos de baja y media actividad para todo el país.



Imagen 131: El Cabril, Córdoba. Fuente: Wikipedia.



Imagen 132: Estructura de El Cabil, Córdoba. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.



Imagen 133: Tratamiento y acondicionamiento previo del residuo nuclear. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.

COBERTURA FINAL

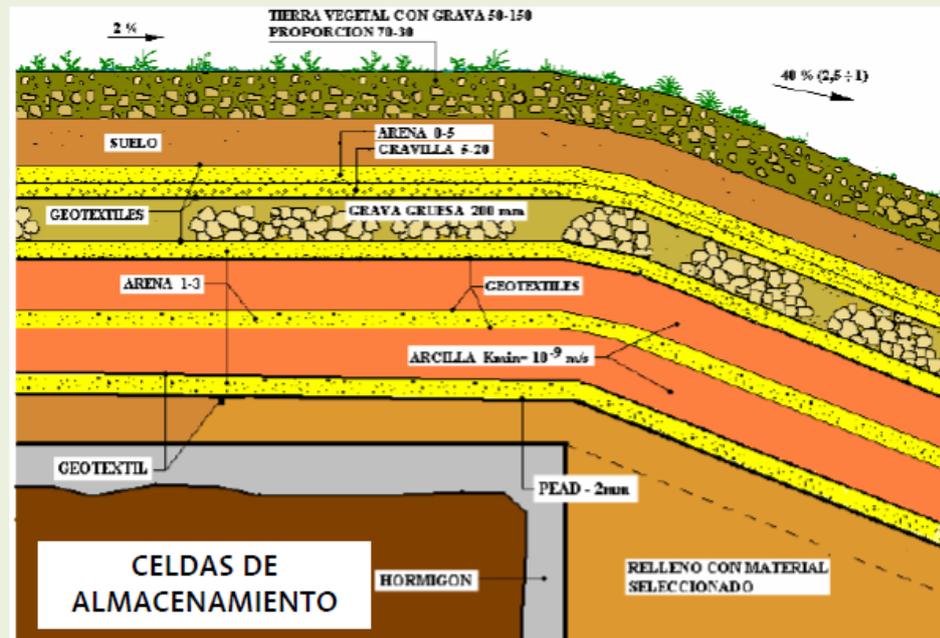


Imagen 134: Cobertura final de los residuos radiactivos en un AGP. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.

Una vez cubierto el emplazamiento, vigilancia durante 300 años, tanto radiológica como ambiental. Pasados estos años, libre disposición del emplazamiento para cualquier actividad.

8.1.2.2.- Almacenamiento de residuos de alta actividad (RAA) y combustible gastado (CG).

Los residuos de alta actividad (RAA) y el combustible gastado (CG) se gestionan de la siguiente manera:

En primer lugar, una vez que se extraen los elementos de combustible del núcleo del reactor, serán enviados a la piscina de la propia central nuclear. Después, pasarán a un almacén temporal centralizado (ATC), donde podrán ser almacenados tanto en piscinas como en seco (contenedores metálicos, contenedores de hormigón o cámaras o bóvedas). Algunas veces, debido al insuficiente espacio de las piscinas de la propia central, se trasladan directamente al ATC. En estos almacenes,

los residuos podrán permanecer durante un periodo de 60 años, y una vez transcurrido este tiempo deberán ser enviados a un almacén geológico profundo (AGP).

8.1.2.2.1.- Almacenes temporales.

Bajo el término “almacenamiento temporal” nos referimos a mantener el material residual en instalaciones técnicamente adecuadas situadas sobre la superficie del terreno o a unos pocos metros bajo tierra. El almacenamiento temporal es inherentemente una etapa intermedia de la gestión, implicando que el material residual será transferido en una fecha futura a una instalación de almacenamiento definitivo permanente, es decir, a una instalación de almacenamiento definitivo.

Generalmente estas instalaciones de almacenamiento temporal están bien preparadas técnicamente, con métodos muy sofisticados de detección y prevención de cualquier fuga que se pueda producir en los bultos.

La misión del almacenamiento temporal es, por tanto, permitir que la radiactividad, y por tanto, el calor residual de los elementos combustibles, decaiga a niveles aceptables para su gestión posterior, pudiendo asimismo mantener una vigilancia directa sobre dichos elementos en su periodo de mayor actividad, además de procurar el tiempo suficiente para el perfeccionamiento de las técnicas de tratamiento final.

Los residuos se almacenan en seco o bajo el agua (en piscinas). Gran parte del combustible gastado se almacena bajo el agua durante un período de tres a cinco años tras su descarga del reactor nuclear, sirviendo el agua como blindaje contra la radiación y como medio refrigerante para mantener los elementos combustibles gastados a temperaturas aceptables. En algunos países se transfiere entonces el combustible gastado a un almacenamiento temporal en seco. El combustible gastado puede también ser reprocesado y los líquidos altamente radiactivos resultantes son solidificados por vitrificación. Muchos otros residuos radiactivos se almacenan también en seco.

RESIDUOS DE ALTA ACTIVIDAD

TECNOLOGÍAS ALMACENAMIENTO TEMPORAL



Imagen 135: Tecnologías de almacenamiento temporal de los residuos nucleares de alta actividad.

Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.

RESIDUOS DE ALTA ACTIVIDAD

ALMACÉN TEMPORAL CENTRALIZADO (ATC)

CRITERIOS BÁSICOS DE DISEÑO DEL ATC



Imagen 136: Almacén temporal centralizado. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos.

Paloma Gómez.

8.1.2.2.1.1- Almacenamiento en piscinas.

Consiste en almacenar los elementos combustibles bajo el agua, en piscinas de hormigón cubierto con materiales sintéticos o acero inoxidable.

El agua actúa de dos formas diferentes: por un lado, como refrigerante; por el otro, como blindaje biológico.

Esta es la forma de almacenamiento más extendida en el mundo. Todas las centrales nucleares disponen de una piscina de almacenamiento de combustible gastado. Existen, además, piscinas centralizadas fuera de los emplazamientos de las centrales.

8.1.2.2.1.2.- Almacenamiento en seco.

El almacenamiento en seco sólo tiene lugar tras un periodo de enfriamiento en piscinas, y utiliza como refrigerante un gas, que puede ser aire o un gas inerte.

