



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS NEUTRÓNICO DE LAS CAPAS DE LITIO  
UN REACTOR HÍBRIDO DE FUSIÓN – FISIÓN.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO ELÉCTRICO – ELECTRÓNICO**

**P R E S E N T A:**

**EDUARDO DE LAS PEÑAS RINCÓN**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. JUAN LUIS FRANÇOIS LACOUTURE**

**2014**

**Ciudad Universitaria, D. F.**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo otorgado a través del proyecto PAPIIT IN113213 “Estudio y diseño de reactores avanzados de fisión nuclear e híbridos fusión-fisión”,

a la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de formarme como ingeniero,

a todos mis profesores, especialmente a mi director de tesis el Dr. Juan Luis François Lacouture por todo su apoyo, su orientación y el tiempo invertido,

a mis padres, Alma Patricia Rincón y Eduardo de las Peñas, por todo el apoyo incondicional,

a mi hermana, mi novia y mis amigos por todos los piratas derrotados.

# Índice

<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<hr/>	
BIBLIOGRAFÍA	6
<b>II. FUSIÓN NUCLEAR</b>	<b>7</b>
<hr/>	
1. INTRODUCCIÓN	8
2. HISTORIA	8
3. PLASMA	9
4. COMBUSTIBLE	10
5. MÉTODOS PARA LOGRAR LA FUSIÓN	12
A. CONFINAMIENTO MAGNÉTICO	12
B. CONFINAMIENTO INERCIAL	20
6. CAPA DE LITIO	20
A. CAPTURA DE NEUTRONES	21
B. PRODUCCIÓN DE TRITIO	21
7. REACTORES DE FUSIÓN	22
8. AMBIENTAL	22
BIBLIOGRAFÍA	24
<b>III. FISIÓN NUCLEAR</b>	<b>26</b>
<hr/>	
1. INTRODUCCIÓN	27
2. HISTORIA	28
3. FISIÓN	32
4. REACCIÓN EN CADENA	34
5. FACTOR DE MULTIPLICACIÓN EFECTIVA (KEFF)	35
6. COMPONENTES DE UN REACTOR	36
A. COMBUSTIBLE	36
B. MATERIALES ESTRUCTURALES	37
C. MATERIAL DE CONTROL	37
D. MODERADOR	38
E. REFRIGERANTE	38
7. EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR	39
8. REACTORES DE FISIÓN	40

A.	PWR (PRESSURIZED WATER REACTOR)	41
B.	BWR (BOILING WATER REACTOR)	42
C.	PHWR (PRESSURIZED HEAVY WATER REACTOR)	43
D.	HTGR (HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR)	44
E.	FNR (FAST NEUTRON REACTOR)	44
<b>9.</b>	<b>RESIDUOS RADIOACTIVOS</b>	<b>45</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>46</b>

#### **IV. HÍBRIDO FUSIÓN-FISIÓN** **48**

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>49</b>
<b>2.</b>	<b>A GRANDES RASGOS</b>	<b>51</b>
<b>3.</b>	<b>QUE SE BUSCA EN UN HIBRIDO</b>	<b>51</b>
<b>5.</b>	<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>52</b>
A.	REPROCESAMIENTO DEL COMBUSTIBLE	53
C.	TRANSMUTACIÓN	53
<b>6.</b>	<b>TIPOS DE REACTORES HÍBRIDOS</b>	<b>54</b>
A.	<i>SUBCRITICAL ADVANCED BURNER REACTOR (SABR)</i>	54
B.	<i>FUSIÓN-FISSION RESEARCH FACILITY (FFRF)</i>	55
C.	<i>COMPACT FUSIÓN NEUTRON SOURCE (CFNS)</i>	56
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>58</b>

#### **V. SERPENT** **59**

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>60</b>
<b>2.</b>	<b>HISTORIA</b>	<b>60</b>
<b>3.</b>	<b>APLICACIONES DE SERPENT</b>	<b>60</b>
<b>4.</b>	<b>MÉTODO DE MONTE CARLO</b>	<b>60</b>
A.	TRAYECTORIA DE LAS PARTÍCULAS	61
B.	CÁLCULOS DE CRITICIDAD	63
C.	ESTIMACIÓN DE ERROR	64
<b>5.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE SERPENT</b>	<b>64</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>66</b>

#### **VI. MODELO Y RESULTADOS** **67**

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>68</b>
<b>2.</b>	<b>MODELO</b>	<b>69</b>
<b>3.</b>	<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>74</b>
<b>4.</b>	<b>PARED DE LITIO</b>	<b>76</b>

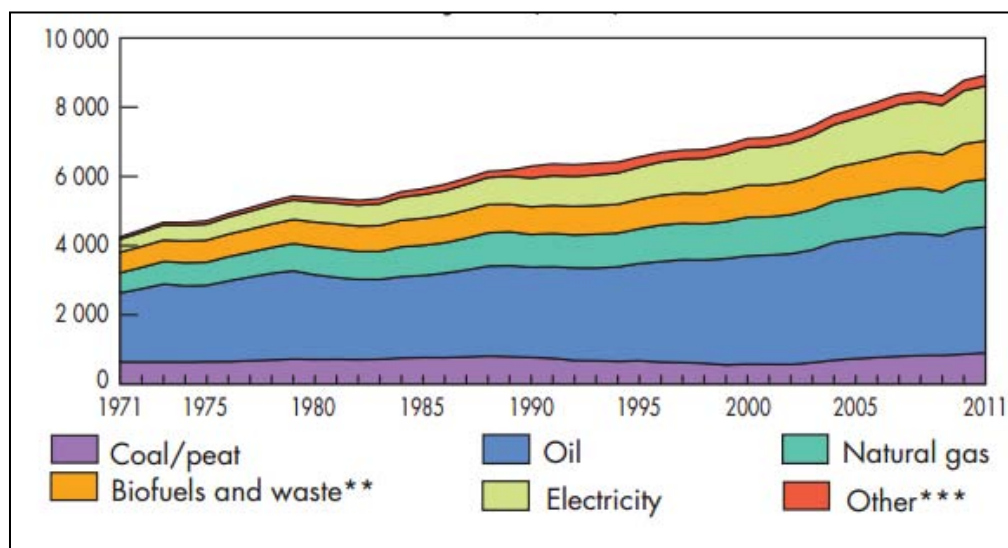
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>91</b>
<b><u>VII. CONCLUSIONES</u></b>	<b><u>92</u></b>

---

# I. Introducción

De 1970 a 2013 la población mundial se incrementó de 3, 000, 000,000 a 7, 000, 000,000 personas (Fundación Wikimedia, Inc., 2014). Esto quiere decir que la población se ha incrementado más del doble en este periodo.

A consecuencia de este crecimiento demográfico, la demanda de energía ha crecido en seis sectores principalmente: El sector industrial, que requiere electricidad, gas seco, petrolíferos y coque, entre otras. El sector de transporte, que requiere electricidad, gasolinas diésel, combustóleo, gas, etc. El sector agropecuario, que hace uso de electricidad y petrolíferos. En el sector de comercio, residencial y público, la mayor demanda es de energía eléctrica. La figura I muestra una gráfica del consumo de energía mundial en el rango de 1971 a 2011 en Mtoe (Million tonnes of oil equivalent, equivalente a un millón de toneladas de petróleo).



**Figura I Consumo total de energía mundial 1971 – 2011 (MTOE). (Agency, International Energy, 2013)**

Debido a este crecimiento en la demanda de energía, los seres humanos han alterado el ciclo del dióxido de carbono por dos lados. Por un lado, se ha incrementado el consumo de energía, específicamente combustibles fósiles como el carbón, gas natural y petróleo, el resultado es un aumento en las emisiones de dióxido de carbono. Por otro lado se han deforestado bosques; las plantas son importantes en el ciclo del carbono debido a su capacidad de capturar dióxido de carbono y convertirlo en oxígeno (**Department of Environmental Conservation, 2014**).



El calentamiento global es causado por una capa de dióxido de carbono actuando como invernadero en el planeta, deja que la radiación solar traspase pero no deja salir el calor del planeta.

El incremento en la temperatura a nivel global puede ocasionar una elevación en los niveles del mar, violentos cambios climáticos extremos, y afectar la cantidad y el patrón de las precipitaciones. Otras consecuencias del calentamiento global incluirían los cambios en la producción en la agricultura, la pérdida de glaciares, rutas comerciales, extinción de diversas especies y se incrementarán las extensiones en rango de diversas enfermedades. Por estas razones debemos reducir la producción de dióxido de carbono en el planeta.

Existen varias formas de reducir las emisiones de dióxido de carbono emitidas por el sector energético, que se pueden aplicar en la industria, transporte, casas, comercio, etc., como por ejemplo:

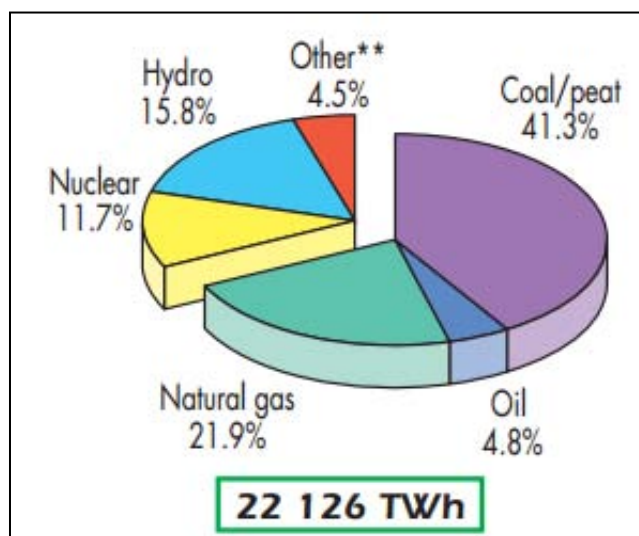
**Eficiencia energética:** En el sector transporte, se pueden utilizar vehículos más eficientes en cuanto a combustible. En todos los sectores se podrían cambiar todas las máquinas eléctricas en máquinas nuevas que reduzcan la necesidad de altos consumos de electricidad.

**Conservación de la energía:** Reducir el uso de energía personal, como apagar luces o desconectar aparatos eléctricos si no se están utilizando. De la misma forma usar automóvil en menor escala o compartir si existe un mismo destino.

**Secuestro o captura de carbono:** Es una tecnología que reduce potencialmente el contenido de dióxido de carbono, almacenando el CO<sub>2</sub>.

**Cambio de combustible:** Se puede producir electricidad a partir de energías renovables o nucleares para reducir la cantidad de emisiones de dióxido de carbono.

Casi el setenta por ciento (70%) del sector eléctrico utiliza energías fósiles a nivel mundial, como se puede observar en la figura II (EPA, 2014). Uno de los objetivos de esta tesis es incrementar el uso de energía nuclear y así reducir las emisiones de dióxido de carbono.



**Figura II Generación de electricidad por combustible (Agency, International Energy, 2013).**

La energía nuclear involucra tanto a la fisión como la fusión, sin embargo el término nuclear normalmente se asocia a los reactores de fisión. La tecnología de los reactores de fisión es la única energía probada a través del tiempo, la cual se puede utilizar como energía base en todo el mundo sin emitir gases de efecto invernadero (Chen, 2011).

La generación de energía eléctrica por medio de plantas nucleares no produce dióxido de carbono, el principal gas de efecto invernadero, por lo tanto no contribuye al calentamiento global ni al cambio climático. Tampoco influye en la creación de lluvia ácida. Es más redituable: un kilogramo de uranio produce 20,000 veces más energía que un kilogramo de carbón.

El índice de accidentes es mínimo, si se considera que tras 60 años de historia y sumar el tiempo de funcionamiento efectivo de todos los reactores del mundo -14,000años-reactor-, encontraremos que sólo han ocurrido tres accidentes graves en la historia de la energía nuclear de uso civil.

Su costo de producción es menor comparado con otras fuentes. En el caso de carbón el costo es de 0.115 dólares por kilowatt-hora; gas natural 0.066 dólares por kilowatt-hora; solar 0.130 dólares por kilowatt-hora; biomasa 0.102 dólares por kilowatt-hora, en cambio el de una planta nuclear es de 0.0961, dólares por kilowatt-hora (Fundación Wikimedia,

Inc., 2014), pero hay que valorar que el gas y el petróleo son afectados por la volatilidad de su precio.

Sin embargo, la energía nuclear, tiene la desventaja de los combustibles gastados, que son altamente radiactivos y que tienen que ser almacenados por mucho tiempo. El almacenamiento geológico profundo es la solución internacional aceptada como más segura y viable para la gestión final de los residuos radioactivos. Se fundamenta en la capacidad de aislamiento y confinamiento de las formaciones geológicas, siempre que éstas reúnan unas determinadas características de estabilidad, espesor, ausencia de vías preferentes de migración y capacidad de retención.

El proyecto de esta tesis es un híbrido de fusión – fisión, tiene la ventaja de usar estos residuos radioactivos y utilizarlos para generar energía. Básicamente genera energía por medio de los desechos de otras plantas nucleares.

Al utilizar residuos radioactivos en el híbrido de fusión – fisión existe una transmutación del combustible gastado. Al hablar de la transmutación ocurren dos factores: convierte el combustible gastado en combustible útil y otros elementos radioactivos de vida larga se convierten en elementos de vida media más corta. Esto quiere decir que estos elementos de vida media más corta, sí van a necesitar almacenamiento, pero va a ser de menos años. Los primeros dos capítulos hacen referencia a la fusión y a la fisión. Es necesario conocer qué se necesita para realizar estas reacciones y generar energía, y cómo están contenidos para que la energía que nos proporcione se pueda transformar de la forma más eficiente a energía eléctrica.

El tercer capítulo habla del programa SERPENT y la metodología probabilística-estadística que usa para simular la vida de los neutrones dentro de un reactor nuclear.

El cuarto capítulo narra la forma en que un reactor híbrido de fusión - fisión utiliza tanto el concepto de fusión como el de fisión para generar energía.

El quinto capítulo se refiere al proyecto, cómo se realizó el modelo, cuáles fueron las variaciones para obtener más tritio, y los resultados de estas variaciones.

El sexto capítulo son las conclusiones que obtuvieron a partir de esta investigación.

## **Bibliografía**

Agency, International Energy. (2013). *Key World Energy Statistics*. Francia: SOREGRAPH.

Chen, F. F. (2011). *An Indispensable truth: How Fusión Power Can save the Planet*. New York: Spring. Los Angeles: Springer.

Department of Environmental Conservation, N. Y. (2014). *Department of Environmental Conservation*. Obtenido de <http://www.dec.ny.gov/lands/41794.html>

EPA. (17 de abril de 2014). *United States Enviromental Protection Agency*. Obtenido de Overview of Greenhouse Gases: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/co2.html>

Fundación Wikimedia, Inc. (12 de junio de 2014). *Cost of electricity by source*. Obtenido de Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Cost\\_of\\_electricity\\_by\\_source](http://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source)

Fundación Wikimedia, Inc. (12 de junio de 2014). *Población Mundial*. Obtenido de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Poblaci%C3%B3n\\_mundial](http://es.wikipedia.org/wiki/Poblaci%C3%B3n_mundial)

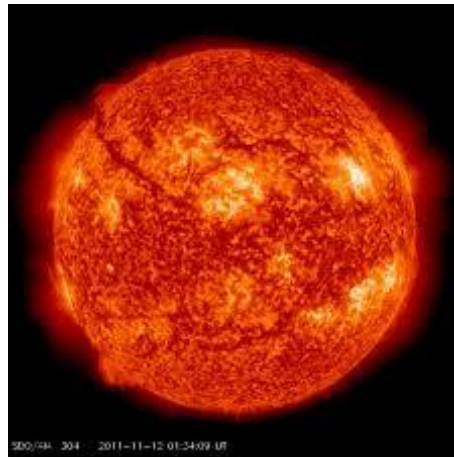
## II. Fusión Nuclear

## 1. Introducción

El Sol (figura 1.1) transforma cada segundo alrededor de 564 millones de toneladas de hidrógeno en 560 millones de toneladas de helio, lo que significa que unos cuatro millones de toneladas de materia se transforman en energía, la cual abastece a la vía láctea y por consiguiente, a la Tierra, permitiendo la vida (UNAM, 2013).

Dicha energía proviene de una reacción de fusión termonuclear que sucede en el interior de la estrella cuando los protones forman isótopos de helio, generando tanto calor que su temperatura excede 12, 000,000 de grados kelvin en el interior (Bittencourt, 2004).

Al observar la cantidad de energía emitida por el sol, surge el interés por entender y posteriormente recrear dicho fenómeno. De aquí el tema de este capítulo.



**Figura 1.1** El sol (UNAM, 2013).

## 2. Historia

Los orígenes de la fusión nuclear se localizan hacia 1929 cuando Atkinson y Houtemans plantearon la posibilidad de obtener energía de las reacciones de fusión. Sin embargo, los conceptos más importantes de fusión nuclear, y su aplicación real, se desarrollaron a partir de 1942 con los trabajos de H. Bethe, E. Fermi, R. Oppenheimer y E. Teller, entre otros. A través del proyecto Sherwood se llevaron a cabo los primeros avances tecnológicos, que permitieron desarrollar el concepto de confinamiento magnético, obteniéndose los primeros diseños: z-pinch, stellarator y espejos magnéticos.

En 1961, J. Nuckolls (EEUU) y N. Basov (URSS) desarrollaron una técnica mediante la cual se podrían obtener reacciones de fusión nuclear mediante altas compresiones

provocadas por la cesión de energía. Se desarrollaron así programas secretos en EEUU y Rusia.

En 1968, el Premio Nobel N. Basov informó de la obtención de temperaturas de ignición y de la producción de neutrones en las reacciones de fusión nuclear empleando láseres. A partir de entonces, se pudo disponer de una gran cantidad de aparatos en construcción y operación bajo el concepto de Fusión Nuclear por Confinamiento Magnético (FCM), técnica mediante la cual se pueden obtener reacciones de fusión nuclear mediante confinamiento magnético, específicamente TOKAMAK

En la década de los 70 comenzó a producirse la primera serie de publicaciones sobre Fusión nuclear por Confinamiento Inercial (FCI). En EE.UU., los principales investigadores fueron Brueckner, Nuckolls, Kidder y Clark

En la década de los 90, las instalaciones de tipo TOKAMAK: JET (EURATOM), TFTR (EEUU) y JT-60 (Japón), permitieron obtener cierta potencia. El primero fue el JET, que con una mezcla de D (90%) y T (10%) consiguió en 1991, una potencia de 1,7 MW. Posteriormente, en 1993, el TFTR con una mezcla de DT al 50% llegó hasta los 6 MW, alcanzándose temperaturas de 30 keV. En el calentamiento se gastaron 29 MW.

Hasta la fecha, se han llegado a producir hasta 12 MW de potencia en reacciones de fusión nuclear controladas durante más de un segundo (JET, 1997) y existe la confianza de que con los avances tecnológicos actuales sea posible llegar al rango comercial de cientos de MW de forma mantenida (Energía Nuclear, S/F).

### **3. Plasma**

Para producir una reacción de fusión, entre otros conceptos que se profundizarán más adelante, es necesario alcanzar el cuarto estado de la materia conocido como plasma.

La palabra plasma viene del griego que significa materia moldeable. La primera vez que se aplicó este término fue por Tonks y Langmuir, en 1929, para describir la región interna de un gas ionizado producto de descargas eléctricas en un tubo (Bittencourt, 2004).

