



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

“PROYECTO DE UNA CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA EN EL PAÍS”

**Que para obtener el Título de
Ingeniero Electricista**

**Presenta:
ISRAEL PÉREZ RODRÍGUEZ**

**Asesor de Tesis:
DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS**

Morelia, Michoacán, Diciembre de 2011

Capítulo 1.

Introducción

1.1	<i>Introducción.....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>La energía nuclear como una alternativa en la generación de energía eléctrica.....</i>	<i>5</i>
1.3	<i>Objetivo.....</i>	<i>6</i>
1.4	<i>Justificación.....</i>	<i>6</i>
1.5	<i>Metodología de la investigación.....</i>	<i>7</i>
1.6	<i>Organización de la tesis.....</i>	<i>8</i>

Capítulo 2

La energía nuclear desde el descubrimiento del átomo a nuestros días

2.1	Introducción.....	9
2.2	Bosquejo Histórico Del Átomo.....	10
2.3	Definiciones de la física nuclear.....	14
2.3.1	Átomo.....	14
2.3.2	Isótopo.....	18
2.3.3	Radiactividad.....	19
2.3.4	Partícula Alfa	20
2.3.5	Partícula Beta.....	21
2.3.6	Rayos X.....	21
2.3.7	Rayos Gamma.....	22
2.3.8	Materia.....	23
2.3.9	La Energía.....	26
2.4	Reacciones Nucleares.....	29
2.4.1	Fusión.....	30
2.4.2	Fusión Nuclear.....	30
2.4.3	Fisión.....	32
2.4.4	Fisión Nuclear.....	33

Capítulo 3

Centrales Nucleares

3.1	Introducción.....	35
3.2	Reactores Nucleares.....	36
3.2.1	Combustible.....	37
3.2.2	Barras De Control	38
3.2.3	Materiales estructurales.....	38
3.2.4	Moderador.....	38
3.2.5	Refrigerantes.....	39
3.2.6	Reflector.....	39
3.2.7	Elementos De Control.....	39
3.2.8	Blindaje.....	39
3.3	Tipos De Reactores.....	40
3.3.1	Reactor de agua a presión	40
3.3.2	Ventajas y Desventajas del reactor de agua pesada (PWR).....	42
3.3.3	Reactor de agua en ebullición.....	43
3.3.4	Ventajas y Desventajas del reactor de agua en ebullición (BWR).....	45
3.3.5	Reactor Magnox.....	46
3.3.6	Reactor refrigerado por gas	49
3.3.7	Reactor refrigerado por aire	50
3.3.8	Reactor de agua pesada	52
3.3.9	Reactor de Sodio Grafito.....	54
3.3.10	Reactor reproductor.....	56
3.3.11	Reactor homogéneo.....	58
3.4	Reactores en el mundo.....	60

Capítulo 4

Proyecto de una central nucleoelectrica

4.1	Introducción.....	63
4.2	Emisiones de radioactividad.....	64
4.3	Desintegración Radioactiva.....	64
4.4	Generación de la energía eléctrica en el país.....	67
4.5	Posible ubicación de la central Nucleoelectrica del país.....	72
4.6	Selección de tipo de central nucleoelectrica.....	75
4.6.1	Costos de la energía nuclear.....	76
4.6.2	Minas de uranio.....	82
4.6.3	Fabricación de combustible.....	83
4.7	propuestas de central nucleoelectrica para el país.....	86
4.7.1	Comparación con una planta geotérmica instalada en el país.....	106
4.7.2	Comparación con una planta termoelectrica de nominada de ciclo con condensador e instalada en el país	110
4.8	Resumen del proyecto.....	113
4.9	Riesgos de contaminación.....	114

Capítulo 5

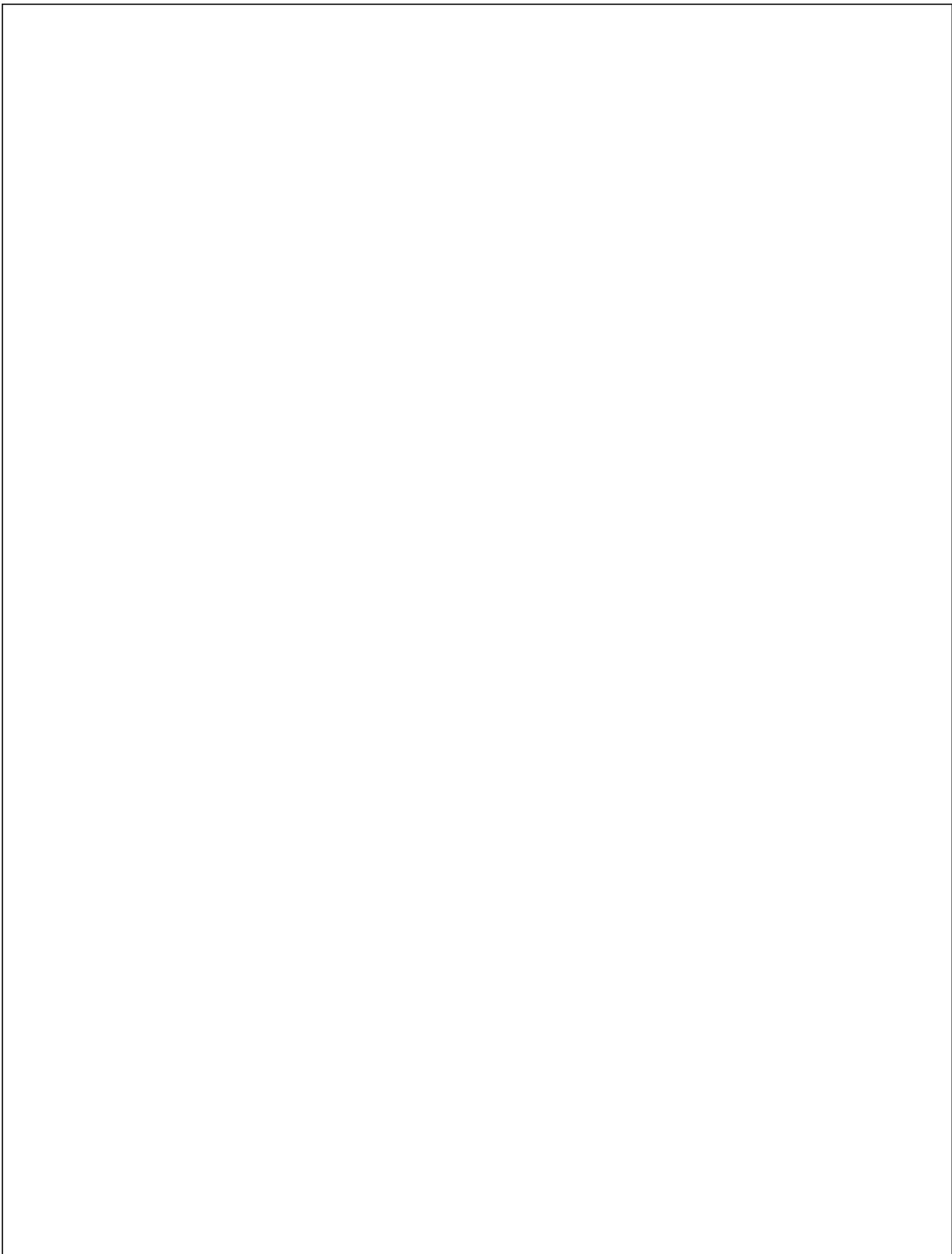
Conclusión y recomendaciones

5.1	Introducción.....	118
5.2	Recomendaciones.....	121
	Referencias.....	123
	Lista de Figuras.....	127
	Lista de Tablas.....	129
	Apéndices	
	<i>Tabla de agua sobre calentada</i>	<i>130</i>
	<i>Tabla de agua saturada.....</i>	<i>131</i>
	Resumen.....	132

Lista de Símbolos y Abreviaturas

<i>CN</i>	<i>central nuclear</i>	<i>Z</i>	<i>número atómico</i>
<i>K</i>	<i>kilo</i>	<i>A</i>	<i>número másico</i>
<i>M</i>	<i>mega</i>	<i>n</i>	<i>número cuántico principal</i>
<i>G</i>	<i>giga</i>	<i>ele</i>	<i>número cuántico secundario</i>
<i>m</i>	<i>metros</i>	<i>U</i>	<i>uranio</i>
<i>m³</i>	<i>metros cúbicos</i>	<i>Pu</i>	<i>plutonio</i>
<i>Kg</i>	<i>kilogramo</i>	<i>α</i>	<i>Rayos alfa</i>
<i>W</i>	<i>watts</i>	<i>β</i>	<i>Rayos beta</i>
<i>Hz</i>	<i>Hertz</i>	<i>X</i>	<i>rayos X</i>
<i>€</i>	<i>euro</i>	<i>γ</i>	<i>Rayos gamma</i>
<i>W-h</i>	<i>watt-hora</i>	<i>GE</i>	<i>General Electric</i>
<i>g</i>	<i>aceleración de la gravedad</i>	<i>NRC</i>	<i>Comisión Reguladora de la Energía nuclear</i>
<i>t</i>	<i>tiempo</i>	<i>NUREG-150</i>	<i>Estudios de riesgos de accidentes severos.</i>
<i>KD</i>	<i>ganancia derivativa</i>	<i>ABWR</i>	<i>Advanced Reactor de Agua en ebullición</i>
<i>KI</i>	<i>ganancia integral</i>	<i>PWR</i>	<i>reactor de agua a presión</i>
<i>KP</i>	<i>ganancia proporcional</i>	<i>BWR</i>	<i>reactor de agua en ebullición</i>
<i>Ω</i>	<i>ohms</i>	<i>AGR</i>	<i>reactor refrigerado por gas</i>
<i>δ</i>	<i>Ángulo de potencia</i>	<i>REP</i>	<i>reactor de agua pesada</i>
<i>X</i>	<i>reactancia</i>	<i>WWER</i>	<i>reactor moderado y refrigerado por agua</i>
<i>R</i>	<i>resistencia</i>	<i>EPR</i>	<i>reactor presurizado Europeo</i>
<i>P</i>	<i>potencia real</i>	<i>CANDU</i>	<i>Canadá deuterio uranio</i>
<i>C</i>	<i>velocidad de la luz</i>	<i>°C</i>	<i>grados centígrados</i>
<i>E</i>	<i>Energía</i>	<i>T</i>	<i>temperatura</i>
<i>j</i>	<i>julios</i>	<i>Pa</i>	<i>Pascales</i>
<i>H</i>	<i>hidrogeno</i>	<i>V</i>	<i>volumen</i>
<i>He</i>	<i>helio</i>		
<i>D2O</i>	<i>óxido de deuterio</i>		
<i>H2O</i>	<i>agua</i>		
<i>CO2</i>	<i>óxido de carbono</i>		

Hf *Energía interna*
Hfg *Entalpía*
hs *Entalpía*
sf *Entalpía*
sg *Entropía*
Pot *Potencia*
Ton *tonelada*
m *Flujo de vapor*
Tg *eficiencia del turbogenerador*



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darle la vida a mis padres: Heliodoro Pérez Licea y a Bertha Alicia Rodríguez Villafan.

A mis padres por darme la vida y hacer posible mi preparación profesional, que en el transcurso de estos años he adquirido. Conocimientos que harán de mí un buen profesionista para mi pueblo y para mi país.

Agradezco de todo corazón al Ing. Isaías Reyes Muñiz y a su familia que compartieron triunfos y derrotas en mi vida y en mi carrera profesional.

A los profesores con los que compartí gran parte de mi tiempo. Los llevaré siempre en mente y recordando sus enseñanzas, a los compañeros y amigos que pasamos tiempos inolvidables fuera y dentro de las aulas.

Agradezco de una manera muy especial y respetuosa al Ing. Moisés Ambriz Díaz, al Ing. José Luis Orozco Corona y a Saúl Eduardo Pineda Esquivel, que supieron asimilar y compartir conmigo conocimientos laborales para mi formación profesional.

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica que siga forjando con disciplina y conocimientos a futuros profesionistas.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis padres Heliodoro Pérez Licea y a Bertha Alicia Rodríguez Villafan, y a la memoria de mis abuelitos, que con su trabajo y esfuerzo hicieron posible mi formación profesional, que es la mejor herencia que me pudieron dar, ya que esta se termina hasta la tumba.

Capítulo 1

1.1 Introducción

En el planeta hay diferentes tipos de energía proporcionada por la naturaleza como caídas de agua, corrientes marinas, caudales de ríos, corrientes de vientos, energía solar y geotérmica, de ellas obtenemos su energía para transformarla en energía eléctrica.

Con el desarrollo tecnológico del hombre, ha creado y perfeccionando las formas para obtener la energía eléctrica, desde los recursos naturales hasta la manipulación de el y todo con un fin, generar energía eléctrica para una población o industria.

La obtención de la energía eléctrica en nuestros tiempos tiene un papel fundamental en el desarrollo de un país. Pero no todas las poblaciones e industrias requieren la misma cantidad de energía.

La energía solar no puede satisfacer la necesidad de una industria pero si puede con una pequeña vivienda o para el calentamiento de agua en una vivienda u hospital la cuál se está implementando en países como España donde se hecho obligación para la población con el propósito de no contaminar y reducir el gasto en combustibles fósiles.

Las energías eólicas, mareomotrices y geotérmicas están en pleno desarrollo y con gran énfasis en algunos países ya que en su generación de energía eléctrica son capaces de dar servicio eléctrico a poblaciones e industria e incluso a ambas.

Con el crecimiento de la demanda de energía eléctrica y el crecimiento tecnológico del hombre ha encontrado diversos tipos de cómo obtener la energía eléctrica, no obstante las innovaciones a las centrales eléctricas ya instaladas brindan una mejor eficiencia pero a un alto costo económico.

Para dar servicio de energía eléctrica a un país y así poder alimentar a una población y a sus industrias se necesitan grandes cantidades de generación de energía,

además es necesario tener plantas de energía disponible o de emergencia por si hay algún problema en alguna de las plantas de generación.

En la actualidad en nuestro país la energía eléctrica es producida por diversas fuentes principales que son:

- **La energía hidráulica:** Producida por la caída de agua. Es limpia y renovable, pero es necesario modificar el ecosistema para crear una presa.
- **La energía térmica:** se tienen en dos grandes tipos por la naturaleza llamada geotérmica y termoeléctrica. La geotérmica es energía limpia y renovable, y se extrae por medio de pozos específicamente perforados, las aguas subterráneas, que poseen una gran cantidad de energía térmica almacenada, se extrae a la superficie transformándose en vapor que se utiliza para generar energía eléctrica. La termoeléctrica producida por la quema de combustibles fósiles para generar vapor para así producir energía eléctrica, pero es altamente contaminante por su gran emisión de CO₂.
- **La energía eólica:** Producida por corrientes de aire. Es limpia y renovable, pero en nuestro país apenas está en desarrollo.
- **La energía por medio de gas:** Mejor conocida por Turbo Gas, su proceso consta de turbinas de gas aeroderivativas empleadas para la generación de energía eléctrica, bombeo y compresión. Por lo general, este tipo de plantas son llamadas plantas de emergencia utilizadas en las horas pico de la demanda máxima de energía o suministrar permanentemente de energía eléctrica a zonas aisladas en donde no es factible líneas de transmisión.
- **Central Carboeléctrica:** Su proceso consta en la combustión del carbón, esta tiene mucha relación a las centrales termoeléctricas convencionales.
- **Central eléctrica por medio del Diesel:** Este tipo de central trabaja con la quema de combustible exactamente de la misma manera que el motor de un automóvil o camión, está situado fijamente y conectado por medio de

una flecha a un generador, y como toda máquina de combustión interna emite gases contaminantes.

- **Centrales Térmicas de ciclo combinado:** Como su nombre lo dice es la combinación de un ciclo de gas y un ciclo de vapor, pero también provoca altas emisiones de gases contaminantes.
- **Central Nucleoeléctrica:** Su funcionamiento es igual que una termoeléctrica o de ciclo combinado lo único en lo que cambia es en el tipo de combustible que es altamente radioactivo.

Las centrales nucleoeléctricas las están implementando en muchos países desarrollados para las crecientes poblaciones e industrias en donde no es costeable ni rentable las innovaciones de las centrales termoeléctricas convencionales.

A nivel mundial y a nivel nacional la generación de energía eléctrica es producida principalmente por las llamadas centrales termoeléctricas convencionales a base de turbinas de vapor y gas como se ha mencionado anteriormente, que utilizan derivados del petróleo.

La implementación de fuentes alternas de energía tiene un gran importancia en el ámbito de la contaminación y la conservación del planeta, pero el crecimiento de la población y de la industria no son muy apropiadas ya que la demanda de energía es grande y por eso que una central nucleoeléctrica si puede satisfacer las demandas de los usuarios de energía eléctrica.

La energía nuclear, lamentablemente tiene mucha relación con fines bélicos, no obstante tiene gran aplicación en la medicina y en la industria misma, aún dándose un crecimiento global en la población, los constantes cambio en la naturaleza es necesario dar solución a las necesidades primarias de un país en constante crecimiento.

En la construcción de una planta de generación de energía eléctrica, mediante la utilización de la energía nuclear y su proceso llamado fisión nuclear y en que el problema de la contaminación radioactiva, en primer lugar y así como el peligro potencial desde el

punto de vista bélico, por la ubicación estratégica de este tipo de centrales, ha hecho que en algunos países opten en otras formas de generar su propia energía eléctrica.

Dadas las perspectivas energéticas mundiales y nacionales y a pesar de las oposiciones públicas en la construcción de las centrales nucleoelectricas, es de esperar que en un futuro no muy lejano y en que las fuentes de recursos naturales se agoten o cambien el ciclo de lluvia o de corrientes de viento o en que no ocurra un desarrollo tecnológico en este ámbito, la fisión nuclear reemplazará a los recursos naturales.

Para poner en marcha la construcción de una central nucleoelectrica en un país es necesario el estudio de factibilidad para poder dar solución a varios problemas a la vez como contaminación ambiental y visual, así mismo el costo del combustible nuclear y los posibles proveedores de dicho combustible, además del manejo de los desechos.

Es necesario hacer un estudio de las plantas termoeléctricas que estén en nuestro país y ver a cuales de ellas son las más contaminantes y menos eficientes para en caso de construirse una central nucleoelectrica, desmantelar o dejárselas a instituciones educativas para su desarrollo educativo de esas centrales termoeléctricas.

1.2 La energía nuclear como una alternativa en la generación de energía eléctrica.

Una parte de la generación de energía eléctrica en nuestro país, es obtenida por medio de la quema de combustibles fósiles y otro tanto de recursos naturales, con el paso de los años no será suficiente con lo que se genera actualmente por ello es necesario un plan energético que cumpla y de solución a este problema. En este caso se justificaría la construcción de una planta nucleoelectrica.

Una energía limpia y con una alta eficiencia en su proceso, es lo deseado en una planta de generación de energía eléctrica, como toda industria la materia prima y los medios de cómo obtenerla es necesario tener un punto de acceso más adecuado al punto de consumo.

Las centrales de generación son fábricas de producción de energía eléctrica, donde se transforma una energía primaria en energía eléctrica, es decir, cómo se ilustra en la siguiente figura 1.1.



Figura 1.1 Diagrama de bloques de la generación.

Esta energía primaria puede ser de diferentes tipos proporcionados por la naturaleza o por derivados de petróleo o material nuclear, de ahí pasa a la central de generación dependiendo de su energía primaria y como resultado tenemos la energía eléctrica.

1.3 Objetivo

El objetivo de esta tesis es proyectar una central nucleoelectrónica fiable y moderna en nuestro país.

1.4 Justificación

Puede justificarse la producción de generación eléctrica, por medio de una central nucleoelectrónica para satisfacer la demanda de la población, sacando de servicio a las centrales más contaminantes, menos eficientes. No obstante los residuos de las centrales nucleoelectrónicas como la radiactividad pueden utilizarse en tratamientos para algunos tipos de cáncer y para detectar otros tipos de enfermedades. Para esto es necesario un crecimiento tecnológico en el país en todos los ámbitos.

En este tema de la generación de energía eléctrica por medio de energía nuclear no tiene como finalidad fines bélicos, sino todo lo contrario, el desarrollo y el beneficio de la humanidad. La energía nuclear es una de los temas que están causando más polémica en los tiempos actuales, ya que todo el mundo le concierne y puesto que es una fuerza destructora capaz de acabar con todo el mundo, con lo cuál causa gran preocupación y un gran interés entre poblaciones.

El gran poder de la energía nuclear debe ser manejado con extrema precaución y si se utiliza sin el debido respeto su gran poder destructor se revelaría en contra de nosotros provocando un holocausto en el que la destrucción y la desgracia terminarían con la raza humana y con todo lo que llevo miles de años en construir, todo esto por no saber utilizar con responsabilidad este recursos que brinda la naturaleza.

Es importante mencionar que los residuos de las centrales nucleoelectrónicas llamado radiación son utilizados en diferentes ámbitos como se mencionó anteriormente en la medicina y en otros tantos desarrollos tecnológicos, no obstante uno ejemplo del uso de estos desechos radioactivos se utiliza con el nombre de irradiación que no genera

efectos secundarios en la salud humana, y siendo capaz de reducir considerablemente el número de organismos y microorganismos patógenos presentes en diversos alimentos envasados para el consumo humano.

Las necesidades de producir energía eléctrica independiente por medio de un reactor nuclear, se ha logrado en nuestros tiempos en unidades móviles grandes, tales como barcos transoceánicos, buques y otros tantos con fines bélicos, la implementación en unidades como aviones y locomotoras es más problemático, pero en un futuro no muy lejano, el reactor nuclear propulsará una nave espacial.

1.5 Metodología de la investigación

Desde que se instalaron las centrales termoeléctricas y nucleoelectricas en nuestro país y en el mundo se da un mejor enfoque al tener una eficiencia en los procesos de cómo generar la energía eléctrica, teniendo en cuenta la ubicación y el tratado de sus desechos radioactivos.

Desde el año 1954 a nuestros días hemos escuchado el poder de la energía nuclear como devastadora, en cambio para hacer un estudio de cómo generar energía eléctrica, con este combustible es necesario, revisar documentos y los logros tecnológicos que se han dado con respecto a la generación de energía eléctrica por medio de la energía nuclear como combustible.

1.6 Organización de la tesis

La organización de la tesis está contemplada en cinco capítulos en donde se describe el contenido de estos que son:

- **Capítulo 1:** Introducción
- **Capítulo 2:** La energía nuclear desde el descubrimiento del átomo a nuestros días.
- **Capítulo 3:** Centrales nucleoelectricas.
- **Capítulo 4:** Proyecto de una central nucleoelectrica.
- **Capítulo 5:** Conclusiones y Recomendaciones.
 - Apéndice A
 - Bibliografía

Capítulo 2

La energía nuclear desde el descubrimiento del átomo a nuestros días

2.1 Introducción

Antes de entrar a detalle de la estructura del átomo y de los conceptos de la física atómica, es conveniente a nivel de cultura general tener una idea cronológica de los desarrollos que se le ha dado al átomo hasta nuestros días.

Desde la época de los griegos, afirmaban que toda materia estaba compuesta por átomos, en donde la palabra (átomo proviene, de la palabra griego sin partes o indivisible, y que en latín atomum), no obstante es bueno mencionar que el desarrollo ha sido muy lento ya que se limitaba a especular sobre él.

El átomo es un concepto estudiado principalmente por la química y la física, que lo define como la unidad básica y estructural de la materia, de tal manera muchos hombres de antaño le han intentado describir y explicarlo. Desde entonces se han hecho y realizado varios estudios e implementaciones tecnológicas al estudio del átomo, teniendo como resultado nuevos elementos que, gracias al desarrollo tecnológico del hombre, han llegado a grandes éxitos y con descubrimientos que inquietan a los científicos, a seguir investigando y trabajando para lograr la creación e innovación de nuevas tecnologías, que ayudarán a la humanidad a lograr grandes descubrimientos en todos los ámbitos de las ciencias.

No obstante, falta mucho por perfeccionar en los estudios de la física nuclear y física cuántica ya que en los últimos años han logrado controlar las mencionadas reacciones nucleares llamadas fusión y fisión, gracias al desarrollo tecnológico la fusión nuclear probablemente sea una de las fuentes inagotables de energía pero en la actualidad esto está en estudios y en experimentos de laboratorio.

De tal manera que la fisión nuclear es la implementada para la generación de energía eléctrica en las centrales nucleares, en tanto la fisión nuclear desencadena lo que comúnmente se le denomina reacción en cadena controlada, utilizando elementos químicos que más a fondo se mencionarán.

2.2 Bosquejo Histórico Del Átomo

Un bosquejo histórico a los personajes que le dieron gran parte de su vida al estudio del átomo, desde sus inicios hasta los desarrollos logrados en la actualidad, teniéndose en:

- 1789 Martin Heinrich Klaproth descubre el uranio, el circonio y el titanio.
- 1808 Dalton da a conocer por primera vez la teoría atómica, en la que se basa la física moderna. Explica y demuestra que la materia está formada por partículas indivisibles llamadas átomos.
- 1857 Heinrich Geissler, descubre los rayos catódicos.
- 1869 Mendeleiev, presentó por primera vez una versión de la tabla periódica que contenía 63 elementos.
- 1891 George Johnstone Stoney, sugirió un nombre para la unidad fundamental fuese o no una partícula, que lo denominó electrón.
- 1895 Wilhelm Röntgen, Descubre los rayos X.
- 1896 Henri Becquerel, se descubre una propiedad del uranio denominada radiactividad.
- 1898 Marie Curie abre la puerta a las aplicaciones de la radioactividad.
- 1900 Max Planck, descubrió la constante fundamental denominada constante de Planck, usada para calcular la energía de un fotón. Planck establece que la energía se radia en unidades denominadas cuantos.
- 1902 Pierre y Marie Curie había notado que cada átomo de una sustancia radiactiva funciona como una fuente constante de energía, no obstante en 1903 Rutherford y Soddy habían hecho ver que esa energía salía del interior

del átomo y que debía de ser enorme comparada con la producida por cambios químicos.

- 1905 Albert Einstein propuso la transformación de la masa en energía y lo resumió en la fórmula (2.1),

$$E = MC^2 \quad (2.1)$$

Donde:

E = Energía.

M = Masa.

C = Velocidad de la luz es igual a $300,000 \text{ Km/seg}$

- 1909 Hans Geiger, descubrió el primer aparato para medir la radiactividad de un objeto u lugar, llamado contador de Geiger.
- 1912 Joseph Thomson, Demostró que algunos isótopos son estables. Estos isótopos, son los mismos átomos de igual nombre y carga, pero con diferente peso atómico.
- 1913 Niels Bohr, desarrolló el modelo atómico de Bohr o de Bohr – Rutherford.
- 1919 Ernest Rutherford, logró la primera transmutación artificial de elementos químicos, mediante el bombardeo de un átomo de nitrógeno con partículas alfa, a esto se le atribuye el nacimiento de la física nuclear.
- 1926 Werner Heisenberg y Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger, Informan sobre la teoría de los cuantos que describe todos los movimientos de ámbito de las partículas atómicas, asimismo nace la mecánica cuántica y la mecánica ondulatoria.
- 1930 Bothe y Becker, observaron una radiación emitida por núcleos de boro, berilio y litio esto cuando eran bombardeados por la radiación alfa. A esto se le dio el nombre de fuente artificial de neutrones.

- 1932 Carl David Anderson, estudia la radiación y descubre el positrón que es un electrón con carga positiva.
- 1932 James Chadwick, descubrió la partícula en el núcleo del átomo que pasaría a llamarse neutrón, esta partícula no tiene carga eléctrica.
- 1932 Harold Clayton Urey, descubrió el deuterio que también recibe el nombre de hidrógeno pesado.
- 1932 Cok Croft y Walton, construyen un acelerador de partículas lineal que es un dispositivo eléctrico y se utiliza para acelerar partículas subatómicas que posean carga eléctrica, tales como electrón, positrón, protón o el ion.
- 1932 Ernest O. Lawrence y M. S. Livingtone, construyen un acelerador de partículas circular llamado Ciclotrón.
- 1934 Iréne Jolito-Curie descubre la radiación artificial.
- 1934 Enrico Fermi, desarrolló el primer reactor nuclear, con el procedimiento de bombardear elementos pesados con neutrones, adquirió un particular interés cuando ataco al uranio, el núcleo de este último en estado natural, se desintegra irradiando una partícula alfa, disminuyéndose así en dos números atómicos.
- 1938 O. Hahn y F. Strassmann, descubrieron la reacción nuclear que liberaba mucha más energía por átomo que la radiactividad, y que tenía una potencial para ser usada tanto para producir explosiones como generar energía. Se trataba del rompimiento del átomo y al proceso de le llama fisión nuclear.
- 1939 Lise Meitner y Otto Robert Frisch, concluyeron que el átomo de uranio bombardeado se divide en dos masas aproximadamente iguales.
- 1940 Mc Millan, Seaborg y sus colaboradores producen los primeros elementos transuránicos en que el nombre (trans-uránidos significa más allá del uranio), también se producen el neptonio y el plutonio.