Sin embargo, el combustible TRISO, del que hablaremos en un capítulo posterior sobre los reactores rápidos, debido a la menor cantidad de calor irradiado respecto al combustible convencional de reactores de agua ligera, no requiere de un almacenamiento previo en piscinas, pudiendo ser almacenado directamente en seco.

Existen varias modalidades de almacenamiento en seco: almacenamiento en cámaras, almacenamiento en cofres de hormigón y el almacenamiento en contenedores metálicos.

- Almacenamiento en cámaras.

En este sistema, el combustible gastado es almacenado, normalmente ya encapsulado, en bastidores que posteriormente se tapan con unas losas de hormigón armado, que actúan como protección contra la radiación (blindaje) y

contra posibles agentes exteriores, como terremotos, caída de proyectiles, etc. Aunque este diseño es sencillo, requiere instalaciones adicionales para la recepción de combustible y su manejo.

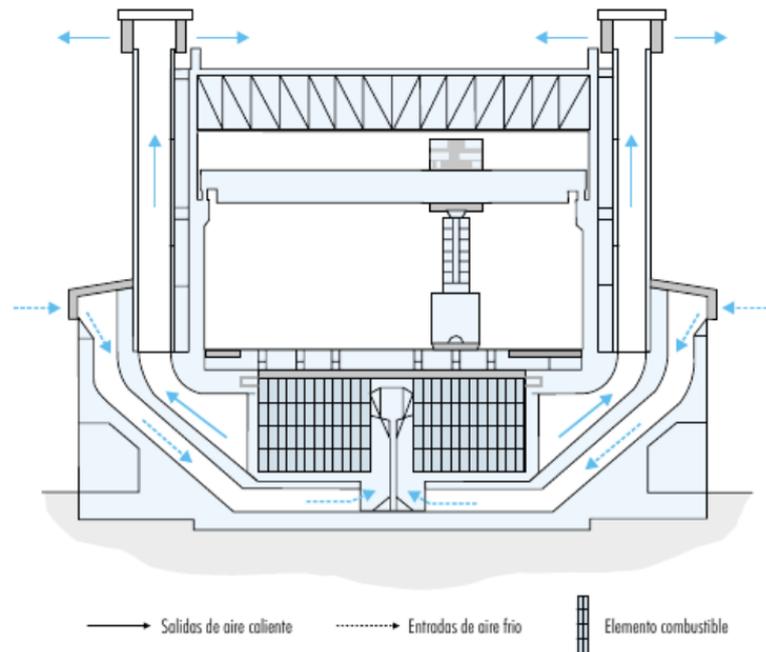


Imagen 137: Almacenamiento en seco, en cámaras. Fuente: *Hacia el buque de actividad sostenible*.

J.R. Sánchez Girón.

- Almacenamiento en cofres de hormigón.

Consiste en la deposición del combustible gastado en estructuras de hormigón armado de forma cilíndrica para uno o varios elementos combustibles, colocados en posiciones fijas en superficie. En su centro existe una cavidad forrada de acero al carbono, dentro de la cual se encuentra un recipiente metálico sellado de acero inoxidable, que alberga a los elementos combustibles gastados en el interior de una atmósfera de helio. La hermeticidad de la cavidad se consigue con un tapón de blindaje.

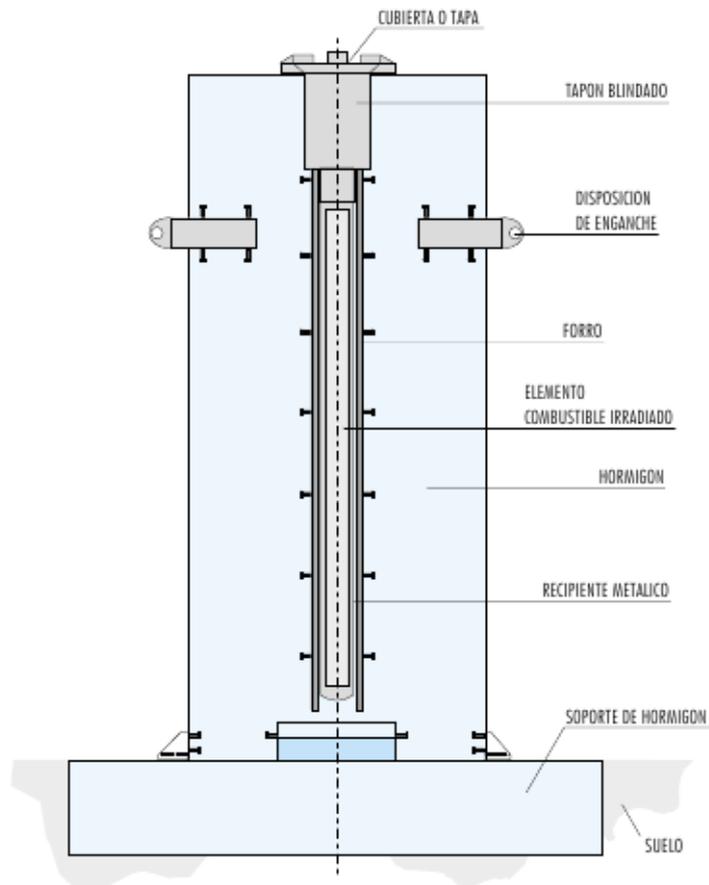


Imagen 138: Cofres de hormigón de almacenamiento temporal de combustible gastado. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

- Almacenamiento en contenedores metálicos.

Se trata de almacenar el combustible gastado en seco, en contenedores metálicos cilíndricos. En estos contenedores se introducen los elementos combustibles directamente en las celdillas interiores o bastidores provistos para tal fin.

El material de construcción de estos contenedores puede ser fundición modular o acero inoxidable. Ambos tienen buenas características de resistencia mecánica, tenacidad, etc.

El contenedor debe tener paredes de un espesor considerable (alrededor de 40 cm.) como blindaje radiológico. La parte externa del contenedor dispondrá de unas aletas longitudinales robustas, con el fin de facilitar, si fuera necesario, la refrigeración que se realiza por convección natural.