Este fenómeno se produce al elevar la temperatura de la materia. Después de lograr los cambios de sólido a líquido y de líquido a gaseoso, se continúa elevando la temperatura. El gas entra a un estado donde los átomos son ionizados y los electrones son casi los mismos que los protones, por lo que la carga se vuelve neutra, es decir, entra al estado

denominado plasma. En la figura 1.2 se puede observar un ejemplo de plasma (Miyamoto, 2004).



**Figura 1.2. Ejemplo de plasma.**

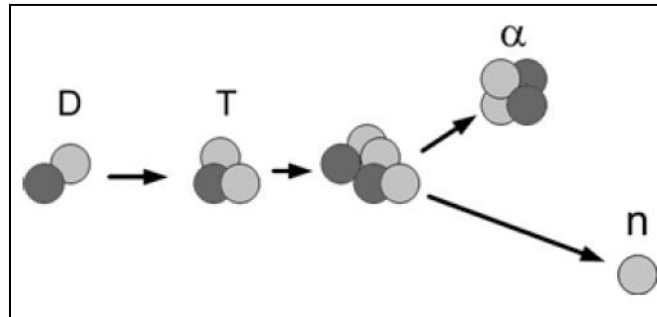
#### **4. Combustible**

La fusión tiene el potencial para convertirse en una fuente de energía esencial para generar electricidad en el futuro. Bajo las condiciones adecuadas, los elementos ligeros reaccionarán fusionándose en elementos más pesados, y así su masa se transforma en energía (Stacey, 2010).

Para poder producir una reacción de fusión, es necesario mezclarse dos elementos ligeros y elevar su temperatura hasta llegar al estado de plasma, con el fin de tener la suficiente energía para superar la repulsión del efecto Coulomb que actúa entre ellos. Este efecto se produce al intentar unir ambos elementos, pues la carga positiva de los átomos provoca un incremento en su fuerza electrostática de repulsión (o efecto Coulomb), entre ambos (Glasstone & Lovberg, 1960). Si tienen la suficiente energía, éstos se acercarán provocando que la atracción de corta distancia anule el efecto Coulomb. (se vuelva la dominante)

Los elementos ligeros utilizados como combustible para los reactores de fusión nuclear son: D=Deuterio, T=tritio,  $\text{He}^3$ =helio-3. En la figura 1.3 se muestra la reacción de D-T.

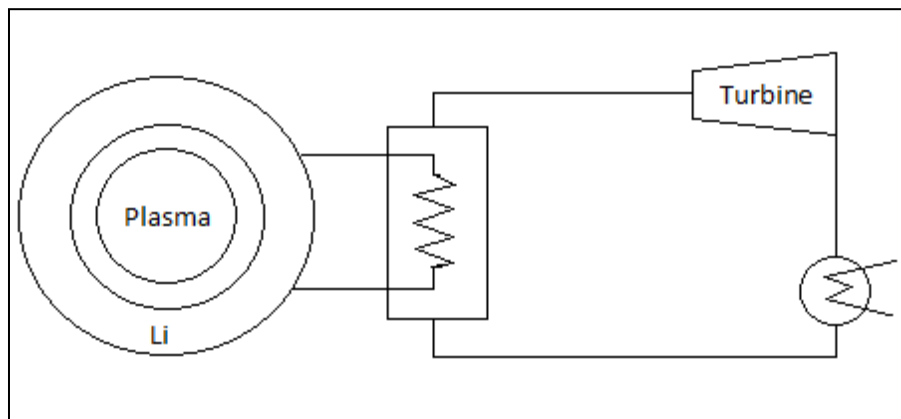




**Figura 1.3. Reacción D-T.**

En la figura 1.4 se muestra el esquema de una planta eléctrica basada en un reactor de fusión D – T. El reactor de fusión, a grandes rasgos, consta de tres cámaras: la interna donde se encuentra el plasma, una capa intermedia que está al vacío, y la tercera donde se encuentra almacenado litio (Li). Los neutrones rápidos producidos en la fusión son expulsados del plasma y penetran la tercera capa, donde, al estar almacenado el litio, se produce fricción; lo que conlleva a la reducción de la velocidad de estos neutrones, convirtiendo su energía dinámica en energía térmica. La energía térmica de la tercera capa es usada en el intercambiador de calor. Este intercambiador al tocar el agua la convierte en vapor y la hace pasar por una turbina, generando así electricidad (Miyamoto, 2004).

Otra de las reacciones a considerar es la cría de tritio producida cuando un neutrón (n) reacciona con el litio 6 ( $\text{Li}^6$ ).



**Figura1.4. Planta eléctrica basada en un reactor de fusión.**

De acuerdo a lo anterior, podemos concluir que las reacciones que nos interesan para los reactores de fusión nuclear son las siguientes:

- $D + D \rightarrow T (1.01 \text{ MeV}) + p (3.03 \text{ MeV})$  (1)
- $D + D \rightarrow He^3(0.82 \text{ MeV}) + n(2.45 \text{ MeV})$  (2)
- $D + T \rightarrow He^4 (3.52 \text{ MeV}) + n (14.06 \text{ MeV})$  (3)
- $D + He^3 \rightarrow He^4(3.67 \text{ MeV}) + p(14.67 \text{ MeV})$  (4)
- $Li^6 + n \rightarrow T + He^4 + 4.8 \text{ MeV}$  (5)
- $Li^6 + n(2.5 \text{ MeV}) \rightarrow T + He^4 + n$  (6)

Donde:

D=Deuterio, T=tritio,  $He^3$ =helio-3, Li=litio,  $He^4$ =helio, p=protón, n=neutrón. (Miyamoto, 2004)

## 5. Métodos para lograr la fusión

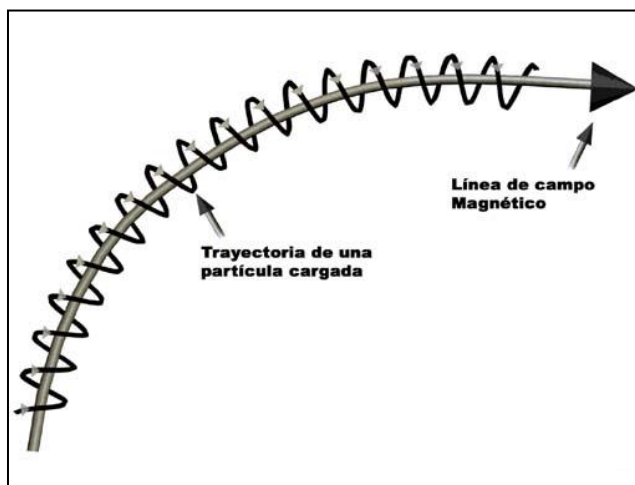
Para lograr una reacción de fusión el plasma tiene que mantenerse a una temperatura elevada por un largo periodo de tiempo. Esencialmente sólo hay dos métodos para lograr este objetivo: Confinamiento Magnético (MCF) y Confinamiento Inercial (ICF).

### a. Confinamiento Magnético

Como su nombre lo indica, el Confinamiento Magnético se basa en el principio de confinar un plasma aplicando un campo magnético adecuado. Esto es posible por el hecho de que las partículas dentro de un plasma están ionizadas. El campo magnético ejerce una fuerza en las partículas del plasma y éstas siguen una trayectoria helicoidal como se representa en la figura 1.5.

La idea general es basarse en este fenómeno para buscar una configuración adecuada, y así, el campo magnético mantendrá a las partículas en orbitas pequeñas y nunca podrán escapar.

La razón por la cual no se puede confinar un plasma en un contenedor, es la temperatura. Si el plasma llegara a tocar la pared del contenedor su temperatura disminuirá rápidamente (Pfalzner, 2006).



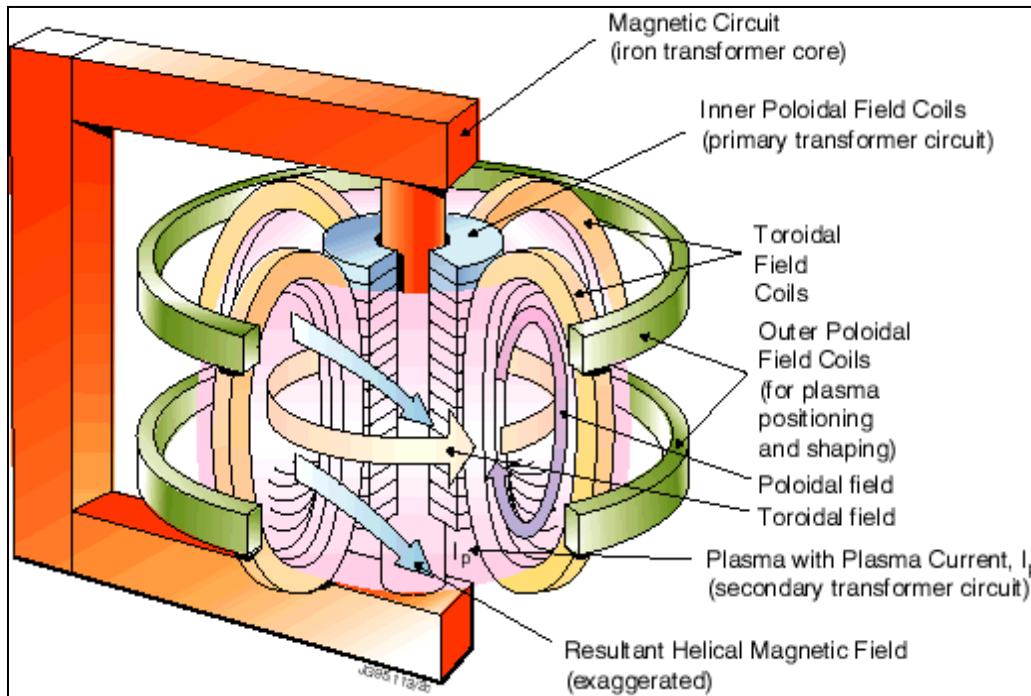
**Fig.1.5. Movimiento helicoidal de las partículas (iones y electrones) (Facultad de Ciencias Exactas y Naturales-UBA, 2006).**

Existen varios tipos de Confinamiento Magnético, los más destacados son: tokamaks, stellarators y *reversed field pinch* (RFP).

#### **a. Tokamak**

La palabra Tokamak es la contracción de las palabras rusas: corriente (Tok), recipiente (KaMeP), magnético (MaгHИT), bobina (KaTyщKa).

A grandes rasgos, el propósito de un Tokamak (figura 1.6) es hacer toroides, aprovechando la relación entre electricidad y magnetismo. Un campo magnético crea un campo eléctrico, mientras una corriente crea un campo magnético. Tokamak utiliza varios campos magnéticos para guiar el plasma dentro de él.

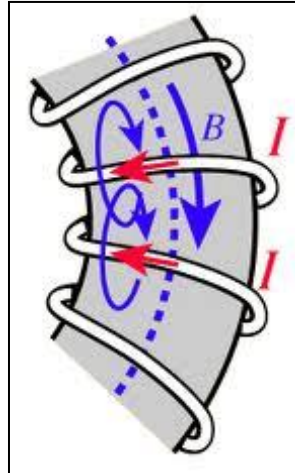


**Figura 1.6 Tokamak. (Splung.com, 2014)**

El plasma se encuentra en una cámara de acero al vacío con alta resistencia o con aislante.

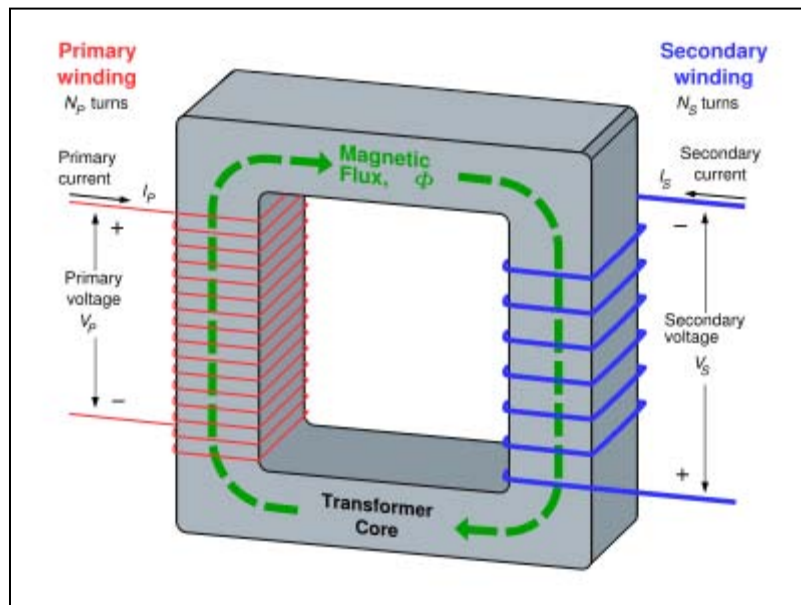
Este cuarto estado de la materia está ionizado, permitiendo la conducción eléctrica a través del plasma y respondiendo a campos electromagnéticos. Ésta es la forma precisa en la que se manipula el plasma dentro de un Tokamak. Los tokamaks utilizan un campo toroidal y un campo poloidal para mantener el plasma confinado. A continuación se describen los dos campos:

La figura 1.7 nos ayuda a entender este proceso de una forma más visual. El campo toroidal (Constant Toroidal Field) se marca con la letra B; se incita mediante una corriente  $I$  que pasa a través de los electro-magnetos situadas a lo largo del toroide (*Toroidal Field Coils*).



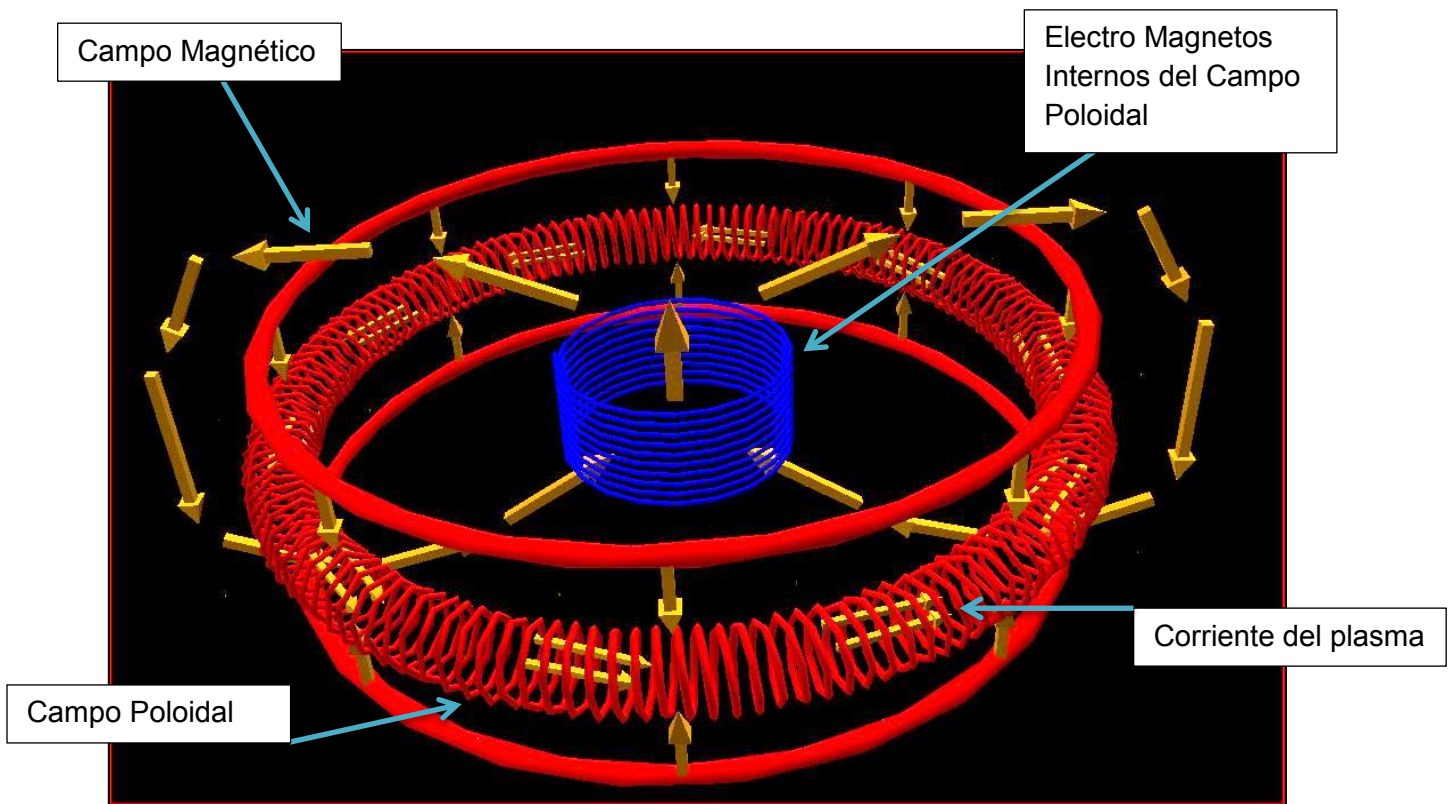
**Figura 1.7** Campo toroidal.

El campo poloidal se induce, como un transformador teniendo un circuito primario y un circuito secundario, como se observa en la figura 1.8.



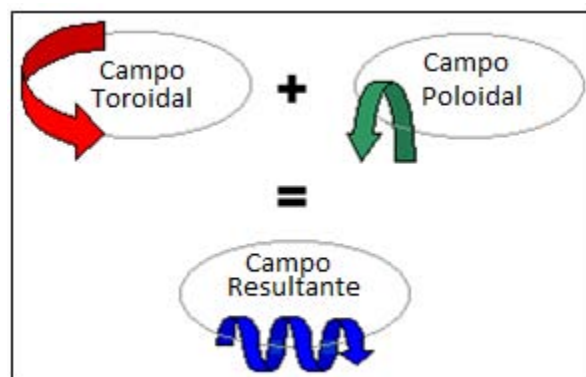
**Figura 1.8** Transformador induciendo una corriente de un circuito primario a un circuito secundario. (Educativa, 2014)

Como se observa en la figura 1.9, si hacemos pasar una corriente por los electro-magnetos internos del campo poloidal, que sería el circuito primario del transformador, se induce una corriente dentro del plasma; esta corriente induce el campo poloidal (Teller, 1981).



**Figura 1.9 Campos poloidales**

La resultante (figura 1.10) de las sumas de la líneas de campo poloidal y toroidal es una línea de campo helicoidal, haciendo que las partículas se mantengan moviendo hacia el centro del toroide y alejándose de las paredes (Farrell, 2009).



**Figura 1.10 Resultante.**

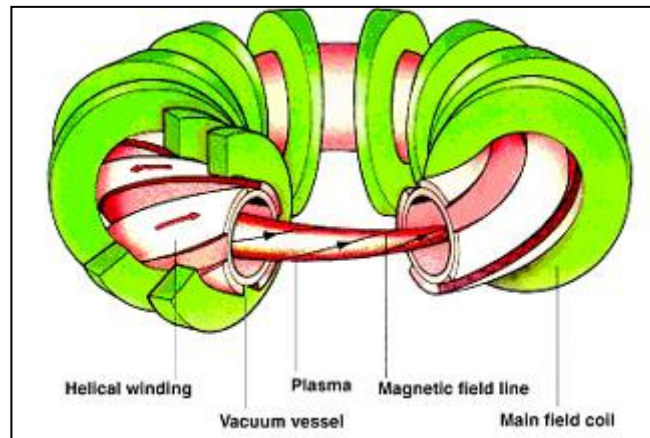
## b. Stellarators

El Stellarator fue inventado por Lyman Spitzer, un científico teórico de nacionalidad norteamericana. Un Stellarator es una máquina, la cual crea un confinamiento magnético, donde el confinamiento del plasma es logrado generando campos magnéticos, muy parecido al Tokamak. La diferencia entre estas dos máquinas, es la forma de generar los campos poloidales. El Stellarator genera su confinamiento por medio de corrientes que están externas al plasma; no es necesaria ninguna corriente en el plasma, a diferencia del Tokamak (Lyon, Anderson, Rome, Johnson, & Garabedian, 2004).