- 1942 Enrico Fermi, bajo el nombre del proyecto Manhattan se obtuvo el primer reactor nuclear en cadena, auto sostenible mejor llamado reacción en cadena.
- 1945 en el desierto de Alamogord (Nuevo México, Estados Unidos De Norte América) tuvo lugar la primera explosión nuclear de la historia. No obstante en ese mismo año y muy dolorosa noticia que envolvió al mundo, sobre las dos explosiones de las bombas de uranio y plutonio, en las ciudades de Hiroshima y Nagasaki (Japón).
- 1954 En los Estados Unidos De Norte América, se construye la primera unidad móvil con reactor nuclear, y se implementó a un submarino llamado Nautilus y desde su creación hasta su primera recarga de combustible fue hasta 1957.
- 1955 En Ginebra, se realiza la primera conferencia mundial del uso pacífico de la energía atómica, la cual abre las puertas al periodismo científico en Europa.
- 1955. Emilio Segré y Owen Chamberlain, descubren la antipartícula y el antineutrón.
- 1956 Inglaterra pone en funcionamiento la primera central nuclear para generar energía eléctrica comercial.
- 1960 los astrónomos detectaron lo que parecía ser una estrella azul tenue, no era más que una fuente de radiación cósmica denominada quasares o (Cuásar).
- 1964 Se desarrolla el primer motor iónico que se emplea en el espacio exterior, cuando se precisan pequeños empujes para corregir la altitud y la trayectoria de los satélites.
- 1967 Serpukhov URSS se pone en marcha el acelerador de partículas.
- 1967 Anthony Hewish Jocelyn Bell descubre los pulsares, que son estrellas que emiten ondas de radio periódicas.

- 1968 en Francia se logra la primera fusión nuclear controlada por rayos laser.
- 1974 se desarrolla la Focélula Nuclear, este tipo de fotocélula nuclear utiliza luz de un fosforo que recibe las partículas beta para operar fotocélulas o calor de una reacción nuclear para operar una termopila que es un dispositivo que convierte energía termal en energía eléctrica, esto se compone de termopares conectados en serie o en paralelo.

A partir de la primera fusión nuclear controlada, el desarrollo tecnológico del hombre ha perfeccionado el cómo implementar el uso de la energía nuclear para su optimo desarrollo, no obstante, los variantes estudios en el llamado reactor nuclear han dado forma a diversos tipos de reactores que más adelante se mencionan

2.3 Definiciones de la física nuclear

La física nuclear es una rama de la física que estudia las propiedades y el comportamiento de los núcleos atómicos, de los elementos químicos, no obstante la física nuclear es conocida principalmente por el aprovechamiento de la energía nuclear en centrales nucleares.

Es por ello que es importante dar definiciones a términos que utilizaremos para la obtención de la energía eléctrica por medio de la energía nuclear. Dentro de las ramas nucleares podemos encontrar:

2.3.1 Átomo

El átomo: se define como la partícula más pequeña que puede dividirse un elemento sin perder sus propiedades químicas que lo caracterizan, es decir, si tomamos un trocito de metal cual sea y dividirlo en miles y miles de veces, se llega a obtener una molécula de este trocito de metal, que sigue conservando la misma propiedad física del trocito del metal del original.

Así el átomo es como un sistema solar en el cual está el núcleo atómico que sería el sol, y las órbitas con los planetas son los electrones que éste, está formado por un número de protones y neutrones, por ello se describe que el átomo se parece al sistema solar.

Está compuesto por una parte central con carga positiva donde se encuentra concentrada casi toda la masa, que el núcleo atómico, y por un cierto número de partículas cargadas negativamente, los electrones, que forman la corteza.

En tanto el núcleo atómico está constituido por protones y neutrones, llamados nucleones, con carga eléctrica positiva de igual manera de carga negativa, en tanto la carga eléctrica total del átomo es neutral. Los protones tienen carga positiva y los neutrones no tienen carga eléctrica.

Como se mencionó anteriormente cuando el número de protones y neutrones son iguales, se dice que el átomo tiene carga eléctrica nula. En tanto, si el número de neutrones, supera al de electrones se dice que el átomo está cargado positivamente, y por el contrario si el número de los neutrones es inferior a los electrones, se dice que el átomo está cargado negativamente. Con esto podemos decir que los electrones que rodean al núcleo del átomo, son únicamente compuestos por protones y neutrones.

Por otro lado, un átomo con carga positiva o negativa, es susceptible a intercambiar electrones con otros átomos de su alrededor, con el único fin de conseguir su estabilidad eléctrica, es decir, iguala el número de protones y neutrones y electrones para conseguir su estabilidad que es decir su carga nula.

En los elementos químicos el elemento más sencillo que existe es el hidrógeno con símbolo **H** que cuenta con un número atómico de 1, ya que cuenta con un electrón y un protón como se muestra en la figura 2.1.

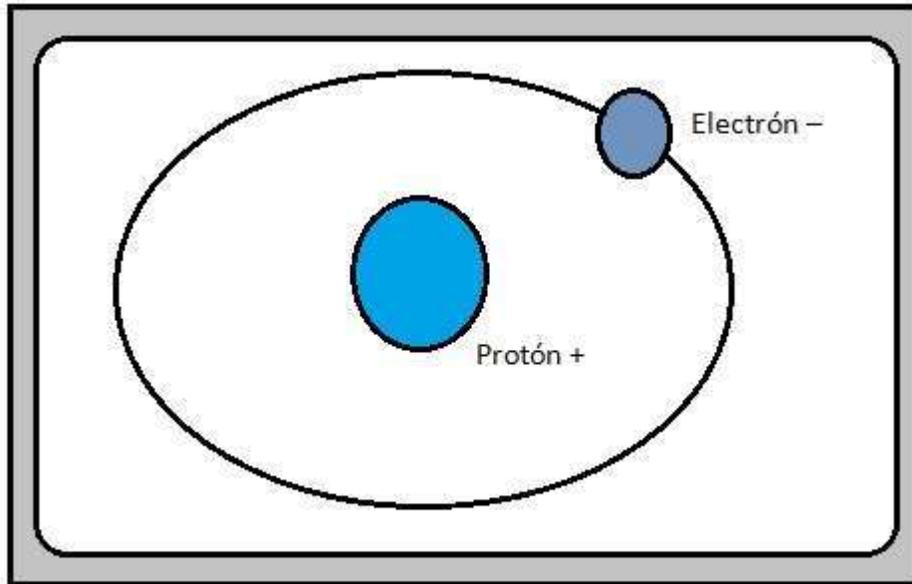


Figura 2.1 Átomo de hidrógeno.

Dentro del estudio del átomo encontramos, términos que nos ayudan a entender como está constituido el átomo en los diferentes elementos químicos, como el número atómico, el número másico y el número cuántico, que describen que electrones y protones y qué cantidad de partículas, contiene un átomo.

Número Atómico con su símbolo (Z), es el número de protones que hay en el núcleo de un átomo que es igual al número de electrones en condiciones normales.

Número Másico (A), es el número total de partículas contenidas en el núcleo atómico.

Número cuántico principal (n), es el número que se relaciona con el volumen que ocupa la llamada región, y es el espacio energético que es la manifestación probabilística de los electrones alrededor del núcleo, es decir, indica la distancia promedio que hay entre el núcleo y cada uno de los niveles que tiene el átomo y define sus niveles de energía.

Número cuántico secundario l (*ele*), está relacionado con la forma de la nube de electrones, junto con el número cuántico principal, que determina la distancia media entre el electrón y el núcleo.

Teniendo definidos los conceptos del átomo, podemos mencionar que en las reacciones nucleares es preciso indicar tanto el número másico como el número atómico, de acuerdo a la siguiente convención:



Dentro de la descripción del átomo describiremos el átomo de uranio que es un elemento químico metálico de color plateado-grisáceo de la serie de los actínidos que es parte de los elementos que forman parte del periodo 7 de la tabla periódica. Su símbolo químico es **U** y su número atómico es 92, por poseer 92 protones y 92 electrones, con un número de enlace químico de 6, su núcleo puede contener entre 141 y 146 neutrones, como se muestra en la figura 2.2 del átomo de uranio.

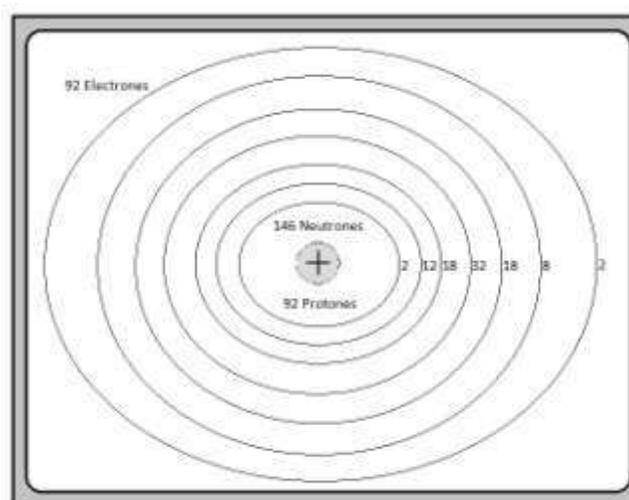


Figura 2.2 Átomo de uranio

El átomo de uranio cuenta con 7 orbitas, y cada una con diferentes números de electrones, y en su núcleo cuenta con 146 neutrones y 92 protones y 92 electrones.

2.3.2 Isótopo

El Isótopo se le conoce como un mismo átomo y con el mismo número de protones, pero con diferente número de neutrones. Si dos isótopos corresponden al mismo elemento químico, pero que tienen un peso atómico distinto, y esto resulta de la suma de protones y neutrones en el núcleo. La mayoría de los elementos químicos poseen más de un isótopo.

En la notación científica, los isótopos se identifican mediante el nombre químico seguido del número de nucleones (protones y neutrones) separado por un guión, un claro ejemplo tenemos al Uranio-238 y Helio-3, en la notación simbólica, el número de nucleones se añade como superíndice a la izquierda del símbolo químico: ${}^3\text{H}$ (Hidrógeno-3). Algunos isótopos poseen nombres especiales, como tal tenemos al hidrógeno en donde en la tabla 2.1 ya que el hidrógeno es el elemento químico más ligero, posee tres isótopos naturales que se denotan en la siguiente tabla.

Isótopos del Hidrógeno

Símbolo	Nombre	Protón	Neutrón	Z	A	También llamado
${}^1\text{H}$	Hidrógeno	1	0	1	1	Protio
${}^2\text{H}$	Hidrógeno	1	1	1	2	Deuterio
${}^3\text{H}$	Hidrógeno	1	2	1	3	Tritio

Tabla 2.1 Diferentes manifestaciones del hidrógeno

En forma simbólica la representación de los isótopos de un elemento químico, es más común verlos de esta forma, ya que describe el número másico como el número atómico del elemento, de tal manera nuevamente tomamos el elemento químico, uranio-238 para expresarlo en su forma simbólica:



Describe qué es, el elemento químico Uranio y que su número másico es de 238, y que su número atómico es de 92, de esta forma es más fácil de entender y leer el elemento químico. Cabe mencionar que el uranio está formado por seis tipos de isótopos:

Uranio -239 (${}^{239}_{92}U$)

Uranio-238 (${}^{238}_{92}U$)

Uranio -236 (${}^{236}_{92}U$)

Uranio -235 (${}^{235}_{92}U$)

Uranio-234 (${}^{234}_{92}U$)

Uranio -233 (${}^{233}_{92}U$)

El uranio es el material más importante ya que es la materia prima para la generación de energía eléctrica en las centrales nucleares, como se describió anteriormente, tiene varios isótopos y siendo el más abundante el uranio-238.

2.3.3 Radiactividad

Radioactividad o Radiactividad es un fenómeno físico natural, que ocurre en los núcleos de ciertos elementos químicos llamados radioactivos, que son capaces de transformarse en núcleos de elementos de otros átomos. Por lo tanto, se hace por emisiones electromagnéticas o por emisiones de partículas con una determinada energía cinética, no obstante, la variación en sus electrones emitiendo rayos X y a su núcleo con rayos gamma y también variando sus isótopos a un átomo, da como resultado la radiactividad, y que pueden ser de dos tipos:

- Natural: Dada por isótopos que se encuentran en la naturaleza.
- Artificial o inducida: Dada por radioisótopos producidos en transformaciones artificiales.

Como se mencionó anteriormente la radiactividad es la propiedad que presentan determinados núcleos atómicos ya que todos los elementos químicos que tienen un número atómico mayor a 83 son naturalmente radiactivos, en la figura 2.3 se presenta el ícono que identifica la presencia de sustancias radiactivas.



Figura 2.3 Icono utilizado para señalamiento de presencia de sustancias radiactivas.

Este símbolo es comúnmente más visto en aéreas medicas, y en laboratorios de investigación, no obstante en las centrales nucleares, el uso de este icono es de mayor importancia ya que se trata con un elemento químico altamente radioactivo.

2.3.4 Partícula Alfa

Las partículas o rayos alfa (α), son radiaciones de partículas formadas por núcleos de helio que se desplazan a gran velocidad, sus núcleos son completamente ionizados, sin envoltura de electrones ya que cuenta con dos protones y dos neutrones, este núcleo de helio es expulsado a alta velocidad desde otro núcleo atómico, con la finalidad de la desintegración radiactiva o la reacción nuclear. La ionización por partículas alfa o radiación alfa, da la teoría del frenado de los rayos alfa ya que la materia está relacionada con la energía cinética perdida por la carga en movimiento y no por la ionización producida en el medio absorbente. Cuando un rayo alfa pasa a través de la materia, ioniza muchos de los

átomos de ella a lo largo de su trayectoria, así se pierde gradualmente su energía cinética hasta que es frenado totalmente (absorbido).

2.3.5 Partícula Beta

Una partícula Beta (β) son radiaciones de partículas formadas principalmente por electrones que sale despedido de un suceso radiactivo, y que viajan a gran velocidad. Puesto que son partículas con carga positiva o negativa, ionizan directamente. El paso de los rayos beta a través de la materia es macroscópicamente observable por el efecto calorífico, debido a la energía cinética disipada. Esta radiación también puede provocar ciertas reacciones químicas y así producir cambios estructurales en los materiales por donde pasa, por ejemplo la decoloración del vidrio.

2.3.6 Rayos X

Los rayos X son un tipo de radiación electromagnética de alta energía, invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos y de imprimir en placas fotográficas. No obstante la naturaleza que las ondas de radio, las ondas de microondas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioleta y los rayos gama, son de una radiación electromagnética, de tal manera los rayos X surgen de un fenómeno extranuclear, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos o la desaceleración de electrones. La energía de los rayos X en gran parte se encuentra en la radiación ionizante ya que al interactuar con la materia produce la ionización de los átomos de la misma, es decir, origina partículas con carga llamada iones.

2.3.7 Rayos Gamma

La radiación gamma o rayos gamma (γ), son radiaciones electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, como quantums de energía llamados fotones. De tal manera es capaz de penetrar en la materia más profundamente de las radiaciones Alfa o beta. Dada su alta energía puede causar gran daño en núcleo de las células. En la figura 2.4 se describen los comportamientos de las mencionadas radiaciones Alfa, beta, Rayos X y Rayos Gamma.

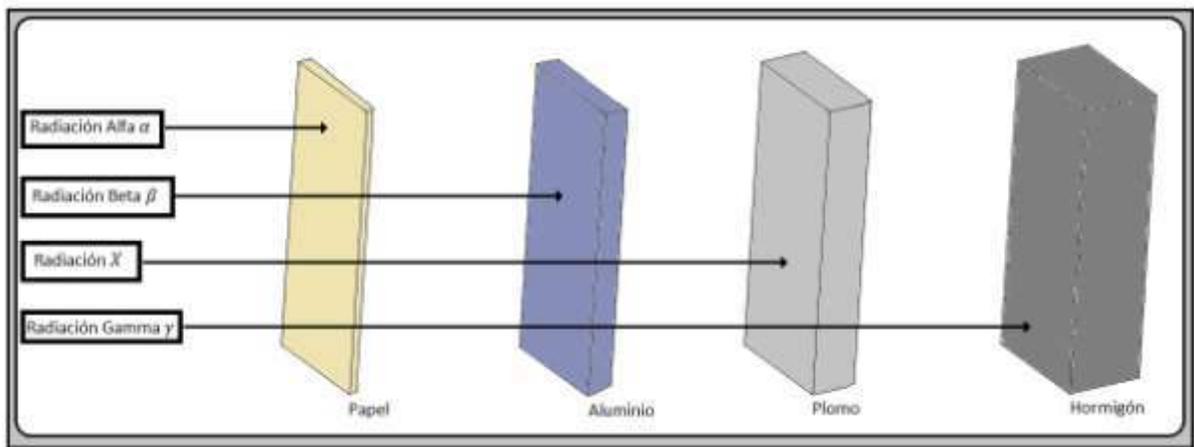


Figura 2.4 Los diferentes tipos de radiación y su poder de penetración.

De la figura 2.4 podemos observar que los diferentes tipos de radiación se comportan muy diferentes, es decir, que cada radiación tiene sus particularidades al traspasar la materia, no obstante tenemos que:

- Radiación Alfa (α), recorre una distancia muy pequeña y son detenidas por una hoja de papel o la piel del cuerpo humano.
- Radiación Beta (β), recorre una distancia aproximadamente de un metro y es detenida por una hoja delgada de aluminio u otro metal, o en su caso por unos pocos centímetros de madera.
- Rayos (X), recorre una distancia de cientos de metros en el aire y son detenidos por una pared de plomo o en su caso, una pared de concreto grueso.

- Radiación Gamma (γ), recorre cientos de metros en el aire y son detenidos por una pared, ya sea hormigón o concreto, o en su caso plomo.

2.3.8 Materia

La materia es todo aquello que ocupa un lugar en el espacio, es decir todos los cuerpos están formados por materia, cualquiera sea su forma, tamaño o estado. Pero no todos ellos están formados por el mismo tipo de materia, sino que están compuestos de sustancias diferentes, y para examinar la sustancia de la que está compuesto un cuerpo cualquiera, hasta llegar a las moléculas que lo componen.

La materia másica puede ser estudiada desde los puntos de vista macroscópico y microscópico, según el nivel de descripción adoptado debemos adoptar descripciones clásicas o descripciones cuánticas, es decir a nivel microscópico le corresponde la descripción clásica y a nivel macroscópico de corresponde la descripción cuantica y dentro de estas descripciones podemos definir:

Nivel microscópico que es la descripción clásica de la materia másica que se entiende como un agregado de moléculas, y estas a su vez son agrupaciones de átomos que forman parte del nivel microscópico, de tal manera que permiten descomponer los átomos aún más elementales, tal cual son los siguientes niveles:

- Electrones con carga eléctrica negativa.
- Protones con carga eléctrica positiva.
- Neutrones sin carga eléctrica.

Todo conjunto de partículas subatómicas son finalmente constituyentes para dar forma a la materia y esta nos rodea en sustancias puras o mezclas es decir, las sustancias puras son sustancias que tienen composición y propiedades intrínsecas constantes Estas sustancias puras pueden ser elementos o compuestos. Los elementos son sustancias que no se pueden separar en otras más simples usando métodos físicos o químicos comunes y

los compuestos son sustancias formadas por más de un elemento combinados químicamente en una razón fija de números enteros. Las mezclas están formadas por dos o más sustancias puras que retienen sus propiedades características y que pueden separarse utilizando métodos físicos. Existen dos clases de mezclas: mezclas donde la distribución de los componentes es uniforme (mezcla homogénea) y mezclas donde no se pueden distinguir los componentes (mezcla heterogénea).

Nivel microscópico que es la descripción cuántica de la materia másica que se presenta en las condiciones que dominan en el sistema solar en que la materia sufre unos cambios químicos que son transformaciones que convierten una sustancia en otra, y de acuerdo con la teoría cinética molecular la materia se encuentra formada por moléculas y éstas se encuentran en movimiento, el cual cambia constantemente de dirección y velocidad cuando chocan bajo el influjo de otras interacciones físicas. Debido a este movimiento presentan energía cinética y energía potencial que tienden a separarlas y a juntarlas de tal manera el estado físico de una sustancia se puede representar de cuatro formas, llamadas las cuatro formas de la materia que son descritas a continuación.

- Sólido
 - Tiene forma y volumen definido
 - Fusión- cambiar del estado sólido a líquido
 - Sublimación - cambiar del estado sólido al gaseoso
- Líquido
 - Tiene volumen definido pero su forma es variable
 - Congelación - cambiar del estado líquido a sólido
 - Evaporación - cambiar del estado líquido a gaseoso
- Gas
 - No tiene ni volumen definido: toma la forma y el volumen del embase que lo contiene
 - Condensación - cambiar del estado gaseoso a líquido

- Deposición - cambiar del estado gaseoso al sólido
- Plasma
 - Gas ionizante
 - Átomos disociados en electrones con carga eléctrica negativa y iones con carga eléctrica positiva
 - Movimiento libre
 - La mayor parte del universo está formado por plasma

Una teoría es aceptada cuando se puede explicar satisfactoriamente los hechos experimentales observados y describiblemente su comportamiento que pueden ser demostrados mediante la experimentación, no obstante, en la teoría atómica cumple con los requisitos de modo que describe las siguientes leyes:

- Conservación de la materia
 - Durante los cambios químicos no ocurren cambios apreciables en masa
- Composición constante
 - Un compuesto, no importa su origen, siempre contiene los mismos elementos y en la misma razón por peso
- Proporciones múltiples
 - Cuando dos elementos se combinan para formar más de un compuesto, las masas de un elemento que se combinan con una masa fija del otro elemento están en razón o relación de números enteros

2.3.9 La Energía

El concepto de energía es muy grande y es muy contemplada en muchas de las ramas de la física, en tanto energía se define como la capacidad para realizar un trabajo, en la física clásica se encuentran:

- Energía Mecánica, que es la relación de la Energía Cinética y Energía Potencial.

No obstante, en electromagnetismo tenemos diferentes tipos de energía y está compuesto por:

- Energía radiante: Este tipo de energía poseen las ondas electromagnéticas.
- Energía calorífica: Este tipo de energía depende de la cantidad de la materia que puede desprender al producir una reacción química de oxidación, es decir, la reacción química a partir del cual un átomo, ion o molécula cede electrones; entonces se dice que aumenta su estado de oxidación.
- Energía Eléctrica: Este tipo de energía depende una diferencia de potencial entre dos puntos.

En concepto de energía en termodinámica está relacionada por:

- Energía interna: Este tipo de energía está relacionada con la suma de la energía mecánica de las partículas que constituyen su sistema.
- Energía Térmica: Este tipo de energía es obtenida por la naturaleza como energía geotérmica y por otra parte la quema de combustible fósil.

En la física y dentro de las definiciones de la energía tenemos conceptos relacionados con la relatividad, es decir, física relativista.

- Energía en reposo: Este tipo de energía es debida a la masa, dada en la formula ya conocida por la ecuación (2.1), que establece la equivalencia entre masa y energía.
- Energía de desintegración: Este tipo de energía relaciona las diferencias de energías en reposo entre las partículas iniciales y finales de una desintegración, esta forma de desintegración es el decaimiento que dependerá de los modos de emisión más probables de cada isotopo, siendo lo más común que sean gamma, beta o alfa.

En la química aparecen algunas formas específicas no mencionadas de la energía

- Energía de ionización; Esta forma de energía potencial y es la energía que hace falta para ionizar una molécula o átomo.
- Energía de enlace: Es la energía almacenada en los enlaces químicos de un compuesto. En las reacciones químicas se dan o ganan tipos de energía, en función de la entalpia y energía calorífica.

Dentro de los conceptos de la Energía potencial que se define como la energía que mide la capacidad que tiene dicho sistema para realizar un trabajo en función exclusivamente de su posición, en tanto algunos tipos de energía potencial aparecen en diferentes contextos de la física, de tal manera tenemos:

- Energía Potencial Gravitatoria: Este tipo de energía se le asocia a la posición de un cuerpo en el campo gravitatorio.
- Energía Potencial Electroestática: Este tiene relación con el campo eléctrico.
- Energía Potencial Elástica: Este tipo de energía se le asocia al campo de tensiones de un cuerpo deformable.

Como se mencionó en un principio la energía es la capacidad para realizar un trabajo, de tal manera la unidad de la energía es el Julio y puede ser representada con diferentes unidades, ya sea por el sistema internacional de unidades, o en el sistema ingles, en la tabla 2.2 se describen sus unidades y sus equivalencias de la energía:

Tabla 2.2 Unidades de energía

Cantidad	Nombre	Abreviatura	Equivalencia en Julio
1	Julio	<i>J</i>	1
1	Newton-Metro	<i>N.m</i>	1
1	Vatio-Segundo	<i>W.s</i>	1
1	Pascal-Metro-Cúbico	<i>P_a.m³</i>	1
1	Culombio-Voltio	<i>C.V</i>	$6,2415 * 10^{18}$
1	Electrón voltio	<i>eV</i>	$1.602 * 10^{-19}$
1	Atmósfera-Litro	<i>atm.L</i>	0.00987
1	Calorías	<i>Cal</i>	4.1868
1	Vatio-Hora	<i>W.h</i>	3600
1	Kilovatio-Hora	<i>Kw.h</i>	3600000
1	Ergio	<i>erg</i>	0.0000001
1	Pie libra	<i>ft lb</i>	1.36
1	Unidad	<i>btu</i>	1055.055853

	térmica británica		
--	----------------------	--	--

La energía se encuentra en constante transformación, pasando de unas formas a otras, y cumpliendo los principios termodinámicos que son:

- La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Da a entender que la energía inicial es igual a la fina.
- La energía se degrada continuamente hacia una forma de energía de menor calidad. Esto en la energía térmica, no obstante dicho de otro modo ninguna transformación de energía se tiene como resultado un 100% de rendimiento, ya que como en todo sistema hay unas pérdidas de energía térmica no recuperable, y que en el rendimiento de un sistema es la relación de la energía obtenida y la que suministra al sistema.

2.4 Reacciones Nucleares

Antes de entrar a detalles sobre el proceso que lleva una reacción nuclear, para la generación de energía eléctrica, es necesario definir algunos conceptos como son; la fusión, fusión nuclear, fisión y fisión nuclear, de tal manera estas fuentes de energía más rentables energéticamente en la naturaleza, y esto conlleva a la ecuación (2.1) en que la masa se transforma en energía, de esta manera podemos darnos cuenta como es el proceso que lleva una central nuclear para generar la energía eléctrica.

2.4.1 Fusión

El termino fusión se define como el cambio de solido a líquido esto por la acción del calor, en tanto cuando se calienta un sólido, se transfiere energía a los átomos que hacen que vibren con mayor rapidez a medida que gana energía. En otras palabras la fusión se le conoce como fundición, pero este término se aplica generalmente a sustancias como los metales, que licuan a temperaturas altas y a sólidos cristalinos.

Un claro ejemplo de la fusión es una vaso con hielo a temperatura ambiente y que con el paso del tiempo y un cambio en la temperatura empieza a derretirse pasando de solido a liquido, a este fenómeno se le conoce como fusión.

2.4.2 Fusión Nuclear

Se le denomina fusión nuclear al proceso de unión de dos núcleos atómicos, de tal manera la fusión ocurre cuando dos núcleos atómicos muy livianos se unen, formando un núcleo atómico más pesado y con mayor estabilidad. Esto da como resultado reacciones que liberan energías elevadas. En la actualidad se estudian formas más adecuadas para mantener la estabilidad y confinamiento de las reacciones.

Dentro del estudio de la fusión nuclear se tienen dos conceptos:

- Fusión nuclear natural
- Fusión nuclear artificial

Fusión natural: Es el proceso que se produce en las estrellas que hacen que brillen.

Fusión artificial: se basa en la energía que se libera de la unión entre átomos, concretamente en la fusión nuclear intervienen dos isotopos de hidrógeno (Deuterio y Tritio), se utilizan para que se produzca dicha fusión nuclear, es decir la unión de los átomos, en tanto es necesario que sus núcleos tengan la misma fuerza de repulsión, y esto se logra precisamente con los átomos más ligeros, que solo poseen un protón, en la figura 2.5 se describe como es el proceso de una fusión nuclear.