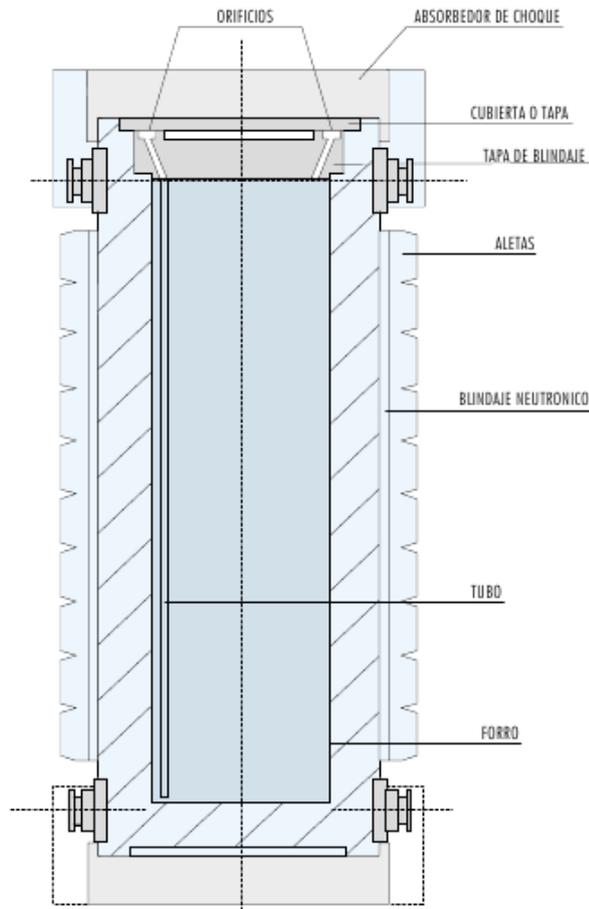


Imagen 139: Contenedores metálicos de almacenamiento temporal de combustible gastado. Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

Dependiendo de sus características, los residuos pueden también ser acondicionados antes de ser introducidos en un contenedor. Algunos de los contenedores utilizados con este fin están diseñados para ser extremadamente duraderos y resistentes a la corrosión u otras formas de degradación durante muchos años. Los contenedores se almacenan entonces temporalmente dentro de una estructura adecuada, construidas a menudo de hormigón que proporciona blindaje contra la radiación y seguridad física. Estas estructuras, tanto si son edificios convencionales como otros tipos de estructuras masivas, están normalmente situados en un emplazamiento físicamente seguro dentro de una valla perimetral de seguridad.

Un almacén temporal centralizado (ATC) no solo está diseñado para albergar residuos de alta actividad como solución temporal para su aislamiento, sino que o

también con el objetivo de tratar y reciclar esos residuos. En países como Francia o el Reino Unido, se encuentran anexos a plantas de reprocesado, donde se separa cualquier elemento utilizable, como el uranio y el plutonio, de productos de fisión y otros materiales existentes en el combustible nuclear gastado en los reactores nucleares.

El ATC tiene una vigencia de 60 años. Durante este tiempo:

- Mantenimiento necesario de la instalación.
- Acceso restringido.
- Vigilancia institucional, que incluirá: toma periódica de muestras y medidas de radiactividad en el agua, aire y seres vivos, debiéndose mantener los valores medidos por debajo de los indicados en la reglamentación vigente.

Pasado este tiempo, los residuos radiactivos deberán trasladarse a un Almacén Geológico Profundo (AGP).

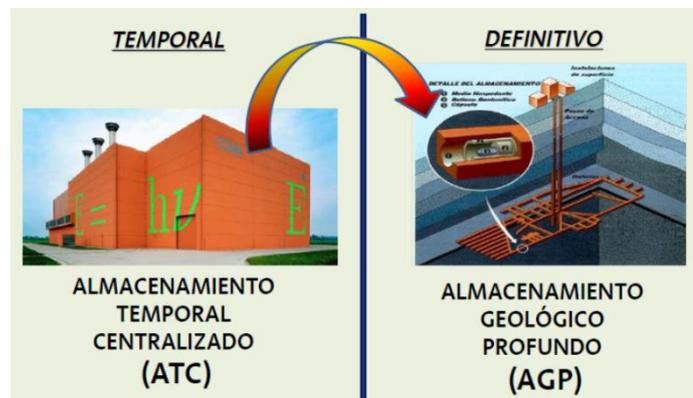


Imagen 140: almacenamiento de los residuos radioactivos. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.

8.1.2.- TRANSPORTE DE RESIDUOS RADIATIVOS.

El transporte de los residuos radiactivos conlleva un peligro importante.

Este transporte se realiza en el interior de unos grandes cilindros de metal (contenedores) extremadamente resistentes.

Los embalajes deben de estar sometidos a diferentes ensayos de caída libre, ensayos de fuego e inmersión para poder ser homologados.



Imagen 141: Resistencia de los embalajes. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.

Hay pruebas en las que estos cilindros superan sin problema la embestida de una locomotora a más de 100 km/h o resistencia al fuego a 800°C durante media hora, por ejemplo; sin embargo, un error o un atentado terrorista podría resultar catastrófico. Una persona no puede soportar con vida más de 20 segundos seguidos cerca de estos residuos.

Los contenedores de CG y de RAA se pueden transportar hasta la instalación ATC por dos vías:

- Por ferrocarril.
- Por carretera.



Imágenes 142 y 143: transporte de CG y RAA por ferrocarril (izquierda) y por carretera (derecha).



Imágenes 144 y 145: Contenedor metálico para el transporte de combustible nuclear gastado (izquierda) y embases con residuos nucleares transuránidos (derecha). Fuentes: ENRESA y Wikipedia.

8.1.3.3.- Almacenes geológicos profundos.

El almacenamiento geológico profundo (AGP) se utiliza para residuos de alta actividad, y es el lugar donde deben almacenarse éstos durante un período de miles de años. Su utilización está justificada por motivos tecnológicos, ambientales y de seguridad, éticos y de buena práctica internacional. Asegura la protección a largo plazo del ser humano y del medio ambiente contra las radiaciones, aprovechando formaciones geológicas que permitan ubicar estos residuos tan duraderos.