En general, existen cuatro tipos de Stellarators en operación:

- **Stellarator convencional** (figura 1.11)

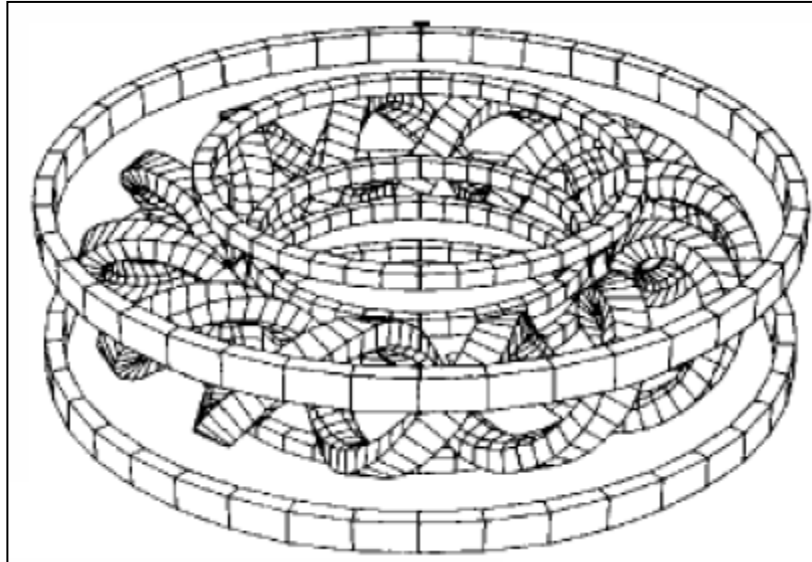
Se basan en electro-magnetos helicoidales, estos electro-magnetos vienen en pares. Cada uno de estos pares lleva corriente en sentido contrario para no producir ningún campo toroidal, por esta razón se necesita un campo toroidal aparte.



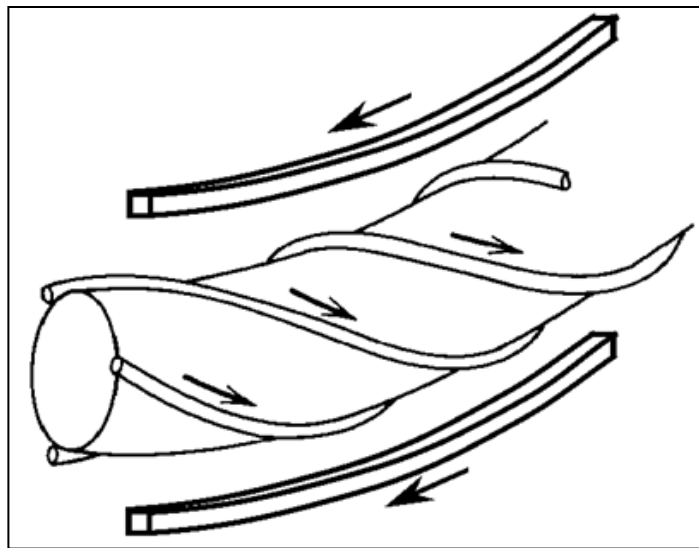
**Figura 1.11 Stellarator convencional. (Fontanet Saez, 2001)**

- **Torsatron** (Figura 1.13)

Se basan en electro-magnetos helicoidales (figura 1.14); la diferencia radica en que la corriente de los electro-magnetos tiene el mismo sentido.



**Figura 1.13 Stellarator torsatron. (Fontanet Saez, 2001)**

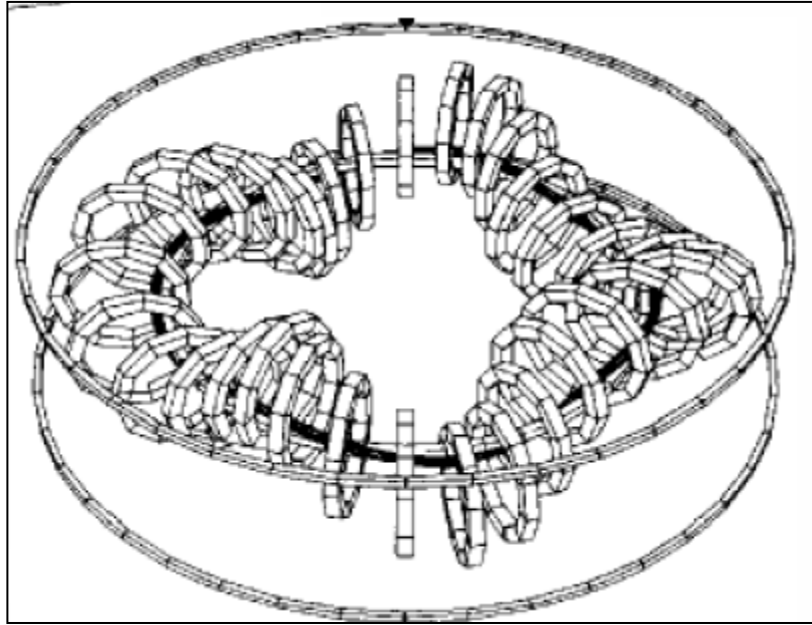


**Figura 1.14 Electro magnetos helicoidales. (Fontanet Saez, 2001)**

- **Heliotrons** (figura 1.15)

Los Heliacs o Helitrones están formados por un conjunto de bobinas planas circulares, han recibido una examinación muy superficial por su compleja geometría en los electro-magnetos (Lyon, Anderson, Rome, Johnson, & Garabedian, 2004).

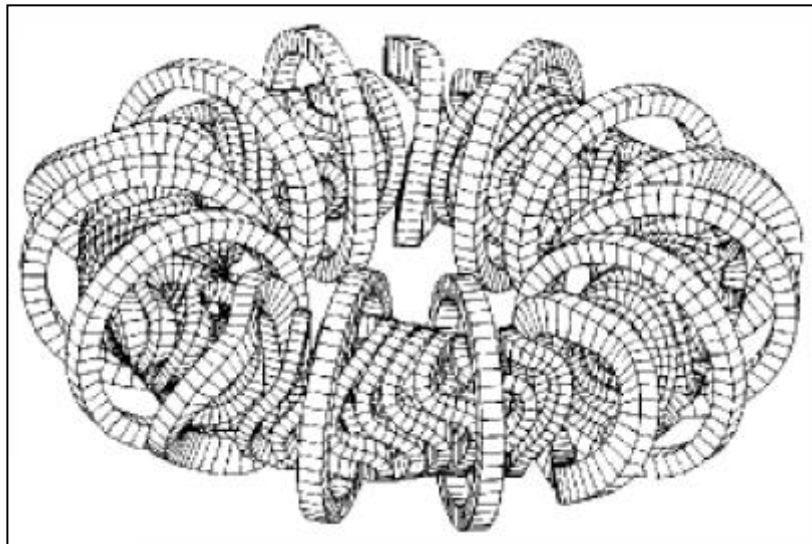




**Figura 1.15 Stellarator heliotrons. (Fontanet Saez, 2001)**

- **Stellarator modular** (figura 1.16)

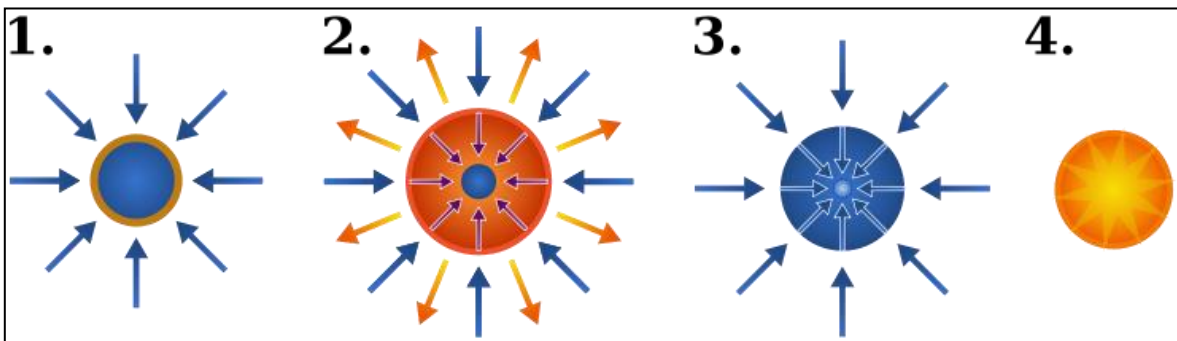
A diferencia del convencional, el modular es en proporción más grande. Las ondulaciones en los campos helicoidales son más pequeños, tiene una pared de tritio entre el plasma y los electro magnetos y una disposición de bobinas toroidales no planas (Dorantes, 2011).



**Figura 1.16 Stellarator modular. (Fontanet Saez, 2001)**

## b. Confinamiento Inercial

En el confinamiento inercial de fusión (figura 1.17), se utilizan láseres o haces de iones enfocados de forma precisa a la superficie de un objetivo, el cual normalmente es un *pellet* de combustible D-T de unos pocos milímetros de diámetro. Esto calienta la capa superficial del material, provocando que explote al exterior creando un colapso interno o induciendo una implosión que comprime y calienta las capas interiores del combustible. El núcleo del material se comprime mil veces su densidad líquida, resultando en condiciones perfectas para la fusión. La energía liberada calentará los pellets de combustible que están a su alrededor, generando una reacción en cadena de fusión. El tiempo requerido para que la reacción ocurra depende de la inercia del material, normalmente es menos de un microsegundo.



**Figura 1.17. Etapas de confinamiento inercial. (Wikimedia Foundation, Inc., 2014)**

1. Enfoca un láser o haces de iones a un pellet D-T.
2. Calienta la capa superficial provocando que explote.
3. Se induce una implosión que comprime y calienta el interior.
4. Creando las condiciones perfectas para la fusión.

## 6. Capa de litio

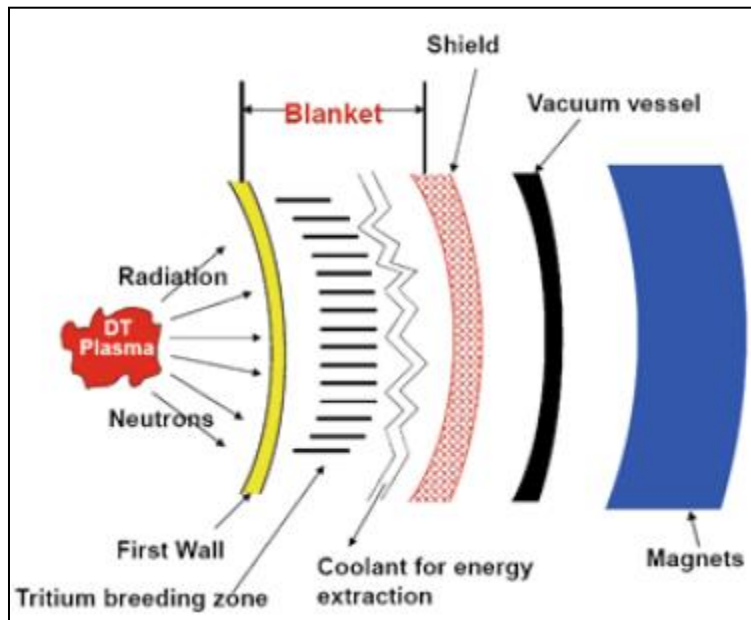
La pared de litio es una estructura gruesa, masiva y compleja que nos sirve para tres propósitos:

- Capturar los neutrones generados por la fusión y convertirlos en calor.
- Producción de tritio.
- Protege los electro-magnetos de los neutrones.

### a. Captura de Neutrones

Un neutrón que salga desprendido por la reacción DT chocará con la primera pared, ésta es la superficie de la pared de litio. Después, el neutrón se desplaza dentro del litio, generando energía térmica debido a la fricción entre el neutrón y el litio. La energía se traslada a través de intercambiadores de calor.

Como la pared de litio está atrapando los neutrones, impide que los neutrones y el calor estén en contacto con los electro-magnetos. A continuación se presenta una imagen que muestra cómo la pared rodea al plasma (figura 1.18).

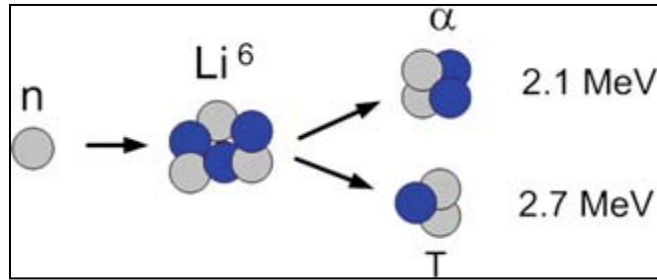


**Figura 1.18** Pared de litio. (Chen, 2011)

### b. Producción de Tritio

La reacción del litio con un neutrón dentro de un reactor de fusión nuclear ayuda a regenerar el tritio y mantener el plasma.

El tritio es criado a partir de litio-6 como se muestra en la figura 1.19. El neutrón que inicia a 14 MeV de energía, se le reduce la energía por medio de moderadores, y choca con el núcleo del litio, rompiéndose en una partícula alpha y tritio. Juntos tienen una energía de 4.8 MeV de energía que es obtenida al dividir el núcleo del litio. Esta energía es transmitida a un gas o un líquido que eventualmente se transferirá para generar electricidad (Chen, 2011).



**Figura 1.19** Reacción Li6-n.

## 7. Reactores de Fusión

Se han construido varios tokamaks a través del tiempo como el *Joint European Torus* (JET), el *Mega Amo Spherical Tokamak* (MAST) en Inglaterra, el *Tokamak Fusión Test Reactor* (TDTR) en Princeton, en U.S.A., y el ITER (International Thermonuclear Experiment Reactor), el cual es un proyecto en construcción en Francia; será el Tokamak más grande.

También se ha investigado mucho en stellarators. El más grande de estos reactores es el Large Helical Device en Japón, empezó a operar en 1988. En el sitio Garching, en el Instituto Max Planck para física de plasmas en Alemania, se desarrolló el *Wendelstein 7-AS* entre 1988 y 2002, que después se transformaría en el *Wendelstein 7-X*. El proyecto acabará en 2015, *Wendelstein 7-X* será el Stellarator más grande; está planeado para trabajar durante treinta minutos continuos.

Ha habido investigación significativa en confinamiento inercial. Con siete mil millones de dólares se construyó el *National Ignition Facility* (NIF) en *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL), fue completado en marzo del 2009 (Farrell, 2009).

## 8. Ambiental

Una planta de fusión tiene que asegurar la seguridad del público en general, de sus trabajadores, de su equipamiento y del ambiente.

Se ha buscado fusión controlada por su seguridad y ventajas ambientales sobre otras plantas de generación.

Las ventajas de seguridad están relacionadas con los procesos para operar el plasma, poco material radioactivo producido y bajo consumo de material radiactivo como energético. Los desechos de la fusión son similares a los desechos de hospitales o de la industria, que decaen rápidamente. Lo que rige si la fusión es una energía limpia, es el

reciclado de sus componentes. Las plantas de fusión nuclear tienen como ventaja ser de bajo riesgo para el público, sin la necesidad de evacuar si hay algún problema. Los trabajadores de este tipo de plantas también van a estar protegidos de cualquier accidente dentro de la instalación.

Algunas ventajas ambientales son que el deuterio existe en el agua natural y es relativamente fácil sacar la cantidad de deuterio que se necesita. El tritio es casi nulo en la naturaleza. Por la poca proporción que existe, se planea utilizar la pared de litio para generar tritio. Con estos dos factores, el energético de las plantas de fusión es más benigno que el tipo de energéticos donde explotan los subsuelos para sacar miles de toneladas de carbón, por ejemplo.

## Bibliografía

- Bittencourt, J. (2004). *Fundamentals of Plasma Physics*. Nueva York: Springer-Verlag.
- Chen, F. F. (2011). *An Indispensable truth: How Fusión Power Can save the Planet*. New York: Spring. Los Angeles: Springer.
- Dorantes, J. J. (2011). Análisis Neutrónico de un Sistema Híbrido Fusión-Fisión. *Tesis de Maestría*. D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Educativa. (14 de junio de 2014). *Inducción electromagnética*. Obtenido de Transformadores: [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3234/html/4\\_transformadores.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3234/html/4_transformadores.html)
- Energía Nuclear*. (S/F). Obtenido de Historia de la Energía Nuclear: [www.energia-nuclear.net](http://www.energia-nuclear.net)
- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales-UBA. (29 de 05 de 2006). *Micro Seminario*. Obtenido de El escudo terrestre y las tormentas geomagnéticas de origen solar.: <http://www.fcen.uba.ar/prensa/micro/2006/561/articulo1.html>
- Farrell, M. (10 de diciembre de 2009). *Future of Nuclear Power*. Obtenido de Tokamak: <http://new.math.uiuc.edu/math198/MA198-2009/farrell1/>
- Fontanet Saez, J. (2001). *Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator*. Barcelona: Univertitat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech.
- Glasstone, S., & Lovberg, R. H. (1960). *Controlled Thermonuclear Reactions*. Nueva Jersey: D. Van Nostrand Compsny, Inc.
- Lyon, J. F., Anderson, D. T., Rome, J. A., Johnson, J. L., & Garabedian, P. R. (Abril de 2004). *Stellarator Physics*. Obtenido de Chapt 2: <http://aries.ucsd.edu/LIB/REPORT/SPPS/FINAL/chap2.pdf>
- Miyamoto, K. (2004). *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusión*. Tokyo: Springer.
- Pfalzner, S. (2006). *An Introduction to Inertial Confinement*. E.U.: Taylor & Francis.
- Splung.com. (2014). *Splung*. Obtenido de Nuclear Fusión: <http://www.splung.com/content/sid/5/page/fusion>
- Stacey, W. M. (2010). *Fusion. An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion*. Alemania: Wiley-VCH.
- Teller, E. (1981). *Fusion Magnetic Confinement Part A*. Nueva York: Academic Press, Inc.
- UNAM. (2013). Obtenido de Fusión Nuclear: [www.objeto.unam.mx/fisica/fusionNuclear/index.html](http://www.objeto.unam.mx/fisica/fusionNuclear/index.html)

Wikimedia Foundation, Inc. (13 de junio de 2014). *Wikipedia*. Obtenido de Inertial confinement fusion: [http://en.wikipedia.org/wiki/Inertial\\_confinement\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_confinement_fusion)

### III. Fisión Nuclear

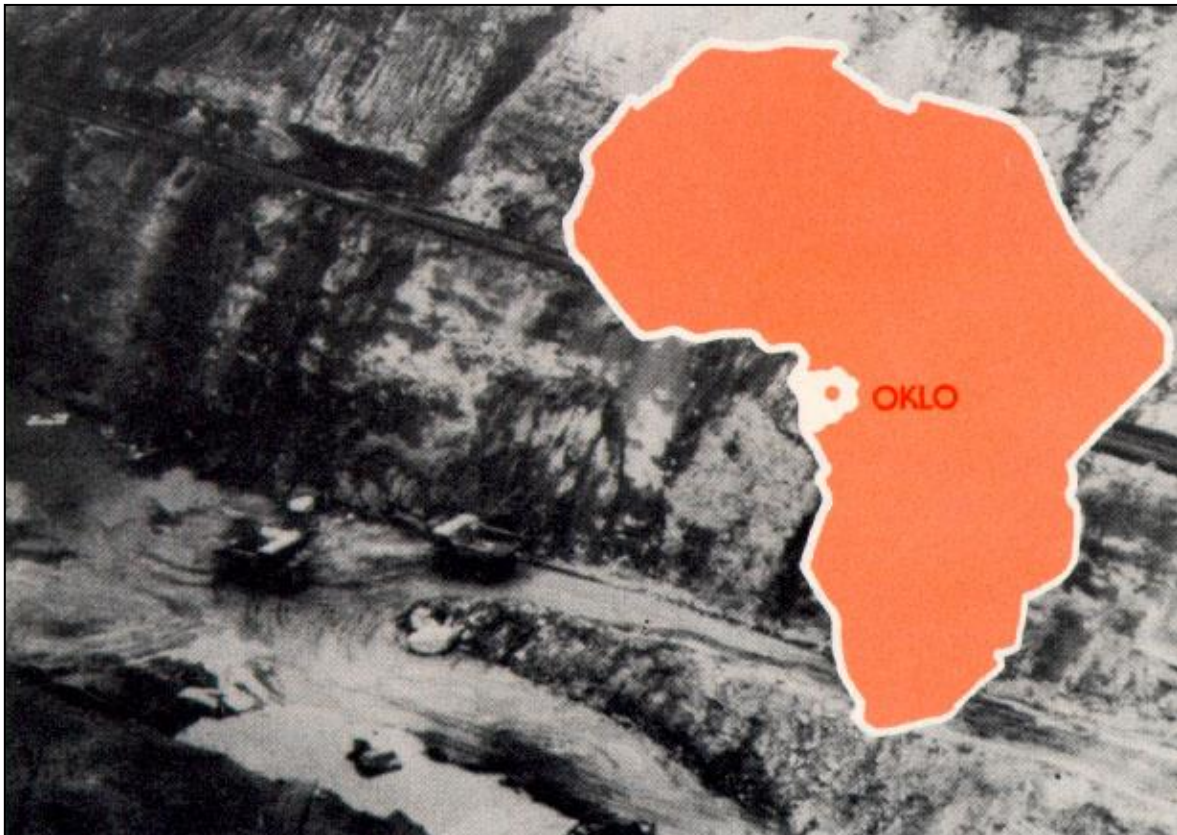


## 1. Introducción

La energía nuclear de fisión es conocida comúnmente por su uso militar sin tomar en cuenta su importancia como energía base en un sistema eléctrico, o sin creer si quiera que esta energía se generara alguna vez de forma natural.