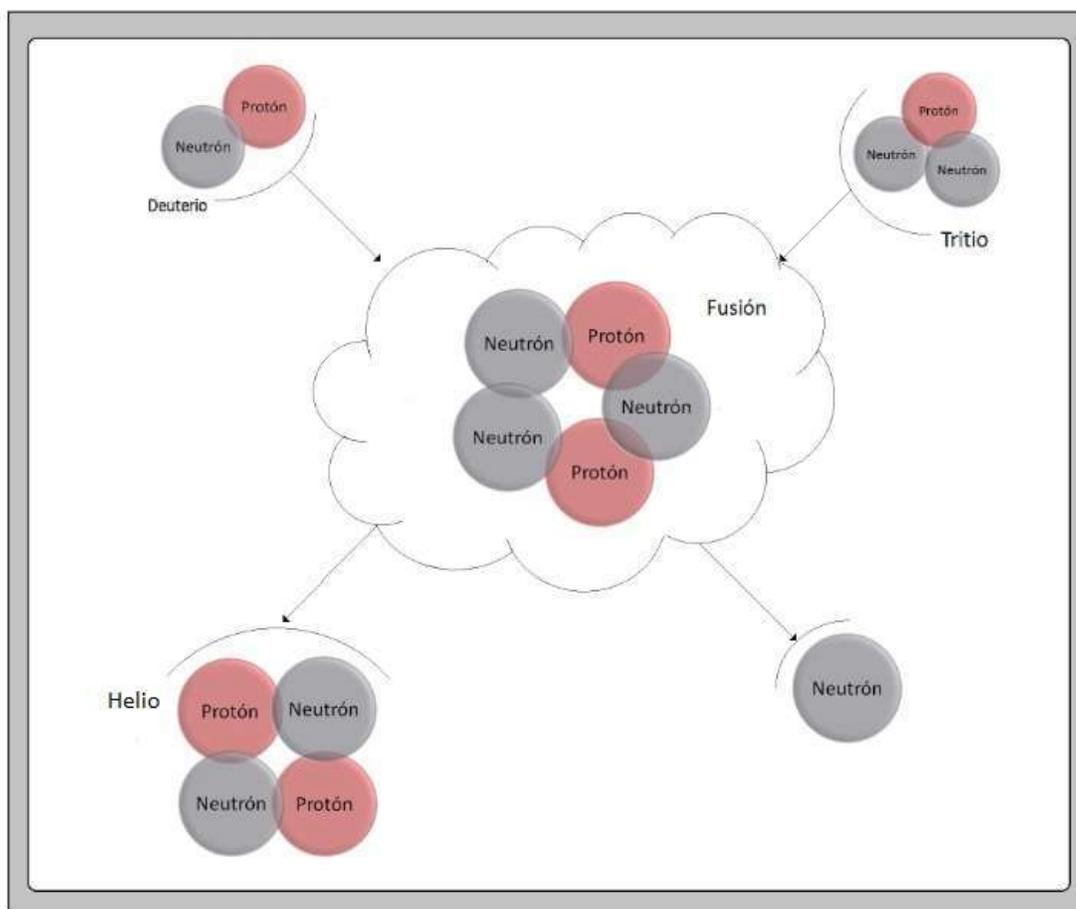


Figura 2.5 Representación de una reacción de fusión entre deuterio y tritio teniendo como resultado Helio.

Para lograr la unión de los núcleos se puede obtener utilizando la energía térmica o en su caso utilizando un acelerador de partículas, como se mencionó anteriormente, no obstante ,dentro de la fusión nuclear podemos encontrar:

- Fusión nuclear en caliente: es por medio de altas temperaturas.
- Fusión nuclear en frío: es por medio de temperaturas y presiones normales. (Actualmente en estudios)
- Fusión nuclear por medio del láser: es por medio de 192 haces de luz que forman el láser y enfocándose a una pequeña cápsula y con la acción de la luz contendrá átomos de Deuterio y Tritio, de tal manera calentando con una temperatura cercana a los 3.3 millones de grados Kelvin y esto gracias a los 669 *kJ* (Kilo Julios) de energía, proporcionados por los láseres, pero esto es en estudios realizados en los laboratorios.

En tanto la fusión Natural y la Fusión Artificial, ambos buscan que la velocidad de las partículas aumente para así vencer las fuerzas de repulsión electrostáticas estas generadas en el momento de la colisión para la fusión nuclear, esto para obtener núcleos de átomos aislados, es decir, separados de una envoltura de electrones. Se utilizan gases sobre calentados mejor conocidos como el cuarto estado de la materia llamado plasma.

2.4.3 Fisión

Se define como la separación de un átomo por medio de un neutrón teniendo como resultado una gran cantidad de energía, y dando lugar a la denominada reacción en cadena.

2.4.4 Fisión Nuclear

Dentro de la física nuclear, se encuentra la fisión nuclear o comúnmente denominada reacción nuclear, esto consiste en la división del núcleo de un átomo pesado en otro elemento más ligero, de tal manera que da forma a una reacción en la que se libera gran cantidad de energía. A pesar de ser altamente productiva (energéticamente hablando). Es muy difícil de controlar este proceso, un claro ejemplo que ha quedado en el desastre de Chernóbil, y en las bombas de Nagasaki e Hiroshima.

Lo que en la fisión nuclear se utilizan elementos químicos como el (Uranio, Plutonio, etc.) y se dividen su núcleo atómico en dos o más fragmentos, y esto causado por el bombardeo de neutrones y teniendo como resultado una reacción en cadena y así obteniendo una enorme cantidad de energía y varios neutrones.

Dentro de la fisión nuclear teniendo como elemento químico, un átomo de Uranio-235 se observan diferentes fenómenos de tal manera que:

- Se comprueba la ecuación (2.1) de Albert Einstein ya que aparece una cantidad de energía elevada que reduce la pérdida de la masa.
- Los productos de la ruptura son radiactivos
- En cada núcleo fisionado se emiten 2 ó 3 neutrones que provocan el fenómeno de la reacción en cadena.

De modo que gran parte de las centrales nucleares existente en la actualidad se basan en reactores de fisión, utilizando como combustible el Uranio compuesto de entre un 3.5 % y un 4.5 % de Uranio-235 y de tal manera que el resto de U-238 a este isótopo es tan mencionado y conocido Uranio Enriquecido. En tanto la reacción nuclear en cadena genera la energía controlada y esto se produce cuando un núcleo de Uranio-235, se divide en dos o más núcleos por la colisión de un neutrón como se muestra en la figura 2.6, de este modo los neutrones liberados colisionan de nuevo formando una reacción en cadena.

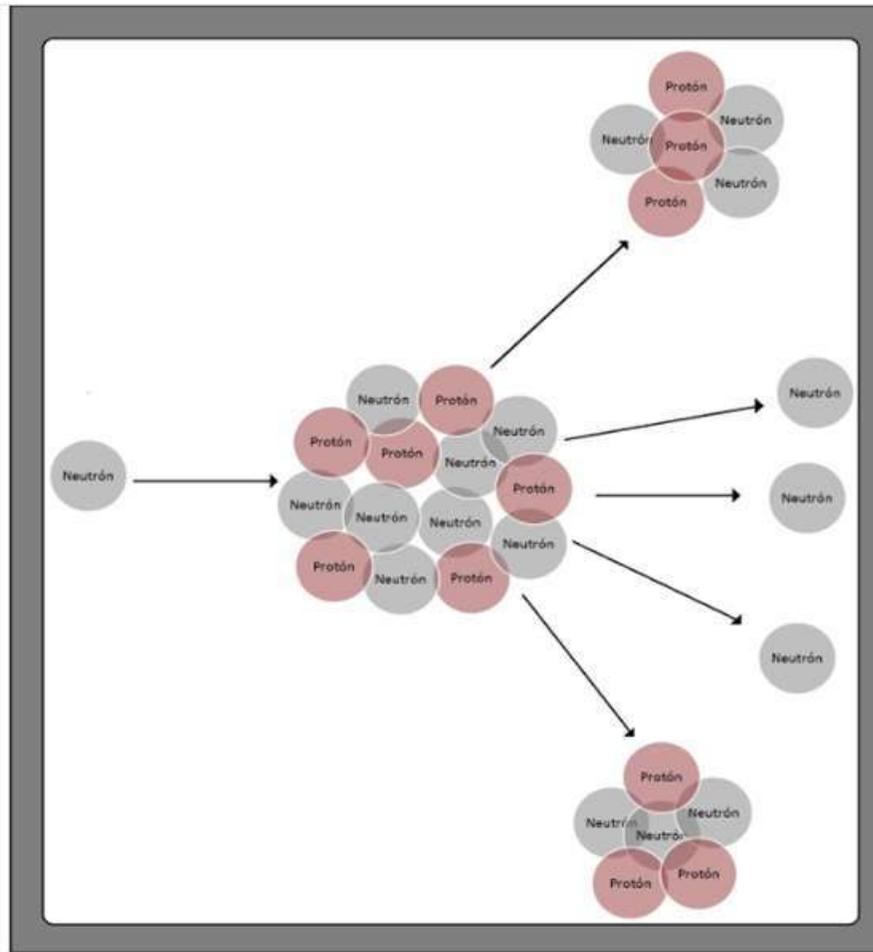


Figura 2.6 Fisión nuclear.

Por lo tanto, en las centrales nucleares se utiliza más la fisión para generar calor, y transferirlo al agua y esta a su vez transformarla en vapor, el cual al pasar por un sistema de turbinas, genera la energía eléctrica, más adelante se describirá esta manera más a fondo.

Capítulo 3

Centrales Nucleares

3.1 Introducción

Las centrales nucleares con sus siglas (CN), tiene un papel muy importante en el ámbito de la generación de la energía eléctrica, es decir que en tanto en el caso de los reactores nucleares como en las plantas térmicas convencionales, tienen como finalidad producir vapor para mover las turbinas, y así producir energía eléctrica.

La generación del vapor es muy diferente de una central nucleoelectrica a una central térmica convencional, ya que esta última utiliza combustibles derivados del petróleo, gas o carbón y estos para calentar en grandes calderas de agua para producir vapor, de tal manera que en el proceso del reactor nuclear, se emplea la fisión nuclear esto generada en el núcleo del reactor, por lo que para generar vapor, se calienta el agua y esta pasa por un circuito secundario independiente, lo cual permite ciclos y este no tenga interacción con el reactor, de manera que en este capítulo describiremos los diferentes tipos de reactores nucleares, y sus definiciones así como sus características técnicas y sus eficiencias, de igual manera mencionaremos sus normas y protocolos de operación, es bueno reafirmar que este tipo de generación de energía eléctrica es por medio de un reactor nuclear, y utilizando elementos químicos como materia prima, dan como resultados mayor eficiencia y así producir más energía eléctrica.

Dentro de las centrales nucleoelectricas se tienen los siguientes componentes;

- Reactor nuclear.
- Generador de vapor de agua.
- Turbina de vapor.
- Condensador.

De modo que las cuatro aéreas son de sumo cuidado y alta seguridad, se describirán a detalle estas cuatro aéreas que conforman una central nucleoelectrica, para la producción de energía eléctrica.

Con el desarrollo tecnológico del hombre, ha innovado diferentes tipos de reactores nucleares, con el fin de hacer más eficiente el proceso para la obtención del vapor, y así poder generar más potencia eléctrica y esta ser entregada a los diferentes usuarios.

3.2 Reactores Nucleares

Como se menciona anteriormente, los reactores nucleares es la parte fundamental en una central nucleoelectrica, para la generación de energía, de tal manera está mal implementada esta frase ya que en un reactor nuclear y para fines de generación eléctrica lo que se genera es vapor, es decir la parte fundamental de una central nucleoelectrica es generar vapor para accionar

Una turbina de vapor y esta producir energía eléctrica, por lo tanto los reactores nucleares están conformados de varios elementos que tienen gran importancia para la obtención del calor, estos elementos son:

- Combustible
- Moderador
- Refrigerante
- Reflector
- Control
- Blindaje

3.2.1 Combustible

El material combustible normalmente es Uranio y el Plutonio con óxido u otro elemento químico para formar una aleación, de modo que la característica de un combustible nuclear es que contenga núcleos fisionables y pueda emplearse en un reactor nuclear para que en él se desarrolle una reacción nuclear en cadena controlada.

El elemento químico llamado Uranio es un combustible nuclear, de modo que también lo es el óxido de uranio, es decir los isótopos del Uranio son fisionables de tal manera el óxido de uranio tiene determinados isótopos, como sabemos los isótopos fisionables son aquellos núcleos que se pueden dividirse por medio de una partícula que en este caso es un neutrón.

Un claro ejemplo de un isótopo *Uranio – 238* (${}^{238}_{92}\text{U}$) no fisionable debido a los neutrones térmicos, es decir, que sus neutrones son de movimiento lento, esto conlleva a que inducirá a un núcleo a que experimente la fisión. De manera que un isótopo fisionable por partículas denominadas neutrones térmicos que estos se encuentran en la naturaleza como el *Uranio – 235* (${}^{235}_{92}\text{U}$) que se encuentra en una proporción del 0.711% en el Uranio natural.

Hay diversos isótopos fisionables que no existen en la naturaleza pero son creados artificialmente en laboratorios para diversos fines tales como:

- ***Uranio – 233*** (${}^{233}_{92}\text{U}$), es obtenido por la captura de un neutrón de torio-232. Este núcleo sufre dos desintegraciones beta y el Uranio-233.
- ***Plutonio – 239***, no es denominado isótopo natural, y su obtención es por medio de la captura de un neutrón por medio de Uranio-238 seguida de dos emisiones beta.
- ***Plutonio – 241***, su obtención es por medio de la captura de un neutrón por el Pu-240 el cual gana un neutrón del núcleo del Pu-239.

Los dos primeros isótopos mencionados, se pueden crear en los propios reactores nucleares, si introducimos en los mismos, núcleos el elemento químico torio-232 y Uranio-238, que son átomos que por captura de neutrones dan lugar a los isótopos fisionables, es decir material fértil.

3.2.2 Barras De Control

Las barras de control o llamadas de otra forma las vainas, son normalmente hechas de aleaciones metálicas como el Zirconio, Aluminio, etc. que encierran herméticamente al material combustible para evitar que se escape el combustible y en su mayoría son gases, formados durante la reacción nuclear.

3.2.3 Materiales estructurales

Son aleaciones metálicas, como el Zirconio, Aluminio y aceros, que tienen la finalidad de darle espacio y facilitar la extracción del calor por medio de los refrigerantes que normalmente es agua.

3.2.4 Moderador

El moderador es el que frena la velocidad de los neutrones rápidos, teniendo como resultado neutrones lentos o térmicos, de tal manera el moderador no existe en los reactores denominados rápidos, su implementación es en base de materiales moderadores como el agua, el grafito y el agua pesada.

3.2.5 Refrigerantes

Los refrigerantes son empleados para extraer el calor generado por el combustible nuclear con que están hechos, de tal manera se utilizan refrigerantes líquidos, como el agua ligera y el agua pesada, o gases como el anhídrido carbónico y el helio.

3.2.6 Reflector

Es implementado para frenar la fuga de neutrones en la zona del combustible, teniendo como ventaja más neutrones para la reacción en cadena. Así, los materiales usados para este fin son el agua, el grafito y el agua pesada.

3.2.7 Elementos De Control

Los elementos de control que su función principal es la absorción y control de neutrones, de la radiación nuclear dentro del reactor, haciendo que sea crítico durante su funcionamiento y sub-funcionamiento. La forma de los elementos de control pueden ser diversas ya sea en forma de barras o diluidas en el refrigerante.

3.2.8 Blindaje

El blindaje evita que se escape la radiación gamma y de neutrones del reactor, los materiales usados para el blindaje son de hormigón, cerámica, el agua y el plomo.

3.3 Tipos De Reactores

Los tipos de reactores nucleares se clasifican de acuerdo con la velocidad de los neutrones, que se producen en las reacciones de fisión denominados: reactores rápidos y reactores térmicos, de tal manera que en el reactor es donde se realiza la reacción nuclear controlada, dentro de las innovaciones tecnológicas del hombre, sobre los reactores nucleares se tenía conocimiento, que para el año 2005 habría 441 reactores nucleares instalados en un total de 31 países en todo el mundo.

Desde los reactores denominados de Primera generación y estos, construidos entre los años 50 y 60 con fines bélicos. De modo que la segunda generación de reactores son desarrollados a partir de los años 70, innovando diferentes tipos de reactores como se describe a continuación:

- Reactor de agua a presión
- Reactor de agua en ebullición
- Reactor Magnox
- Reactor refrigerado por gas
- Reactor refrigerado por aire
- Reactor de agua pesada
- Reactor de sodio grafito
- Reactor reproductor
- Reactor homogéneo
- Reactor tipo CANDU

3.3.1 Reactor de agua a presión

El reactor de agua a presión con sus siglas en inglés (PWR), (Pressurized Water Reactor), es el más implementado en el mundo, por países como Estados Unidos de Norte América, Alemania, Francia y Japón, no obstante, este tipo de reactor produce prácticamente entre 900 y 1500 MW_e y varios cientos más que se utilizan para la navegación marítima y con fines bélicos.

El reactor de agua a presión (PWR) emplea agua ligera como moderador y refrigeración, de tal manera que el refrigerante circula a una presión tal que el agua no alcanza la ebullición, de modo que extrae el calor del reactor llevándolo a un intercambiador de calor, en donde es generado el vapor que alimenta la turbina. La fuente principal de combustible es el uranio 238 enriquecido con uranio 235, en la figura 3.1 se describe el reactor de agua pesada (PWR)

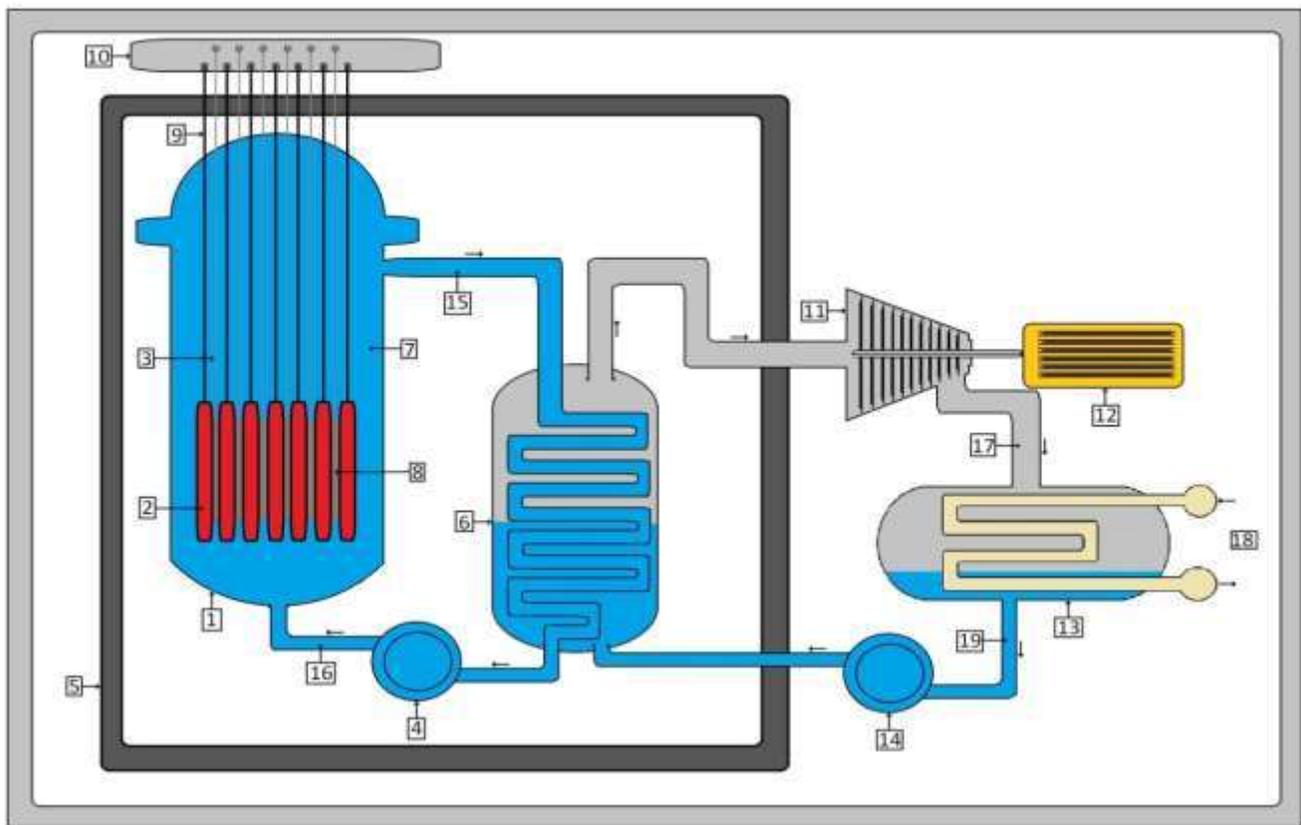


Figura 3.1 Reactor de agua pesada (PWR).

- 1) Cuerpo del reactor
- 2) Combustible que contiene Uranio Enriquecido
- 3) Barra de control del grafito
- 4) Bomba centrífuga de recirculación de refrigeración
- 5) Protección biológica
- 6) Intercambiador de calor

- 7) Refrigerante agua a presión
- 8) Moderador Grafito
- 9) Barras de control del combustible
- 10) Grúa de control para las barras de combustible y barras de grafito
- 11) Turbina de vapor
- 12) Generador
- 13) Condensador
- 14) Bomba centrífuga de recirculación de agua del la turbina
- 15) Refrigerante agua a presión que sale del cuerpo del reactor
- 16) Refrigerante agua a presión que entra al cuerpo del reactor
- 17) Vapor de agua que entra al condensador
- 18) Agua de refrigeración
- 19) Refrigerante agua a presión que sale del condensador

3.3.2 Ventajas y Desventajas del reactor de agua pesada (PWR)

Ventajas

- Los reactores de agua pesada (PWR) tienen mayor experiencia ya que desde los años 80's se han implementados en la centrales nucleoelectricas en el mundo.
- Los reactores de agua pesada (PWR) son muy estables esto debido al control para reducir su potencia cuando se presenta incrementos en la temperatura, de modo que se puede controlar las reacciones en cadenas cuando se presenta algún incremento de la temperatura en el reactor.
- Los reactores de agua pesada (PWR) pueden ser operados con un núcleo que contienen menos material fisible.
- Los reactores de agua pesada (PWR) aíslan los ciclos de refrigeración del reactor, con los ciclos de refrigeración de la turbina evitando así la contaminación radiactiva.

Desventajas

- Los reactores de agua pesada (PWR) deben de salir de operación de 30 ó 45 días por año para el cambio de combustible y mantenimiento preventivo.
- Los reactores de agua pesada (PWR) utilizan como combustible uranio enriquecido, el cual es producido por países denominados desarrollados esto conlleva a dependencias tecnológica y eventualmente políticas.
- Los reactores de agua pesada (PWR) no es posible cambiar el combustible gastado mientras está en operación.
- Los reactores de agua pesada (PWR) debido a que el refrigerante que entra al reactor tiene que ser presurizado a altas presiones para mantener el agua en estado líquido en el funcionamiento del reactor.

3.3.3 Reactor de agua en ebullición

El reactor de agua en ebullición con sus siglas en ingles (BWR) (Boiling Water Reactor), este tipo de reactor utiliza como combustible el Uranio 238 enriquecido con uranio 235, de modo que el refrigerante y el moderador en el reactor nuclear es el agua, y debido al calor generado en la reacción en cadena, este se utiliza para llevar al punto de ebullición del agua, de modo el vapor generado se introduce a una turbina que acciona un generador eléctrico, el vapor que sale de esta turbina pasa al condensador, donde se transforma nuevamente en agua limpia y posteriormente vuelve al reactor al ser impulsada por bombeo como se ilustra en la figura 3.2

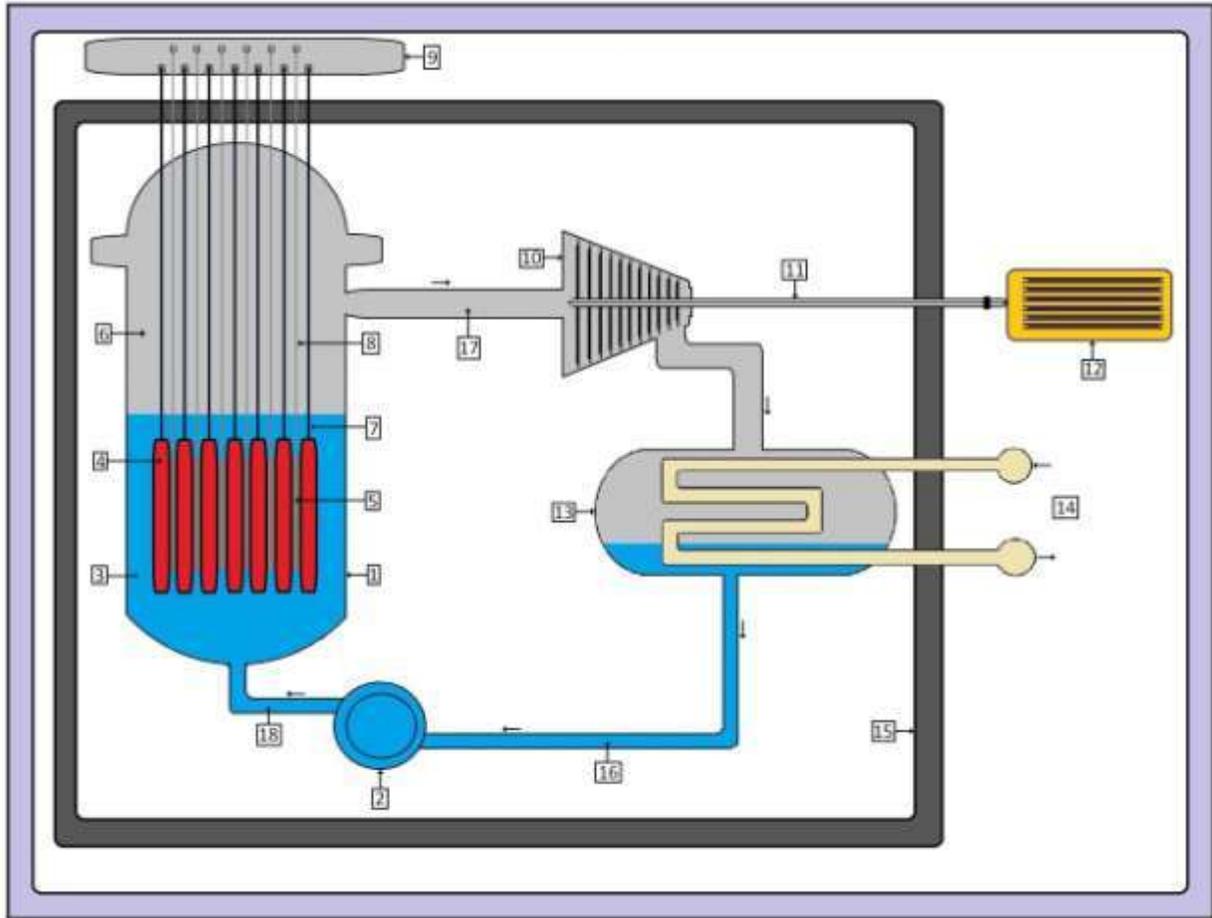


Figura 3.2 Reactor de agua en ebullición (BWR).

- 1) Cuerpo del reactor.
- 2) Bomba centrífuga de recirculación del agua de la turbina
- 3) Refrigerante agua a presión
- 4) Combustible que contiene Uranio Enriquecido
- 5) Barras de control de respaldo de maniobra
- 6) Refrigerante de agua natural pasando a vapor
- 7) Vapor de agua
- 8) Varilla de maniobra
- 9) Grúa de control para las barras de combustible y barras de control de maniobra
- 10) Turbina de vapor

- 11) Flecha de la turbina de vapor al generador eléctrico
- 12) Generador eléctrico
- 13) Condensador
- 14) Agua de refrigeración
- 15) Protección biológica
- 16) Refrigerante agua natural
- 17) Vapor de agua a presión
- 18) Refrigerante agua natural

Este tipo de reactor de agua en ebullición (BWR), es muy empleado y sus desarrollos tecnológicos fueron en países como Estados Unidos De Norte América, Alemania Occidental y Suecia, no obstante, en nuestro país tenemos este tipo de reactor en funcionamiento generando el 15% de la energía eléctrica en el país, está ubicada en Punta Limón, municipio de Alto Lucero, Estado de Veracruz, con nombre de Laguna verde.