Si tomamos como ejemplo la mina de uranio bajo el Cigar Lake, en Canadá, de más de 1.000 millones de años, un AGP tendría la siguiente estructura:

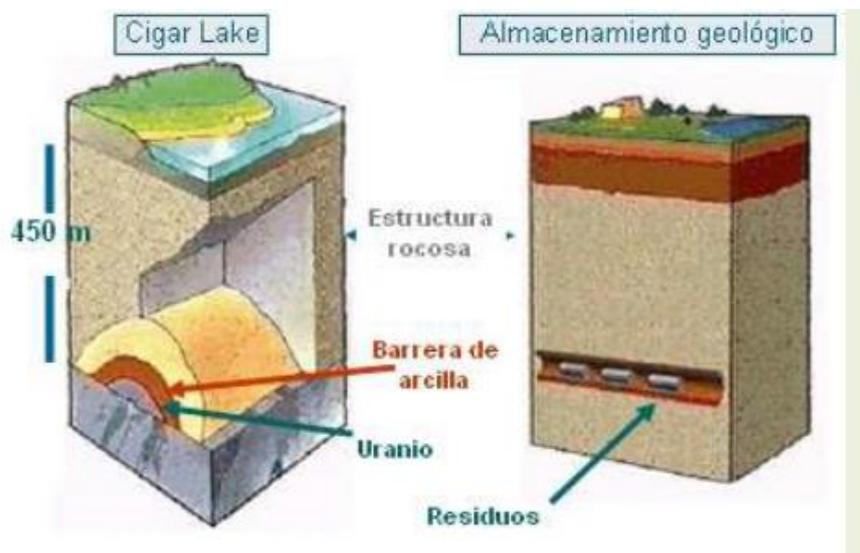


Imagen 146: AGP. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.

Los factores más importantes de este tipo de almacenado son la formación geológica a utilizar y las barreras artificiales para aislarlos del medio.

El sistema se encuentra en fase de desarrollo, si bien la mayoría de los países con un alto desarrollo nuclear se encuentran en fase de estudio de ubicaciones idóneas, siendo los terrenos más favorables para ello los salinos, arcillosos, graníticos o de yesos, debido a sus condiciones geológicas, físicas y químicas.

En un almacenamiento geológico profundo (AGP), el aislamiento de los residuos de la biosfera se consigue mediante la interposición de una serie de barreras múltiples, tanto naturales como artificiales y su seguridad a largo plazo se alcanza mediante la aplicación de tres principios básicos:

- Contención y aislamiento, que permite que los radionucleidos se desintegren antes de entrar en contacto con el hombre y su medio ambiente.
- Retención y retardo, que permite, una vez perdido el confinamiento, limitar las tasas de emisión de radionucleidos, mediante una muy baja disolución del combustible gastado, un transporte muy lento y una alta absorción en el sistema de barreras.
- Condiciones favorables del receptor, que permite limitar las dosis al hombre y al medio ambiente.

Los dos primeros principios básicos de seguridad se consiguen imponiendo criterios y requisitos funcionales al sistema de barreras artificiales y naturales, así como al diseño del almacenamiento profundo. El tercer principio se puede alcanzar mediante una situación y configuración adecuadas al almacenamiento.

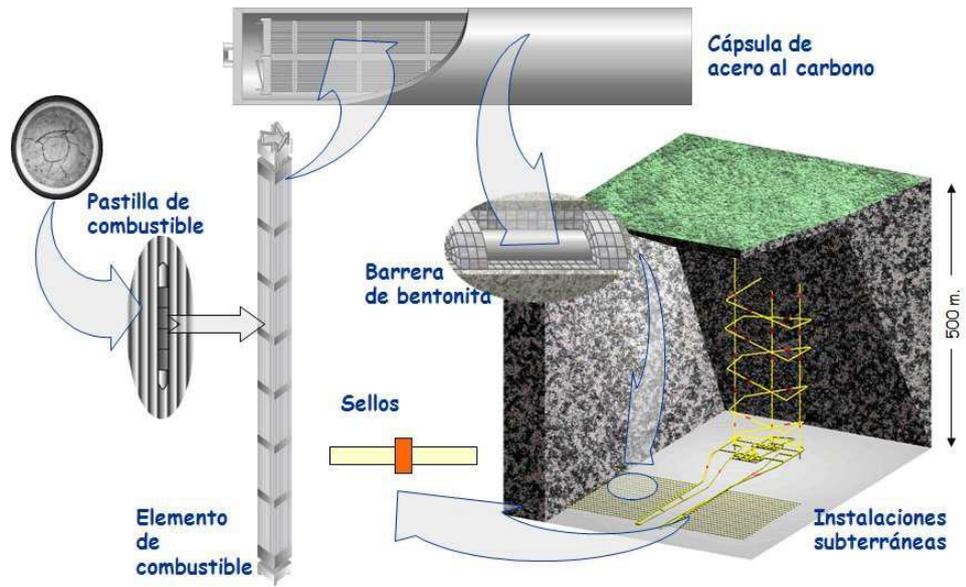


Imagen 147: AGP. Fuente: Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

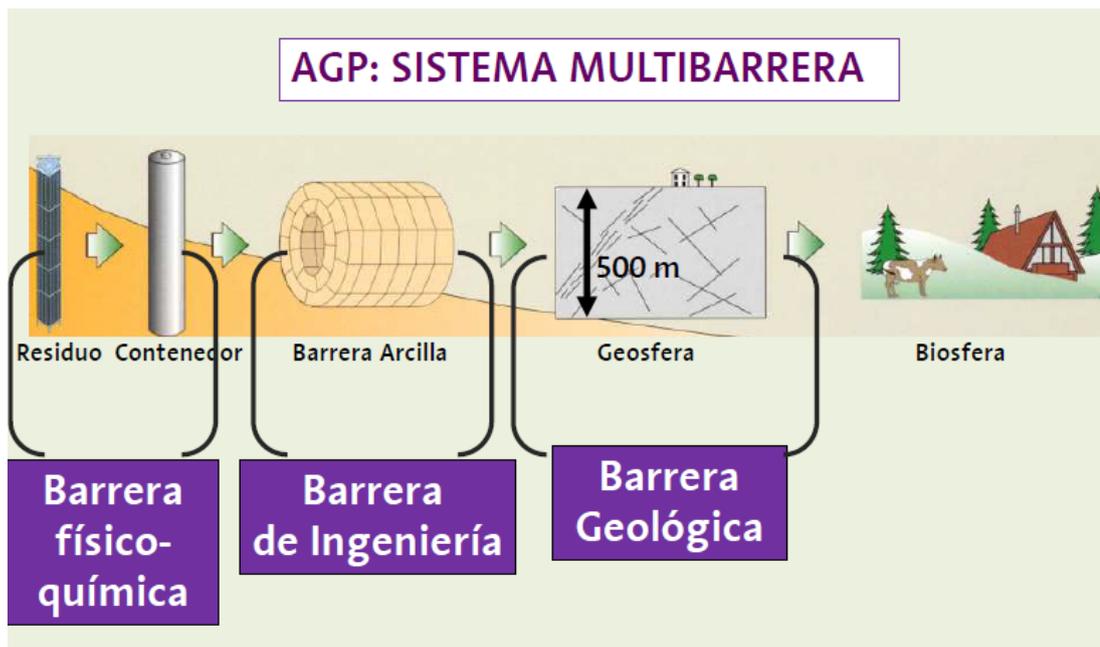


Imagen 148: Sistema multi-barrera. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.