Oklo, en Gabón, África, (figura 2.1) es el único lugar conocido en este mundo que consiste en 16 sitios donde una reacción en cadena de fisión se mantuvo por sí sola hace 1.7 miles de millones de años, manteniéndose por unos miles de años, con un promedio de 100 kW térmicos.

El reactor nuclear natural se formó en el momento que minas de uranio se inundaron con agua del subsuelo, actuando como moderador, y teniendo lugar una reacción en cadena. El calor que generó la reacción en el subsuelo consumía el líquido evaporándolo, provocando que se redujera la reacción en cadena. Cuando no existía reacción en cadena la temperatura del depósito de uranio disminuía y se rellenaba de agua. De esta forma la reacción se mantuvo por miles de años, hasta que el uranio se acabó (Wikimedia Foundation, Inc, 2014).



**Figura 2.1 Oklo, Gabón África.**

## **2. Historia**

La reacción de fisión se conoce como una energía bastarda; por el hecho de ser creada para un uso destructivo. Después de las explosiones en Japón se vio su gran potencial para generar energía.

En 1939, en los inicios de la Segunda Guerra Mundial, Albert Einstein recomienda al presidente de los Estados Unidos, F. D. Roosevelt, el desarrollo de la bomba atómica. Einstein explicaba que gracias a los trabajos de investigación llevados a cabo por Enrico Fermi y Leo Szilard, en los Estados Unidos, y por Frédéric Joliot y su esposa Irene Joliot-Curie, en Francia, era casi seguro que muy pronto fuera posible desencadenar una reacción nuclear en cadena que permitiera liberar unas grandes cantidades de energía. Este procedimiento permitiría también la construcción de una nueva clase de bombas. (Energía Nuclear)

Einstein mencionaba también la escasez de reservas de uranio de los Estados Unidos y que las minas de este mineral se encontraban en Canadá, la antigua Checoslovaquia y en

el Congo Belga. Propuso la colaboración entre científicos y la industria para desarrollar lo más pronto posible la mencionada bomba.

Además, informó que Alemania había suspendido la venta de uranio de las minas checas, de las que el Reich se había hecho cargo, lo que podría significar que los científicos del Instituto Káiser Wilhelm podrían estar llevando a cabo experimentos de fisión nuclear también.

El miedo de Albert Einstein a la guerra nuclear era consecuencia de su profundo conocimiento de los avances de la investigación en este campo. Tuvo que emigrar a Estados Unidos en 1933, desde Alemania, al comienzo de la persecución de los judíos.

Carta de Albert Einstein:

*Albert Einstein  
Old Grove Road  
Peconic, Long Island  
August 2nd, 1939*

*F.D. Roosevelt  
President of the United States  
White House  
Washington, D.C.*

*Sir:*

*Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations.*

*In the course of the last four months it has been made probable through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America--that it may be possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new*

*radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.*

*This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable--though much less certain--that extremely powerful bombs of this type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove too heavy for transportation by air.*

*The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is in the Belgian Congo.*

*In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust the task with a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:*

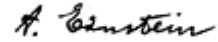
*a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States.*

*b) To speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining co-operation of industrial laboratories which have necessary equipment.*

*I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsacker, is*

*attached to the Kaiser-Wilhelm Institute in Berlin, where some of the American work on uranium is now being repeated.*

*Yours very truly,*



*Albert Einstein*

(Einstein's Letter to President Roosevelt-1939, 2013)

Roosevelt acogió la carta de Einstein sin excesiva ilusión, aunque creó una comisión para que se encargara de las cuestiones mencionadas por el científico en la misma.

Entre 1940 y 1941 empezaron a realizarse medidas en sistemas de uranio-grafito, descubriendo Glen Seaborg, a finales de 1940, un elemento artificial, el plutonio-239, que podría emplearse para la fabricación posterior de la bomba atómica.

La fabricación de la bomba fue confiada al ejército, en un proyecto bélico que costaría alrededor de 2500 millones de dólares. El programa contemplaba dos alternativas: la separación del uranio-235 del uranio-238, y la producción de plutonio-239 en los reactores de grafito.

El 2 de diciembre de 1942, un grupo de físicos nucleares europeos, emigrados a los Estados Unidos, y dirigidos por el físico italiano Enrico Fermi, ponían en marcha la primera reacción nuclear en cadena producida por el hombre con la intención de aplicar por primera vez la energía nuclear. **El** reactor nuclear empleado, conocido como Chicago Pile (CP-1) era de estructura sencilla, y se instaló bajo la tribuna del estadio de fútbol americano de la Universidad de Chicago. Se empleó combustible de uranio, como el que Fermi empleaba en sus experimentos en Roma, y moderador de grafito.

Los preparativos para este experimento fueron llevados a cabo con gran secreto. El objetivo de la investigación era la obtención de una reacción en cadena –en principio controlada– que permitiera el estudio de sus propiedades en vistas al posible desarrollo de una bomba atómica.

Se inició la reacción en cadena, entrando de este modo en funcionamiento el primer reactor nuclear del mundo.

En 1943 fueron creadas tres ciudades con instalaciones de investigación: Oak Ridge (Tennessee) para separar el uranio-235 del uranio-238, Hanford para el establecimiento

de los reactores nucleares, y Los Álamos para la construcción de la bomba atómica. Robert Oppenheimer fue nombrado director del laboratorio de Los Álamos, consiguiendo reunir a cerca de mil científicos que permanecerían allí hasta seis meses después de acabada la guerra.

En la madrugada del 16 de julio de 1945, se llevó a cabo la primera prueba de la bomba de plutonio en el desierto de Alamogordo (Nuevo México), y resultó ser un completo éxito.

La bomba de uranio y la de plutonio estuvieron listas al mismo tiempo.

La primera, denominada Little Boy, constaba de dos masas de uranio-235 que se proyectaban una sobre otra con explosivos convencionales. La energía liberada durante una detonación de este tipo se reparte aproximadamente en un 35% de radiación térmica, un 50% de presión y un 15% de radiación nuclear. Este proceso hace que se alcancen temperaturas de hasta 14 millones de grados centígrados. La bomba de Hiroshima liberó 23,2 millones de KWh.

La segunda, Fat Man, consistía en una esfera hueca de plutonio que colapsaba sobre su centro por la acción de explosivos convencionales, esta bomba se basaba en el mismo principio que un reactor híbrido.

El 6 de agosto de 1945, Little Boy fue lanzada sobre Hiroshima.

Las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki se convirtieron así en los primeros y hasta el momento los únicos objetivos de un ataque con bombas.

Las condiciones para la construcción de una bomba atómica, en la que trabajaron –sin éxito– durante la Segunda Guerra Mundial algunos físicos soviéticos, como Igor Vasilievich Kurchatov, fueron más estrictas de lo que se necesita para conseguir el funcionamiento con éxito de un reactor nuclear (Vandenbosch & Huizenga, 1973).

### **3. Fisión**

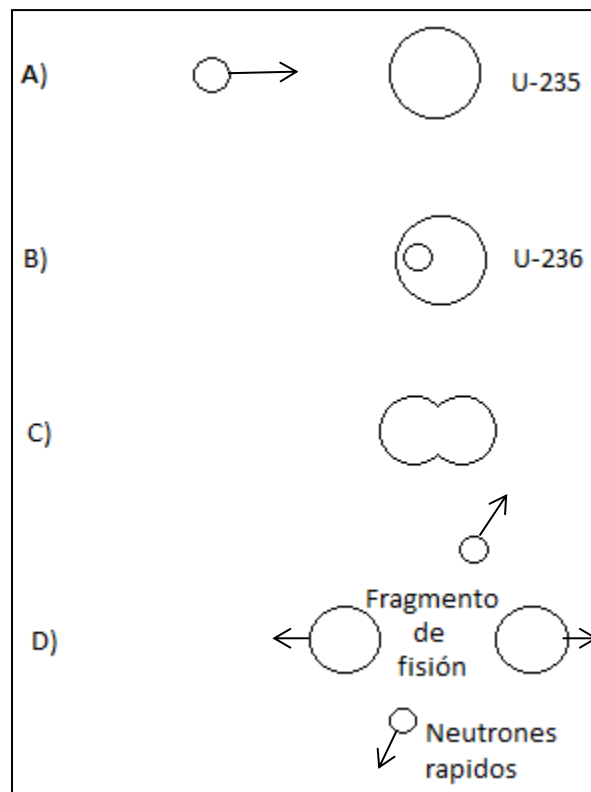
La fisión es el proceso en el cual un elemento se rompe en dos fragmentos. El uranio y el plutonio se rompen al absorber un neutrón, provocando la liberación de energía. En la figura 2.2 se puede apreciar cuatro eventos consecutivos que ocurren con una reacción con U-235 (Settle, 2009).

Evento A: Tenemos a un neutrón el cual se aproxima al isótopo U-235.

Evento B: El neutrón se une al isótopo formando U-236, el cual es un isótopo inestable. En este estado, en algunos casos, el isótopo emite rayos gamma para intentar estabilizarse perdiendo energía.

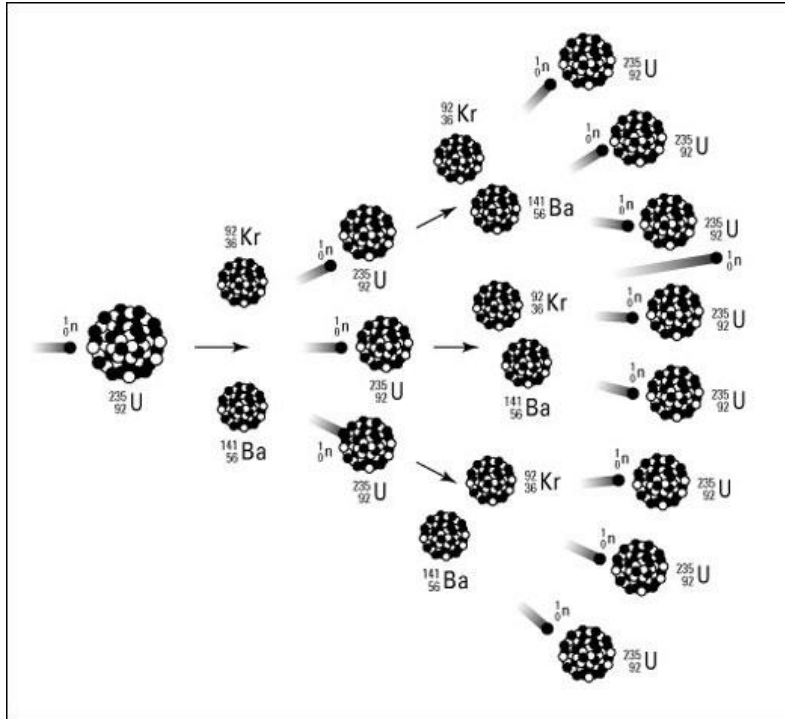
Evento C: El exceso de energía causa distorsión en el núcleo, éste se deforma por una repulsión de Coulomb y la fuerza del núcleo no puede mantener las dos partes juntas.

Evento D: El núcleo se separa en dos elementos, llamados fragmentos de fisión. Éstos se separan llevando una gran velocidad, 166 MeV de energía cinética de un total de 200 MeV emitida durante todo el proceso. Al ser separados a gran velocidad, los fragmentos de fisión pierden electrones, y como resultado, estos electrones viajando a grandes velocidades pierden energía chocando con los átomos o moléculas del medio. La energía térmica así producida se puede recuperar si la fisión se encuentra dentro de un reactor (Shultis & Faw, 2008).



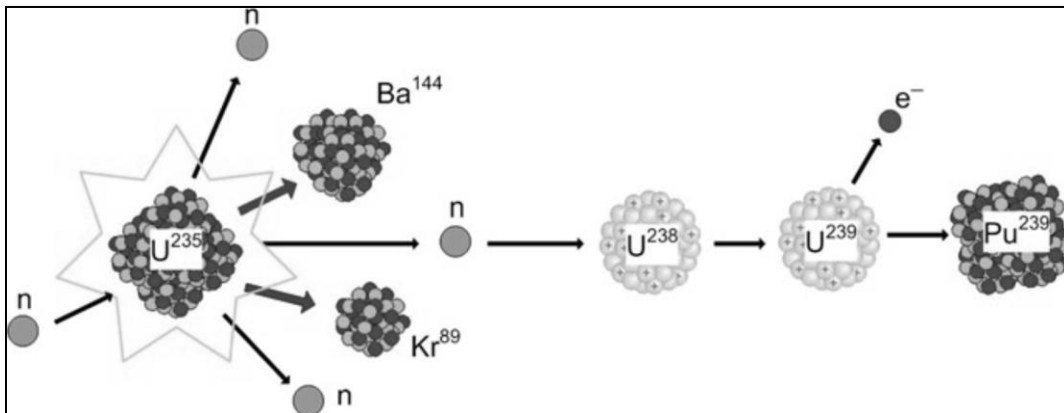
**Figura 2.2** Descripción grafica de la fisión.

#### 4. Reacción en Cadena



**Figura 2.3** Reacción en cadena.

Una vez obtenida la fisión, es necesario mantener esta reacción, para así mantener emitiendo energía constante; esto se logra con una reacción en cadena (figura 2.3). La fisión emite de uno a ocho neutrones, alguno de estos neutrones se pueden unir a otro núcleo de U-235, éste se rompe en dos elementos más ligeros, liberando energía y neutrones.



**Figura 2.4** Reacción en cadena, siendo bario y kriptón fragmentos.



En el caso de la figura 2.4 los elementos más ligeros son Ba-144 y Kr-89. Se puede observar que tres neutrones fueron liberados en la reacción. Una reacción en cadena ocurre cuando uno de estos neutrones rompe otro U-235 para liberar más neutrones y la reacción en cadena continuará (Chen, 2011).

La figura 2.4 nos muestra otra reacción que puede continuar la reacción en cadena. En el combustible de los reactores de fisión no sólo se encuentra U-235, también podemos encontrar U-238, y en mayor cantidad. Cuando un neutrón se une al U-238, éste se transforma en U-239, que es inestable por lo que emite una partícula beta y se transforma en Np-239, el cual, a su vez, también por emisión de una partícula beta, decae en Pu-239. Si un neutrón llega a chocar con Pu-239, éste se fisionará y continuará la reacción en cadena.

### 5. Factor de multiplicación efectiva (Keff)

Dentro de un reactor se tiene un conjunto de neutrones iniciales ( $N_{iniciales}$ ), estos neutrones pueden tener diferentes tipos de reacciones en el medio (Koerting & Qeral, 2012):

- a. Ser absorbidos por  $U^{238}$ .
- b. Ser absorbidos por  $U^{235}$  y provocar fisión.
- c. Ser absorbidos en materiales estructurales, refrigerante u otros materiales.
- d. Escapar del núcleo.

Al factor de número de neutrones generados o finales ( $N_{finales}$ ), entre el número de neutrones iniciales ( $N_{iniciales}$ ), se le conoce como factor de multiplicación efectiva (Keff).

$$Keff = \frac{N_{Finales}}{N_{Iniciales}}$$

En función del valor del factor de multiplicación efectiva el número de neutrones evolucionará en el tiempo aumentando, disminuyendo o permaneciendo constante, recibiendo los nombres de:

- a.  $Keff > 1$ . Reactor supercrítico.
- b.  $Keff = 1$ . Reactor crítico.
- c.  $Keff < 1$  Reactor subcrítico.

## 6. Componentes de un Reactor

Cualquier planta de generación eléctrica consiste en un arreglo de componentes estructurales, sistemas mecánicos y eléctricos. En las plantas nucleares existen demandas especiales en la estructura de los edificios. En los reactores estándar los componentes básicos son (Bodansky, 2004):

### a. Combustible

Existen pocos elementos que se pueden usar como combustible para reactores nucleares. Los posibles candidatos dependen de sus propiedades, al encontrarlos en la naturaleza:

Uranio ( $Z=92$ ). Es el combustible principal de la mayoría de los reactores, especialmente el isótopo U-235 que es fisil. El U-238 es importante en los reactores, principalmente porque puede criar Pu-239.

Torio ( $Z=90$ ). El torio se encuentra completamente como Th-232, que no es fisil. Se puede usar para criar U-233 que es un material fisil.

Por lo tanto, el uranio y el torio son los únicos elementos encontrados en la naturaleza que se pueden utilizar como combustible para un reactor nuclear. Sin embargo, existen dos elementos que se pueden criar a partir de U-238 y Th-232, que son Pu-239 y U-233, respectivamente.

El combustible viene en *pellets* cilíndricos (figura 2.5), con una dimensión típica de un centímetro de altura. A este pellet, normalmente de uranio, lo enriquecen al 5%, máximo, de U-235 y 95% de U-238 (Murray).



**Figura 2.5 Pellet de Uranio.**

### **b. Materiales Estructurales**

El material estructural se utiliza en soportes, espaciadores y como revestimiento del combustible; sirve para evitar que los productos de fisión que se producen en el combustible salgan al exterior (Figura 2.6). Como se encuentra en el combustible está sometido a radiación.