El reactor de agua en ebullición (BWR) en sus últimos desarrollos que se le han dado en que consta en el combustible teniendo entre 74 y 100 barras de combustible, teniendo en total en el núcleo del reactor 800 y esto suma un aproximado de 140 toneladas de uranio, no obstante el tamaño del reactor y su contenido de combustible depende de la potencia a generar.

3.3.4 Ventajas y Desventajas del reactor de agua en ebullición (BWR)

Ventajas:

- Los reactores de agua en ebullición (BWR) trabajan a una presión notablemente baja
- Los reactores de agua en ebullición (BWR) es el más sencillo, además de utilizar agua natural en su proceso de refrigeración.
- Los reactores de agua en ebullición (BWR) en sus nuevas tecnologías las barras de control son introducidas y sostenidas de abajo hacia arriba, eliminando así las posibles caídas de las barras de combustible.

Desventajas:

- Los reactores de agua en ebullición (BWR) debido a que el agua hierve en el núcleo del reactor, el vapor producido es radiactivo.
- Los reactores de agua en ebullición (BWR) debido que vapor es generado dentro del reactor es necesario realizar cálculos precisos para el manejo del combustible durante la producción de energía debido al flujo de líquido-vapor.
- Los reactores de agua en ebullición (BWR) debido a sus presiones requiere de una vasija mucho más grande que los reactores de agua a presión (PWR).
- Los reactores de agua en ebullición (BWR) requieren de mucha protección en la hora de darle mantenimiento debido a la contaminación radiactiva del vapor que interactúa con la turbina.

3.3.5 Reactor Magnox

El reactor Magnox es reactor fuera de operación, su nombre Magnox es de aleación principalmente de magnesio no oxidable y con cantidades pequeñas de aluminio y otros metales. Utilizada en la cobertura de combustible de uranio no enriquecido con una cubierta inoxidable para contener productos de fisión.

El reactor Magnox tiene como ventaja, una baja captura de neutrones en sección cruzada, pero tiene dos importantes inconvenientes:

- Limita al máximo las temperaturas, y en consecuencia la eficiencia térmica de la planta.
- Reacciona con el agua natural, teniendo como beneficio de no almacenar combustible gastado debajo del agua dentro de las piscinas.

De modo que este reactor de energía nuclear de nombre Magnox fue desarrollado y puesto en marcha en el Reino Unido De la Gran Bretaña, de manera que fue exportado a países como Japón, Italia, Corea Del Norte, y no obstante a otros países desarrollados, como centrales eléctricas, la finalidad de este tipo de reactor es para su producción de plutonio para armas nucleares, es decir, este tipo de central tiene como finalidad generar energía eléctrica y a la vez producir plutonio.

Sin embargo, este tipo de reactor incorpora aletas de refrigeración para maximizar la transferencia del calor debido a las temperaturas de operación, de modo que esto eleva su precio. Así este tipo de reactor utiliza como combustible, el uranio en forma solida teniendo como resultado ser más económico. Esto por una parte, de modo que en su retirada del reactor se supone que los riesgos de fisión del producto sean graves, a su vez se requiere de costosas infraestructuras para las manipulaciones de los residuos nucleares teniendo como resultado plutonio.

En tanto la refrigeración de este tipo de reactor Magnox es por medio de la refrigeración de óxido de carbono que se mantiene a una presión determinada y son moderados por grafito, el combustible utilizado en estos reactores es uranio natural.

Este tipo de reactor tiene una seguridad inseparable debido a su gran tamaño de diseño, y su baja densidad de energía y de la refrigeración por medio de gas, de modo que no requiere de instalaciones de segunda contención. En la figura 3.3 se describe el reactor Magnox.

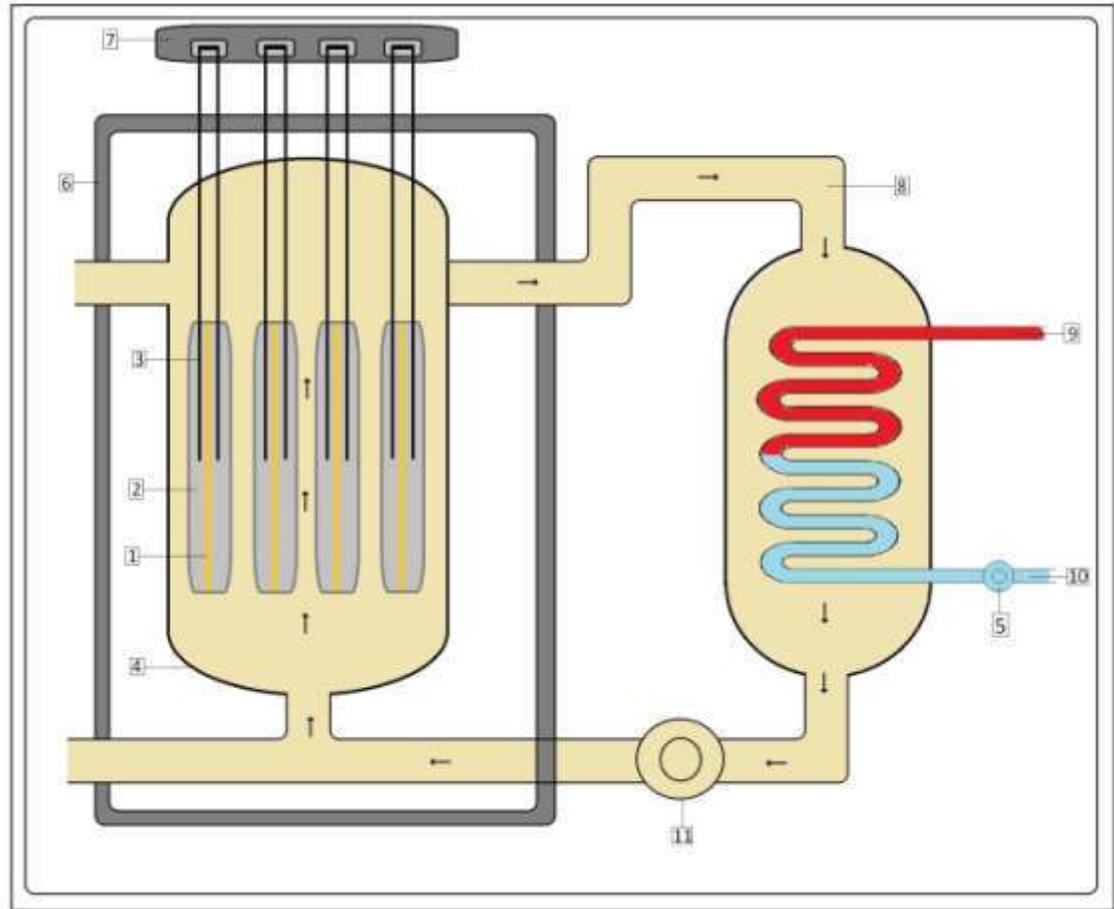


Figura3.3 Reactor Magnox.

- 1) Barras de uranio
- 2) Barras de grafito
- 3) Barras de control
- 4) Vasija del reactor a presión
- 5) Bomba de circulación del gas
- 6) Protección biológica
- 7) Grúas de control de combustible o del moderador
- 8) Gas caliente
- 9) Vapor de agua
- 10) Agua purificada
- 11) Bomba de circulación del gas

3.3.6 Reactor refrigerado por gas

Reactor refrigerado por gas avanzado o en sus siglas en ingles (AGR, acrónimo de Advanced Gas cooled Reactor), desarrollado en Reino Unido de la Gran Bretaña, denominado de segunda generación, de modo que este tipo de reactor fue desarrollado a partir del reactor **Magnox**.

El reactor refrigerado por gas avanzado (AGR) su tipo de reactor utiliza como combustible en forma de pastillas de óxido uranio enriquecido al 2.5% - 3.5% en tubos de acero inoxidable, además su moderador en base de átomos de carbono y átomos de grafito, y como material refrigerante es un gas por ejemplo CO_2 Óxido de carbono o el He Helio el cual alcanza un temperatura cercana a los $650^{\circ}C$ alrededor del núcleo, de modo que sale del reactor pasando a un intercambiador de calor y nuevamente entra al reactor, de modo que las barras de control penetran el moderador, además cuenta con un sistema de apagado secundario que inyecta nitrógeno al refrigerante, en la figura 3.4 se describe el reactor refrigerado por gas.

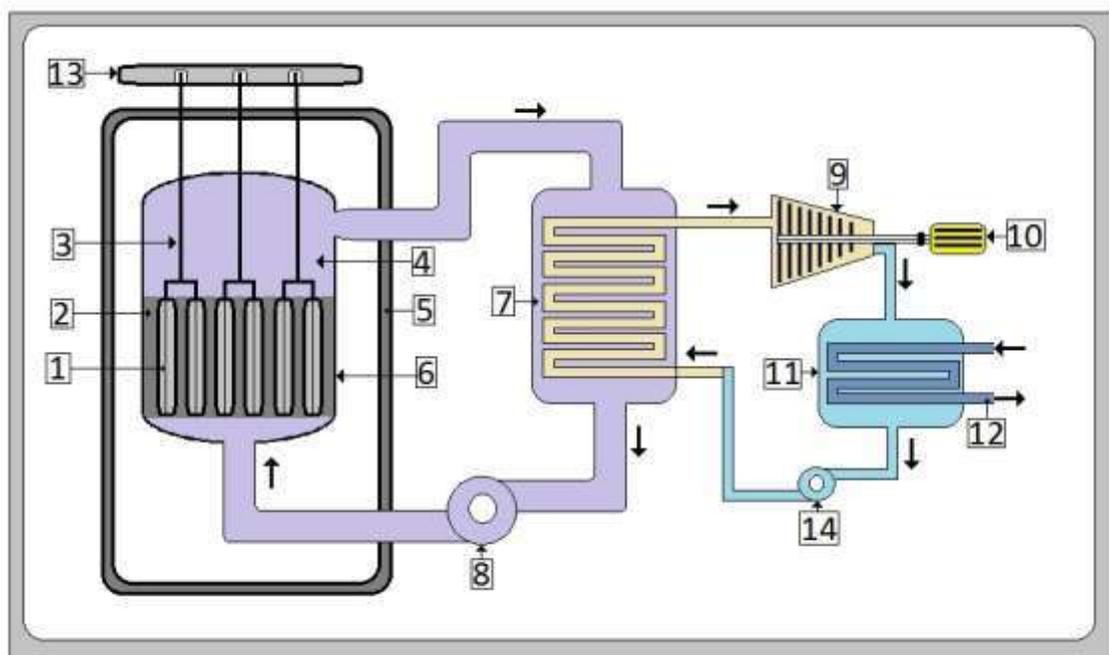


Figura 3.4 Reactor Refrigerado por Gas.

- 1) Barras de combustible encapsulado en forma de pastilla
- 2) Moderador que es normalmente grafito
- 3) Barras de control
- 4) Refrigerante
- 5) Protección biológica
- 6) Cuerpo del reactor
- 7) Cambiador de calor
- 8) Impulsador centrifugo de gas refrigerante
- 9) Turbina de vapor
- 10) Generador eléctrico
- 11) Condensador
- 12) Entrada y salida de agua de refrigeración
- 13) Grúa de montaje de las barras de combustible
- 14) Bomba centrifuga de recirculación del agua de la turbina

Este tipo de reactor refrigerado por gas avanzado (AGR) tiene una buena eficiencia térmica cercana a un 41% comparado con el reactor de agua a presión (PWR) que tiene una eficiencia térmica del 34%, esto es debido a gran parte de la temperatura del refrigerante que llega a una temperatura cercana a los 640°C de modo que las temperaturas alcanzados en los reactores refrigerados por gas alcanza una temperatura cercana a los 325°C , de tal manera esto con lleva a que el núcleo del reactor sea más robusto.

3.3.7 Reactor refrigerado por aire

Los reactores refrigerados por aire, como su nombre lo dice su refrigeración es por medio de circuito abierto, es decir el aire es filtrado y llevado al reactor, que pasa por el intercambiador de calor y posteriormente es filtrado el aire para no exponer tanta radiactividad hacia la atmosfera, utiliza como combustible es el uranio natural y como moderador grafito, una de las grandes desventajas de este tipo de reactores, es la

radiactividad de la atmósfera en los alrededores de la central, de tal manera la figura 3.5, describe el reactor refrigerado por aire.

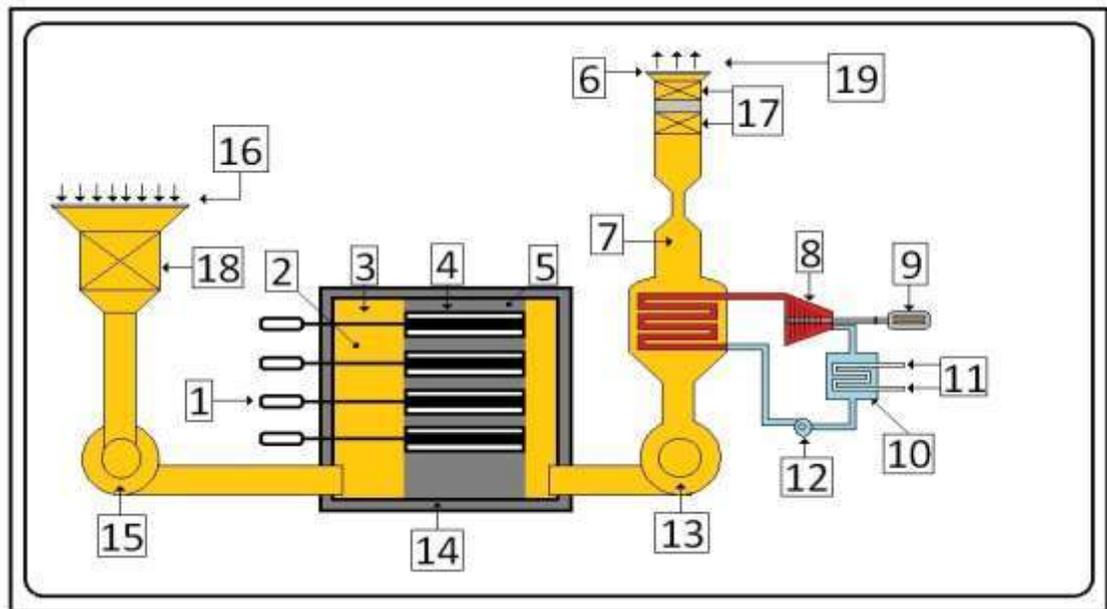


Figura 3.5 Reactor Refrigerado por Aire.

- 1) Varillas de Regulación
- 2) Cuerpo del reactor
- 3) Refrigerante Agua a presión
- 4) Barras de combustible (Uranio Natural)
- 5) Moderador grafito
- 6) Chimenea
- 7) Cambiador de calor
- 8) Turbina de vapor
- 9) Generador eléctrico
- 10) Condensador
- 11) Entrada y salida de agua de refrigeración
- 12) Bomba centrífuga de recirculación de agua de la turbina
- 13) Impulsor centrífugo de salida de aire
- 14) Protección biológica

- 15) Impulsor de entrada de aire
- 16) Entrada de aire
- 17) Filtro de salida
- 18) Refrigerante agua a presión
- 19) Salida del aire

3.3.8 Reactor de agua pesada

En el reactor de agua pesada presurizada (REP) su tecnología es muy parecida a los reactores de agua a presión (PWR), una de las diferencias de este reactor es que tiene un moderador que utiliza agua pesada y como refrigerante puede ser la misma o gas, dicha agua se conoce como agua pesada u óxido de deuterio con su fórmula D_2O , y una característica de este tipo de agua es que su punto de ebullición es de $101.42^{\circ}C$ y de modo que su punto de congelación es de $3.81^{\circ}C$, a manera de comparación con el agua normal que su punto de ebullición es de los $100^{\circ}C$ y su punto de congelación es de los $0^{\circ}C$, de modo que el agua pesada a temperatura ambiente tiene una densidad del 10.79% de manera que este tipo de agua tiene la propiedad de absorber en alguna medida los neutrones libres, lo que la hace en un moderador para las reacciones de fusión nuclear.

El reactor de agua pesada (REP) utiliza como combustible uranio enriquecido, la proporción de los isotopos del uranio 235 fisibles varían entre 3 a 5% según los usuarios en diversos países en el mundo, la forma en que se introduce el combustible al reactor es en forma de pastillas estas introducidas en las barras denominadas barras de combustible, en la figura 3.6 se muestra este tipo de reactor.

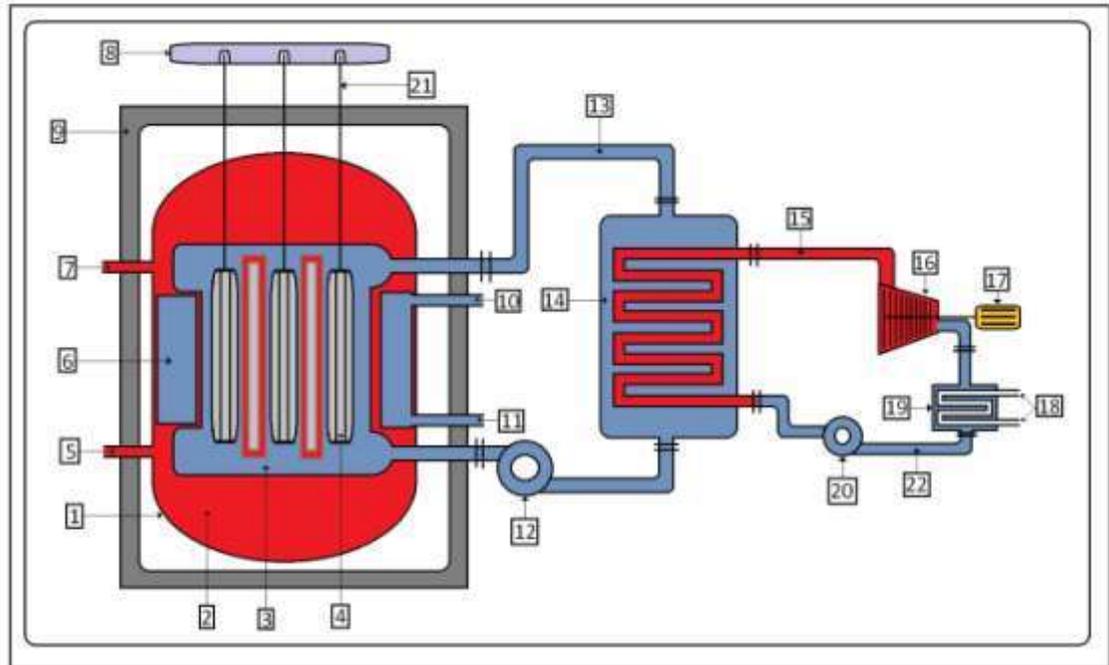


Figura 3.6 Reactor de Agua Pesada.

- 1) Cuerpo del reactor
- 2) Atmósfera de Helio
- 3) Refrigerante (agua pesada)
- 4) Barras de combustible (Uranio Natural)
- 5) Entrada de Helio
- 6) Moderador agua pesada
- 7) Salida de Helio
- 8) Grúa de montaje
- 9) Protección biológica
- 10) Salida del agua pesada
- 11) Entrada del agua pesada
- 12) Bomba centrífuga de recirculación del refrigerante
- 13) Circulación del agua pesada hacia el cambiador del calor
- 14) Cambiador de calor
- 15) Vapor de agua hacia la turbina

- 16) Turbina de vapor
- 17) Generador eléctrico
- 18) Entrada y salida de agua de refrigeración
- 19) Condensador
- 20) Bomba centrífuga de recirculación de agua de la turbina
- 21) Varilla de regulación
- 22) Agua de circulación hacia el intercambiador de calor

El reactor de agua pesada es empleado en programas Europeos, no obstante en Canadá es muy empleado este tipo de reactores con el nombre de CANDU, es una marca registrada de la Energía Atómica de Canadá Limitada CANDU (Canadá Deuterio Uranio), de esta tecnología de los reactores de agua pesada (REP) se tienen dos innovaciones :

- WWER Reactor Moderado y Refrigerado por Agua, de fabricación Rusa
- EPR Reactor Presurizado Europeo, en proyecto en el continente Europeo

3.3.9 Reactor de Sodio Grafito

El reactor de Sodio-Grafito este tipo de reactor utiliza como refrigerante el sodio líquido y la combinación de sodio-potasio, esto para mejorar el rendimiento en base de la elevación de la temperatura, de tal manera este tipo de procedimiento tiene un alto índice de radiactividad por ello conlleva a utilizar intercambiadores de calor adicionales para transferir el calor a un fluido y este pasa nuevamente por un intercambiador de calor para generar vapor, que como se muestra en la figura 3.7, de modo que el grafito se emplea como moderador, en tanto su combustible es el elemento químico Uranio enriquecido, esto logra a tener un mejor rendimiento.

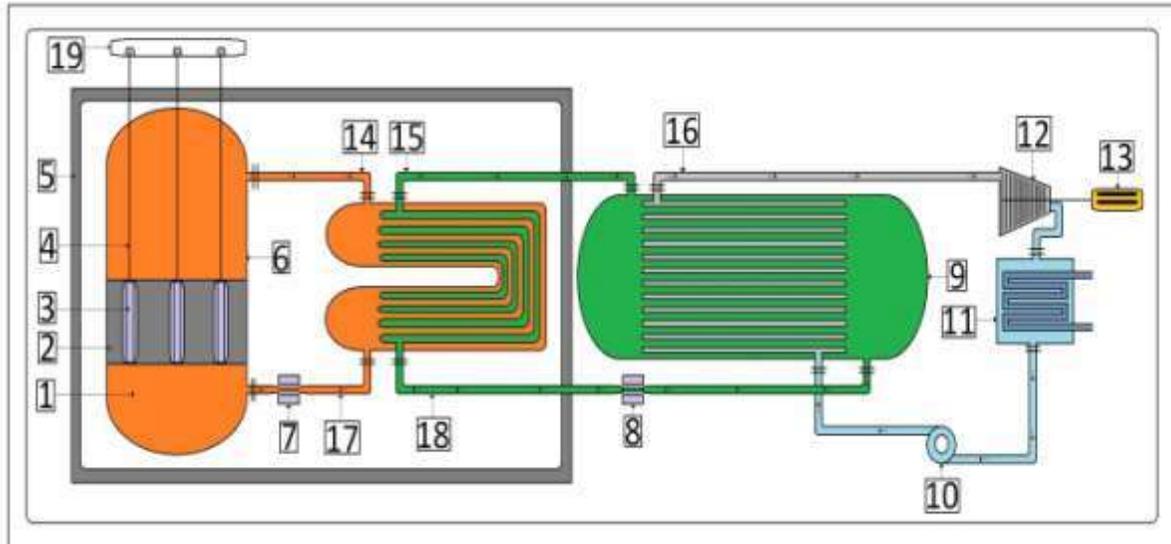


Figura 3.7 Reactor de Sodio-Grafito.

- 1) Refrigerante (Sodio)
- 2) Moderador (Grafito)
- 3) Barras de combustible (Uranio enriquecido)
- 4) Varillas de regulación
- 5) Protección biológica
- 6) Cuerpo del reactor
- 7) Bomba electromagnética para la refrigeración (sodio)
- 8) Bomba electromagnética para aleación sodio-potasio
- 9) Cambiador de calor final
- 10) Bomba centrífuga de recirculación del agua de la turbina
- 11) Condensador
- 12) Turbina de vapor
- 13) Generador eléctrico
- 14) Entrada del sodio al cambiador de calor
- 15) Aleación sodio-potasio
- 16) Vapor de agua
- 17) Sodio

18) Aleación de sodio-potasio

19) Grúa de montaje

3.3.10 Reactor reproductor

Mejor conocido como reactor reproductor rápido y con sus siglas en inglés (FBR), (Fast Breeder Reactor), este tipo de reactor se ha implementado y puesto en marcha en países como Estados Unidos de Norte América, Reino Unido de la Gran Bretaña, Francia, la India, Japón y la antigua Unión Soviética, no obstante en datos de del 2004 sobre los reactores reproductores rápidos (FBR), se tenía noticia sobre la construcción de un reactor reproductor rápido (FBR) en China y en Alemania.

Este tipo de reactor utiliza como combustible óxido de plutonio PuO_2 de una proporción del 20%, y dióxido de Uranio UO_2 con una proporción del 80%, de esta manera este tipo de reactores transforma el material fértil en material combustible, teniendo en cuenta la producción del calor, para la transformación de agua a vapor, en la figura 3.8 se describe este tipo de reactor.

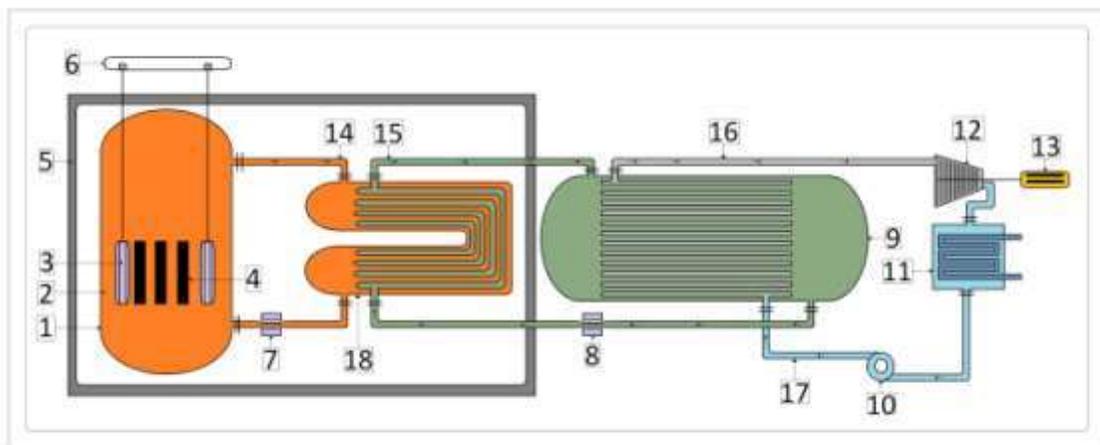


Figura 3.8 Reactor Reproductor.

- 1) Cuerpo del reactor
- 2) Refrigerante (sodio)
- 3) Capas exteriores de combustibles, de uranio 238.
- 4) Núcleo de combustible de uranio 235.
- 5) Protección biológica
- 6) Grúa de montaje de las varillas de regulación
- 7) Bomba electromagnética para refrigeración (sodio)
- 8) Bomba electromagnética para aleación sodio-potasio
- 9) Cambiador de calor
- 10) Bomba centrífuga del agua de la turbina
- 11) Condensador
- 12) Turbina de vapor
- 13) Generador eléctrico
- 14) Entrada del sodio
- 15) Salida del las aleaciones de sodio-potasio
- 16) vapor de agua hacia la turbina
- 17) entrada de agua
- 18) entrada y Salida del las aleaciones de sodio-potasio

Este tipo de reactores no requieren de moderador ya que se utilizan los neutrones para la fisión, por ello se emplea combustible nuclear muy rico en materiales fisionable de tal manera emplea como combustible el Uranio y el plutonio, en tanto a la elevada velocidad de los neutrones en estos elementos químicos, las probabilidades de nuevas fisiones con otros núcleos son muy escasas, y se compensa con una mayor masa de material fisionable.

No obstante, las innovaciones tecnológicas al reactor reproductor rápido (FBR), y ser refrigerado por el elemento químico en estado líquido se han diseñado:

- Tipo Loop, de manera que la circulación del refrigerante, se mueve entre el intercambiador de calor en el lado primario del reactor, es decir, dentro de la protección biológica.
- Tipo Pool, de manera que los intercambiadores de calor primario y su circulación están dentro de la vasija que contiene el reactor.
- Prototipos del reactor reproductor rápido (FBR), tienen contemplado que en su refrigeración sea por medio de metales líquidos como el mercurio, y plomo.
- Reactor reproductor rápido (FBR) refrigerado por helio, este denominado como reactor de cuarta generación.

3.3.11 Reactor homogéneo

Reactor Homogéneo acuoso (AHR), sus estudios sobre este reactor comienzan hacia el cierre de la segunda guerra mundial, este tipo de reactores homogéneos acuosos fueron llamados las calderas de agua, aunque no son reactores de agua hirviente, su combustible es el sulfato de uranio o nitrato de uranio, estos disueltos en agua, formando una especie de pasta, de modo que el combustible se mezcla con el refrigerante, es decir como su nombre lo dice una mezcla homogénea, de tal manera el tipo de agua puede ser pesada o ligera como se muestra en la figura 3.9. De modo que esta mezcla a la vez es, combustible, moderador y refrigerante.