Imagen 149: Sistema multi-barrera. Fuente: Almacenamiento de residuos radiactivos. Paloma Gómez.

Primera barrera: Contenedor de acero al C.

Segunda barrera: Bloques de bentonita compactada (arcilla expansiva).

Tercera barrera: Barrera geológica (formación geológica alojante).

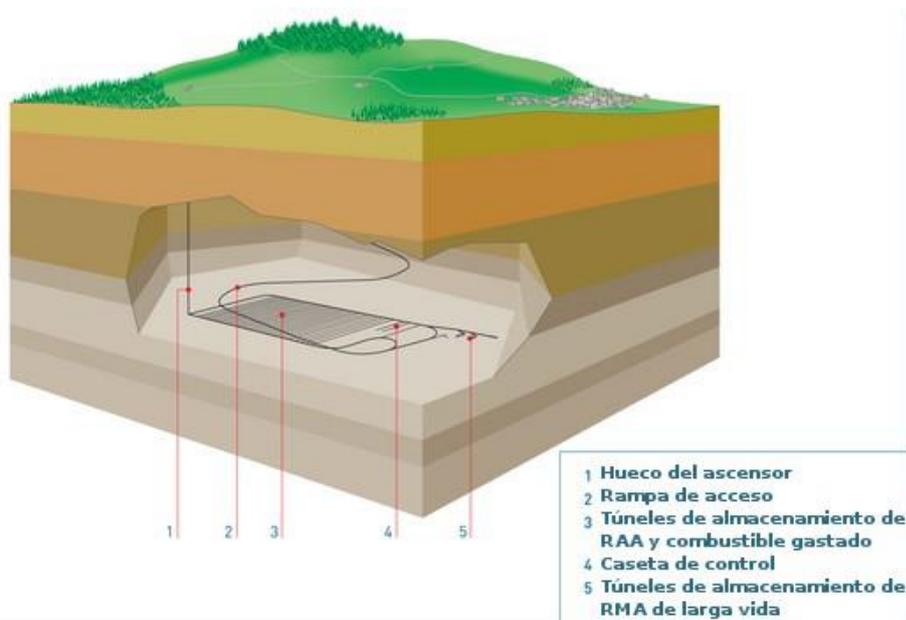


Imagen 150: Esquema conceptual de un almacén geológico profundo (AGP). Fuente: Hacia el buque de actividad sostenible. J.R. Sánchez Girón.

Los elementos que justifican el almacenamiento definitivo en formaciones geológicas son de cuatro tipos:

- Tecnológicas: existen soluciones técnicas viables para diseñar, construir, operar y clausurar un almacenamiento de este tipo con las tecnologías existentes.
- Ambientales y de seguridad: el nivel de protección para el hombre y el medio ambiente, proporcionando un almacenamiento geológico así concebido, es adecuado a corto y largo plazo.
- Éticas: este concepto es compatible con una estrategia de desarrollo sostenible, que requiere que la satisfacción de las necesidades del presente no comprometa la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas. Las generaciones presentes deben ser responsables de la gestión de los residuos que han generado.
Las generaciones futuras podrán decidir cómo usar, extender o cambiar el sistema de gestión que les dejemos, ya que los sistemas de almacenamiento mencionados contemplan la posibilidad de recuperar los residuos, si fuera necesario, por razones técnicas, económicas o de seguridad.
- De buena práctica internacional: el almacenamiento geológico es la opción internacionalmente aceptada por los países inmersos en la problemática de la gestión de los RAA y recomendada por los organismos internacionales (OIEA y AEN/OCDE).

En Nuevo México funciona el único AGP del mundo, pero sólo se utiliza para almacenar los residuos militares de los Estados Unidos. En Finlandia se aprobó el programa de almacenamiento geológico profundo en la localidad de Olkiluoto, que se espera poder operar a partir de 2020. Suecia también está realizando estudios avanzados de emplazamientos para la construcción de un AGP.

En Francia, el futuro repositorio geológico profundo en la región de Meuse (este de Francia) está previsto para 2025 y será gestionado por la empresa francesa de gestión de residuos radiactivos Andra.

El Reino Unido considera prioritario acelerar su programa de gestión de los residuos radiactivos, y proyecta disponer de un repositorio profundo en 2029. El programa comenzó hace 10 años y ha considerado todas las opciones posibles. El plan actual, que fija el año 2040 para disponer del repositorio, está basado en los procesos seguidos por otros países para estudiar y seleccionar el emplazamiento de sus repositorios y la tecnología a utilizar.

8.1.3.4.- Almacenamiento submarino.

El vertido de residuos radiactivos en los mares fue una práctica habitual desde los años 1950. A finales de la década, hubo varias controversias sobre estos vertidos en las costas de los Estados Unidos por empresas autorizadas por la Comisión de Energía Atómica, y en el Mar de Irlanda a cargo de empresas británicas, y la práctica se incrementó con la proliferación nuclear de los años 1980.

Desde 1993, existen leyes internacionales que prohíben el depósito de residuos de alta actividad en el mar. A pesar de esta legislación, se estudia la posibilidad de utilizar fosas oceánicas como almacenes en distintas partes del mundo.

Se estima que la Fosa Atlántica (a 700 Km de las costas de Galicia y a 4.000 m. de profundidad alberga más de 140.000 toneladas de residuos radiactivos, vertidos entre 1967 y 1983.

8.1.4.- CICLOS DE TRATAMIENTO.