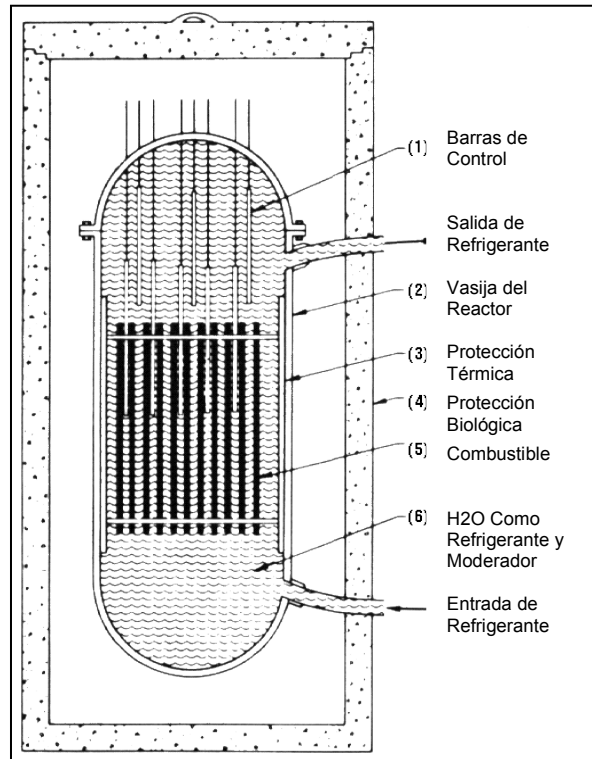


**Figura 2.6 Material estructural.**

### **c. Material de Control**

El calor emitido en el reactor nuclear es función de las fisiones y por lo tanto del flujo de neutrones. Por lo tanto, controlando este flujo puede regularse el nivel de la potencia. Los materiales de control (Figura 2.7) son elementos cuya característica principal es absorber neutrones.

Para regular la absorción de los neutrones las barras de control se introducen, si se quiere reducir la población de neutrones, o se retiran si se quiere aumentar la cantidad de éstos dentro del reactor.



**Figura 2.7** Material de control.

#### **d. Moderador**

La función primordial del moderador es reducir la energía de los neutrones que se producen en la fisión, desde una energía del orden de 2 MeV hasta un nivel de 0.025 eV. Los reactores rápidos carecen de moderador.

Hay una pequeña cantidad de candidatos para moderar: agua, agua pesada, grafito y berilio.

#### **e. Refrigerante**

En general, el refrigerante transfiriere la energía térmica del combustible caliente a una turbina acoplada a un generador, y así se genera la electricidad.

En las plantas nucleares, el refrigerante tiene un rol más amplio; si se apaga la planta nuclear el refrigerante tiene que seguir fluyendo, ya que el reactor sigue generando energía térmica y podría producir un accidente nuclear.

## **7. Evolución de la Energía Nuclear**

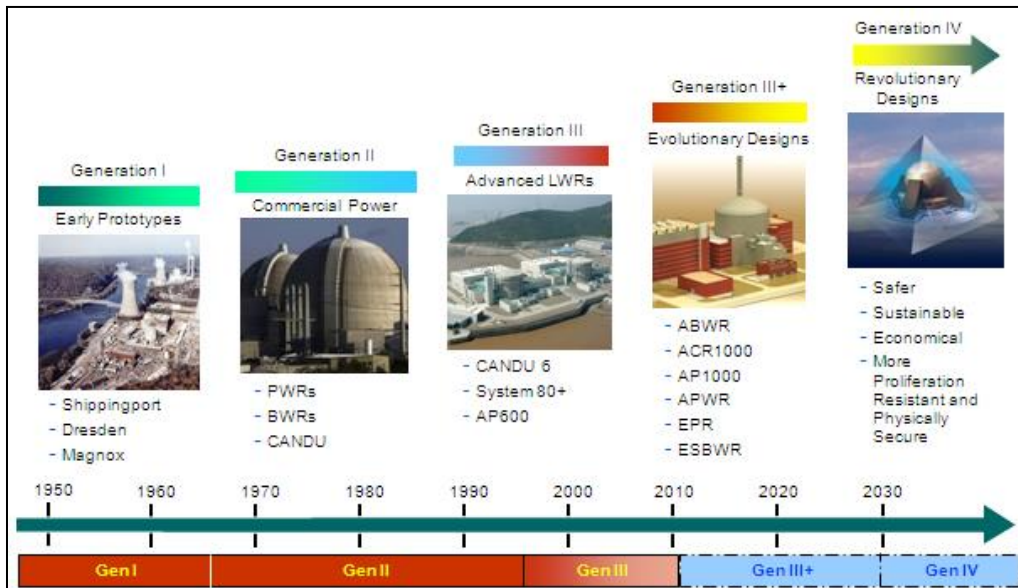
La finalidad de los primeros reactores fue la producción de plutonio, que se utilizaba para las armas nucleares. Estos reactores se utilizaron en Estados Unidos de 1944 a 1982, también se utilizaron en la Unión Soviética, en la guerra fría.

Más adelante los reactores nucleares fueron utilizados en los submarinos, por ejemplo, el US Nautilus, en 1954. El mismo año, Obninsk 5 fue la primera planta nuclear incorporada a la red eléctrica, en Rusia. El número de reactores nucleares a partir de estos momentos creció en grandes cantidades. Hoy en día existen 430 plantas nucleares comerciales operando en 31 países, con cerca de 370,000 MW eléctricos de capacidad total (World Nuclear Association, 2014). En 56 países se están operando un total de 240 reactores de investigación y 150 de barcos y submarinos.

Los intereses por la energía nuclear se han incrementado por la inquietud por el cambio climático y la reducción de las fuentes fósiles.

Los diseños de los reactores han evolucionado de la primera generación a la segunda generación, que incluyen los PWR, BWR y Magnox de los 1970 a 1980. Los reactores generación III y generación III + están diseñados para ser más económicos, para construcción más rápida y fácil de operación, y más seguros; algunos ya están operando (ABWR) y otros están en construcción (AP1000).

Finalmente tenemos los reactores generación IV, se planea usarlos en el 2030. Estos diseños de reactores continuarán en desarrollo para mejoras económicas, seguridad, desechos y proliferación (Talk Nuclear, 2012).



**Figura 2.8** Evolución de los reactores nucleares. (Wikimedia Foundation, Inc., 2014)

## 8. Reactores de Fisión

Los reactores nucleares se clasifican por sus siguientes características:

- Según el **combustible utilizado**, encontramos los reactores nucleares de uranio natural y los reactores nucleares de uranio enriquecido. El combustible de uranio natural contiene la misma proporción de uranio que se encuentra en la naturaleza, mientras que en el combustible de uranio enriquecido esta proporción se aumenta artificialmente. También existen los combustibles de óxidos mixtos de Uranio y Plutonio.
- Según el **moderador utilizado**, pueden ser reactores nucleares de agua pesada, agua ligera o de grafito.
- Según el **material usado como refrigerante**, los materiales más habituales son un gas (helio o anhídrido carbónico) o agua (ligera o pesada). Algunas veces estos materiales, a la vez, también actúan como moderador. También se puede utilizar sales fundidas, aire, o metales líquidos (sodio o plomo).

Las diferencias entre los diferentes tipos de centrales nucleares en operación se basan en el tipo de reactor nuclear que utilizan para producir energía. La forma en que se genera energía eléctrica a partir del vapor generado es similar en todas las centrales nucleares.

Tipos de reactores nucleares en operación:

**a. PWR (Pressurized Water Reactor)**

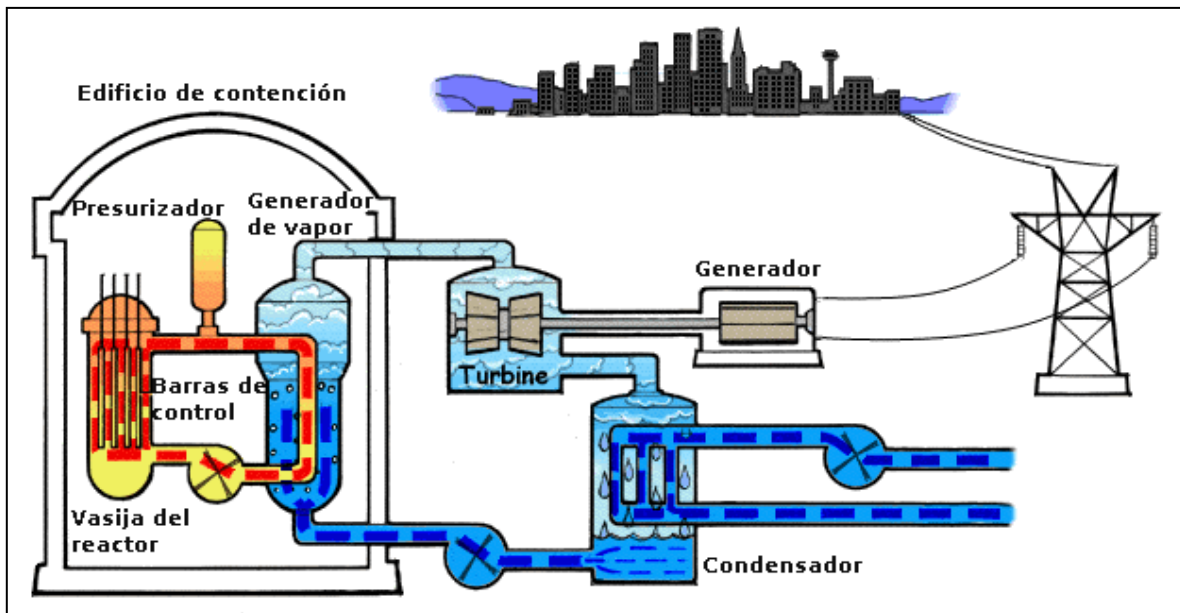
Es el reactor más común, el diseño original de este tipo de reactores era usado en las plantas de generación de los submarinos (figura 2.9).

El agua del núcleo fluye por un circuito primario a una temperatura y presión elevada, este circuito llega a un intercambiador de calor, el cual eleva la temperatura del agua en el circuito secundario, este líquido se transforma a estado gaseoso (vapor) y fluye por una turbina para generar la energía eléctrica.

Combustible: Uranio enriquecido

Moderador: Agua

Refrigerante: Agua



**Figura 2.9 PWR. (APS Maroc)**

## b. BWR (Boiling Water Reactor)

Es un diseño muy parecido al PWR, la diferencia radica en el uso de un solo circuito y su presión es menor (figura 2.10).

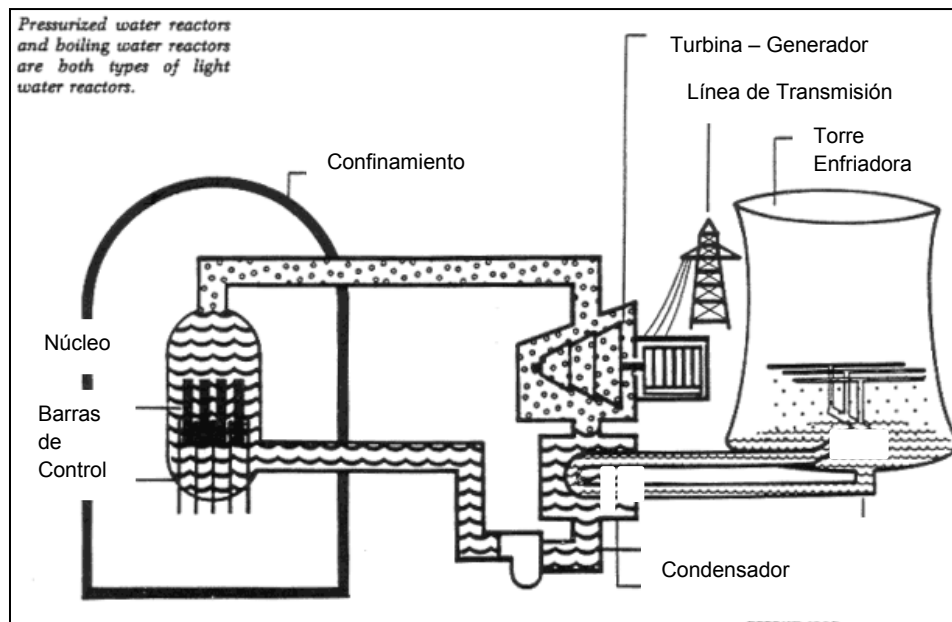
El agua dentro del núcleo del reactor se evapora ocasionando que suba por la vasija a los separadores de humedad y secadores, aquí tiene que absorber casi el 100% del agua en estado líquido para no dañar las turbinas. Pasando los secadores se dirige directo a las turbinas para generar energía eléctrica con el generador acoplado a las turbinas. Después el agua se enfría por un intercambiador y regresa a la vasija por medio de bombas.

Combustible: Uranio enriquecido

Moderador: Agua

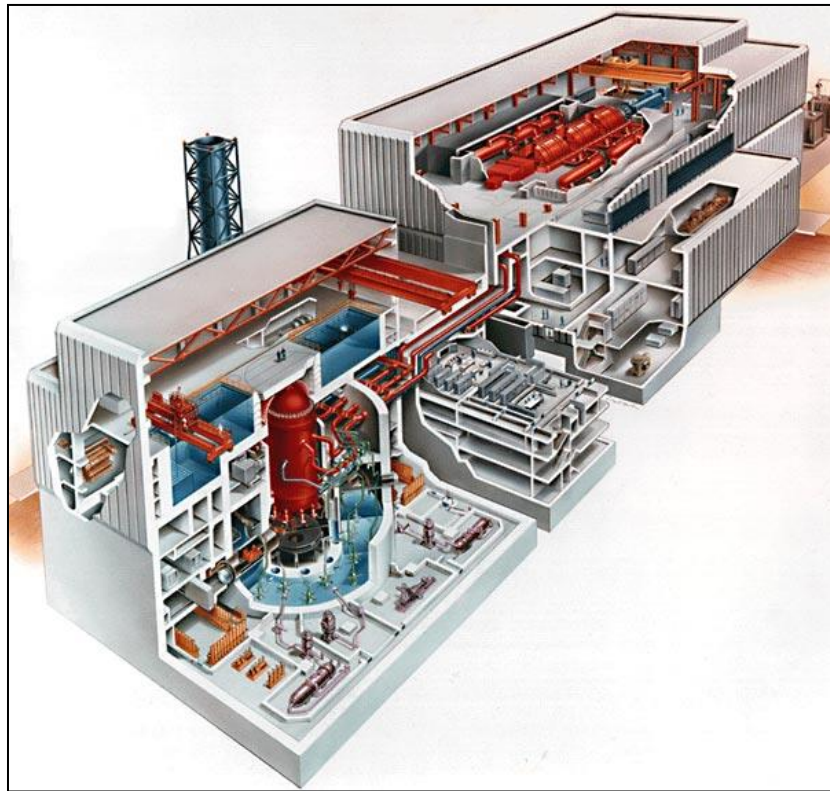
Refrigerante: Agua

El ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) es una evolución de los diseños BWR (figura 2.11). Este tipo de reactores se encuentran en Japón.



**Figura 2.10 BWR (U.S.NRC, 2012).**





**Figura 2.10 ABWR. (United States Nuclear Regulatory Commission, 2014)**

**c. PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor)**

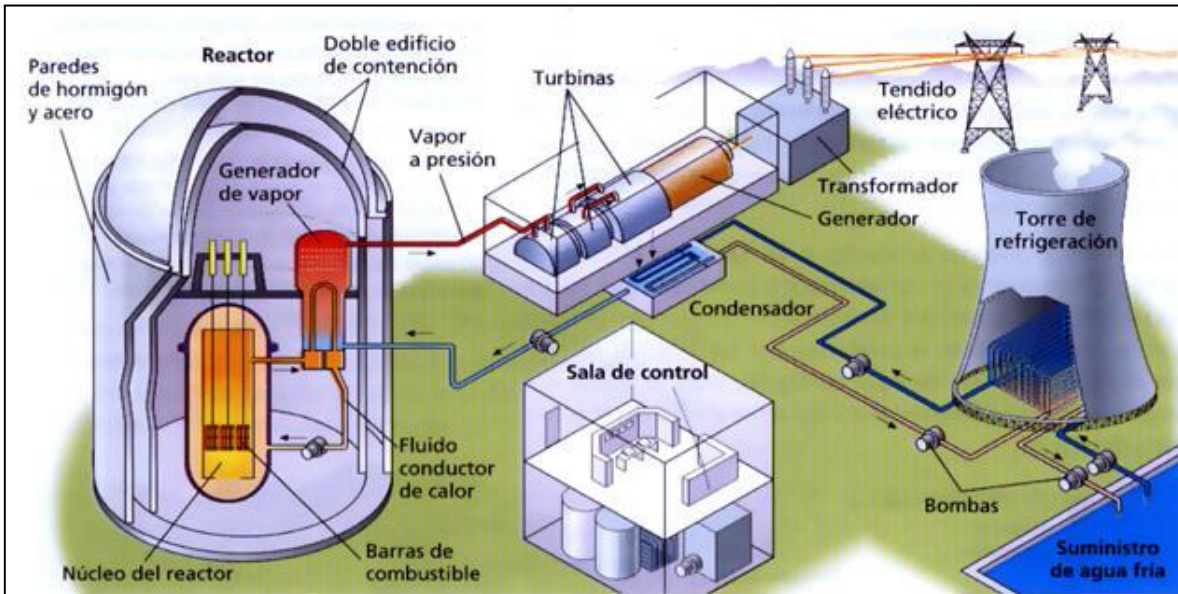
Fue desarrollado principalmente en Canadá, comúnmente se le conoce con el nombre de Candu (figura 2.11).

Es un diseño muy parecido al reactor PWR por el hecho de tener dos circuitos y una temperatura y presión elevada. La diferencia está en el uso de agua pesada como moderador y uranio natural como combustible, aunque actualmente utiliza uranio ligeramente enriquecido.

Combustible: Uranio natural

Moderador: Agua pesada

Refrigerante: Agua pesada



**Figura 2.11 Candu. (Castela, 2012)**

**d. HTGR (High-Temperature Gas-cooled Reactor)**

Este reactor nuclear es una evolución de los reactores nucleares refrigerados por gas. Desarrollado en Alemania, Reino Unido y Estados Unidos. Han existido sólo dos diseños construidos en todo el mundo, en Estados Unidos y Alemania.

Combustible: Uranio natural

Moderador: Grafito

Refrigerante: Helio

**e. FNR (Fast Neutron Reactor)**

Hay varios diseños, siendo el ruso y el francés los que se encuentran más avanzados.

El núcleo del reactor consta de una zona fisil, rodeada de una zona fértil en la que el uranio natural se transforma en plutonio. También puede utilizarse el ciclo uranio 233-torio.

El refrigerante es sodio líquido, el vapor se produce en intercambiadores de calor. Su nombre de "reproductor" se debe a que en la zona fértil se produce mayor cantidad de material fisil que el que consume el reactor en su funcionamiento, es decir más combustible nuevo que el que se gasta.

Combustible: Uranio enriquecido, o plutonio o óxidos mixtos de uranio y plutonio.

Moderador: Nulo

Refrigerante: Sodio

## **9. Residuos Radioactivos**

Los residuos radiactivos, esto es, aquellos materiales que no teniendo ningún uso declarado, contienen isótopos radiactivos por encima de un valor legalmente establecido, se clasifican para su gestión en dos grandes grupos:

Residuos de Baja y Media Actividad (RBMA) que contienen isótopos radiactivos con períodos de semidesintegración iguales o inferiores a 30 años.

Para los RBMA su aislamiento y confinamiento debe asegurarse para períodos de aproximadamente 300 años, establecidos considerando que transcurridos 10 veces el período de semidesintegración la actividad habrá prácticamente desaparecido.