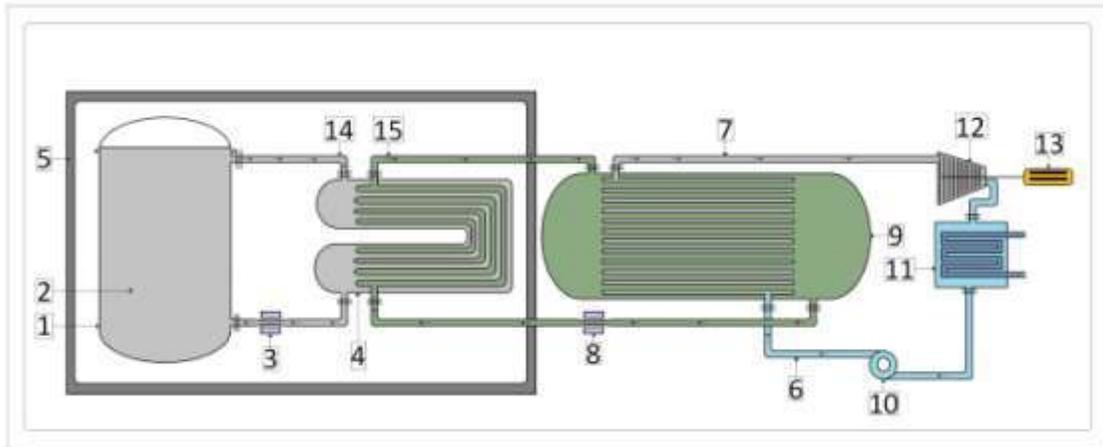


Figura 3.9 Reactor Homogéneo.

- 1) Cuerpo del reactor
- 2) Solución de uranio al 1% en bismuto líquido (combustible y refrigerante)
- 3) Bomba electromagnética para refrigerante (aleación uranio-bismuto)
- 4) Cambiador de calor intermedio
- 5) Protección biológica
- 6) Entrada de agua refrigerada
- 7) Vapor de agua hacia la turbina de vapor
- 8) Bomba electromagnética para aleación sodio-potasio
- 9) Cambiador de calor final
- 10) Bomba de recirculación del agua de la turbina
- 11) Condensador
- 12) Turbina de vapor
- 13) Generador eléctrico
- 14) Aleación uranio-bismuto
- 15) Aleación sodio-potasio

Las innovaciones a este tipo de reactores son:

- Reactores homogéneos: tienen una fase única es decir de líquida a gaseosa.

- Reactores heterogéneos: pueden estar en diferentes fases es decir de gas a sólido, de líquido a sólido, de líquido a líquido, de gas a líquido y de gas a líquido y a sólido.

3.4 Reactores en el mundo

De acuerdo al foro Nuclear de la industria Nuclear española, con datos del año 2009, que cuentan con los países que tienen reactores nucleares para su generación de energía eléctrica. No obstante, en la tabla 3.1 y figura 3.10, está sujeta a cambios para el presente año, ya que algunos países innovaron e instalaron y sacaron de operación algunos de dichos reactores nucleares.

Tabla de países que cuentan con reactores nucleares hasta el año 2009:

Alemana	17	India	17
Argentina	2	Irán	0
Armenia	1	Japón	55
Bélgica	7	Lituania	1
Brasil	2	México	2
Bulgaria	2	Pakistán	2
Canadá	18	Reino Unido	19
China	11	Republica Checa	6
Eslovaquia	5	Corea del sur Corea	20
Eslovenia	1	Rumania	1
España	8	Rusia	31
Estados Unidos de Norte América	104	Sudáfrica	2
Finlandia	4	Suecia	10
Francia	59	Suiza	5
Holanda	1	Taiwán	6
Hungría	4	Ucrania	15

Tabla 3.1 Países que cuentan con reactores nucleares.

Reactores nucleares instalados en el mundo

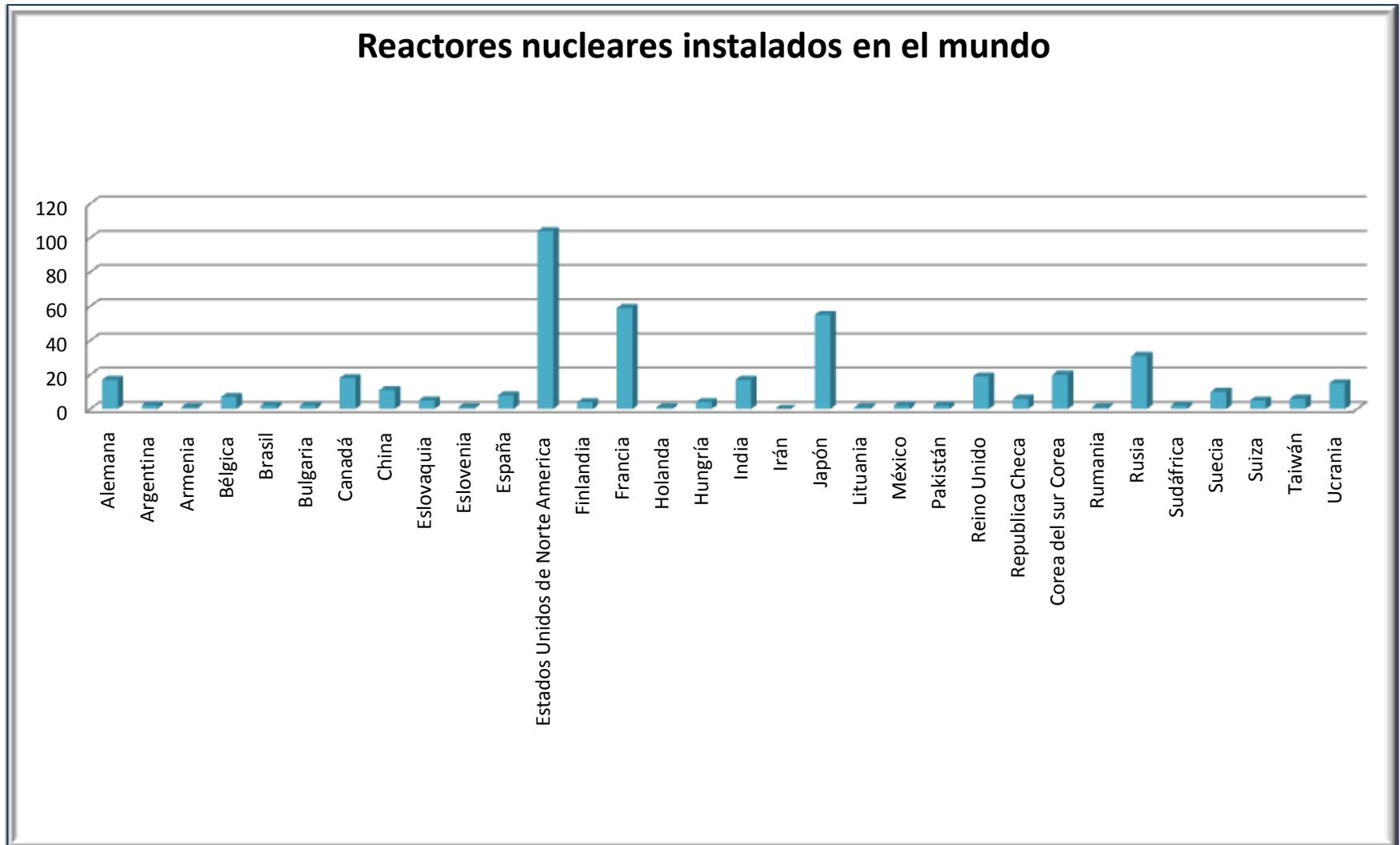


Figura 3.10 Países que cuentan con reactores nucleares para el año 2009.

De modo que hay un total de 438 plantas de reactores nucleares en todo el mundo, y con la finalidad de generar energía eléctrica, no obstante hay países que tienden a sacar fuera de operación sus plantas nucleares, un claro ejemplo son los países como Alemania que tiene planes de dismantelar sus centrales nucleares para los años 2020, otro país con planes de dismantelar dichas plantas en Francia en que este país apuesta por una generación de energía renovable a menor costo.

Capítulo 4

Proyecto de una central nucleoelectrica

4.1 Introducción

La tecnología nuclear ha avanzado en reactores más versátiles y seguros denominados como reactores nucleares de cuarta generación, de tal modo estas innovaciones han dado como resultado a diferentes tipos de reactores como; reactor reproductor refrigerado por gas (GFR), reactor rápido refrigerado por plomo (LFR), reactor de Sal fundida (MSR), reactor supercrítico refrigerado por agua (ACRW), reactor rápido refrigerado por sodio (SFR), reactor a muy alta temperatura (VHTR). De modo este tipo de innovaciones en estas centrales nucleoelectricas pueden ser mucho más pequeñas y seguras y con mucho mayor eficiencia y al igual su generación de energía eléctrica

La energía nuclear puede ayudar a cumplir los acuerdos establecidos por el protocolo de Kyoto en que este es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de ciertos gases que causa el calentamiento global, como el Bióxido de carbono CO_2 , gas Metano CH_4 , y óxido nitroso N_2O , de modo que otros tres gases contaminantes que provienen de procesos industriales como Hidrofluorocarbonos HFC , Perfluorocarbonos PFC y Hexafluoruro de azufre SF_6 . No obstante, las plantas nucleoelectricas emite cierta cantidad de CO_2 durante el ciclo de obtención de combustible nuclear, de tal manera y durante su construcción y desmantelamiento de dichas centrales nucleares.

Para realizar la construcción de una planta nucleoelectrica se tiene que hacer un estudio de factibilidad para poder ser creada dicha planta, al igual que su tipo de construcción y equipo a implementar, no obstante hay que tener muy en claro los posibles ventajas y desventajas de este tipo de planta de generación eléctrica por medio de material nuclear. Al igual que tener muy en claro de: en donde y cuanto puede abastecer de la materia prima para este tipo de plantas?. No obstante sus desechos

tendrán diferentes fines, ya sea para el ámbito bélico, médico e industrial o simplemente sepultarlos en contenedores herméticos y aislados del medio ambiente y estos alejados de la civilización humana.

4.2 Emisiones de radioactividad

Uno de los grandes puntos sobre el proyecto de una central nucleoelectrónica, son las emisiones de radioactividad, no obstante en su operación, las centrales nucleares emiten material radioactivo al medio ambiente, en emisiones gaseosas radioactivas por la chimenea, y en los desechos radioactivos en forma líquida su descarga va hacia el mar o al embalse o al río del que depende para su refrigeración.

De manera que las emisiones de la radioactividad son de muy bajo nivel de dosis de radiación hacia el medio ambiente, esto se debe al tratamiento que se le da a los residuos, antes de ser liberados, ya sea hacia la atmósfera como a los medios acuáticos.

4.3 Desintegración Radioactiva

Como se ha mencionado anteriormente, la radioactividad es una propiedad de los isótopos que son inestables, es decir, que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, de tal forma para alcanzar su estado fundamental deben perder energía. De modo que esto lo hacen en forma de emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con determinada energía cinética. Para hacer esto se tiene conocido varios métodos uno de ellos se hace variando la energía de sus electrones en emisiones de rayos X, y sus nucleones en rayos gamma, y como segundo es variando el isótopo, es decir, al emitir desde el núcleo electrones, positrones, neutrones, protones o partículas más pesadas, esto en varios pasos sucesivos, con los que un isótopo pesado puede terminar convirtiéndose en algo mucho más ligero, da el caso con el elemento químico llamado Uranio en que con el transcurrir de los siglos termina por convertirse en plomo.

De tal modo la desintegración radioactiva de un elemento radioactivo, disminuirá exponencialmente con el paso del tiempo, de modo que la desintegración de un núcleo cualquiera se produzca al azar, y el número de núcleos que se desintegren en un intervalo de tiempo dt es directamente proporcional al tiempo y al número de núcleos existentes de modo su expresión matemática es:

Donde:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4.1)$$

$N(t)$ Es el número de núcleos radioactivos en un instante t

dN Es el número de desintegraciones en el tiempo t

λt Es λdt

De tal manera la ecuación (4.1) es aplicable en la ley de la desintegración radioactiva que data desde los años 1902 por Ernest Rutherford y Frederick Soddy en que establecen que: $N(t)$ es el número de núcleos que quedan sin desintegrar, en tanto N_0 es el número de núcleos iniciales, de forma que $N_0 - N$ es el número de núcleos desintegrados. En tanto la constante λ es la constante de desintegración.

El fenómeno de la radioactividad es aleatorio sujeto a una cierta probabilidad de desintegración. La constante λ es la probabilidad por unidad de tiempo de que los núcleos pertenecientes a esa población se desintegren.

De modo que la semivida o periodo de desintegración, es el tiempo que tarda un núcleo en desintegrarse en período, semiperiodo, semivida o vida media. En tanto no hay que confundirnos con el tiempo de vida, en tanto su expresión matemática es:

$$N = \frac{N_0}{2} \quad (4.2)$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (4.3)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4.4)$$

Si llamamos tiempo de vida o tiempo de vida media de un radioisótopo al tiempo promedio de vida de un átomo radioactivo antes de la desintegrarse es igual a la inversa de la constante de desintegración radioactiva y su expresión matemática es:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (4.5)$$

De modo que la velocidad de desintegración es inmediata. Ver que la constante de la desintegración es el cociente entre el número de desintegraciones por segundo y el número de átomos radioactivos, en donde la A es el número de átomos de un elemento químico en tanto su expresión matemática es:

$$\lambda = \frac{A}{N} \quad (4.6)$$

En la tabla 4.1 se encuentran ciertos elementos radioactivos con su descripción en rangos de desintegración de segundos, minutos, días y años.

Elemento Químico	Periodo de desintegración	Emisión
Berilio - 8	10^{-16} segundos	
Polonio-213	410^{-6} segundos	
Aluminio-28	2.25 min	
Yodo-131	8 días	
Radón-222	382 días	Alfa
Estroncio-90	28 años	
Radio-226	1600 años	
Cobalto-60	5271 años	Gamma
Carbono-14	5730 años	Beta
Uranio-238	4510 millones de años	Alfa

Tabla 4.1 periodo de desintegración radioactiva

Debido a la desintegración radioactiva y en que los desechos radioactivos del elemento químico utilizado en las plantas nucleares son almacenados en sitios distantes a la población humana, se instalan símbolos de advertencia radioactiva, da el caso con el símbolo de advertencia de radioactividad adoptado por la ISO (International Organization for Standardization) en el año 2007 para fuentes que puedan resultar peligrosas que se ilustra en la figura 4.1



Figura 4.1 Advertencia radioactiva

4.4 Generación de la energía eléctrica en el país

Los fabricantes de reactores nucleares en el mundo son empresas prestigiadas y mencionadas por sus productos eléctricos, electrónicos y electrodomésticos y diversos productos para el consumo humano común. De tal manera las empresas con el nombre General Electric, Mitsubishi Heavy Industries, Toshiba y la renombrada Westinghouse, son empresas que fabrican e instalan reactores nucleares en el mundo.

Como se mencionó en capítulos anteriores la generación de energía eléctrica en México en su mayor parte es generada por centrales termoeléctricas y en segundo lugar las plantas hidroeléctricas, no obstante las centrales nucleares o reactores nucleares en México son:

- Laguna verde 1 en Punta limón, Veracruz, México. Inaugurada en 1989 con la potencia de 1365 MW. Con tipo de reactor BWR (Reactor de agua en ebullición).
- Laguna verde II en Punta Limón. Veracruz México. Inaugurada en 1995.
- Instituto nacional de Investigación en Ixtapan de la Sal. Estado de México, México. Inaugurada en 1968. Fue la primera central nuclear de Latinoamérica y es inaugurada únicamente para la investigación de la energía nuclear. Con una potencia de 600 MW.

De manera que la vida útil de este tipo de centrales nucleoelectricas oscila entre 40 y 60 años, esto sin innovaciones o cambios en el núcleo del reactor, no obstante las innovaciones que se les ha dado a las nuevas generaciones de reactores, han sido en el tipo de aislamiento y su eficiencia, es decir, así como han innovado reactores de gran potencia de generación, hay reactores de pequeña potencia, un claro ejemplo esta el Reactor Micro Nuclear de la empresa renombrada Toshiba como se muestra en la figura 4.2, es un reactor de 200 (KW), de un centésimo del tamaño de un central estándar: con sólo 6×1.82 metros, fue diseñado para operar en forma totalmente automatizada y así evitar de manera inteligente a los sobrecalentamientos que esté presente, es decir; no usa barras de control ni Cadmio o Boro como refrigerante, de tal manera la reacción es a través de un tubo vertical, este ubicado en el centro, como las barras de control en un reactor nuclear convencional, de tal manera este tubo contiene isótopos de Litio-6 que tiene una mayor eficiencia para la absorción de neutrones en la reacción.



Figura 4.2 Micro-nuclear Toshiba

Este tipo de reactor tiene una vida útil de 40 años produciendo electricidad con un costo de cinco centavo de dólar el Kw/hora de este tipo de reactores se está implementando en Estados Unidos de Norte América y parte del continente Europeo, en edificios o en zonas rurales.

No obstante, la generación eléctrica en el país, está dada por la figura 4.3, obtenida de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), las capacidades se integran con todas la formas de generación:

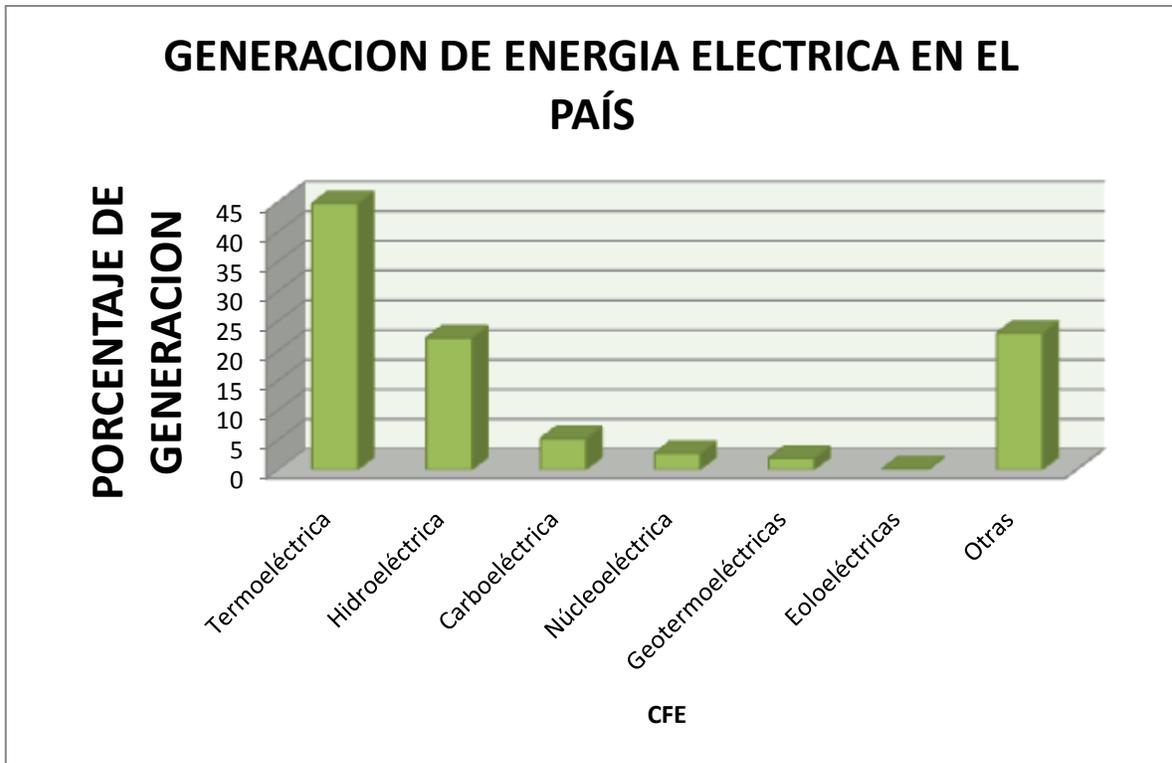


Figura 4.3 Generación de energía eléctrica en el país.

Sin embargo, el costo de generación de energía eléctrica en el país en nuestros tiempos asido un tema de gran debate a nivel nacional, de tal manera un listado de costos de generación de energía eléctrica en nuestro país, dado en el año 2008 por la Comisión federal de Electricidad (CFE), enlista las tecnologías en que usamos para generar la energía eléctrica desde el año 2002 al 2008, en donde vemos los costos en pesos por cada KW-H generado en una planta de esa tecnología, como se muestra en el tabla 4.2.

Costos de generación eléctrica en México:

COSTO DE GENERACION DE LA ENERGIA ELECTRICA EN NUESTRO PAIS							
Tecnología	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Turbo Gas y Ciclo Combinado	0.73	1.02	1.07	1.16	1.07	1.06	1.38
Diesel	2.43	3.02	3.61	3.91	6.07	4.81	7.85
Vapor (Combustóleo)	0.45	0.62	0.69	0.78	1.02	1.06	1.58
Carboeléctrica y Dual (Carbón y combustóleo)	0.47	0.57	0.70	0.65	0.65	0.67	1.10
Geotermoeléctrica	0.36	0.38	0.44	0.41	0.46	0.36	0.59
Eoloeléctrica	1.16	1.52	1.34	1.87	0.27	0.61	0.74
Nuclear	0.74	0.75	0.95	0.77	0.83	0.91	0.82
Hidroeléctrica	0.47	0.64	0.52	0.49	0.49	0.55	0.49

Tabla 4.2 Costo de generación.

Promediando los costos de generación de la energía eléctrica en nuestro país y graficándola tenemos la figura 4.4, del costo de generación de energía eléctrica, en el periodo del 2002 al 2008:

PROMEDIANDO LOS COSTOS DE GENERACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN MEXICO

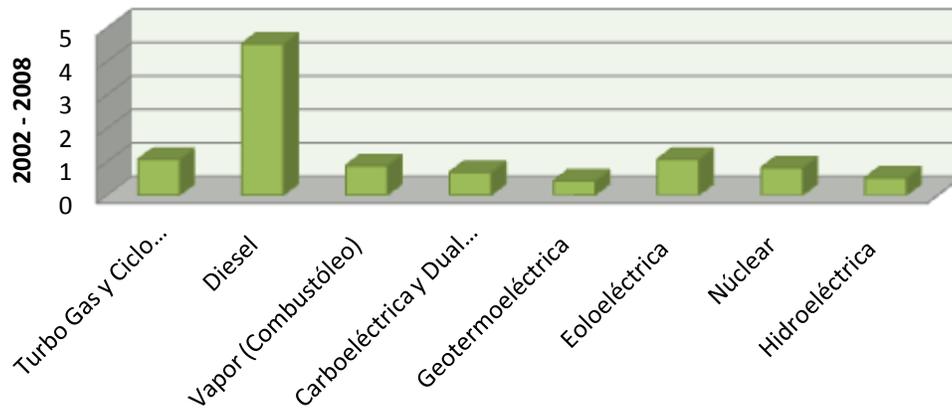


Figura 4.4 Promedio de costos de generación de energía eléctrica en México.

4.5 POSIBLE UBICACIÓN DE LA CENTRAL NUCLEO ELECTRICA DEL PAIS

Los riesgos de instalar una central núcleo eléctrica en nuestro país, es un punto extremadamente importante, las regiones sísmicas en México, se dividen en cuatro zonas, esto con el fin de reducir las probabilidades de un terremoto, en la zona en donde posiblemente se ubicará la central nucleoelectrica, tomando como referencia los catálogos de sismos de la Republica Mexicana, desde inicios de siglo, se ha dividido en cuatro zonas en las que se describen en la figura 4.5 en donde:



Figura 4.5 Zonas sísmicas de la Republica Mexicana.

Zona A esta zona es una en donde no se tiene registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores al 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

Zona D, es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, en donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y la aceleración del suelo puede sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Las Zonas B y C son zonas intermitentes, en donde se registran sismos no tan frecuentes o son zonas afectadas por las altas aceleraciones, es decir que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

No obstante la ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B, esto debido a las condiciones del subsuelo del valle de México, esto pueden esperarse altas aceleraciones. (El mapa que aparece en la figura 4.5 se tomó del manual de diseño de Obras civiles (Diseño por Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad).

De tal manera la posible ubicación, de la central nucleoelectrica seria zona A como se muestra en la figura 4.6, por menor reportes de sismos de gran intensidad, siendo más segura estadísticamente.



Figura 4.6 Zona segura para la ubicación de la central nuclear.

Sin embargo, de la Zona A como se mostro en la figura 4.6 anterior y siendo el área más factible para la posible ubicación de la central, de tal manera el punto exacto es en donde se encuentren tres principales vías de transporte, es decir, que cuente con Aeropuerto, Puerto Marítimo y vías de comunicación terrestres, esto dentro la Zona A mencionada anteriormente, de tal manera los principales puertos del Golfo de México son:

- Altamira – Tamaulipas
- Tampico – Tamaulipas
- Río Lagarto – Yucatán
- Progreso – Veracruz
- Alvarado – Veracruz
- Tamiahua – Veracruz
- Barra de Tuxpan – Veracruz
- Tecolutla – Veracruz
- Tuxpan – Veracruz
- Anton Lizardo – Veracruz

- Veracruz – Veracruz
- Coatzacoalcos – Veracruz
- Celestun – Yucatán
- Sisal – Yucatán
- Dzilam de Bravo – Yucatán
- Las Coloradas – Yucatán
- Isla Mujeres – Quintana Roo
- Chetumal – Quintana Roo
- Progreso – Yucatán
- Cancún – Quintana Roo
- Sánchez Magallanes – Tabasco
- Puerto Dos Bocas – Tabasco
- Barra de Chiltepec – Tabasco
- La Barra – Tabasco
- Ciudad del Carmen – Chetumal
- Isla Aguada – Campeche
- Champotón – Campeche
- Campeche – Campeche

Del listado anterior, seleccionamos el puerto de Tampico Tamaulipas, este se encuentra dentro de la zona A con bajas probabilidades de sismos históricamente, además Tampico Tamaulipas, cuenta con aeropuerto internacional y vías de comunicación terrestres y un puerto internacional, esto nos brinda más alternativas para la llegada de la estructura de la central, a demás la llegada del restablecimiento del combustible, el punto exacto de la posible ubicación es en la comunidad de Las Flores al norte de la ciudad

4.6 SELECCIÓN DE TIPO DE CENTRAL NUCLEOELECTRICA

La generación de energía eléctrica, por parte de la central nuclear de Laguna Verde Veracruz, es de 1365 Mw, suministrando el 2.74% de la energía total generada en el país, de tal manera al implementar la tecnología del reactor nuclear para la generación de energía eléctrica, esto con la firma de Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR), e instalando 1 unidad, teniendo como generación 1460 Mw.

4.6.1 COSTOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Como se mencionó anteriormente el combustible nuclear es aquel material que haya sido tratado para poder ser utilizado en la generación de energía eléctrica, no obstante el costo de la energía nuclear.

- Una competitividad en costos con otras formas de generación de electricidad, excepto cuando exista un acceso directo al costo de combustibles fósiles-bajo.
- Los costos de combustibles para las centrales nucleares son una pequeña proporción de los costos de de generación total, aun que los costos de capital son mayores que en las plantas de carbón y mucho mayores que las plantas de gas.
- En la evaluación de la economía de la energía nuclear, el desmantelamiento y la eliminación de los costos de operación se tengan plenamente en cuenta.

Los costos relativos de las nuevas plantas generadoras de energía eléctrica, que utilizarán diferentes tipos de tecnologías en su generación, es un asunto complejo ya que dependerán de su ubicación. De modo que el carbón es sin duda es un probable candidato para ser utilizado en las nuevas plantas generadoras de energía, de modo que es económicamente atractiva en países como China, Estado Unidos de Norte América y Australia, ya que cuentan con grandes abundancias de recursos de carbón y teniendo en cuenta las grandes emisiones de contaminantes al planeta, de tal manera que el gas no se queda atrás para la generación de energía, ya que el gas es también competitivo para la energía de carga base, en muchos lugares, en particular el uso de las plantas de ciclo combinado, y aunque el aumento de los precios del gas han eliminado gran parte de sus ventajas.

La energía nuclear es en muchos lugares, la competencia con los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, de modo que a pesar de los costos de inversión relativamente altos y la necesidad de eliminar sus residuos como su desmantelamiento, de modo que si la salud social y los costos ambientales producidos

por los combustibles fósiles, también repercuten en la economía y como resultado las centrales de energía nuclear son excepcionales.