Una vez transcurrido el tiempo de enfriamiento conveniente en el almacenamiento temporal, puede optarse por tres vías distintas de actuación:

- Ciclo abierto: En la opción de ciclo abierto, los residuos de alta actividad son los elementos combustibles gastados, cuyo destino final, tras un encapsulamiento, es su evacuación definitiva.
- Ciclo cerrado actual: Consiste en la reelaboración o reproceso del combustible gastado y tiene por objeto recuperar los materiales fisibles presentes (uranio y plutonio), descontaminándolos de los productos de fisión y resto de transuránidos y purificándolos, de forma que cumplan con unas especificaciones admitidas internacionalmente y puedan volver a utilizarse.
- Ciclo cerrado avanzado: En un elemento combustible gastado podemos encontrar una compleja mezcla de isótopos radiactivos, compuesta principalmente por:
 - Actínidos que se generan cuando el U-238 captura los neutrones producidos en la desintegración del U-235. Los más importantes son el plutonio (Pu) y los llamados actínidos minoritarios: neptunio (Np), americio (Am) y curio (Cu).
 - Productos de fisión generados por la fisión del U-235 y sus correspondientes descendientes.
 - Productos de activación que se originan por la irradiación de neutrones sobre las vasijas de zircaloy que contienen el combustible y sobre el resto de materiales estructurales de los elementos combustibles y sus impurezas.

Estos últimos no contribuyen significativamente al inventario radiotóxico del combustible gastado, sin embargo el riesgo radiológico potencial viene determinado, principalmente, por los actínidos, y por los productos de fisión de vida larga.

Actualmente hay en marcha a nivel internacional actividades de I+D, tanto experimentales como de evaluación técnica y económica, sobre la viabilidad de llevar a cabo la transmutación de radionucleidos de vida larga, fundamentalmente actínidos, así como algunos productos de fisión presentes en los combustibles

gastados, con el objetivo de transformarlos (transmutarlos) y así disminuir el inventario radiotóxico de los residuos radiactivos de alta actividad antes de su almacenamiento definitivo.

Cualquiera que sea su viabilidad futura, la transmutación requiere la realización de una serie de actividades previas, conocidas genéricamente como separación, que están basadas en una compleja serie de operaciones químicas y/o metalúrgicas, cuyo objetivo es separar de forma selectiva, individualmente o por grupos, los diversos radionucleidos de vida larga presentes en los elementos combustibles gastados que periódicamente son descargados de los reactores nucleares en operación.

Actualmente, la modalidad que se viene realizando es la de ciclo abierto, ya que a día de hoy no existe tecnología capaz de separar el material fisible residual en un elemento de combustible TRISO, y la opción de ciclo cerrado avanzado es una opción todavía no puesta en práctica comercial.

8.1.5.- REUTILIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE.

Como se viene comentando en los apartados anteriores, las últimas tendencias de investigación y desarrollo tecnológico del tratamiento de residuos nucleares realizan su trabajo en el campo de la transmutación, el reproceso y el almacenamiento definitivo del combustible gastado. A estos tres campos ha de añadirse uno más, el de la reutilización del combustible gastado sin reproceso, es decir, en ciclo cerrado. Se trata de los Reactores Reproductores Rápidos. La vanguardia tecnológica en este campo la constituye principalmente un nuevo prototipo de reactor en desarrollo por General Atomics, el Energy Multiplier Module (EM2). El EM2 es una versión modificada del GT-MHR y es capaz de convertir combustible gastado en electricidad sin la necesidad de reprocesarlo. Cada módulo produciría aproximadamente 240 MW de potencia a 850°C. La sección estándar del núcleo proporciona los neutrones necesarios para la conversión del combustible gastado o de uranio empobrecido en material fisible utilizable.

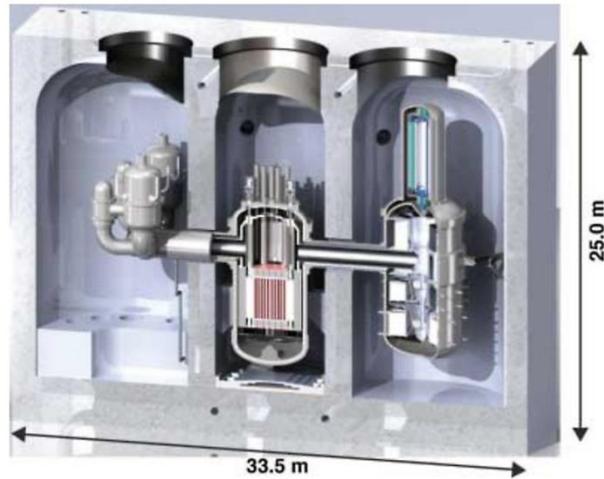


Imagen 151: Reactor EM2 Fuente: www.ga.com/advanced-reactors.

8.1.5.1.- Reactores reproductores rápidos.

Se trata de reactores de neutrones rápidos diseñados para producir combustible nuclear generando más material fisible del que consumen.

El combustible que utilizan es una mezcla de dióxido de plutonio (20%) y dióxido de uranio (80%). El plutonio puede proceder del desmantelamiento de armas nucleares o del reprocesamiento civil.

Rodeando el núcleo del reactor hay una capa de tubos con U-238 no fisible, que al capturar neutrones rápidos de la reacción en el núcleo, se convierte parcialmente en Pu-239 fisible (como lo hace parte del uranio en el núcleo), el cual puede ser reprocesado para su uso como combustible nuclear.

Los reactores rápidos habitualmente utilizan metal líquido como refrigerante. Los reactores reproductores rápidos a gran escala construidos a gran escala utilizan sodio como refrigerante primario, para refrigerar el núcleo y calentar el agua utilizada para generar electricidad mediante turbinas.

Sin embargo, también hay prototipos refrigerados por mercurio, plomo u otros metales.

Hay una propuesta para un reactor reproductor rápido de 4ª Generación

refrigerado por helio. Se trata del EM2, del que ya se habló en el apartado anterior.

En Francia, se diseñó y construyó el reactor reproductor rápido de pequeño tamaño Phenix, el cual desde el año 2004 hasta su cierre en 2009 se destinó a investigación de la transmutación de residuos nucleares.

El reactor reproductor rápido ASTRID, en caso de construirse (se decidirá en 2019), sustituirá al anterior Phenix.

Se trata de una tecnología ensayada, pero mejorable. Actualmente no son competitivos con los actuales, pero probablemente lo serán en el futuro.



Imagen 152: Reactor Phenix. Fuente: Wikipedia.