Residuos de Alta Actividad (RAA) que contienen isótopos radiactivos con períodos de semidesintegración superiores a 30 años. Éstos, además, suelen ser emisores de calor y pueden permanecer radiactivos durante miles o decenas de miles de años.

Los residuos de Alta Actividad, al contener isótopos radiactivos con períodos de semidesintegración de cientos o miles de años, requieren otros sistemas de gestión definitiva que aseguren su aislamiento y confinamiento por períodos de decenas o centenas de miles de años. El almacenamiento geológico profundo es la opción internacionalmente aceptada para la gestión final de este tipo de residuos (Pastor, 2001).

## **Bibliografía**

- APS Maroc. (s.f.). *Energía y su Transformación*. Obtenido de APS Maroc:  
<http://apsmaroc.wordpress.com/2011/02/10/energia-y-su-transformacion/>
- Bodansky, D. (2004). *Nuclear Energy Principles, Practices, and Prospects*. Nueva York: Springer.
- Castela, P. J. (06 de julio de 2012). *pcastela*. Obtenido de Central Nuclear:  
<http://www.pcastela.es/recursos/centrales/nuclear.htm>
- Chen, F. F. (2011). *An Indispensable truth: How Fusion Power Can save the Planet*. New York: Spring. Los Angeles: Springer.
- Einstein's Letter to President Roosevelt-1939*. (2013). Obtenido de atomic archive:  
<http://www.atomicarchive.com/Docs/Begin/Einstein.shtml>
- Energía Nuclear*. (s.f.). Obtenido de Historia de la Energía Nuclear: [www.energia-nuclear.net](http://www.energia-nuclear.net)
- Koerting, V., & Queral, C. (28 de agosto de 2012). *Energía Nuclear y Ciclo de Combustible*. Obtenido de  
<https://ingenierosenapuros.files.wordpress.com/2012/09/en-tema2.pdf>
- Murray, R. (s.f.). *Nuclear Energy an introducción to the concepts systems, and applications of nuclear process*.
- Pastor, J. A. (2001). *El Almacenamiento Geológico Profundo de los Residuos Radiactivos de Alta Actividad*. España: Empresa Nacional de Residuos Radioactivos, S.A.
- Settle, D. F. (2009). *Nuclear Chemistry*. Obtenido de Nuclear Reactors:  
<http://www.chemcases.com/nuclear/nc-10.html>
- Shultis, K., & Faw, R. (2008). *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering*. Florida: CRC Press Boca Raton.
- Talk Nuclear*. (20 de abril de 2012). Obtenido de The Evolution of Nuclear Power:  
<http://talknuclear.ca/index.php/2012/04/the-evolution-of-nuclear-power/>
- U.S.NRC. (29 de Marzo de 2012). *Boiling Water Reactor*. Obtenido de Protecting People and the Environment: [www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/bwr-schematic.html](http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/bwr-schematic.html)
- United States Nuclear Regulatory Commission. (25 de 02 de 2014). *U.S.NRC*. Obtenido de Issued Design Certification - Advanced Boiling-Water Reactor (ABWR):  
<http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/abwr.html>
- Vandenbosch, R., & Huizenga, J. R. (1973). *Nuclear Fission*. Nueva York: Academic.

Wikimedia Foundation, Inc. (10 de junio de 2014). *Oklo*. Obtenido de Wikipedia:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Oklo>

Wikimedia Foundation, Inc. (01 de Mayo de 2014). *Generation IV reactor*. Obtenido de  
Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Generation\\_IV\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Generation_IV_reactor)

*World Nuclear Association*. (Marzo de 2014). Obtenido de Outline History of Nuclear  
Energy: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Nuclear-Fusion-Power/#.UngaJfILO49>

## IV. Híbrido Fusión-Fisión

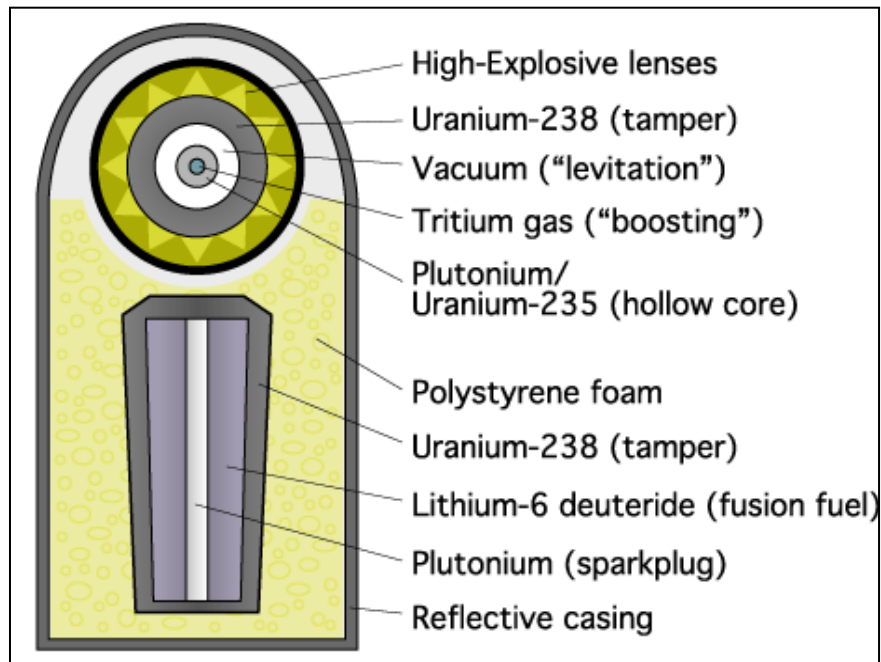
## 1. Introducción

Un híbrido de fusión-fisión es la combinación de dos conceptos, el reactor de fusión y el reactor de fisión, para generar esencialmente lo mismo, que es energía eléctrica.

La idea de un híbrido no es algo nuevo. Su origen puede ser rastreado 50 años atrás; cada época la idea regresa. La razón por la que nunca se dio gran importancia a un híbrido es que en el pasado, la tecnología requerida era muy compleja para la época. Tampoco era necesario invertir investigación y tiempo en un nuevo generador de energía.

Realmente, el único híbrido fusión-fisión construido hasta este momento es la bomba de hidrógeno, probada por primera vez en 1952.

La bomba de hidrógeno (figura 3.1), o bomba H, es un artefacto nuclear cuya explosión se logra por la combinación de la fusión y la fisión. Su nombre se lo debe a los elementos deuterio y tritio, los cuales son isótopos del hidrógeno, por esta razón se le conoce como bomba de hidrógeno.



**Figura 3.1 Bomba H. (Wikimedia Foundation, Inc., 2014)**

Para explicar a grandes rasgos como se genera la explosión se pueden analizar las figuras 3.1 y 3.2:

La figura 3.1 nos muestra el interior de la bomba, podemos observar una esfera en la parte superior; está compuesta de tritio en estado gaseoso, plutonio o uranio 235, vacío,



Uranio 238 y explosivos, en esta sección es donde ocurre la fisión. En la parte inferior de la bomba se encuentra un paralelogramo el cual almacena deuterio, litio, plutonio y uranio, es donde ocurre la fusión. Lo que recubre a la esfera y al paralelogramo es una espuma de polietileno.

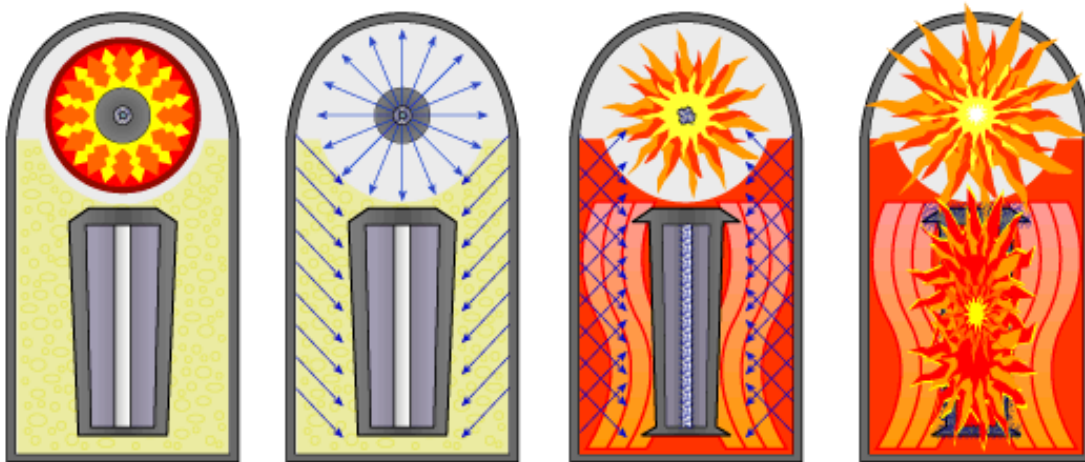
En la primera imagen de la figura 3.2 se presenta la emisión de neutrones por el tritio hacia el plutonio 239 o el Uranio 235; esto desencadena la fisión. Esta sección la envuelve material explosivo y uranio 238, generando más energía cuando ocurre la fisión.

En la segunda imagen se observa cómo los rayos X provocados por la fisión irradian la espuma de polietileno (Reed, 2011).

La tercera imagen muestra cómo la esfera genera temperaturas muy elevadas, a causa de esto el plástico llega a su cuarto estado de la materia, provocando que el recubrimiento del paralelogramo, que es plutonio, se fisione.

Al fisionar se puede observar en la quinta imagen cómo el calor generado hace reacción en el deuterio y litio 6 provocando la fusión, y a su vez la fusión genera fisión en el plutonio interno del paralelogramo.

Hoy en día se busca la potencia de un reactor híbrido, no por su poder destructivo, sino para generar grandes cantidades de energía eléctrica de una forma limpia y sustentable (Wikimedia Foundation, Inc., 2014).



**Figura 3.2 Explosión por pasos de la Bomba H.**



## 2. A Grandes Rasgos

Un híbrido de fusión-fisión es un reactor nuclear que se basa en un núcleo de fusión rodeado por una pared o cobija de fisión. El núcleo de fusión sirve como una fuente de neutrones externa, así los neutrones chocan con la pared de fisión desencadenando la reacción nuclear.

Un híbrido de fusión-fisión se basa en una combinación del número de neutrones que proporciona un reactor nuclear de fusión con la inmensa energía que genera en un reactor nuclear de fisión (Energy, 2009).

## 3. Que se Busca en un Híbrido

La energía nuclear es una forma de lograr expansión en los niveles de generación, convirtiéndose en energía base en todo el mundo, sin emitir dióxido de carbono. Las energías renovables, no pueden cubrir este trabajo por su naturaleza no continua.

Si la energía nuclear se incrementa en el futuro, se tendrá que mejorar las formas de manejo de desechos que se tiene actualmente. El reactor híbrido de fusión-fisión representa una de las formas de manejo de desechos, utilizándolo para: (Energy, 2009)

- a. Transmutación de combustible gastado de reactores de agua ligera.
- b. Generación de energía.
- c. Reutilización de su propio combustible.
- d. Generación de combustible para reactores de agua ligera.

## 4. Funcionamiento

Para entender el atractivo del híbrido de fusión-fisión es necesario recordar el capítulo de fisión nuclear y el de fusión nuclear.

Es útil pensar en el núcleo de fusión, como una fuente de neutrones que chocan con la pared de combustible de fisión.

La reacción que nos interesa en el núcleo de fusión es la de D-T, que aparece en la ecuación de abajo. Aunque se sabe que la reacción por si sola genera energía suficiente para operar como planta de generación, lo que nos interesa para el híbrido es el neutrón que emite.



Cuando uno de los neutrones emitidos penetra la pared de fisión, existen dos tipos de reacciones cuando interactúa con el uranio: fisión o captura. La primera reacción, fisión, consta de un neutrón el cual choca contra un elemento pesado que es el uranio-235 y lo divide en dos elementos más ligeros emitiendo energía de aproximadamente 200 MeV.

La segunda reacción que nos interesa es la de captura de un neutrón. Un elemento como el U-238 captura a un neutrón, produciendo así un elemento fisible conocido como Pu-239. El plutonio es un elemento que se utiliza como combustible en los reactores nucleares.

Es importante resaltar que un híbrido debe tener una pared de litio, cuando un neutrón choca con litio-6 reacciona formando tritio, el cual se utiliza como combustible en el núcleo de fusión (Energy, 2009).

## **5. Combustible**

La energía nuclear se caracteriza por generar energía a gran escala con la mínima cantidad de combustible. Por ello, un híbrido puede trabajar quemando la mínima cantidad de combustible; sin embargo, el combustible gastado es un material radioactivo por lo que se tiene que manejar con su debida atención (Energy, 2009).

Cuando se habla de combustible gastado se hace referencia al uranio dentro de un reactor de agua ligera utilizado como combustible durante un determinado periodo. Durante el periodo en el que está en el núcleo del reactor, y debido al flujo neutrónico al que está sometido el uranio, tienen lugar reacciones de captura neutrónica y de fisión nuclear de parte del uranio y de otros radionucleidos generados, dando lugar a productos de fisión, productos de activación y a la generación de plutonio y de actínidos menores, como el neptunio, el americio y el curio, con una gran generación de calor (Processing of Used Nuclear Fuel, 2013).

Para poder reciclar el combustible gastado es necesario utilizar una estrategia para purificarlo. Esta estrategia es una tecnología mediante la cual se reprocesa los desechos radiactivos para recuperar uranio y plutonio de otros actínidos menores y productos de fisión.

Otra razón para reprocesar es para reducir el volumen de los desechos altamente radioactivos; puede llegar a reducirse hasta un quinto de su volumen inicial. Adicionalmente, los niveles radiactivos de los desechos procesados son menores y decaen más rápido que los desechos sin procesar.

### **a. Reprocesamiento del combustible**

El propósito del reprocesamiento es separar el uranio y el plutonio de otros actínidos y productos de fisión contenidos en el combustible gastado. El combustible es disuelto en ácido nítrico, y el uranio y el plutonio son separados en un proceso químico (p.e. el proceso PUREX). El uranio y el plutonio recuperados son reciclados para su posible uso como combustible nuclear. El resto (otros actínidos, productos de fisión e impurezas) es una solución altamente radioactiva (desecho líquido de alto nivel) y es almacenada para su futuro acondicionamiento (François J. L.).

### **b. Proceso PUREX**

El proceso inicia cuando los elementos combustibles se transportan a una celda mecánica, donde se cortan los extremos superior e inferior; por medio de una sierra o por un disco cortante con abrasivos. Las barras combustibles se rebanan en pequeños trozos de unos cinco milímetros, que caen directamente al recipiente de disolución, en donde se disuelven con ácido nítrico. Los elementos pesados se van en la solución, separándose del encamisado del combustible. La solución de ácido nítrico que contiene el uranio y el plutonio es procesada mediante extracción de solventes, separando, de esta manera, los productos de fisión y los elementos transuránicos del uranio y del plutonio. Después de esto, el uranio y el plutonio se separan usando un proceso químico, el cual reduce solamente al plutonio, pero no al uranio, a un estado orgánico insoluble; quedando, de esta manera, separados el uranio y el plutonio, los cuales pueden ser utilizados para la fabricación de nuevo combustible (François J. L.).

El uranio recuperado de un reprocesamiento debe ser re-enriquecido para su uso como combustible nuevo. Debido a que contienen U-234 y U-236 en mayores cantidades y absorben más cantidad de neutrones; el uranio procesado debe ser enriquecido más de lo que necesita el uranio natural (Dorantes, 2011).

El plutonio es primero recuperado como nitrato  $[Pu/ (NO_3)_4]$ , el cual es posteriormente convertido en óxido ( $PuO_2$ ). Un simple reciclado de plutonio en forma de combustible MOX, incrementa la energía del uranio original en un 12% y si el uranio es enriquecido de la misma forma, este incremento es de 22% (François J. L.).

### **c. Transmutación**

El objetivo de la transmutación es transformar elementos de vida media larga en elementos de vida media más corta. Con esto, la necesidad de almacenar los actínidos

menores y los productos de fisión será de menor tiempo y pueden ser de menor volumen y elementos más simples.

La transmutación se logra mediante el bombardeo de neutrones. En el caso de un reactor nuclear híbrido de fusión-fisión, el núcleo de fusión es el que realiza el bombardeo (Processing of Used Nuclear Fuel, 2013).

#### **d. Combustible en el Reactor Híbrido de Fusión-Fisión**

En un reactor híbrido de fusión-fisión se utiliza uranio, plutonio, torio o una mezcla, ya sea sin reciclar, reciclado o segundo reciclado. No es necesario que la sección de fisión mantenga por sí sola la reacción en cadena, esto se logra gracias a los neutrones provenientes de la sección de fusión. El resultado es un quemado extremo del combustible, con esto una gran cantidad de productos de fisión y actínidos menores pueden ser transmutados antes de que el combustible tenga que ser cambiado (Mixed Oxide (MOX) Fuel, 2013).

#### **e. Híbrido Fusión-Fisión como Productor de Combustible**

El uranio como todo combustible, con una alta demanda del producto, se volverá limitado y más costoso. El reactor híbrido fusión-fisión, en su propósito como criador de combustible, utilizaría uranio natural, el cual está compuesto en su mayor parte por U-238, para criar Pu-239, que se puede utilizar como combustible para reactores de agua ligera.

Otro elemento que funciona como criador de combustible es el torio. El Th-232 captura un neutrón, y se transforma en U-233, que es excelente como combustible fisil (Energy, 2009).

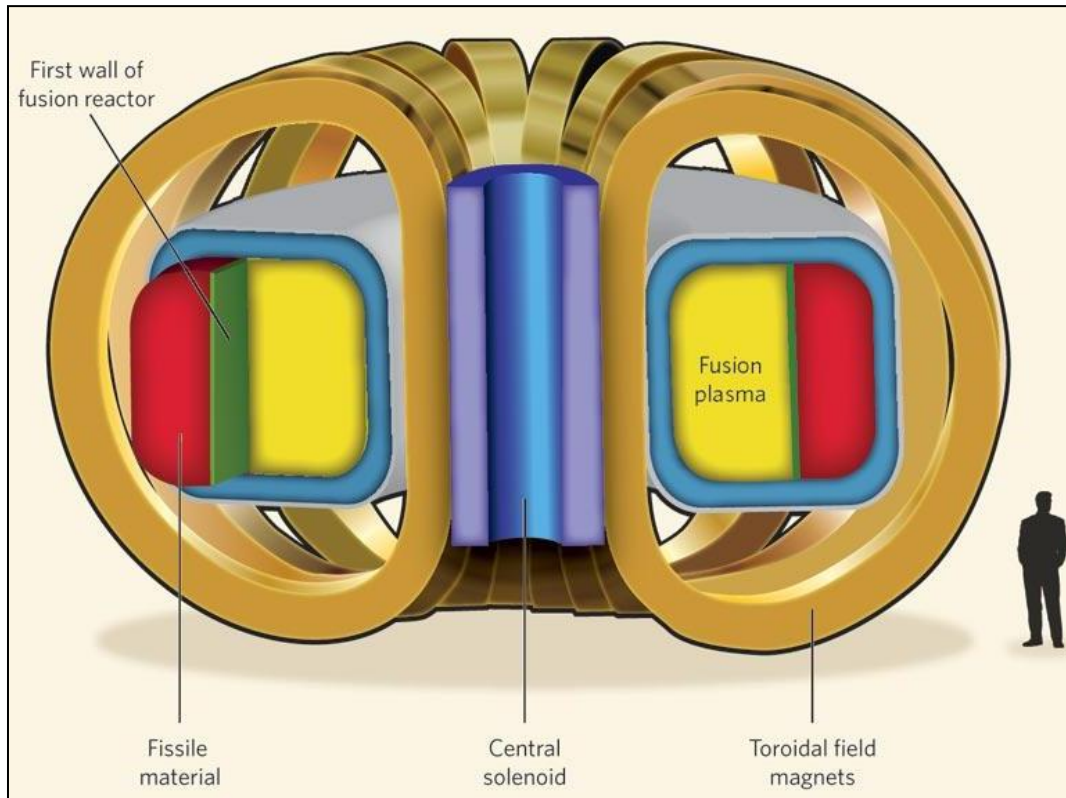
### **6. Tipos de Reactores Híbridos**

Existen varias propuestas de fuente de neutrones para el reactor híbrido de fusión-fisión, ya sea por confinamiento magnético o confinamiento inercial. Aunque algunas propuestas tienen sus conceptos en desarrollo, los sistemas proponen una producción de energía sin residuos radioactivos del proceso (Energy, 2009).