Para producir combustible nuclear y este es utilizado en un reactor nuclear es necesario realizar una serie de procesos químicos y físicos para convertirlo desde la forma mineral en que se encuentra en la naturaleza a los pellets de óxido cerámico que se cargan en el núcleo del reactor nuclear, de modo que son fundamentales cuatro o cinco pasos para tener el combustible nuclear:

- Como primer paso, se extrae el uranio del yacimiento de la tierra, se tritura y se procesa habitualmente se disuelve con ácido sulfúrico para obtener el color amarilloso.
- Como segundo paso consiste en convertir bien el uranio en UF_6 para su enriquecimiento en isótopos 235 antes de reconvertirlo en óxido de uranio.
- Las dos etapas posteriores son reservadas por seguridad social. Teniendo como referencia las 4 imágenes de su proceso como se describen a continuación:
 - Figura 4.7 uranio mineral extraído de las minas o yacimientos de uranio.
 - Figura 4.8 Uranio en forma triturado para ser transportado para su enriquecimiento y mesclado con óxido de uranio teniendo forma de pasta amarillenta.
 - Figura 4.9 Material utilizado para el enriquecimiento
 - Figura 4.10 Combustible nuclear solido, compactado químicamente inerte e insoluble.

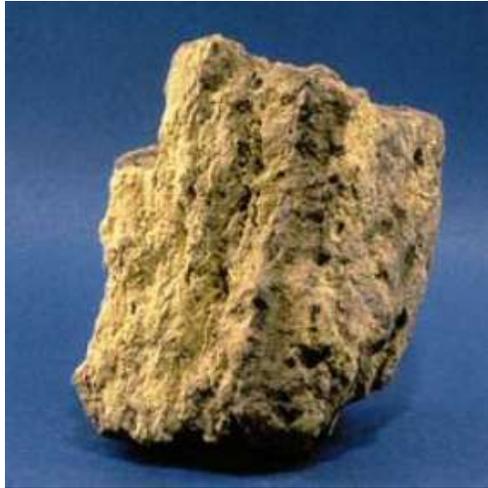


Figura 4.7 Uranio mineral.

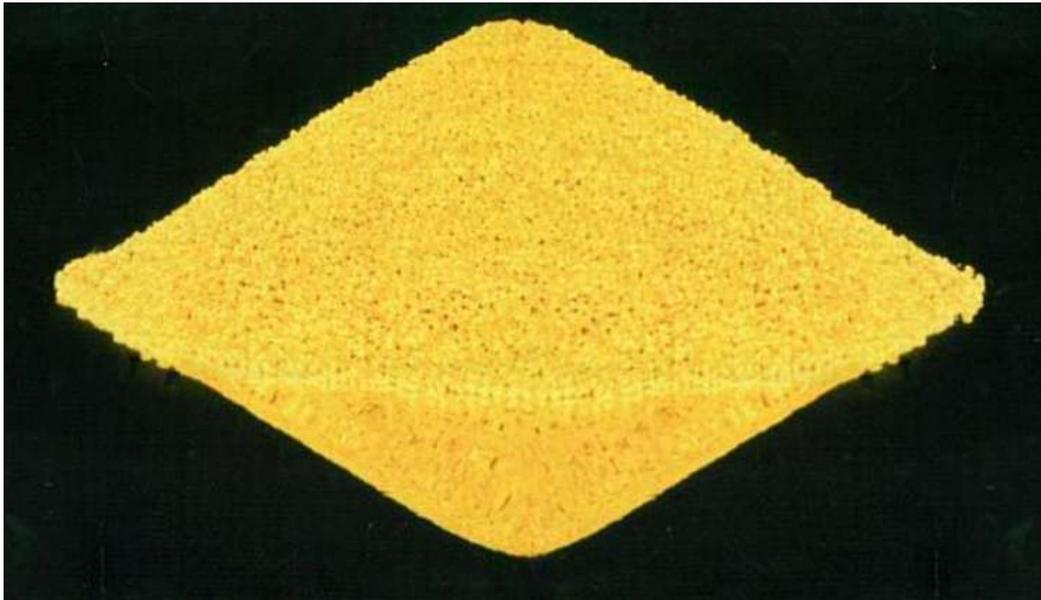


Figura 4.8 Uranio triturado con mezclado con óxido, torneándose de un color amarilloso.



Figura 4.9 Proceso de enriquecimiento del uranio.



Figura 4.10 Pellets mejor conocido como combustible nuclear encapsulado en pequeños cilindros cerámicos.

Los costos asociados con el combustible utilizado en la producción de energía eléctrica ha sido un combustible relativamente bajo en comparación con el carbón, el petróleo y las centrales de gas. De tal modo el uranio, tiene que pasar por varios procesos antes de ser utilizado como combustible en las centrales nucleares, es decir el uranio tiene que ser procesado y tratado en diferentes etapas como se muestra en la tabla 4.3.

Etapas de fabricación del combustible nuclear:

ETAPA	ESPECIFICACIÓN	PROCEDIMIENTO	PRECIO	
			DÓLAR	PESO MN
1	Uranio	Extracción de la mina de Uranio	1299	16237
2	Conversión	Conversión a $U_3 O_8$ o (óxido de uranio en forma de pasta amarillenta)	98	1225
3	Enriquecimiento	Conversión en hexafluoruro de Uranio	1132	14150
4	Fabricación del Combustible	Un total aproximado Por Kg	240	3000
TOTAL APROXIMADO			2769	34612

Tabla 4.3 Etapas de fabricación

Considera que el costo de transporte son altos para el carbón debido a la cantidad de materia prima necesaria para generar la misma energía que el combustible nuclear, de modo que el uranio tiene la ventaja de ser una fuente altamente concentrada de energía,

y que más fácilmente transportable y con un costo muy bajo, las cantidades necesarias son mucho menores que las del carbón o el petróleo, para mencionar algo de su gran diferencia un kilogramo de Uranio natural, producirá más de 20,000 veces de energía que la misma cantidad de carbón, en tanto es intrínsecamente un producto muy portátil y comercializable.

La competitividad del combustible al costo total de la electricidad es relativamente pequeño, es decir, en una escala de precios de combustibles grande, el combustible nuclear tendrá un efecto relativamente pequeño, ya que no hay escases de uranio, de modo que hay otros posibles ahorros, así el combustible utilizado es reprocesado y el plutonio recuperado y junto con el uranio se utilizan en la mezcla de óxidos (MOX), o mejor conocidos como óxidos mixtos, por lo que más energía se puede extraer. Los costos de la consecuencia de este (MOX) son algo grandes pero el gasto es compensado ya que no es necesario el enriquecimiento, en la figura 4.11 se describe brevemente las etapas del combustible nuclear.

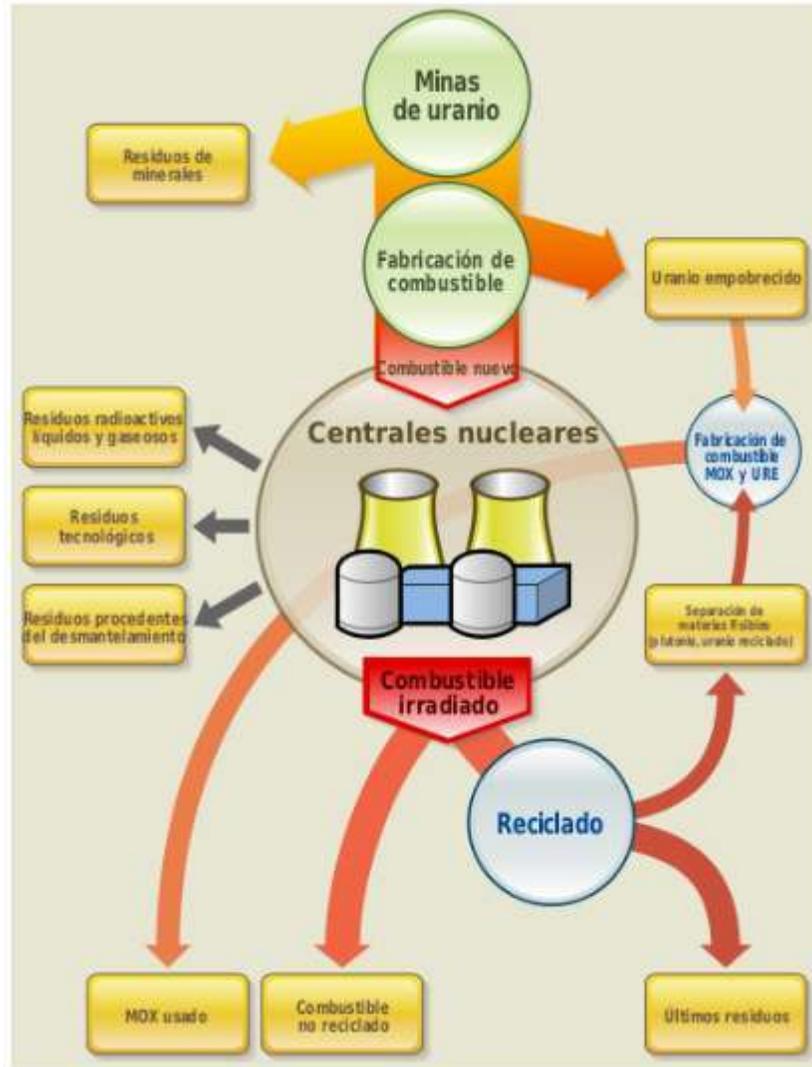


Figura 4.11 Etapas del combustible nuclear.

4.6.2 Minas de uranio

La extracción del uranio mineral de las minas, en todo el mundo es relativamente bajo ya que tiende a llevarse a cabo como minería a cielo abierto, de tal modo sólo un pequeño número de países en todo el mundo realiza estas extracciones de uranio mineral y esto en parte ya que las concentraciones de uranio mineral son suficientemente alta, de modo que no motiva a empresas mineras a extraer este mineral debido al los precios establecidos por dichas empresas mineras.

La producción mundial del uranio para el 2009 ascendió a 50,572 toneladas de las cuales se extrajo un 90% de uranio mineral en tres principales países del mundo Kazajstán, Canadá y Australia, siendo los tres principales en todo el mundo en extracción de uranio mineral en gran cantidad, es decir, en países como Namibia, Rusia, Nigeria, Uzbekistán y los Estados Unidos de Norte América, juntos extraen una cantidad cercana a 1000 toneladas de uranio mineral, anualmente.

No obstante la extracción de uranio mineral para la fabricación del combustible nuclear es un 90% en tanto el otro 10% es para fines bélicos, en la figura 4.12 muestra a nivel porcentual de los países que extrajeron uranio mineral en para el 2007.



Figura 4.12 porcentaje de extracción de uranio mineral para el 2007

4.6.3 Fabricación de combustible

La fabricación y los tipos de combustible nuclear, para fines de generación de energía eléctrica:

- A) Dióxido de Uranio (UO_2): Este combustible es utilizado principalmente en los reactores PWR y BWR en operación.

De modo que el dióxido de uranio es utilizado en forma de cerámico sólido negro, al ser un material cerámico, el dióxido de uranio posee una baja conductividad térmica, lo que resulta una elevada temperatura en el núcleo de la pastilla combustible, esto cuando se encuentra en operación el reactor nuclear. De tal manera la conductividad térmica es una función de la porosidad del material en que adquiere un grado de quemado en el núcleo del combustible nuclear, a esto se le denomina “quemado del combustible”, es decir, al porcentaje de átomos de uranio iniciales que se han fisionado. el proceso de la fisión genera otros isotopos que afectan al combustible de modo que algunos productos permanecen disueltos en el material combustible como los lantánidos y otros elementos químicos presentes como el paladio y otros forman burbujas que contienen xenón o el kriptón.

El dióxido de uranio se puede obtener por reacción de nitrato de uranio con base de amonio para formar un sólido (uranato de amonio, el cual se calienta (calcina) para formar U_3O_8 que este puede convertirse en una mezcla de argón/hidrógeno a $700^{\circ}C$ para formar UO_2 y este envasado en pellets, para ser quemados a temperaturas mucho más alta, la finalidad de este proceso es conseguir que tenga una bajo grado de porosidad.

B) Óxidos mixtos (MOX): El combustible nuclear denominado mezcla de óxidos o combustible MOX o simplemente MOX, es una mezcla de plutonio y uranio natural o empobrecido que se comporta en el reactor de forma natural al uranio enriquecido que alimenta a los reactores nucleares comerciales en el mundo. El combustible nuclear de desecho de algunas plantas nucleares es reprocesado para obtener MOX, de modo que las empresas que realizan este proceso se encuentran en: Inglaterra, Francia y en menor medida en Rusia, India y China.

Comparación en costos de generación de energía eléctrica en cuestión de euros por MWH (Mega Watts Hora), para las nuevas centrales en construcción para el presente año, en la tabla 4.4, describe los costos de generación como costo mínimo y como máximo, de tal modo los valores de la tabla se ven reflejados en la figura 4.13.

FUENTES DE ENERGÍA	COSTO DE PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA ELECTRICA EN € A MWH		EN MONEDA NACIONAL	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Energía Nuclear	107	124	1444	15174
Brown Carbón	88	97	1188	1309.5
Carbón Negro	104	107	1404	1444
Gas Doméstico	106	118	1431	1593
Energía Eólica en Tierra	49.7	96.1		
Energía Eólica a poca distancia de la costa	35	150	472	2025
Energía Hidroeléctrica	34.7	126.7	468	1710
Biomasa	77.1	115.5	1040	1561
Energía Solar	284.3	391.4	3838	5283.9

Tabla 4.4 Precios de generación

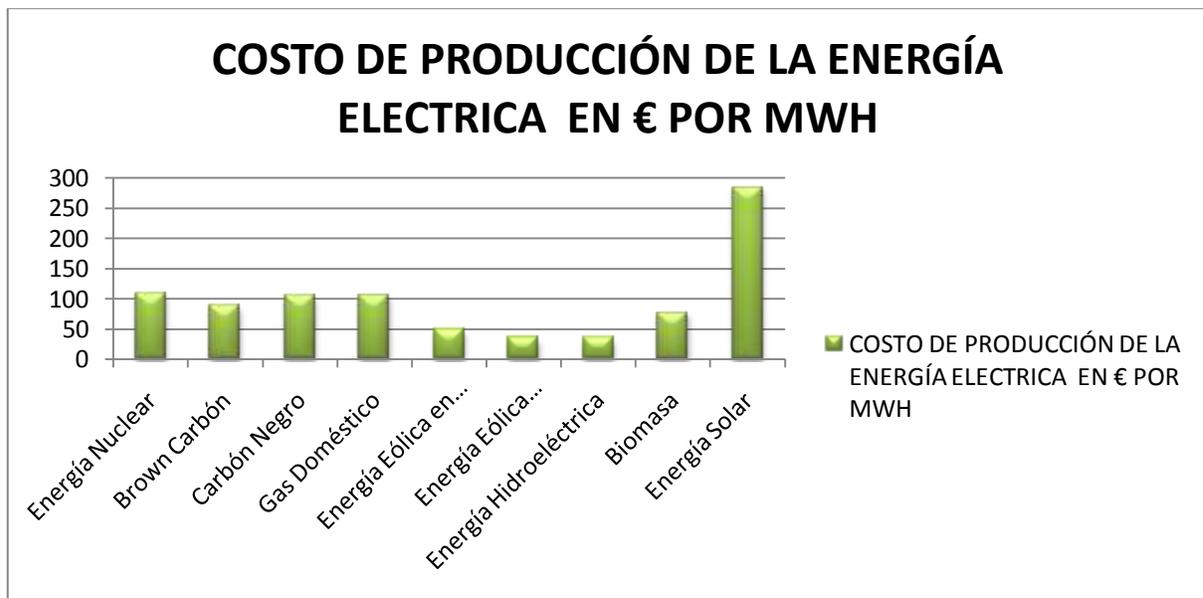


Figura 4.13 Costos de producción de la energía eléctrica.

4.7 PROPUESTAS DE CENTRAL NUCLEOELECTRICA PARA EL PAÍS

ADVANCED REACTOR DE AGUA EN EBULLICIÓN (ABWR)

Para nuestro proyecto de una central nucleoelectrónica y como primera propuesta utilizaremos el reactor El Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR), e innovado por la empresa de renombre mundial como General Electric Hitachi (GEH), en que su diseño ya está disponible para la implementación y generación inmediata de electricidad y con una generación de 1500 Mw, con 2000 MVA brindando así tecnología, programación y confianza.

Los datos técnicos del reactor de agua hirviente (ABWR), su innovación viene del reactor nuclear de la central de GES. Este diseño de Gen III está disponible hoy en día para satisfacer las necesidades de la generación de energía eléctrica que van desde los 1350 MW hasta 1460 MW netos.

Las características del reactor y la planta con el reactor ABWR. Se tiene la hoja de datos proporcionada por el fabricante que brinda una prospectiva del reactor y su diseño.

Así, el avanzado Advanced reactor de agua hirviente (ABWR), y su gran confianza por su tecnología y costo ha sido estudiado e innovado, ha implementado en diversas centrales nucleares creadas e instaladas por la firma General Electric Hitachi GEH. El diseño del Gen III está disponible hoy día para satisfacer las necesidades de la generación de energía eléctrica, que van desde los 1350 a 1460 MW netos. Este tipo de centrales, se entrega probada tecnológicamente avanzada y económicamente competitiva.

El avanzado Advanced reactor de agua hirviente (ABWR), tiene una historia impresionante, en el sentido en que se ha instalado en gran parte del mundo, teniendo grandes resultados, de modo el primer GEH comenzó su operación comercial en Kashiwazaki-Kariwa en el Japón, en el año de 1996. Teniendo resultados muy factibles y con otras tres plantas adicionales operando en el Japón, se tenía planeado más de una en

este país, desafortunadamente, el sismo que sacudió este país ha puesto en jaque este tipo de centrales nucleares en el mundo y hasta fuera de servicio las centrales nucleares del Japón que aún están operando. No obstante, en los Estados Unidos de Norte América están previstas dos unidades para su instalación.

El reactor Advanced reactor de agua hirviente (ABWR) es el resultado de un gran estudio y una continua innovación del reactor de agua ligera BWR-GEH que combina las mejores características del el reactor BWR de todo el mundo, de manera que esta tiene una gran cadena a nivel mundial para su instalaciones de estas plantas.

Los beneficios y características del reactor avanzado de agua hirviente (ABWR) son:

- Mejor seguridad, fiabilidad, operativa y mantenimiento.
- Demostrado en una reducción en los costos de capital de operación y mantenimiento.
- Demostrando mejoras en tecnología en reactores avanzados y en rendimiento.
- Menor tiempo en construir y con sus pruebas de control de calidad esto en un tiempo aproximado a 39 meses a partir de la primera piedra.

Las mejoras tecnológicas en el rendimiento son:

- Reactor de seguridad interna-bombas y rendimiento mediante la eliminación de sistemas de recirculación externa.
- Esta diseñado con estructura de respuesta sísmica en su construcción compacta y de fácil construcción.
- Menos material de construcción teniendo menor costo y mayor tiempo de construcción.
- Optimo diseño en módulos y con modularización refinada y probada en instalaciones reales.
- Sofisticado sistema de control completamente digital, proporcionando monitoreo de la planta fiable y precisa, control y diagnóstico.

- Cuenta con una gran integración del combustible y un tratamiento al agua que tiene como resultado un mejor resultado, así bien reduce en un porcentaje las fuentes de radiactividad.

Los componentes del reactor ABWR se describen en la figura 4.14.

1. Unión atornillada y sellada de la parte superior de la vasija.
2. Válvula de seguridad.
3. Salida de vapor de agua hacia la turbina.
4. Amortiguador para movimientos sísmicos.
5. Entrada de agua a la caldera.
6. Soporte de acero forjado, que resguarda a la vasija.
7. Brida de sujeción del reactor.
8. Parte inferior de la vasija del reactor.
9. Alojamiento de las bombas internas del reactor (RIP).
10. Aislamiento térmico.
11. Pared interna del núcleo del reactor.
12. Placa de soporte del núcleo.
13. Guías superiores, para las barras de control.
14. Soporte de las barras de combustible.
15. Alojamiento de las barras de accionamiento.
16. Tubos guías de las barras de control.
17. Anclaje de las barras de control.
18. Guías de las barras de control.
19. Tubos de la caldera.
20. Distribuidor de agua a alta presión. (HPCF High Pressure Core Flooder).
21. Entrada de agua a alta presión (HPCF High Pressure Core Flooder).
22. Entrada de agua a baja presión (LPFL).
23. Salida de agua de refrigeración de emergencia.
24. Vaporizadores, mejor conocido como separador de vapor.

25. Secado de vapor y separadores de vapor.
26. Bombas internas del reactor (RIP).
27. Motor de las bombas internas (RIP).
28. Tubo de equilibrado de presión entre el núcleo y las bombas (RIP).
29. Accionamiento de las barras de control.
30. Barras de combustible.
31. Barras de control.
32. Sensor de temperatura.

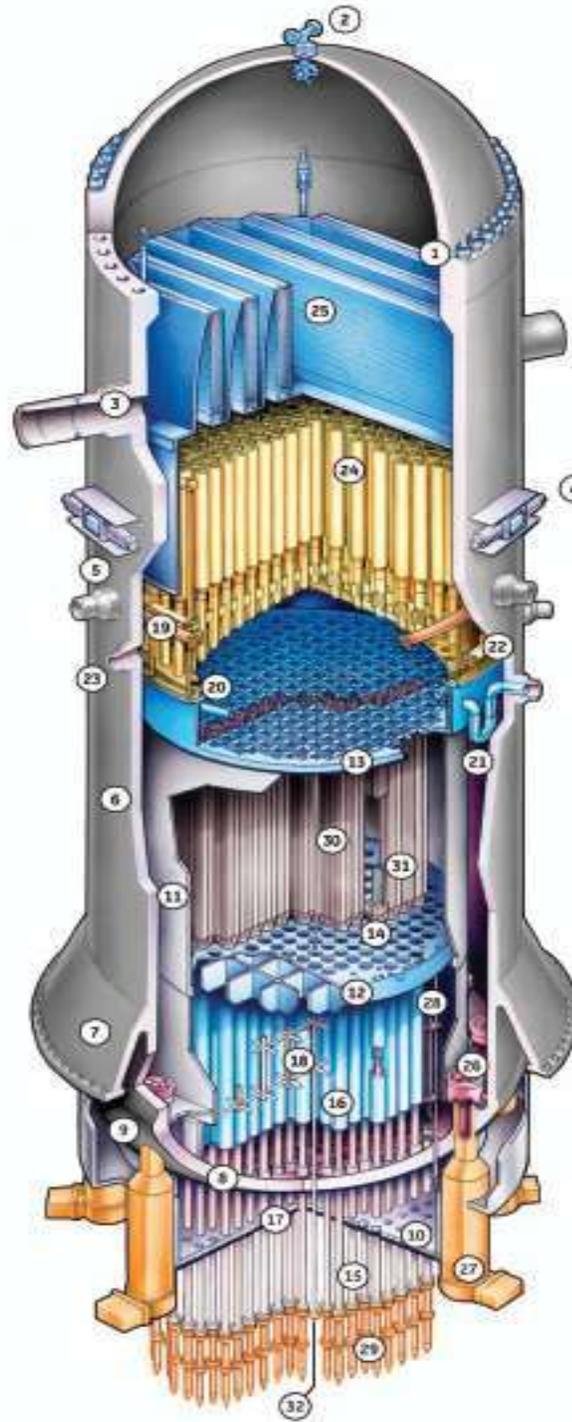


Figura: 4.14 El Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR).

El diseño de la planta es diseñada por la empresa General Electric Hitachi (GEH), diseña y construye la instalación desde la primera piedra hasta la generación de energía, de tal modo la garantía y su política es del acuerdo y tratado con sus clientes como se

muestra en la figura 4.15-A, muestra la descripción de la central, en tanto en la figura 4.15-B se muestra la central nuclear.

De modo su diseño es:

1. Vasija del reactor (RPV).
2. Bombas del reactor interno.
3. Unidad de control del movimiento de las barras de control.
4. Válvulas de aislamiento del vapor principal.
5. Seguridad en válvulas de alivio (SRV).
6. Extintores de seguridad de las válvulas de alivio (SRV).
7. Equipos en la plataforma, en que los que se encuentran en un pozo seco.
8. Sistema de desahogo horizontal.
9. Supresor de balsa.
10. Horno seco de baja expansión.
11. Contención de hormigón anclada a la vasija.
12. Unidades de controles hidráulicos.
13. Varilla de control de unidad hidráulica del sistema de bombas.
14. Intercambiador de calor RTH.
15. Bomba RHR.
16. Bomba HPCF.
17. Turbina de vapor RCIC y bomba --
18. Generador de Diesel.
19. Tratamiento de gas filtrado.
20. Combustible gastado y almacenado en agrupaciones.
21. Plataforma movable o gura de montaje.
22. Bloque de aislamiento.
23. Secado del vapor y piscina de almacenamiento de separación.
24. Grúa puente.
25. Líneas principales de vapor.
26. Tuberías de alimentación de agua.

27. Control de ambiente.
28. Turbina-Generador.
29. Separador de humedad y recalentador.
30. Combustión del generador turbina.
31. Secadora de aire del compresor.
32. Subestación transformadora de la energía eléctrica.