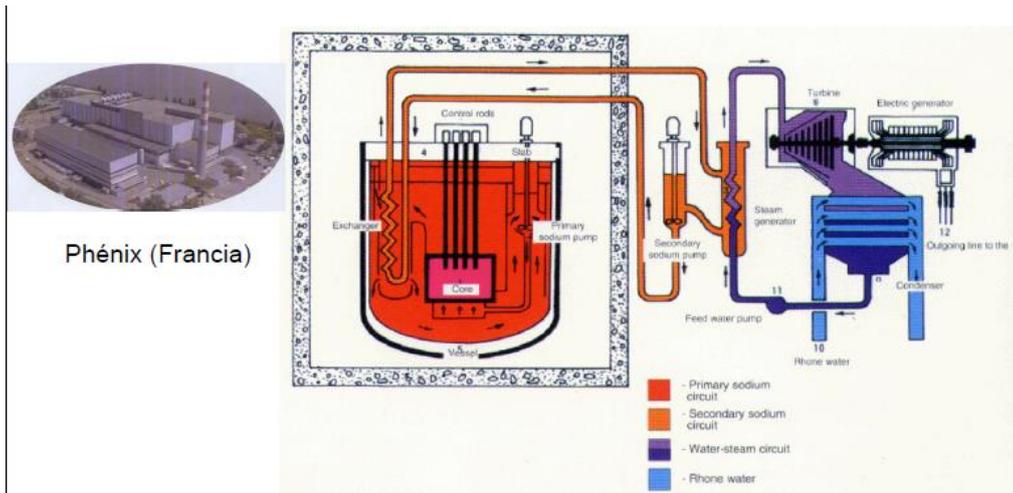


Imagen 153: Reactor Phénix. Fuente: Metodologías avanzadas para recuperar la energía del combustible usado. González-Romero.

8.1.4.- ACCIDENTES EN LOS ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIACTIVOS.

El almacenamiento de este tipo de residuos en cantidades importantes les convierte en lugares altamente peligrosos, por lo que son objeto de extremas medidas de seguridad. No obstante, a lo largo de la historia se han producido accidentes resultando en fugas radiactivas al Medio Ambiente.

- Entre 1948 y 1951 se produjeron fugas en un almacén de la Unión Soviética que provocó un vertido al río Tetcha, provocando la evacuación de más de 7.000 personas.
- El 29 de septiembre de 1957, la planta rusa Mayak sufrió la explosión de un contenedor que liberó 2.000.000 de curios, lo que provocó la evacuación de 11.000 personas y la muerte de un número indeterminado, siendo el segundo accidente nuclear más grave de la historia de la URSS tras el accidente de Chernóbil.
- El 2º de abril de 1973, en las instalaciones de Handford Site, en Estados Unidos, un tanque de residuos dejó escapar 435.000 litros de residuos líquidos altamente radiactivos de cesio, estroncio y plutonio.

- En 1993 se produjeron dos graves accidentes en instalaciones exsoviéticas que ocasionaron las consiguientes fugas radiactivas en los depósitos de Tomsk (en abril) y de nuevo Mayak (en julio), lo que puso en evidencia la seguridad de los depósitos de la antigua URSS.

8.1.5.- PRINCIPALES FABRICANTES DE REACTORES MARINOS.

Los fabricantes que se pueden destacar actualmente para aplicaciones nucleares navales son Westinghouse, General Electric, Bechtel y Combustion Engineering.

Las instalaciones nucleares navales se denominan bajo tres siglas. La primera de ellas define el tipo de buque; A para portaaviones, C para crucero, D para destructor y S para sumergible. La siguiente es un número a partir del 1 que define la generación del propulsor para dicho fabricante. Siendo por ello, la última la que designa al fabricante; B para Betchel, C para Combustion Engineering, G para General Electric y W para Westinghouse, siendo, por ejemplo, el A4W el sistema de doble reactor Westinghouse de cuarta generación que empleaban los portaaviones clase Nimitz Estadounidenses que entregaban un valor unitario de 104 MWth (potencia térmica en el reactor) proporcionando un cómputo de 140.000 SHP (potencia en eje).

Las primeras generaciones quedaron tiempo atrás reservadas a los primeros prototipos.



Imagen 154: Núcleo de un reactor naval de AREVA que DCNS monta en buques franceses. Fuente:

loqueaprendeuna.blogspot.com.es

CONCLUSIONES

Tarde o temprano no tendremos más remedio que acudir a la energía nuclear debido al inminente agotamiento de los combustibles fósiles y a la creciente demanda de energía por parte de nuestra sociedad.

Además, las nuevas políticas medioambientales obligan a sustituir el uso de los combustibles fósiles por su efecto directo sobre la contaminación ambiental, contribuyendo al calentamiento global y a la destrucción de la capa de ozono.

Lejos de producir un rechazo casi generalizado sobre la opinión pública, debemos estar preparados para la utilización masiva de la energía atómica, tanto de fisión como de fusión, en un futuro no muy lejano.

A pesar de que la tecnología nuclear presenta un potencial en la propulsión, se estima que se le ha impedido evolucionar lo suficiente, debido, principalmente, al temor ante posibles accidentes nucleares y a la opinión pública, además, de la problemática sobre la gestión de los residuos radioactivos.

Sin embargo, la propulsión nuclear se presenta como una excelente opción a la propulsión marina debido a, fundamentalmente:

- Su nula emisión de gases de efecto invernadero, ya que no necesita oxígeno para su combustión. El impacto ambiental, en este tipo de buques, es prácticamente cero.
- En los submarinos, al no necesitar oxígeno para la combustión se solucionó el problema de la necesidad de emerger tras cortos períodos de tiempo (a pesar de que el esnórkel mejoró este problema no lo solucionó).
- No necesita utilizar combustibles fósiles en su actividad. Por ello, se eliminan los procesos de carga de combustible (bunker).
- Aprovechamiento de los espacios antes ocupados por el combustible, al no requerir de enormes tanques para el almacenamiento del combustible.

- Autonomía prácticamente ilimitada; una pequeña cantidad de combustible nuclear proporciona la energía equivalente a millones de veces su peso en combustibles derivados del petróleo.
- Esta autonomía prácticamente ilimitada repercute en un ahorro de combustible.
- Al emplear energía nuclear se consiguen mejores prestaciones en el buque, entre ellas un empuje como ningún otro motor puede generar, o mayores velocidades, lo que sin duda se trata de una gran ventaja, no sólo para los buques de guerra, sino también para los buques civiles, tanto de transporte de carga (ahorro en los tiempos) como de pasajeros.

Cabe mencionar que con los novedosos diseños de los reactores de cuarta generación se podrían solucionar los problemas derivados de la gestión de los residuos nucleares, mediante el empleo de reactores reproductores rápidos, además de los nuevos diseños de reactores de alta temperatura refrigerados por helio y alimentados con combustible TRISO, el cual retiene los productos de fisión en su interior, tanto durante el funcionamiento del reactor como su residuo.