#### **a. *Subcritical Advanced Burner Reactor (SABR)***

El reactor SABR (figura 3.3) es un reactor estilo Tokamak (confinamiento magnético); se enfría por medio de sodio y su combustible es un metal 40Zr-transuránico. Actualmente se

desarrolla en el *Argonne National Laboratorio (ANL)*. Este reactor proporcionará una potencia de 3000 MW térmicos, la cual fue elegida por la experiencia con esta potencia.



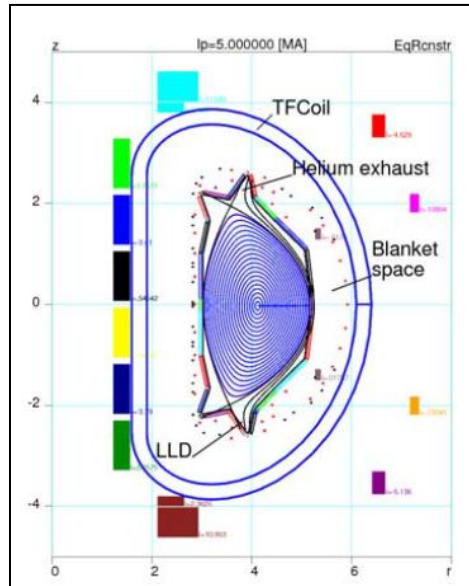
**Figura 3.3 SABR. (Chen, 2011)**

El reactor cuenta con una cámara en forma de anillo dentro de los electro-magnetos del Tokamak. Estos anillos cuentan con material fisible en el exterior, en el intermedio tiene una capa de sodio y plasma en la cámara interna.

#### **b. Fusion-Fission Research Facility (FFRF)**

El reactor FFRF es un proyecto de la *Chinese Academy of Sciences (ASIPP)*, una institución dedicada al desarrollo de aplicaciones de fusión en la energía nuclear. La misión de FFRF es desarrollar la fusión a un estado de fuente de neutrones.

El FFRF está planeado para tener una corriente en el plasma de 5 MA, una potencia del plasma de 50-100 MW y una potencia de fisión de 80-4000 MW. Se espera ejecutar este proyecto en China dentro de 12 a 15 años. A continuación se tiene la figura 3.4 donde se observa un corte transversal del reactor.



**Figura 3.4 FFRF. (Energy, 2009)**

### c. **Compact Fusion Neutron Source (CFNS)**

Es la primera proposición de la Universidad de Texas, ha sido objeto de discusión y análisis por varios expertos, ahora es objeto de estudio por varios laboratorios y universidades como la Universidad Nacional Autónoma de México (François, Dorantes, Martín-del-Campo, & Herrera, 2013).

El reactor CFNS (figura 3.5) está diseñado para producir una potencia de fusión en el orden de 50 a 100 MW y una potencia de fisión de 3 GW térmicos. Es un reactor que tiene que ser compacto para insertarlo dentro de un ensamble de fisión el cual se puede remover (M. Kotschenreuther1, 2010).

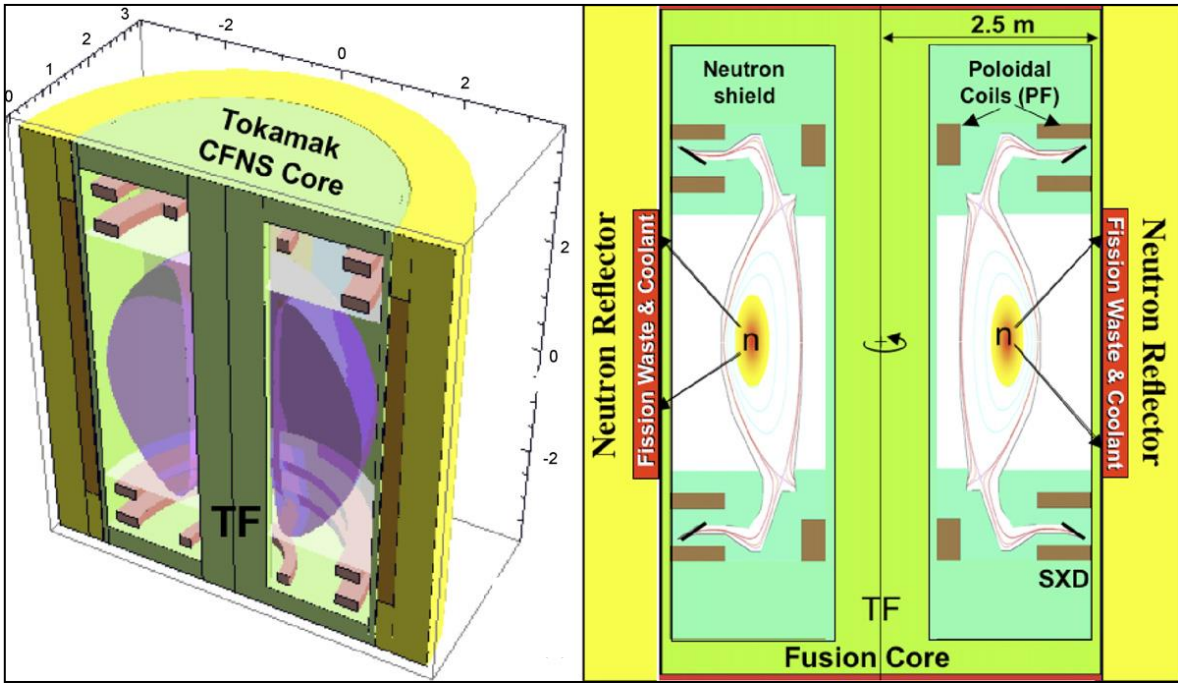


Figura 3.5 CFNS. (Energy, 2009)

## Bibliografía

- Chen, F. F. (2011). *An Indispensable truth: How Fusion Power Can save the Planet*. New York: Springer. Los Angeles: Springer.
- Dorantes, J. J. (2011). Análisis Neutrónico de un Sistema Híbrido Fusión-Fisión. *Tesis de Maestría*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Energy, U. D. (2009). Research Needs for Fusion-Fission Hybrid Dydtem. *Report of the Research Needs Workshop (ReNeW)*, (pág. 177). Gaithersburg.
- François, J. L. (s.f.). Ciclo de Combustible Nuclear. En *Apuntes de Fundamentos de Energía Nuclear*.
- François, J., Dorantes, J., Martín-del-Campo, C., & Herrera, J. (2013). LWR spent fuel transmutation with fusion-fission hybrid reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 50-55.
- M. Kotschenreuther<sup>1</sup>, P. V. (12 de Febrero de 2010). *The super X divertor SXD and a compact fusion neutron source (CFNS)*. Obtenido de [stack.iop.org/NF/50/035003](http://stack.iop.org/NF/50/035003)
- Mixed Oxide (MOX) Fuel*. (Mayo de 2013). Obtenido de World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Fuel-Recycling/Mixed-Oxide-Fuel-MOX/>
- Processing of Used Nuclear Fuel*. (Septiembre de 2013). Obtenido de World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Fuel-Recycling/Processing-of-Used-Nuclear-Fuel/>
- Reed, M. P. (Enero de 2011). *A Fission-Fusion Hybrid Reactor in Steady-State L-Mode Tokamak Configuration with Natural Uranium*. Obtenido de [http://www.psfc.mit.edu/library1/catalog/reports/2010/11rr/11rr001/11rr001\\_full.pdf](http://www.psfc.mit.edu/library1/catalog/reports/2010/11rr/11rr001/11rr001_full.pdf).
- Wikimedia Foundation, Inc. (31 de 05 de 2014). *Thermonuclear weapon*. Obtenido de Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermonuclear\\_weapon](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermonuclear_weapon)



## V. SERPENT

## 1. Introducción

SERPENT es un programa de tres dimensiones con energía continua que utiliza el Método de Monte Carlo para estudiar el transporte de neutrones y cálculos de quemado, basado en el método de Monte Carlo en energía continua.

El código fue diseñado para física en una dimensión; sin embargo, está especializado en cálculos para geometrías bidimensionales que se encuentran generalmente en la física de los reactores, como barras y elementos de combustible. Debido al uso de universos, permite modelar geometrías en tres dimensiones.

## 2. Historia

El desarrollo de SERPENT empezó en VTT en 2004, bajo el nombre de “*Probabilistic Scattering Game*”, o PSG. Todas las publicaciones utilizando este nombre fueron creadas antes de su lanzamiento en octubre de 2008. El nombre fue cambiado a SERPENT debido a sus ambigüedades en sus acrónimos.

## 3. Aplicaciones de SERPENT (Serpent. A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Burn-up, 2014)

- a. Generación de constantes de grupo homogeneizados para cálculos con simuladores de reactores deterministas.
- b. Estudio de ciclo de combustible que involucra cálculos detallados de quemado a nivel de elemento de combustible.
- c. Validación de códigos de transporte deterministas.
- d. Física de reactores de núcleo completo y cálculos de quemado para reactores de investigación.
- e. Propósitos académicos y demostración de fenómenos de física de reactores.

## 4. Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo se ha utilizado por su precisión dentro en los análisis para cálculos de criticidad, cálculos de blindaje de radiación y modelado de detectores, entre otros. La motivación principal es usualmente la necesidad de modelar geometría e interacciones con un alto grado de precisión, normalmente independiente a las necesidades de memoria en una computadora. El método es adecuado para este trabajo, debido a su capacidad en el manejo de geometrías en tres dimensiones y para el modelado de las interacciones entre neutrones alcanzado su objetivo con una gran

precisión (Serpent. A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Burn-up, 2014).

Dado que el método de Monte Carlo se basa esencialmente en conceptos estadísticos, el resultado obtenido no es único, sino una estimación con un intervalo de confianza alrededor del “valor verdadero”. Por lo anterior, una de las desventajas del método es la magnitud del error obtenido asociado con el resultado. Con la finalidad de reducir el error a un nivel aceptable, se requiere seguir un gran número de historias de partículas desde su “nacimiento” hasta su “muerte”, lo que implica tiempos de cómputo muy grandes (François, S/F).

#### **a. Trayectoria de las Partículas (François, S/F)**

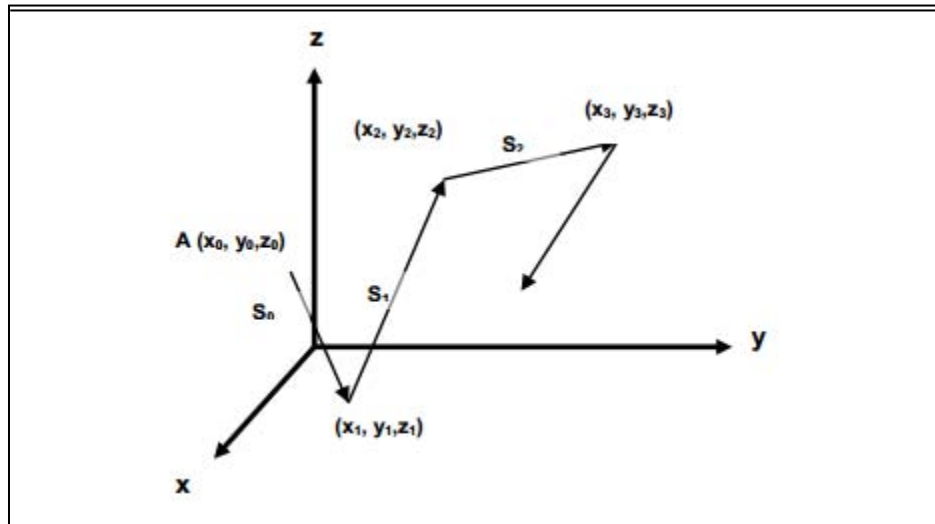
La vida de una partícula inicia con su nacimiento, ya sea por una fuente de neutrones externa o por una fisión, y termina con la absorción o con el escape del sistema. Los eventos que ocurren durante la vida del neutrón se registran y se convierten en la historia del neutrón, pero, como se mencionó anteriormente, debido a que la historia de una sola partícula no es representativa del sistema, se debe evaluar una cantidad adecuada de historias para describir realmente los fenómenos del sistema de interés.

Es necesario observar y registrar los eventos que ocurren durante la vida de un neutrón dentro de un sistema. Debido a que la historia de una sola partícula no es representativa del sistema, se debe evaluar una cantidad adecuada de historias para describir realmente los fenómenos del sistema.

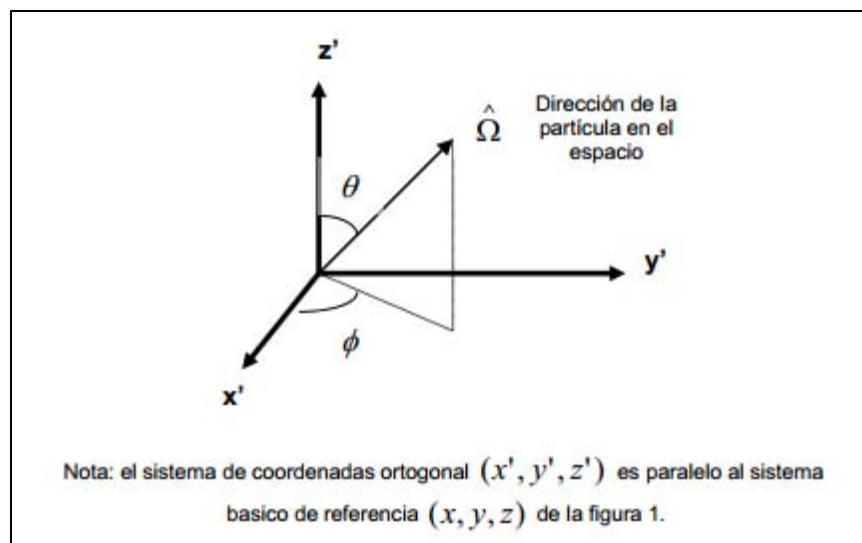
Si consideramos el inicio de la vida de una partícula, ya sea por una fuente de neutrones externa o por una fisión, con una posición, dirección y energía conocida. Este neutrón tendrá una trayectoria hasta que colisione con un átomo del medio, esta colisión podría resultar en la absorción del neutrón ocasionando el fin del registro de la vida o en una dispersión, donde la partícula sufre un cambio de dirección y energía. Después de esta primera colisión la partícula puede volver a colisionar. Su trayectoria se puede representar como un zigzag de la partícula como se muestra en la figura 4.1.

Para rastrear a la partícula durante su viaje es necesario conocer: sus coordenadas espaciales ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), las coordenadas esféricas de su dirección ( $\theta, \varphi$ ) y su energía como en la figura 4.2. Estas variables son suficientes para definir el estado  $\alpha$  de la partícula, donde:

$$\alpha \equiv \alpha(x, y, z; E; \theta, \varphi)$$



**Figura 4.1 Trayectoria aleatoria de una partícula.**



**Figura 4.2 Dirección de la partícula en coordenadas esféricas.**

Por lo tanto, la trayectoria de una partícula es una sucesión de eventos, por lo que cada colisión de ésta es función de la colisión anterior, con excepción del estado inicial de la partícula se puede representar con su  $i$ -ésimo estado que sería:

$$\alpha_i = \alpha_i(x_i, y_i, z_i; \theta_i, \phi_i)$$

Ahora si consideramos una partícula que ha sufrido su  $i$ -ésima colisión. Las coordenadas de su siguiente colisión se obtienen de la siguiente manera:

$\Sigma_t e^{-\Sigma_t s} ds$ : la probabilidad de una partícula tenga una colisión entre  $s$  y  $s+ds$ .

Donde

$s$ : longitud de la trayectoria que la partícula viaja hasta su siguiente colisión.

$e^{-\Sigma_t s}$ : la probabilidad de que una partícula viaje la distancia  $s$  sin tener una interacción.

$\Sigma_t ds$ : la probabilidad de que la partícula tenga una interacción en el intervalo  $ds$ .

$\Sigma_t$ : la sección eficaz macroscópica total.

El siguiente paso es establecer un procedimiento para seleccionar aleatoriamente un valor de  $s$  ( $s_i$ ). Las coordenadas de la siguiente colisión se obtienen.

$$x_{i+1} = x_i + s_i (\text{sen}\theta_i \cos\Phi_i)$$

$$y_{i+1} = y_i + s_i (\text{sen}\theta_i \text{sen}\Phi_i)$$

$$z_{i+1} = z_i + s_i (\cos\theta_i)$$

Para la distribución de energía de los neutrones en equilibrio térmico con los átomos del medio, la ecuación de distribución de Maxwell-Boltzmann:

$$n(E) = cte E^{1/2} e^{(-\frac{E}{kT})}$$

### **b. Cálculos de Criticidad (François, S/F)**

Un grupo de historias de neutrones se refiere a un ciclo  $k_{eff}$  (en teoría de reactores se define como generación de neutrones), donde el factor de multiplicación está dado por la razón del número de neutrones generados en los eventos de fisión que se presentan en el ciclo, entre el número de neutrones cuyas historias son evaluadas en este ciclo. El valor esperado del factor de multiplicación se estima promediando sobre los eventos en el ciclo  $k_{eff}$ . El factor de multiplicación se estima mediante la siguiente expresión:

$$k(\text{media}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i$$

Donde

$k(\text{media})$ : es el factor de multiplicación estimado para el sistema de interés.

$k_i$ : el factor de multiplicación estimado para el  $i$ -ésimo ciclo.

### c. Estimación de Error (François, S/F)

El código da resultados en forma de conteos (tallies) relacionados a la corriente de partículas, flujo de partículas y a la deposición de energía, donde un tally es la cantidad a estimar (score promedio), obtenido al sumar todos los scores de todas las historias. Los tallies de MCNP son normalizados por partícula iniciadora y son impresos en la salida, acompañados por un segundo número R, que es el error relativo estimado. En MCNP, las cantidades requeridas para estimar este error son calculadas después de cada historia completa de Monte Carlo, que considera el hecho de que las diferentes contribuciones a un tally de la misma historia están correlacionadas.

Para un tally bien comportado,

$$R = \frac{1}{\sqrt{N}},$$

Donde

N: es el número de historias

## 5. Características de SERPENT (Serpent. A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Burn-up, 2014)

- a. Características geométricas específicas para el diseño de combustible. Estas características incluyen definiciones simplificadas de pin y combustible, partículas esféricas de combustible, reticulados cuadrados y hexagonales para reactores de agua ligera y matrices circulares para reactores CANDU. También se incluyen subrutinas para modelar partículas de combustible de reactores de alta temperatura y cama de esferas.
- b. Transporte de neutrones basado en el método convencional *ray-tracking* en combinación con el método *Woodcock delta-tracking*. Esta metodología permite reducir considerablemente el tiempo de cálculo en comparación con otros códigos.
- c. Tratamiento continuo de la energía de los neutrones. SERPENT lee secciones eficaces de energía continua en formato ASCII basado en la cinemática de colisión clásica y en las leyes de reacción ENDF (*Evaluated Nuclear Data File*). Esto

permite usar las mismas librerías que emplean códigos similares pero más extendidos, como el MCNP.