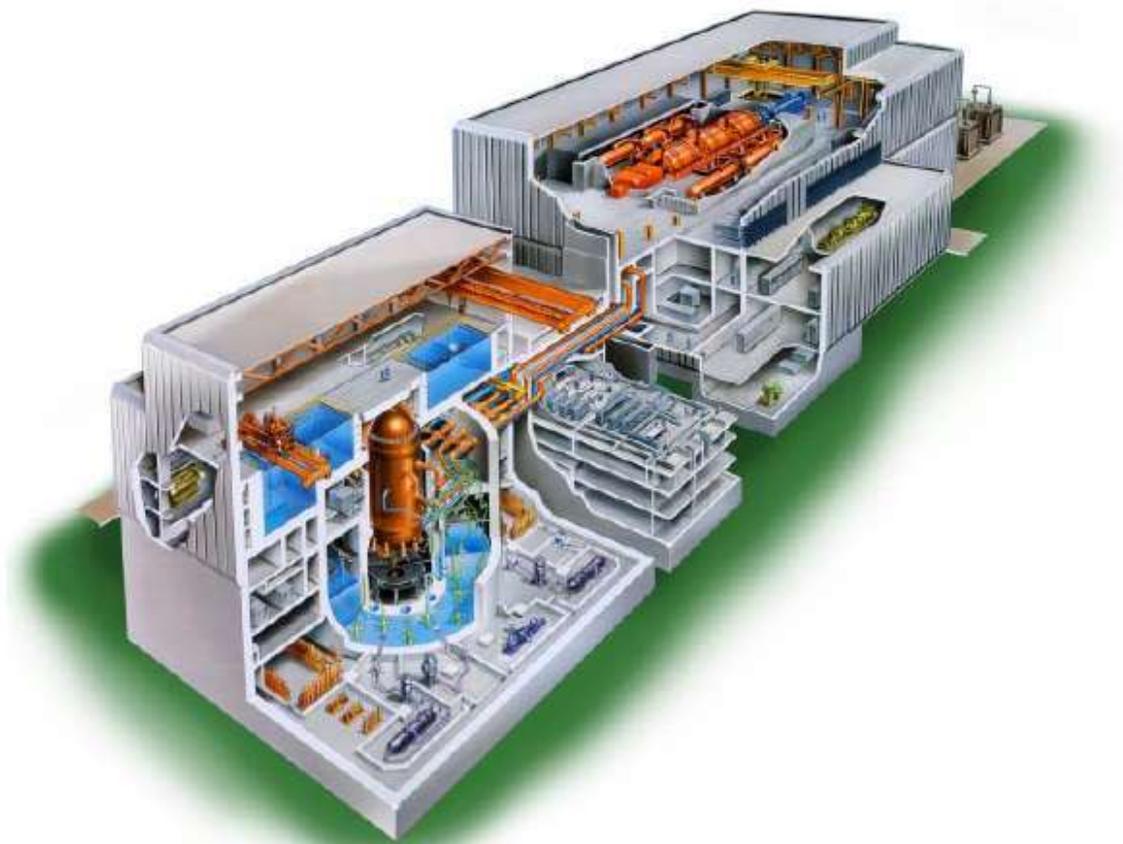


Figura: 4.15-B Central Nuclear Advanced Reactor de Agua en ebullición
(ABWR)

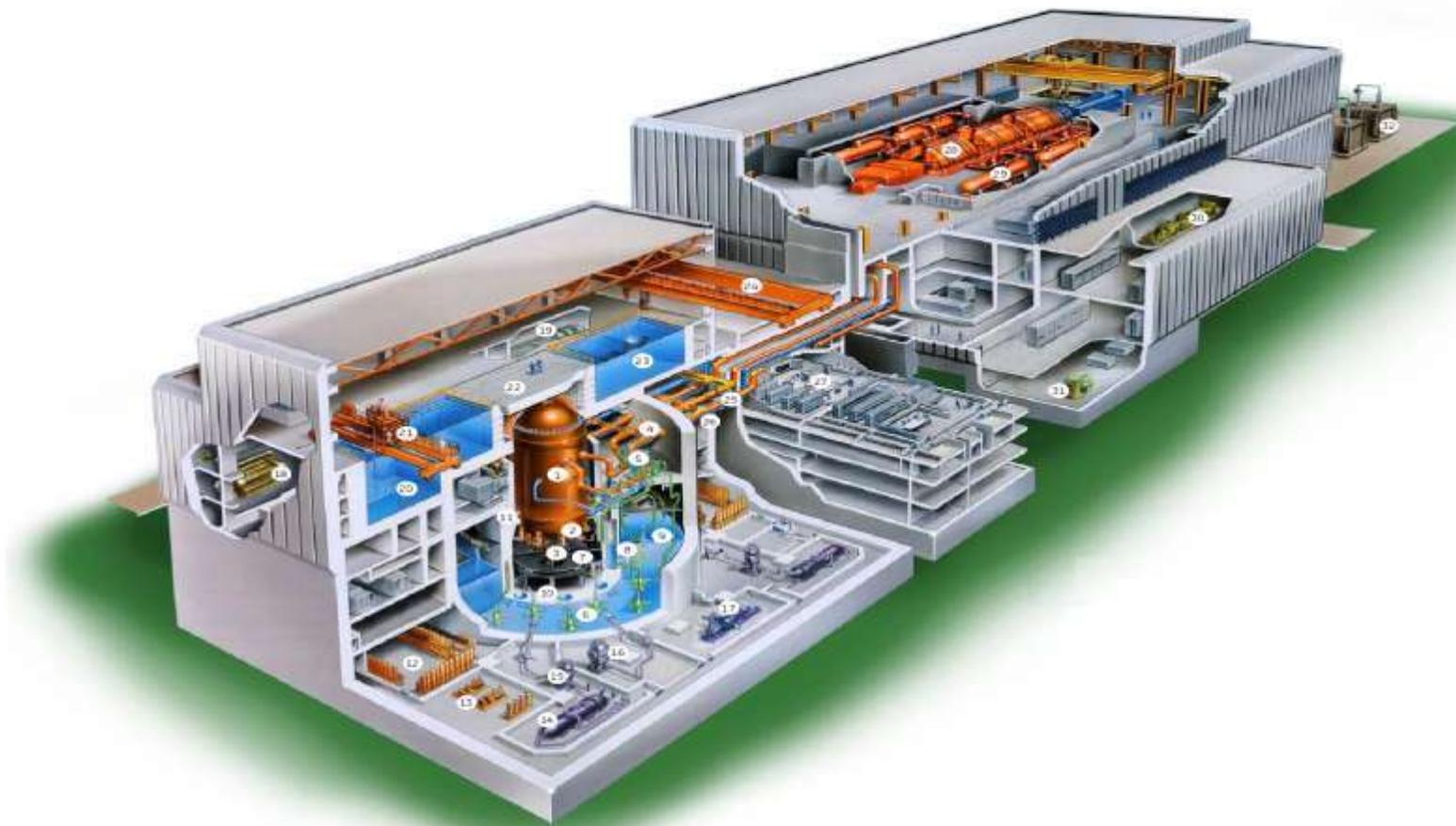


Figura 4.15-A Diseño de la planta

Teniendo los datos técnicos del reactor Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR) como se muestra en la tabla 4.5, de tal manera para comprobar los datos de generación de energía eléctrica, se comprobara matemáticamente:

DATOS TECNICOS DEL REACTOR ADVANCED REACTOR DE AGUA EN EBULLICIÓN (ABWR)	
GENERACION MINIMA DE ENERGIA	1350 MW
GENERACION MAXIMA DE ENERGIA	1460 MW
PRESION DEL VAPOR A LA ENTRADA DE LA TURBINA	72.1 kgf/cm^2
TEMPERATURA	300°C
PRESION A LA SALIDA DEL CONSESADOR	5.09858 kgf/cm^2
PRODUCCION DE VAPOR PARA MINIMA GENERACION DE ENERGIA	13262.4 TON/Hr
PRODUCCION DE VAPOR PARA MAXIMA GENERACION DE ENERGIA	14342.4 TON/Hr
CALIDAD DEL VAPOR EN LA ENTRADA A LA TURBINA	90%
EFICIENCIA DEL TURBOGENERADOR	90%

Tabla 4.5, Datos técnicos del reactor.

Teniendo los datos técnicos de la tabla anterior tenemos que realizar la conversión a Pascales, en tanto tenemos:

$$\begin{aligned}
 P_1 = 72.1 \text{ kgf/cm}^2 &= \left\{ \frac{9.80665 \text{ kgf}}{1 \text{ N}} \left| \frac{1 \text{ cm}^2}{0.0001 \text{ m}^2} \right. \right\} = \frac{(72.1)(9.89665)}{0.0001} \\
 &= \frac{707.059465}{0.0001} = 7070594.65 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

$$7070594.65 P_a = \frac{7070594.65 P_a}{1000} = 7070.59465 kP_a$$

$$7070594.65 P_a = \frac{7070594.65 P_a}{10000000} = 7.0705965 MP_a$$

Teniendo la presión y la temperatura, podemos obtener el valor del agua sobre calentada en la siguiente tabla 4.6:

P = 7.0705965 Mpa			
Temperatura	T	300	°C
Volumen específico	V	0.02737	m ³ /kg
Energía interna	U	2580.5	kJ/kg
Entalpía	h	2772.1	kJ/kg
Entropía	S	5.8133	kJ/kg k

Tabla 4.6 Valores del reactor Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR)

Como presión a la salida del turbina de vapor tenemos;

$$P_2 = 5.0985810648896 \frac{kgf}{cm^2} = \left\{ \frac{9.80665 kgf}{1 N} \left| \frac{1 cm^2}{0.0001 m^2} \right. \right\}$$

$$= \frac{(5.0985810648896)(9.89665)}{0.0001} = \frac{50}{0.0001} = 500000 P_a$$

$$500000 P_a = \frac{500000 P_a}{1000} = 500 kP_a$$

$$500000 P_a = \frac{500000 P_a}{1000000} = 0.5 MP_a$$

Teniendo la presión del agua saturada y teniendo los valores superiores e inferiores podemos obtener el valor exacto, realizando una interpolación de los siguientes datos en la tabla 4.7 y la tabla 4.8 con él valor superior:

Valor menor a 0.5 MP _a del agua saturada			
Temperatura	T	150	°C
Presión	Pa	0.4758	MPa
Energía interna	hf	631.68	<i>kJ/kg</i>
Entalpía	hfg	2114.3	<i>kJ/kg</i>
Entalpía	hs	2746.5	<i>kJ/kg</i>
Entalpía	sf	1.8418	<i>kJ/kg</i>
Entropía	sg	6.8379	<i>kJ/kg k</i>

Tabla 4.7: valores de agua saturada menores a 0.5 MPa.

Valor superior a 0.5 MP _a del agua saturada			
Temperatura	T	155	°C
Presión	Pa	0.5431	MPa
Energía interna	hf	653.24	<i>kJ/kg</i>
Entalpía	hfg	2098.6	<i>kJ/kg</i>

Entalpía	hs	2752.4	kJ/kg
Entalpía	sf	1.8925	kJ/kg
Entropía	sg	6.7935	$\text{kJ}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{K}$

Tabla 4.8: Valores de agua saturada mayor a los 0.5 MPa.

El procedimiento para realizar la interpolación es la aplicando los siguientes pasos, tomando los datos de las tablas tenemos que:

MPa_1	T_1	hf_1	hfg_1	hg_1	sf_1	sg_1
0.4758	150	631.68	2114.3	2746.5	1.8925	6.8379
MPa_2	T_2	hf_2	hfg_2	hg_2	sf_2	sg_2
0.5431	155	653.24	2098.6	2752.4	1.8925	6.7935
Resultado						
MPa	T	hf	hfg	hg	sf	sg
0.5	151.7979198	639.43263	2108.654532	2748.621545	1.860030906	6.821934473

Tabla 4.9: Resultado de la interpolación para determinar el valores de 0.5 MPa.

Procedimiento para saber la temperatura:

$$(0.5431) - (0.4758) = 0.0673$$

$$(0.5431) - (0.5) = 0.0431$$

$$\frac{0.0673}{0.0431} = 1.561484919$$

$$(155) - (150) = 5$$

$$\frac{5}{1.561484919} = 3.202080238$$

$$(155) - (3.202080238) = 151.7979198$$

Para obtener los siguientes resultados, se aplica el mismo procedimiento, pero con nuevos valores para los posteriores incógnitas, de tal modo se realizó el siguiente pseudocódigo en matlab con nombre de interpolación_. El procedimiento de este pseudocódigo, es simple y complejo, basta con darle valores a las incógnitas para hacer la interpolación para un sólo paso, de modo que repite el procedimiento 7 veces para así tener todos los resultados esto acomodados en una simple matriz de 1 x 7, de modo que el pseudocódigo es el siguiente:

```
function interpolacion_  
clc  
  
tic  
  
disp(' Datos menores ')  
  
x= 0.5;  
n = 0.4758;  
hf = 631.68;  
hfg = 2114.3;  
hg = 2746.5;  
sf = 1.8418;  
sg = 6.8379;  
t1= 150;  
  
digits(10)  
valor_menor = vpa([n t1 hf hfg hg sf sg])  
  
disp('Datos mayores ')  
  
n2 = 0.5431;  
hf2 = 653.24;
```

```

hfg2 = 2098.6;
hg2 = 2752.4;
sf2 = 1.8925;
sg2 = 6.7935;
t2= 155;

digits(10)
valor_mayor = vpa([n2 t2 hf2 hfg2 hg2 sf2 sg2])

disp(' RESULTADO ')

digits(10)

R = vpa([ x (t2-((t2-t1)/((n2-n)/(n2-x)))) (hf2-((hf2-hf)/((n2-n)/(n2-
x)))) (hfg2-((hfg2-hfg)/((n2-n)/(n2-x)))) (hg2-((hg2-hg)/((n2-n)/(n2-
x)))) (sf2-((sf2-sf)/((n2-n)/(n2-x)))) (sg2-((sg2-sg)/((n2-n)/(n2-
x))))])

```

La ejecución de este pseudocódigo es el siguiente:

Datos menores

valor_menor = [0.4758, 150.0, 631.68, 2114.3, 2746.5, 1.8418, 6.8379]

Datos mayores

valor_mayor = [0.5431, 155.0, 653.24, 2098.6, 2752.4, 1.8925, 6.7935]

RESULTADO

R=[0.5, 151.7979198, 639.43263, 2108.654532, 2748.621545, 1.860030906, 6.821934473]

>>

Teniendo los resultados de la interpolación, pasamos a calcular la potencia eléctrica generada, de modo que utilizaremos la siguiente fórmula:

$$Pot = \dot{m}(h_1 - h_2)tg \quad (4.7)$$

Para aplicar la fórmula directa tenemos que encontrar el valor de h_2 para esto se aplica el siguiente procedimiento para encontrar el valor deseado:

$$S_1 = S_2 = SF_2 + sf g_2 X_2 \quad (4.8)$$

De tal modo de la ecuación (4.8) despejamos X_2 para encontrar el valor de h_2 de tal manera tenemos que:

$$\begin{aligned} X_2 &= \frac{S_1 - sf_2}{sf g_2} = \frac{S_1 - sf_2}{Sg_2 - sf_2} = \frac{(5.8133) - (1.860030906)}{(6.821934473) - (1.860030906)} = \frac{3.953269094}{4.961903567} \\ &= 0.7967242895 \end{aligned}$$

Teniendo el valor de X_2 podemos conocer el valor de h_2 para esto aplicaremos la siguiente fórmula:

$$h_2 = hf_2 + X_2 hf g_2$$

$$h_2 = (639.43263) + (0.7967242895)(2108.654532)$$

$$h_2 = (639.43263) + (1680.016284) = 2319.448914$$

Teniendo los datos completos, pasamos a calcular la potencia generada, por lo tanto iniciaremos con los cálculos para la generación mínima, teniendo como datos:

$$P_1 = 7.0705965 MP_a$$

$$T = 300^\circ C$$

$$V_1 = 0.02737$$

$$u_1 = 2580.5$$

$$h_1 = 27772.1$$

$$S_1 = 5.8133$$

$$\dot{m} = 13262.4 \text{ } \frac{\text{tone}}{\text{Hr}}$$

$$tg = 90\% = 0.9$$

Calidad del vapor a la entrada de la turbina = 90% = 0.9

Posteriormente realizaremos la conversión del flujo de vapor \dot{m}_v , es decir, la conversión de la producción de vapor con su calidad del vapor a la entrada de la turbina:

- Como primer paso multiplicaremos la producción de vapor con la calidad de vapor a la entrada de la turbina, por lo tanto, tenemos:

$$\dot{m}_v = (13262.4 \text{ } \frac{\text{ton}}{\text{Hr}})(0.9) = 11936.16 \text{ } \frac{\text{ton}}{\text{Hr}}$$

Por lo tanto, el flujo de vapor \dot{m} es:

$$\dot{m} = 11936.16 \text{ } \frac{\text{ton}}{\text{Hr}} = \left\{ \frac{1000_{\text{kg}}}{1_{\text{tone}}} \left| \frac{1_{\text{Hr}}}{3600_{\text{s}}} \right. \right\} = \frac{(13262.4)(1000)}{3600} =$$

$$\frac{11936160}{3600} = 3315.6 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Sustituimos los valores anteriores en la fórmula 4.7, teniendo como resultado:

$$Pot = \dot{m}(h_1 - h_2)tg$$

$$Pot = ((3315.6)((2772.1) - (2319.448914)))(0.9)$$

$$Pot = ((3315.6)(452.6510862))(0.9)$$

$$Pot = (1500809.941)(0.9)$$

$$Pot = 1350728.947 \frac{Kg}{seg} = Kw$$

$$pot = \frac{1350728.947 Kw}{1000} = 1350.728947 Mw$$

La potencia mínima generada es de 1350.728947 Mw, por lo tanto, calcularemos para la máxima generación de energía eléctrica, cambiando únicamente la producción de vapor que entra a la turbina en tanto tenemos que:

$$P_1 = 7.0705965 MP_a$$

$$T = 300^\circ C$$

$$V_1 = 0.02737$$

$$u_1 = 2580.5$$

$$h_1 = 27772.1$$

$$S_1 = 5.8133$$

$$\dot{m} = 14342.4 \text{ kg/s}$$

$$tg = 90\% = 0.9$$

Calidad del vapor a la entrada de la turbina = 90% = 0.9

Sustituimos los valores anteriores en la formula teniendo como resultado:

- Como primer paso multiplicaremos la producción de vapor con la calidad de vapor a la entrada de la turbina:

$$\dot{m}v = (14342.4 \text{ ton}/\text{Hr})(0.9) = 12908.16 \frac{\text{ton}}{\text{Hr}}$$

Por lo tanto, el flujo de vapor \dot{m} es:

$$\dot{m} = 12908.16 \frac{\text{ton}}{\text{Hr}} = \left\{ \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tone}} \left| \frac{1 \text{ Hr}}{3600 \text{ s}} \right. \right\} = \frac{(12908.16)(1000)}{3600} =$$

$$\frac{12908160}{3600} = 3585.6 \text{ kg/s}$$

$$Pot = \dot{m}(h_1 - h_2)tg$$

$$Pot = ((3585.6)((2772.1) - (2319.448914)))(0.9)$$

$$Pot = ((3585.6)(452.6510862))(0.9)$$

$$Pot = (1623025.735)(0.9)$$

$$Pot = 1460723.161 \frac{\text{Kg}}{\text{seg}} = \text{Kw}$$

$$pot = \frac{1460723.161 \text{ Kw}}{1000} = 1460.723161 \text{ Mw}$$

De tal modo su diagrama simplificado del la central nucleoelectrica, Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR), se muestra en la figura 4.16.

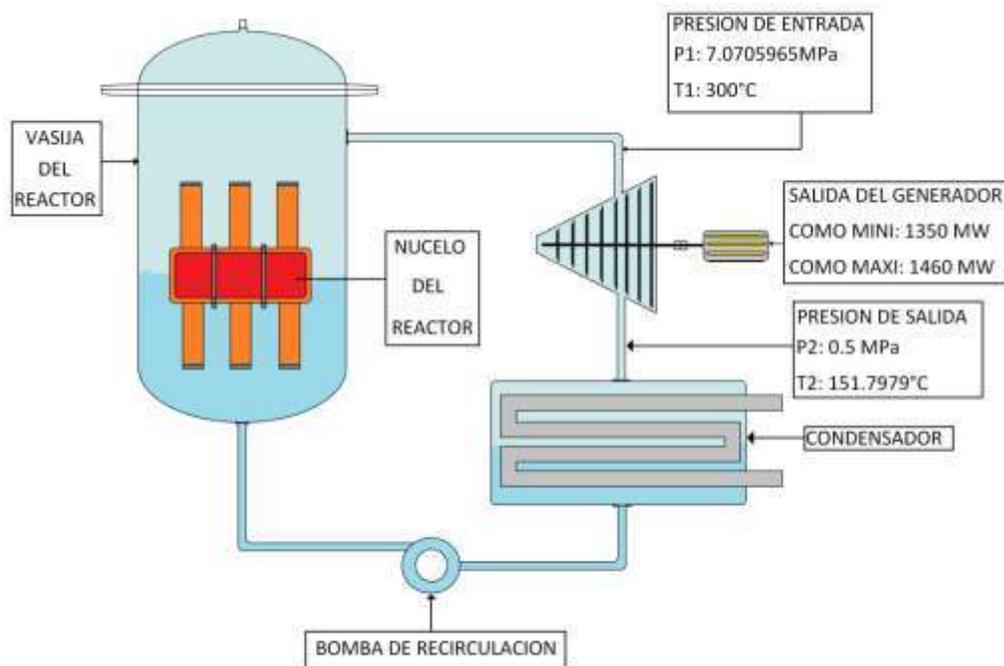


Figura 4.16: Simplificación del reactor, Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR).

Teniendo los resultados de generación de energía eléctrica máxima y mínima pasamos a las preguntas frecuentes, como: partiendo de tiempo cero a generar la mínima y máxima generación de energía eléctrica cuanto tiempo tendremos que esperar? Para esta pregunta se tiene como parámetros varias consideraciones como:

- El tiempo de respuesta de la planta depende de los elementos de control, es decir se hacen varias pruebas antes y mediciones antes de poner en marcha el reactor, esto tarda aproximadamente 2 horas como mínimo, teniendo la referencia si ya se ha puesto en funcionamiento, no obstante si es la primera prueba esto puede tardar varias horas en mediciones de temperatura y presiones dentro y fuera del reactor.

- El tiempo de respuesta después de la puesta en marcha y verificando el comportamiento del reactor, pasa toda su atención a la calidad del agua, esto para tener un vapor adecuado, hacia la turbina y tuberías.
- La calidad del agua debe de ser tratada para reducir su salinidad y evitar sarro en las tuberías.

4.7.1 COMPARACION CON UNA PLANTA GEOTERMoeLECTRICA INSTALADA EN EL PAIS

Para llevar a cabo la comparación propuesta, disponemos de un yacimiento geotérmico, para la generación de energía eléctrica, esto en comparación la central nuclear El Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR), estos datos fueron obtenidos de una central geotermoeléctrica instalada en nuestro país, teniendo los siguientes datos:

- Presión del vapor en la boca del pozo; $p_1 = 1.5 \text{ MPa}$
- Producción de vapor de los pozos; $mv = 2000 \text{ ton/Hr}$
- Calidad del vapor en la boca del pozo; 30%
- Eficiencia del turbo generador; 81%
- Datos de tablas de agua sobrecalentada, para determinar; volumen específico, energía interna, entalpía y entropía, de tal manera se utilizo el pseudocódigo para tener los datos de la tabla 4.11.

MPa_1	T_1	hf_1	hfg_1	hg_1	sg_1
1.040	195.07	0.14084	2592.8	2790.0	6.8379
MPa_2	T_2	hf_2	hfg_2	hg_2	sg_2
1.60	201.41	0.12380	2596.0	2794.0	6.4218
RESULTADO					
MPa	T	hf	hfg	hg	sg
1.5	198.24	0.13232	2594.4	2792.0	6.44555

Tabla 4.10: Datos de la presión de 1.5 MPa de agua sobrecalentada

- Presión del vapor a la salida de la turbina; $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$
- Datos de tablas de agua saturada a la salida de la turbina de vapor como se muestra en la tabla 4.11:

MPa_2	T_2	hf_2	hfg_2	hg_2	sf_2	sg_2
0.1	99.63	417.36	2258.0	2675.5	1.3026	7.3595

Tabla 4.11 Valores del Agua saturada a una presión de 0.1 MPa.

De modo que teniendo los datos procedemos a calcular la energía eléctrica, generada por el tipo de la central, geotérmica, tenemos que:

- Como primer paso multiplicaremos la producción de vapor con la calidad de vapor a la entrada de la turbina, por lo tanto tenemos:

$$\dot{m}_v = (2000 \text{ ton}/\text{Hr})(0.3) = 600 \frac{\text{ton}}{\text{Hr}}$$

Por lo tanto, el flujo de vapor \dot{m} es:

$$\dot{m} = 600 \frac{\text{ton}}{\text{Hr}} = \left\{ \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tone}} \left| \frac{1 \text{ Hr}}{3600 \text{ s}} \right. \right\} = \frac{(600)(1000)}{3600} =$$

$$\frac{600000}{3600} = 166.66666 \text{ kg/s}$$

Teniendo el flujo de vapor, procederemos a calcular la potencia y la incógnita que hace falta:

$$Pot = \dot{m}(h_1 - h_2)tg$$

Para aplicar la fórmula directa tenemos que encontrar el valor de h_2 para esto se aplica el siguiente procedimiento para encontrar el valor deseado:

$$S_1 = S_2 = SF_2 + sf g_2 X_2$$

De la fórmula anterior despejamos X_2 para encontrar el valor de h_2 de tal manera tenemos que:

$$\begin{aligned} X_2 &= \frac{S_1 - sf_2}{sf g_2} = \frac{S_1 - sf_2}{Sg_2 - sf_2} = \frac{(6.44555) - (1.3026)}{(7.3594) - (1.3026)} = \frac{5.14295}{6.0568} \\ &= 0.8491199974 \end{aligned}$$

Teniendo el valor de X_2 podemos conocer el valor de h_2 para esto aplicaremos la siguiente fórmula:

$$h_2 = hf_2 + X_2 hf g_2$$

$$h_2 = (417.36) + (0.8491199974)(2258.0)$$

$$h_2 = (417.36) + (1917.312954) = 2334.672954$$

Considerando, todos los datos pasamos a determinar la energía eléctrica generada, esto sustituyendo los valores en la fórmula:

$$Pot = \dot{m}(h_1 - h_2)tg$$

$$Pot = ((166.66666)((2792.0) - (2334.672954)))(0.81)$$

$$Pot = ((166.66666)(457.327046))(0.81)$$

$$Pot = (76221.17128)(0.81)$$

$$Pot = 61739.14874 \frac{Kg}{seg} = Kw$$

$$pot = \frac{61739.14874 \text{ Kw}}{1000} = 61.73914874 \text{ Mw}$$

De tal modo su diagrama simplificado de este tipo de central denominado geotérmica se muestra a continuación en la figura 4.17:

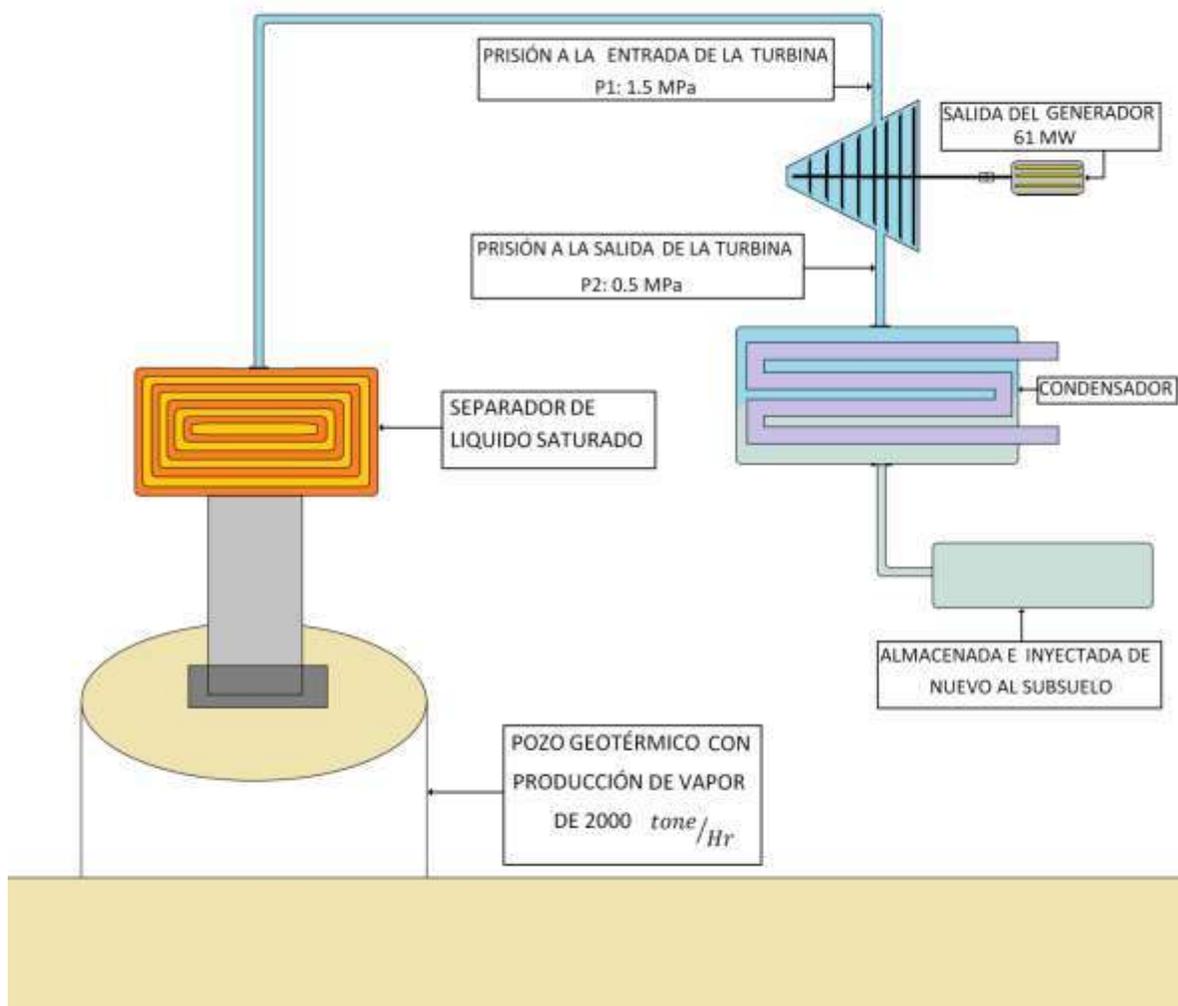


Figura 4.17: Esquema simplificado de una central geotérmica.