Existe un creciente número de países que creen en la expansión de la energía nuclear. Organismos internacionales como AIE, NEA/OCDE o el IPCC prevén escenarios para 2030-2050 con un incremento de la energía nuclear, y coinciden en que será necesario mantener o incrementar la potencia nuclear instalada para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero.

BIBLIOGRAFÍA

Internet

<https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/fision-nuclear>

<http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/119387-ique-es-la-fusion-nuclear>

http://www.antena3.com/noticias/mundo/que-pasaria-si-algun-pais-lanzara-la-bomba-de-hidrogeno-que-hoy-ha-probado-corea-del-norte_2017090359ac57040cf25c1bd7e912da.html

<http://computerhoy.com/noticias/life/que-es-bomba-hidrogeno-bomba-h-como-funciona-67497>

<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>

<http://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/Publicaciones/ArtMID/4126/ArticleID/938/Cient237ficos-del-Cinvestav-experimentan-combustibles-nucleares-seguros>

http://www.larouchepub.com/spanish/reir/privado/anteriores/anteriores2006/2006_06/ciencia/PBMR.htm

<http://www.europapress.es/cantabria/noticia-equipos-nucleares-maliano-construira-nuevo-reactor-nuclear-sudafrica-39-millones-20060124134141.html>

<https://sites.google.com/site/lacienciaradia/home/almacenamiento-de-los-residuos-radiactivos>

<http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/120740-ique-es-un-agg>

http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/07/140729_tecnologia_savannah_barco_nuclear_ch

<https://sites.google.com/site/tallerdetecnologialara/tecnologia-nuclear/buques-militares-de-propulsion-nuclear>

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/fmsc-energy/atom/atom.html>

<http://www.radiationworks.com/version2/NSOttoHahn.htm>

<http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/>

<http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/P>

[aginas/Air-Pollution.aspx\)](#)

<http://www.marinelog.com/docs/NEWSMMV/MMVmar10d.html>

<https://www.prevencionintegral.com/actualidad/noticias/2017/07/25/contaminacion-atmosferica-producida-por-buques-produce-60000-muertes-ano>

<http://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia-barcos-emiten-casi-mitad-contaminantes-coches-20090227130517.html>

<http://www.airclim.org/air-pollution-ships>

Artículos y Trabajos

Sánchez Girón, J.J.R. "HACIA EL BUQUE DE ACTIVIDAD SOSTENIBLE: REVISIÓN DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y ALTERNATIVAS AL EMPLEO DE COMBUSTIBLES FÓSILES". Facultat de Naútica de Barcelona. 2012.

Hans Zandvliet . "El Pico de Petróleo y el Destino de la Humanidad: no existen soluciones técnicas rápidas y las consecuencias pueden ser graves.

New York, enero de 2011.

HUMBERTO PEÑA ALEMÁN . "INGENIERÍA MARINA: MEDIDAS PARA LA REDUCCION DE GASES CONTAMINANTES EN MOTORES MARINOS". ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS. UNIVERSIDADE DA CORUÑA. SEPTIEMBRE – 2016.

"La contaminación marina producida por buques". Medio Ambiente en Andalucía. Informe 2002.

José J. de Troya Calatayud . "Alternativa a los combustibles fósiles. Utilización de hidrógeno a bordo de buques". Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica. Universidade da Coruña (2015).

González-Cancelas, Nicoletta; Soler-Flores, Francisco; Orive, Alfonso; Camarero-

Orive, Alberto “TRANSPORTE MARÍTIMO Y MEDIO AMBIENTE: LAS IMPLICACIONES DE LAS SECAS Y LAS ECAS”. Revista Transporte y Territorio, núm. 8, 2013, pp. 138-156. Universidad de Buenos Aires (Argentina).

Gómez, P. “ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS”. Grupo de Hidrogeoquímica Departamento de Medio Ambiente (CIEMAT). UNIVERSIDAD POPULAR CARMEN DE MICHELENA TRES CANTOS.

H. Barnert, V. Krett y J. Kupitz. “Energía nuclear para producir calor”. BOLETÍN DEL OIEA, 1/1991.

“LA GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE GASTADO DE LAS CENTRALES NUCLEARES”.
WWW.foronuclear.org.

Enrique M. González-Romero. “Metodologías avanzadas para recuperar la energía del combustible usado”. Centro de Energías Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) (2010).

“El almacenamiento temporal a largo plazo de los residuos radiactivos: seguridad y sostenibilidad”. CSN. Colección Otros Documentos 32.2008.

Gabriela Pérez Soria e Israel Santacruz Isunza. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Cecilia Martín del Campo Márquez. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. “*La Planta de Generación de Energía Eléctrica PBMR*”. Energía Nuclear y Seguridad Radiológica: Nuevos Retos y Perspectivas. XIV Congreso Anual de la SNM/XXI. Reunión Anual de la SMSR Guadalajara, Jalisco, México, 10-13 de Septiembre, (2003), Memorias en CDROM.

González-Romero, E.M. “*REACTORES DE GENERACIÓN IV: CAMINO A LA SOSTENIBILIDAD A LARGO PLAZO DE LA ENERGÍA NUCLEAR*”. DYRA. Energía y sostenibilidad. Tecnología nuclear.3320.04. Reactores de fisión nuclear. Rev. 2 del

9/ene/2012

Martin Roberto Wunderlich Contreras. *“Análisis de la Contaminación Atmosférica Provocada por Buques en base a las Exigencias del Anexo VI del MARPOL 73/78”*.

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA NAVAL.
UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE (2005).

Libros

Lozano Leyva, M. *“NUCLEARES: ¿POR QUE NO?: COMO AFRONTAR EL FUTURO DE LA ENERGIA”*. Ed.: Debolsillo (2010).

RICHARD L. GARWIN y GEORGES CHARPAL. *“MEGAWATTS, MEGATONS: THE FUTURE OF NUCLEAR POWER AND NUCLEAR WEAPONS”*. UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS, 2002.

Manuales y Convenios

CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES, DE 2 DE NOVIEMBRE DE 1973. CONVENIO MARPOL (CON EL PROTOCOLO DE LONDRES DE 17 DE FEBRERO DE 1978 Y ENMIENDAS, VER ENLACES PARA 2010-2012). OMI.

AP1000® Overview. Westinghouse Electric Company LLC (2011).

AVISO:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros.

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.”