4.7.2 COMPARACION CON UNA PLANTA TERMoeLECTRICA DE Nominada ciclo con condensador e instalada en el pais

Una central termodinámica denominada de ciclo con condensador, es decir cómo se ilustra en la figura 4.18, su funcionamiento fundamental, se basa en un generador de vapor y claramente una turbina de vapor, y el condensador, finalmente la bomba de recirculación hacia el generador de vapor, de tal manera se tiene datos de una planta instalada en nuestro país con estas características:

- Presión del vapor a la entrada de la turbina; $p_1 = 5 \text{ MPa}$
- Producción de vapor; $\dot{m}_v = 6000 \text{ ton}/\text{Hr}$
- Calidad del vapor; 80%
- Eficiencia del turbo generador; 85%
- Datos de tablas de agua sobrecalentada, para determinar; volumen específico, energía interna, entalpía y entropía. Así fue necesario realizar una interpolación y reutilizando el seudocódigo anterior tenemos la tabla 4.12:

MPa_1	T_1	hf_1	hfg_1	hg_1	sg_1
5	400	0.05781	2906.6	3195.7	6.6459

Tabla 4.12; Valores de agua sobrecalentada

- Presión del vapor a la salida de la turbina; $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$
- Datos de tablas de agua saturada como se muestra en la figura 4.13:

MPa_2	T_2	hf_2	hfg_2	hg_2	sf_2	sg_2
0.1	99.63	417.36	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594

Tabla 4.13, Valores de agua sobre calentada

De modo que teniendo los datos procedemos a calcular la energía eléctrica, generada por el tipo de la central, geotérmica, tenemos que:

- Como primer paso multiplicaremos la producción de vapor con la calidad de vapor a la entrada de la turbina, por lo tanto, tenemos:

$$\dot{m}v = (6000 \text{ ton}/\text{Hr})(0.80) = 4800 \frac{\text{ton}}{\text{Hr}}$$

El flujo de vapor \dot{m} es:

$$\dot{m} = 4800 \frac{\text{tone}}{\text{Hr}} = \left\{ \frac{1000_{\text{kg}}}{1_{\text{tone}}} \left| \frac{1_{\text{Hr}}}{3600_{\text{s}}} \right. \right\} = \frac{(4800)(1000)}{3600} =$$

$$\frac{4800000}{3600} = 1333.33333 \text{ kg/s}$$

Teniendo el flujo de vapor, procederemos a calcular la potencia y la incógnita que nos hace falta:

$$Pot = \dot{m}(h_1 - h_2)tg$$

Para aplicar la formula 4.7 directamente tenemos que encontrar el valor de h_2 para esto se aplica el siguiente procedimiento para encontrar el valor deseado:

$$S_1 = S_2 = SF_2 + sf g_2 X_2$$

De la fórmula anterior despejamos X_2 para encontrar el valor de h_2 de tal manera tenemos que:

$$X_2 = \frac{S_1 - sf_2}{sf g_2} = \frac{S_1 - sf_2}{Sg_2 - sf_2} = \frac{(6.6459) - (1.3026)}{(7.3594) - (1.3026)} = \frac{5.3433}{6.0568}$$

$$= 0.8821985207$$

Teniendo el valor de X_2 podemos conocer el valor de h_2 para esto aplicaremos la siguiente fórmula:

$$h_2 = hf_2 + X_2 hfg_2$$

$$h_2 = (417.36) + (0.8821985207)(2258.0)$$

$$h_2 = (417.36) + (1992.00426) = 2409.36426$$

De tal manera teniendo, todos los datos pasamos a determinar la energía eléctrica generada, esto sustituyendo los valores en la fórmula 4.7:

$$Pot = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

$$Pot = ((1333.33333)((3195.70) - (2409.36426)))(0.81)$$

$$Pot = ((166.66666)(786.3357403))(0.81)$$

$$Pot = (1048447.628)(0.85)$$

$$Pot = 891180.4834 \frac{Kg}{seg} = Kw$$

$$pot = \frac{891180.4834 Kw}{1000} = 891.1804834 Mw$$

De tal manera su diagrama simplificado de una central termoeléctrica convencional de ciclo con condensador se muestra en la siguiente figura 4.18, de tal manera el combustible utilizado puede ser diferente de tal modo ese estema sería diferente, para este esquema es la quema de combustible de gas natural.

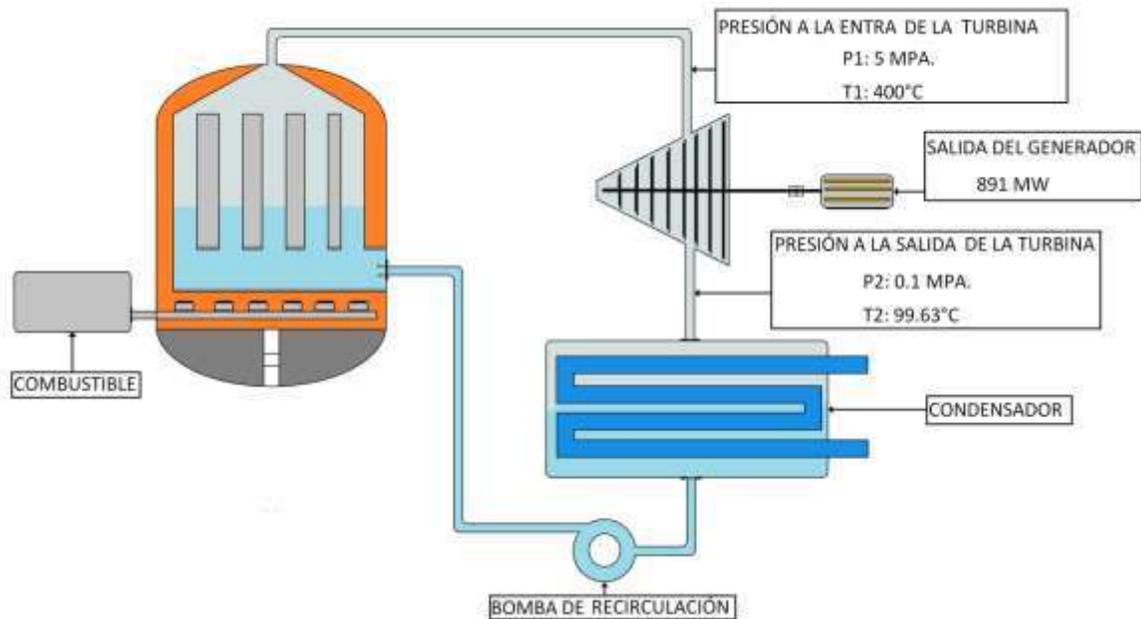


Figura 4.18: Esquema simplificado de una central termoeléctrica con ciclo de condensador.

4.8 RESUMEN DEL PROYECTO

Como se mencionó anteriormente, el uso de combustibles fósiles o derivados de petróleo, y estos empleados para la generación de energía eléctrica por medio, de diferentes sistemas de generación, emiten grandes cantidades de contaminación hacia el planeta, , es decir las emisiones de CO₂ para la proporción en $k_g / KW - H$ para el gas natural es de 0.44, para la biomasa(leña, madera) 0.82 y el carbón de 1.45, no obstante la energía generada por los diversos sistemas empleados, tienen como resultado, muy baja generación de energía eléctrica, comparada con la central nuclear, Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR), teniendo como resultado una gran generación de energía eléctrica y 0 emisiones de CO₂ en funcionamiento.

Haciendo referencia a la cantidad de combustible utilizado en una central nucleoelectrica, para un periodo de un año y éste generando los 365 días del año, esto sin

sacar de operación a la planta, utilizaría 27 toneladas de combustible, que en su comparación con una central carboeléctrica utilizaría 3 950,000 toneladas de combustible, y en comparación con el material combustóleo utilizaría 10540000 barriles de combustible, de modo que una central termoeléctrica convencional, utilizaría 1668 millones de metros cúbicos de gas, estas tres referencias nos hacen analizar el por qué de la generación de la energía eléctrica por medio de una central nuclear.

4.9 RIESGOS DE CONTAMINACIÓN

Los riesgos de contaminación radiactiva, para este tipo de centrales nucleares, es un tema a tratar, no obstante hay diversos métodos de aislamiento para la radiactividad, de tal modo el combustible gastado y elementos contaminados se compactan y se almacenan en un recipiente metálico, como se ilustra en la figura 4.19:



Figura 4.19: Combustible gastado y materiales contaminados con radiación.

Posterior mente son sellados y transportados para ser sepultados, no obstante el combustible y solo él, es sellado y enviado a su reproceso tal como se muestra en la figura 4.20:



Figura 4.20 Transportando el combustible utilizado para su reutilización.

Finalmente el material y los elementos contaminados por la radiactividad, tienen un proceso de sellado y almacenado, de tal modo este sistema se emplea para todas las centrales del todo el mundo, tal como se muestran en las figuras 4.21 y 4.22 en que esta última es la forma como es el llenado.

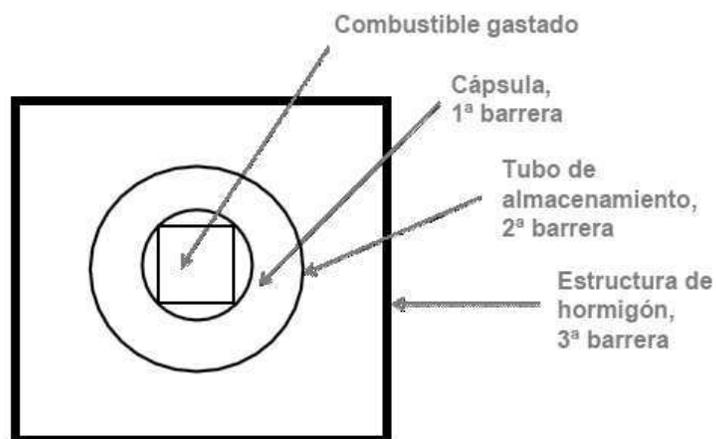


Figura 4.21 sistema empleado en todo el mundo para el combustible o elementos contaminados por radiactividad.



Figura 4.22 sistema de aislamiento del material radioactivo.

No obstante desde 1956 se inició en México el control sobre la utilización y disposición de isótopos radiactivos, esto y para tal efecto se creó la Comisión Nacional de Energía Nuclear. Actualmente, las Secretarías de salud y Energía son las autoridades competentes en este ámbito.

De tal manera los desechos radioactivos generados por aplicaciones no energéticas, esto como la medicina, la industria y la investigación, realizada en instituciones y empresas de todo el país, son resguardados en el Centro de Almacenamiento de Desechos Radioactivos denominados (Cader), localizado en el kilómetro 18.5 de la carretera Tizayuca-Otumba, en el Estado de México, El Instituto nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) es el responsable de la operación del Cader, así como de la vigilancia de dos confinamientos de desechos radioactivos –actualmente cerrados- Localizados en Chihuahua. Laguna Verde, en Veracruz, cuenta con sus propios depósitos a un constado de la planta. Los cuales son:

- **Almacén definitivo de la piedra:** se ubica en el Rancho El Vergel, a 55 Kilómetros de Ciudad Juárez, Chihuahua. En 1984 se confinaron aproximadamente 21000 m^3 de materiales metálicos y tierra contaminada con un registro de 444 curios de cobalto 60. Para el 2005 la actividad había disminuido a 28 curios. Declarada en riesgo institucional (clausurada), esta instalación permanecerá cerrada durante 40 años.
- **Almacén definitivo la peña blanca:** situado a 47 Kilómetros al norte de Ciudad Aldama, Chihuahua. Están depositados de forma definitiva 65000 toneladas de estériles de minería de la minería del uranio (parte de la roca extraída, con muy bajo contenido de este) generadas durante la operación y clausura de la planta de beneficio de concentración de uranio. Se realiza actividades de vigilancia y mantenimiento en el lugar, declarado en resguardo institucional (clausurado). Este sitio es el punto original de procedencia del uranio, donde se generaron los estériles, por lo que en la región existen niveles de radiación muy por encima de los catalogados como naturales.

Capítulo 5

Conclusión y Recomendaciones

5.1 INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es fundamental para el desarrollo de la humanidad, no obstante, la humanidad ha creado diferentes modos de generación de energía eléctrica, este es el caso de la central nucleoelectrica, mejor conocida en el mundo como, central nuclear, si el simple hecho de escuchar la palabra “nuclear” pone a muchos a dudar en que si es seguro este tipo de generación de energía, no obstante y en nuestros tiempo, este tipo de centrales es confiable en su totalidad, respaldado y aprobado por la Comisión Reguladora de la Energía nuclear (NRC), para nuestro tipo de reactor: El Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR).

El estudio NUREG-150 es el estudio de riesgos de accidentes severos: Una evaluación en cinco plantas comerciales en Estados Unidos de Norte América, sobre las plantas de energía nuclear, teniendo como resultado una frecuencia de incidencia de 5×10^{-5} por año, es decir, un incidente en el núcleo del reactor dentro de 20 años, suponiendo que hay 500 reactores en un uso en todo el mundo, y teniendo la misma probabilidad estadística de frecuencias de incidencia, uno de los posibles incidentes en el núcleo del reactor , espera que ocurra en algún lugar del mundo cada 40 o 100 años respectivamente.

Durante el terremoto del 2011 en la costa del Japón, en que las centrales nucleares de Fukushima sufrieron grandes daños principalmente, en tres de sus seis reactores, no obstante después de la emergencia y estudiado el daño, obtuvieron como resultado que la falla fue principalmente en el sistema de refrigeración del núcleo, y los reactores afectado fueron: Westinghouse con tipo de reactor BWR-3 que hay dentro del Mark I de contención. No obstante, el resultado dado de la probabilidad estadística de frecuencias

de incidencia de daño en el núcleo fue entre el 10^{-4} y 10^{-7} de modo que este estudio se había dado antes de lo ocurrido por el terremoto.

De tal modo la empresa renombrada General Electric (GE), y en su división de generación de energía eléctrica, por la energía nuclear, cuenta con la solicitud y la certificación de normas de diseño, para el reactor avanzado de agua en ebullición (ABWR), de tal manera que estas innovaciones, a los reactores de agua en ebullición (AWR), fue en un comienzo desde el 29 de septiembre de 1987, al 31 de marzo del 1989, en los Estados Unidos de Norte América, (EE.UU), teniendo como resultado la certificación de la norma final de diseño el 12 de mayo de 1997, por Comisión de Regulación Nuclear (NCR).

De tal modo en el mundo se están construyendo nuevas centrales nucleares, aprobadas por la Comisión de Regulación Nuclear, tal como se muestra en la tabla 5.1:

Países con proyectos a construcción o entrega de centrales nucleares.

LUGAR	REACTOR	TIPO	CAPACIDAD EN MW	PUESTA EN MARCHA
ARGENTINA	Atucha2	PHWR	692	2010
BULGARIA	Belen 1	PWR	935	SIN DATOS
BULGARIA	Belen 2	PWR	935	SIN DATOS
CHINA	Fanqjashan 1	PWR	1000	SIN DATOS
CHINA	Fuqing 1	PWR	1000	SIN DATOS
CHINA	Fuqing 2	PWR	1000	SIN DATOS
CHINA	Hongyanhe 1	PWR	1000	SIN DATOS
CHINA	Linqao 3	PWR	1000	2010
CHINA	Linqao 4	PWR	1000	SIN DATOS
CHINA	Ninqde 1	PWR	1000	SIN DATOS
CHINA	Ninqde 2	PWR	1000	SIN DATOS

CHINA		Qinshan 2-3	PWR	610	2010
CHINA		Qinshan 2-4	PWR	610	2011
CHINA		Sanmen 1	PWR	1000	SIN DATOS
CHINA		Yangjinq	PWR	1000	SIN DATOS
COREA SUR	DEL	Shin-Kori 1	PWR	960	2010
COREA SUR	DEL	Shin-Kori 2	PWR	960	2011
COREA SUR	DEL	Shin-Kori 3	PWR	1340	SIN DATOS
COREA SUR	DEL	Shin Wolsonq	PWR	960	2011
COREA SUR	DEL	Shin Wolsonq	PWR	960	2012
FINLANDIA		Olkikuoto	PWR	1600	SIN DATOS
FRANCIA		Flamanville 3	PWR	1600	2012
INDIA		Kaiqa 4	PHWR	202	2009
INDIA		Kudankulam 1	PWR	917	2009
INDIA		Kudankulam 2	PWR	917	2010
INDIA		PFBR	FBR	470	SIN DATOS
INDIA		Rajasthan 5	PHWR	202	2009
INDIA		Rajasthan 6	PHWR	202	2009
IRAN		Busher 1	PWR	915	2009
JAPON		Shimane 3	ABWR	1325	SIN DATOS
JAPON		Tomari 3	PWR	866	SIN DATOS
PAKISTÁN		Chasnupo 2	PWR	300	2011
RUSIA		Beloyarky 4	FBR	750	SIN DATOS
RUSIA		Kalinin 4	PWR	950	SIN DATOS
RUSIA		Kursk 5	LWGR	950	SIN DATOS

RUSIA	Leningrad 2-1	PWR	925	SIN DATOS
RUSIA	Novovoronezh 2-1	FBR	32	SIN DATOS
RUSIA	Severodvinsk 1	PWR	32	SIN DATOS
RUSIA	Severodvinsk 2	PWR	32	SIN DATOS
RUSIA	Voqodonsk 2	PWR	950	SIN DATOS
TAIWÁN	Lunqmen 1	ABWR	1300	SIN DATOS
TAIWÁN	Lunqmen 2	ABWR	1300	SIN DATOS
UCRANIA	Khmelnitski	PWR	950	2015
UCRANIA	Khmelnitski	PWR	950	2016
ESTADOS UNIDOS EE.UU	Watts Bar 2	PWR	1165	SIN DATOS

Tabla 5.1 Centrales nucleares en el mundo.

Teniendo como datos de la tabla anterior, nos podemos dar cuenta en que el mundo confía en las centrales nucleares, y de tal manera podemos concluir que se logró en su totalidad el proyecto de tesis, este contribuye al estado del arte de centrales nucleoelectricas para estudiantes de esta facultad

5.2 RECOMENDACIONES

La ubicación de la planta y las características del Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR), nos brinda confianza y seguridad, en que una central nuclear, no tendrá fallas inesperadas, esto por la Comisión Reguladora de la Energía nuclear (NRC), ni riesgos de algún sismo, esto haciendo referencia al manual de diseño de Obras civiles (Diseño por Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad, por otro lado, los conflictos ó atentados terroristas hacia las plantas de generación de energía eléctrica en el país, no se han dado, y esto da como resultado aún más confianza en la instalación de la central nucleoelectrica, en nuestro país, de tal manera el personal que trabajara dentro y fuera de la central, debe de ser certificado y altamente capacitado, para laborar en dicha planta.

La inversión para esta planta es rentable, a comparación con las decenas de centrales que se están instalando en el país, y la recuperación del capital se verá reflejado en aproximadamente 5 años, a partir de la puesta en marcha de la central nuclear Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR).

REFERENCIAS

Revista:

[Aguirre Gil 2004]

Soledad Aguirre Gil, "Las nuevas ventajas de la energía nuclear", *Muy Interesante*, volumen No.11, páginas 108, Octubre, 2004.

Libros:

[Enriquez Harper]

Gilberto Enriquez Harper, *Elementos de centrales eléctricas I*, México: Limusa México.

[Jacobowitz]

Henry Jacobowitz, *Eléctricidad, Enciclopedia Técnica Simplificada: México, Compañía General De Ediciones*

[Yunusa]

Yunusa A. çenegel Michael A. Boles, *Termodinámica (Cuarta edición)*; México, Mc Graw Hill

[H. Shurr]

Sam H. Shurr y Jacob Marschak, *Aspectos económicos de la energía atómica*; México; Fondo de la cultura económica

[Rizhkin]

V.Ya.Rizhkin, *Centrales termo eléctricas: México; Mir. Moscú*

Artículos:

[GREENPEACE]

Helmut Hirsch, Oda Becker, Los peligros de los reactores nucleares (los riesgos continuos que entraña la tecnología nuclear en el siglo XXI)

Hazte socio de Geenpeace mayo 2007 www.greenpeace.es

[CENTRALES NUCLEARES]

*José Manuel Arroyo Sánchez, Área de Ingeniería Eléctrica,
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones*

Universidad de Castilla – La Mancha

[LA NUCLEOELECTRICA UNA OPORTUNIDAD PARA MEXICO]

Rafael Fernández de la garza, César F. García

Academia de Ingeniería de México 2009.

[ENRESA]

LA GESTION DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS EN ESPAÑA

Cámara de comercio e industria de Zaragoza 27 de enero del 2011

Jorge Lang-Lenton

Director División de Administración

[ENERGÍA NUCLEAR ANALISIS Y PROSPECTIVA]

José Emeterio Gutiérrez

Vicepresidente Regional

Westinghouse Electric, LLC 2009

[INTRODUCCION A LOS REACTORES NUCLEARES]

Foro Nuclear, Foro de la Industria Nuclear Española 2008.

[NUEVOS DISEÑOS, EXPERIENCIA CONTRASTADA]

GE HITACHI-NUCLEAR ENERGY 2009

[ABWR Advanced Reactor de Agua en ebullición]

GE ENERGY/ NUCLEAR

IMAGINATION AT WORK

Internet:

[Google 2010]

*Google. Pagina buscador web. 29 de Noviembre del 2010:
<http://www.google.com>*

[CFE 2010]

*Comisión Federal De Electricidad: 12 de noviembre del 2010:
<http://www.cfe.gob.mx>*

[Wikipedia 2010]

*Wikipedia: enciclopedia web: 29 de noviembre del 2010:
<http://www.es.wikipedia.org.com>*

[foronuclear 2010]

Foro de la industria Nuclear Española. Foro nuclear. 23 de noviembre del 2010.

http://www.foronuclear.org/energia_nuclear_mundo.jsp

[monografías 2010]

Monografía, Enciclopedia libre, 20 de noviembre del 2010:

<http://www.monografias.com>

Lista de Figuras

<i>Figura 1.1 Diagrama de bloques de la generación.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.1 Átomo de hidrógeno.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.2 Átomo de uranio.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.3 Icono utilizado para señalamiento de presencia de sustancias radiactivas.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.4 Los diferentes tipos de radicación y su poder de penetración.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.5 Representación de una reacción de fusión entre deuterio y tritio teniendo como resultado Helio.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.6 Fisión nuclear.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.1 Reactor de agua pesada (PWR).....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.2 Reactor de agua en ebullición (BWR).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura3.3 Reactor Magnox.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.4 Reactor Refrigerado por Gas.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.5 Reactor Refrigerado por Aire.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.6 Reactor de Agua Pesada.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.7 Reactor de Sodio-Grafito.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.8 Reactor Reprodutor.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.9 Reactor Homogéneo.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.10 Países que cuentan con reactores nucleares para el año 2009.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.1 Advertencia radioactiva.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.2 Micro-nuclear Toshiba.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.3 Generación de energía eléctrica en el país.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.4 Promedio de costos de generación de energía eléctrica en México..</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.5 Zonas sísmicas de la Republica Mexicana.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.6 Zona segura para la ubicación de la central nuclear.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura 4.7 Uranio mineral.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.8 Uranio triturado con mezclado con óxido, torneándose de un color amarilloso.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.9 Proceso de enriquecimiento del uranio.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.10 Pellets mejor conocido como combustible nuclear encapsulado en pequeños cilindros cerámicos.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.11 Etapas del combustible nuclear.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.12 porcentaje de extracción de uranio mineral para el 2007.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.13 Costos de producción de la energía eléctrica.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura: 4.14 El Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR).....</i>	<i>90</i>
<i>Figura: 4.15-B Central Nuclear Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.15-A Diseño de la planta.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.16: Simplificación del reactor, Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.17: Esquema simplificado de una central geotérmica.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.18: Esquema simplificado de una central termoeléctrica con ciclo de condensador.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 4.19: Combustible gastado y materiales contaminados con radiación.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4.20 Transportando el combustible utilizado para su reutilización.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.21 sistema empleado en todo el mundo para el combustible o elementos contaminados por radiactividad.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.22 sistema de aislamiento del material radioactivo.....</i>	<i>116</i>

Lista de Tabla

<i>Tabla 2.1 Diferentes manifestaciones del hidrógeno.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2.2 Unidades de energía.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3.1 Países que cuentan con reactores nucleares.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 4.1 periodo de desintegración radioactiva.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4.2 Costo de generación.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.3 Etapas de fabricación.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4.4 Precios de generación.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 4.5. Datos técnicos del reactor.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 4.6 Valores del reactor Advanced Reactor de Agua en ebullición (ABWR).....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 4.7: valores de agua saturada menores a 0.5 MPa.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4.8: Valores de agua saturada mayor a los 0.5 MPa.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4.9: Resultado de la interpolación para determinar el valores de 0.5 MPa.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 4.10: Datos de la presión de 1.5 MPa de agua sobrecalentada.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 4.11 Valores del Agua saturada a una presión de 0.1 MPa.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 4.12; Valores de agua sobrecalentada.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 4.13, Valores de agua sobre calentada.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 5.1 Centrales nucleares en el mundo.....</i>	<i>119</i>

Tabla de agua saturada

728
TERMODINÁMICA

TABLA A.4

Agua saturada-Tabla de temperaturas

H₂O

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat.} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg · K		
		Líquido sat., v _f	Vapor sat., v _g	Líquido sat., u _f	Evapor., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Líquido sat., h _f	Evapor., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Líquido sat., s _f	Evapor., s _{fg}	Vapor sat., s _g *
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2 375.3	2 375.3	0.01	2 501.3	2 501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2 361.3	2 382.3	20.98	2 489.6	2 510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2 347.2	2 389.2	42.01	2 477.7	2 519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2 333.1	2 396.1	62.99	2 465.9	2 528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2 319.0	2 402.9	83.96	2 454.1	2 538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2 304.9	2 409.8	104.89	2 442.3	2 547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2 290.8	2 416.6	125.79	2 430.5	2 556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2 276.7	2 423.4	146.68	2 418.6	2 565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2 262.6	2 430.1	167.57	2 406.7	2 574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2 248.4	2 436.8	188.45	2 394.8	2 583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2 234.2	2 443.5	209.33	2 382.7	2 592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2 219.9	2 450.1	230.23	2 370.7	2 600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2 205.5	2 456.6	251.13	2 358.5	2 609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2 191.1	2 463.1	272.06	2 346.2	2 618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2 176.6	2 469.6	292.98	2 333.8	2 626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2 162.0	2 475.9	313.93	2 321.4	2 635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2 147.4	2 482.2	334.91	2 308.8	2 643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2 132.6	2 488.4	355.90	2 296.0	2 651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2 117.7	2 494.5	376.92	2 283.2	2 660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2 102.7	2 500.6	397.96	2 270.2	2 668.1	1.2500	6.1659	7.4159
Presión sat., MPa												
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2 087.6	2 506.5	419.04	2 257.0	2 676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2 072.3	2 512.4	440.15	2 243.7	2 683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2 057.0	2 518.1	461.30	2 230.2	2 691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2 041.4	2 523.7	482.48	2 216.5	2 699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2 025.8	2 529.3	503.71	2 202.6	2 706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2 009.9	2 534.6	524.99	2 188.5	2 713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1 993.9	2 539.9	546.31	2 174.2	2 720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1 977.7	2 545.0	567.69	2 159.6	2 727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5089	588.74	1 961.3	2 550.0	589.13	2 144.7	2 733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1 944.7	2 554.9	610.63	2 129.6	2 740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1 927.9	2 559.5	632.20	2 114.3	2 746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1 910.8	2 564.1	653.84	2 098.6	2 752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1 893.5	2 568.4	675.55	2 082.6	2 758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1 876.0	2 572.5	697.34	2 066.2	2 763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1 858.1	2 576.5	719.21	2 049.5	2 768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1 840.0	2 580.2	741.17	2 032.4	2 773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1 821.6	2 583.7	763.22	2 015.0	2 778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1 802.9	2 587.0	785.37	1 997.1	2 782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1 783.8	2 590.0	807.62	1 978.8	2 786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1 764.4	2 592.8	829.98	1 960.0	2 790.0	2.2835	4.1863	6.4698

Resumen

La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma, es una breve explicación de cómo generar energía eléctrica por medio del vapor de agua, siendo simple agua es calentada y esta evaporada haciendo que este haga girar a una turbina de vapor y producir energía mecánica que se transforma a energía eléctrica, el procedimiento es muy parecido para las centrales geotermoeléctricas, termoeléctricas, nucleoeeléctricas, en que esta ultima nos enfocaremos toda la tesis, desde la parte indivisible de la materia hasta su ubicación de la central nucleoeeléctrica en el país.

No obstante una breve explicación de las centrales eléctricas nucleares en el mundo y en nuestro país, como quien las construye, tipos de reactores nucleares, riesgos de materiales radiactivos, comparaciones con centrales que utilizan el vapor de agua para general energía eléctrica.

No obstante la historia que ha manchado al nombre de la central nuclear es la radiación y desastres catastróficos que se ha suscitado a lo largo de los años, no obstante los tipos de reactores y modo de trabajo hacen que la seguridad sea confiable en nuestros días, no obstante el problema latente de este tipo de centrales es la denominada radiactividad, que es producto de las reacciones en cadenas para generar vapor y este echar andar a una turbina de vapor, para hacer funcionar el generador y este generar energía eléctrica.

En nuestro país y el creciente consumo de la energía a logrado que se creen más centrales nucleares con la finalidad de darle soporte al sistema eléctrico nacional, no obstante la tecnología empleada en estas centrales en los reactores como en el combustible y aun mas sus desechos radiactivos son de mucho mayor importancia que la generación de energía eléctrica ya que para esto es necesario tener un desarrollo tecnológico en todos los ámbitos.