- d. Formato de malla de energía modificado. Tras leer las secciones eficaces de las librerías de energía continua se reconstruye una única malla de energía para todos los tipos de reacción y material. Ésta será usada durante todo el cálculo en lugar de reconstruir la red para cada material cada vez que un neutrón se encuentra en una región de dicho material. Esta técnica reduce considerablemente el tiempo de computación pero hace uso más intensivo de la memoria física del hardware.
- e. Rutina de ensanchamiento Doppler. Ésta permite convertir las secciones eficaces leídas en formato ASCII a una temperatura mayor definida por el usuario permitiendo una mejor descripción de las interacciones físicas.
- f. Cálculos de quemado de combustible resolviendo las ecuaciones de *Bateman* por dos métodos diferentes. El primero se basa en la solución analítica de las cadenas de desintegración linealizadas, llamado análisis de trayectoria de transmutación (TTA). El segundo método de aproximación racional *Chebyshev* (CRAM), una solución de matrices exponenciales avanzada desarrollada en el propio *VTT*.

## **Bibliografía**

François, J. L. (S/F). El Método de Monte Carlo para la Solución de la Ecuación de Transporte. En *Análisis de Reactores Nucleares*. Facultad de Ingeniería.

*Serpent. A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Burn-up.* (2014). Obtenido de Development: <http://montecarlo.vtt.fi/development.htm>

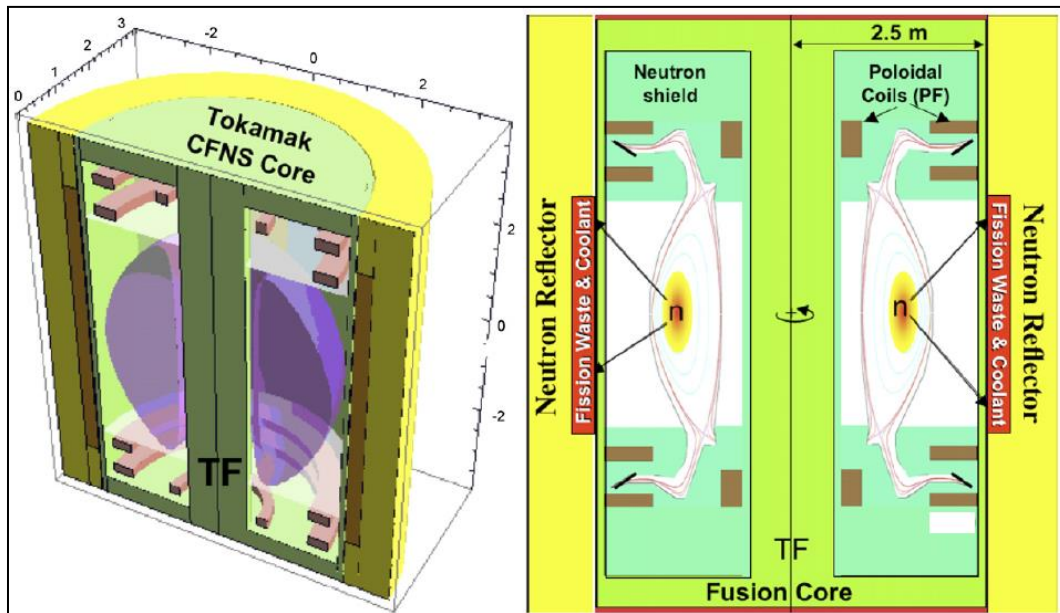


## VI. Modelo y Resultados

## 1. Introducción

El modelo en el cual se basa nuestro reactor híbrido de fusión – fisión es en el CFNS, el cual fue propuesto por la Universidad de Texas (M. Kotschenreuther1, 2010). Las características del CFNS son:

1. En la sección de fusión se producen de 50 a 100 MW térmicos.
2. El radio de la sección de fusión es máximo de 2.5 metros.
3. Es necesario que la sección de fisión utilice combustible gastado.
4. La sección de fisión es subcrítica, y con la contribución de los neutrones de la sección de fusión se vuelve crítica y supercrítica.
5. La sección de fisión produce 3, 000 MW térmicos.



**Figura 5.1 CFNS. (M. Kotschenreuther1, 2010)**

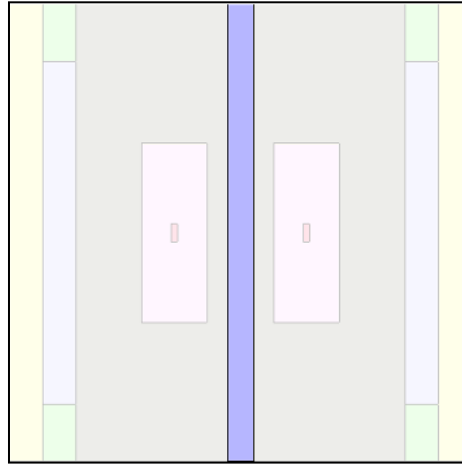
Para poder analizar el flujo de neutrones en la pared de litio es necesario crear un modelo en el programa SERPENT.

La creación del modelo se divide en dos partes: las medidas del reactor que se obtienen del modelo original CFNS, y los materiales que se utilizarán; aunque unos materiales son estándares en el modelo, existen otros que se pueden variar para hacer el reactor más eficiente.

Con el modelo ya terminado y los materiales adecuados, es posible realizar la experimentación con la pared de litio, buscando la distribución del litio dentro del reactor y la cantidad de tritio producido por año.

## 2. Modelo

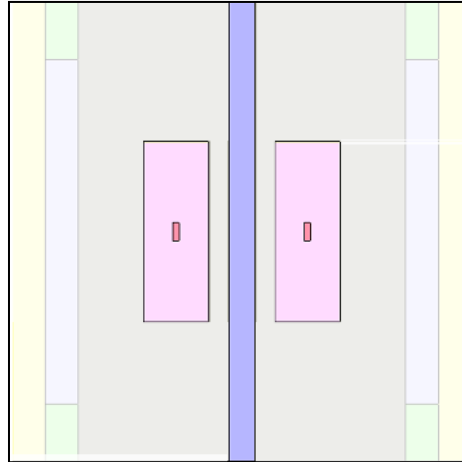
El modelo consta de una sección de fusión, la cual contiene un cilindro central que tiene como material cobre (ver figura 5.2); el diámetro del cilindro es de 4 metros por 8 de altura. Su función principal es reflejar los neutrones emitidos.



**Figura 5.2 Cilindro de cobre.**

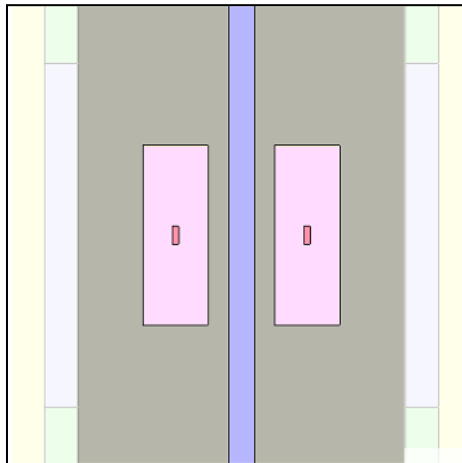
En la siguiente geometría se presentan dos toroides, los cuales en su configuración inicial son elípticos, debido a restricciones del programa fue necesario un cambio de configuración a toroide rectangular (ver figura 5.3). Por lo que se igualan los volúmenes de estos dos para obtener sus medidas exactas.

El rectángulo interno representa al plasma emitiendo neutrones. Cuenta con una fuente cuyas dimensiones son: 0.32 metros de altura por 0.1 metros de ancho. Por otra lado, el rectángulo externo, con una altura de 3.14 metros por 1 metro de ancho, su función es contener el plasma, dando lugar a la fusión del deuterio y tritio.



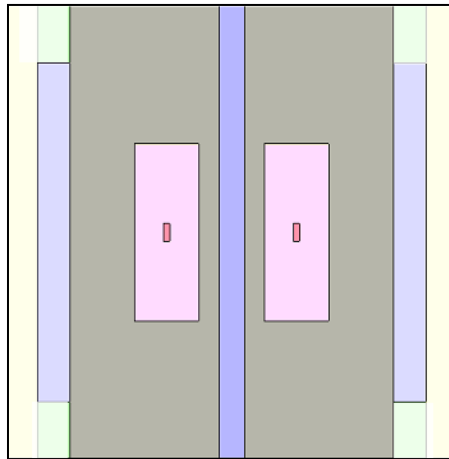
**Figura 5.3 Plasma y fuente.**

Por su parte, la sección de vacío se compone por un cilindro de 2.5 metros de diámetro por 8 metros de altura (ver figura 5.4), ésta contiene al cilindro de cobre y al toroide rectangular de plasma.



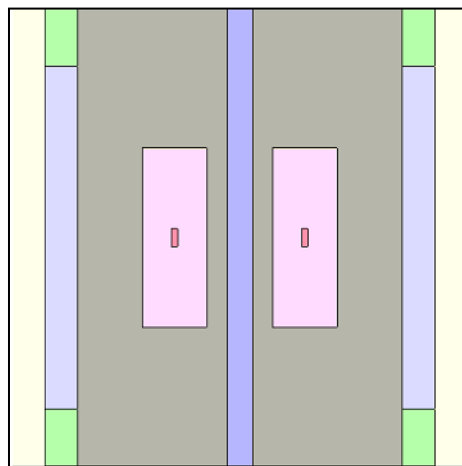
**Figura 5.4 Sección de vacío.**

Después tenemos la sección de fisión, sitio donde se encuentra el combustible. Éste es 6 metros de altura por 0.1 metros de ancho (ver figura 5.5), es aquí donde ocurre la fisión; los neutrones emitidos por el plasma colisionan con el combustible reciclado.



**Figura 5.5 Combustible.**

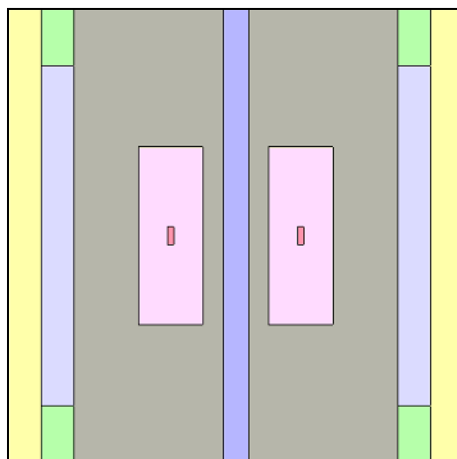
En seguida está el refrigerante, el cual es de 8 metros de altura por 0.5 metros de ancho (ver figura 5.6), su función es remover el calor producido por las fisiones.



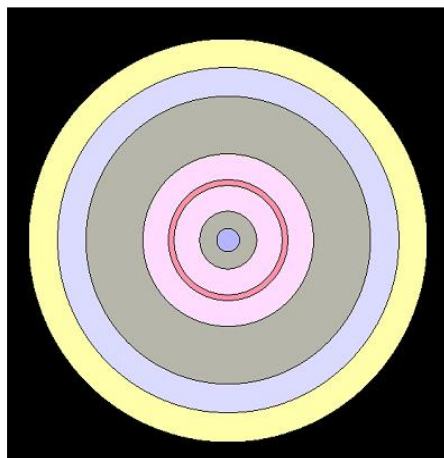
**Figura 5.6 Refrigerante.**

La última sección es una pared de cobre de 8 metros de altura por 0.5 metros de ancho (ver figura 5.7), misma que se utiliza para para reflejar los neutrones que atraviesan el combustible y el refrigerante.

Las figuras 5.7 y 5.8 representan un corte transversal y longitudinal del modelo final. En la tabla 1 tenemos las características de los materiales utilizados en el reactor híbrido de fusión – fisión. En la tabla 2 tenemos la composición del combustible utilizado; se puede apreciar visualmente en la figura 5.9. Este combustible resulta del segundo reciclado del combustible gastado de un reactor de agua ligera (Guzman, 2008).



**Figura 5.7 Modelo final corte longitudinal**



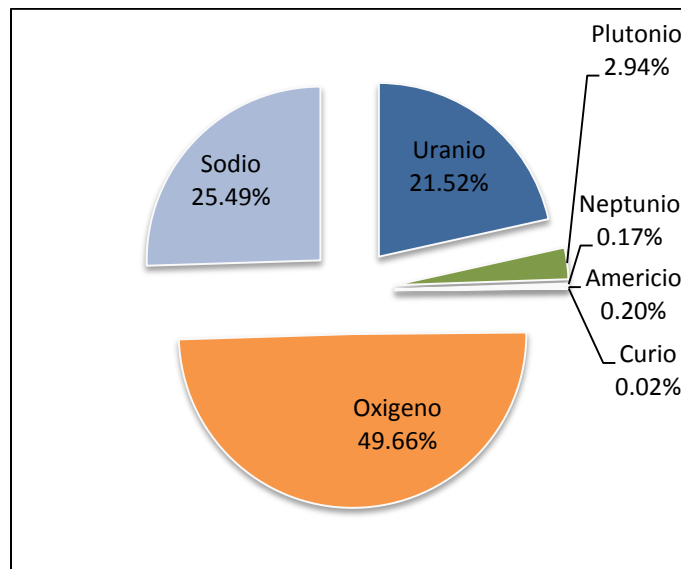
**Figura 5.8 Modelo final corte transversal.**

Tabla 1 Propiedades de los materiales							
Materiales	Elementos				Porcentaje	Temperatura [K]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]
	Nombre	Neutrones	Protones	Total de Nucleones			
Reflector	Cobre	34	29	63	69.17%	300	8.96
	Cobre	36	29	65	30.83%	300	
Plasma	Deuterio	1	1	2	50.00%	1200	9.11E-11

	Tritio	2	1	3	50.00%	1200	
<b>Refrigerante</b>	Sodio	12	11	23	100.00%	300	0.9291
<b>Vacio</b>	Nitrógeno	7	7	14	79.00%	300	1.00E-20
	Oxigeno	8	8	16	21.00%	300	

<b>Tabla 2 Composición del Combustible</b>				
<b>Elementos</b>				Densidad [átomos 10E24/cm <sup>3</sup> ]
<b>Nombre</b>	Neutrones	Protones	Total de Nucleones	
<b>Uranio</b>	143	92	235	5.42E-05
	146	92	238	2.14E-02
<b>Plutonio</b>	144	94	238	8.33E-05
	145	94	239	1.51E-03
	146	94	240	7.86E-04
	147	94	241	3.10E-04
	148	94	242	2.38E-04
<b>Neptunio</b>	144	93	237	1.70E-04
<b>Americio</b>	146	95	241	1.43E-04
	148	95	243	5.93E-05

<b>Curio</b>	148	96	244	1.96E-05
<b>Oxigeno</b>	8	8	16	4.95E-02
<b>Sodio</b>	12	11	23	2.54E-02
Densidad Total				<b>9.97E-02</b>



**Figura 5.9 Composición del combustible.**

### 3. Combustible

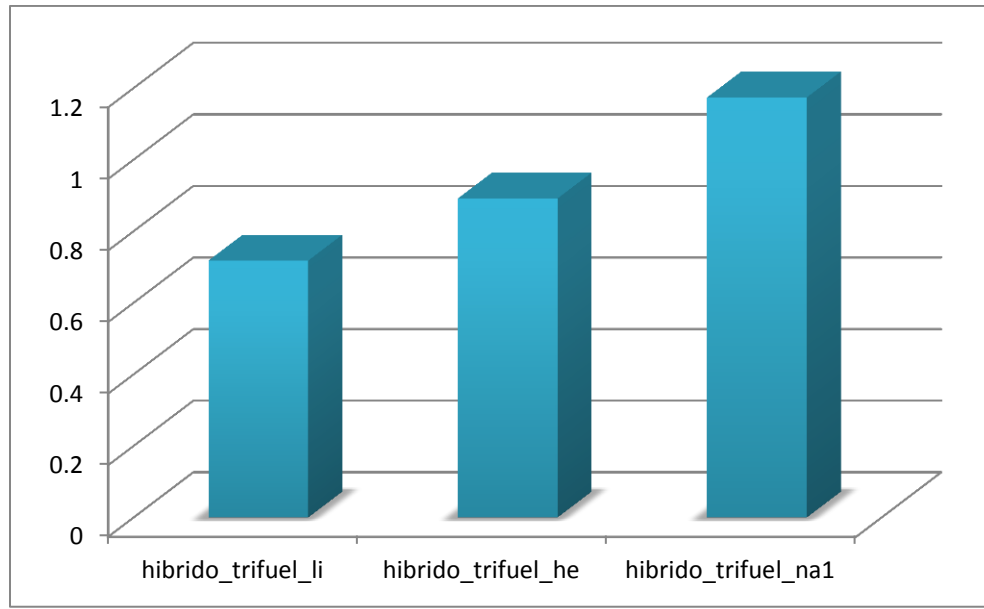
Al inicio del análisis del reactor CFNS, se estudió el factor efectivo de multiplicación de neutrones ( $K_{eff}$ ) con diferentes posiciones del combustible; el combustible del modelo base es un anillo dentro de la sección del refrigerante. En la primera y segunda prueba se dividió el combustible en dos anillos y tres anillos, como se muestra en la tabla 3. Se puede observar que con un anillo de combustible el factor  $K_{eff}$  es de 1.0981, el cual es un valor aceptable para poder operar el sistema por varios años. En la siguiente simulación se utilizaron dos anillos de combustible dentro del refrigerante, el resultado es un factor  $k_{eff}$  de 1.0957. Se observa un leve decremento del factor  $K_{eff}$ , esto se debe a que algunos neutrones se absorben en el sodio en el momento que cruzan el primer anillo de combustible. El factor  $K$  es mayor que 1.0 por lo tanto, continua siendo un modelo aceptable. El tercer modelo es el reactor híbrido con tres anillos, el factor  $K$  resultó de



1.09836, es un buen valor para continuar con la experimentación en la configuración de tres combustibles.

Tabla 3 Anillos de Combustible							
Simulación	Dimensiones [cm]					Keff	
1. Híbrido_cobre	20	10	20			1.0981	
2. Híbrido_bifuel	10	10	10	10	10	1.0957	
3. Híbrido_trifuel	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	1.09836

La segunda prueba consistió en buscar el mejor refrigerante para el reactor híbrido de fusión – fisión. Se realizó una comparación del factor Keff entre los diferentes refrigerantes, los materiales utilizados fueron litio, helio y sodio como punto de referencia. Los valores de Keff son 0.717753, 0.890199 y 1.17373 respectivamente, se puede observar en la figura 5.10 la comparación de los refrigerantes. Como se observa en los resultados, ni helio ni litio son candidatos como refrigerante. El litio-6 tiende a absorber neutrones, es por esta razón que el factor Keff fue tan bajo, sin embargo es una propiedad que utilizaremos más adelante para la producción de tritio. El factor Keff del helio fue también menor a uno.



**Figura 5.10 Segundo Experimento.**

Como conclusión de la etapa de combustibles se observó que con un anillo de combustible la  $K_{eff}$  es mayor, sin embargo utilizar un solo combustible es un proceso poco realista, los modelos más apegados a la realidad son los que utilizan dos o tres anillos, por esta razón se utilizó como modelo base la configuración de tres anillos.

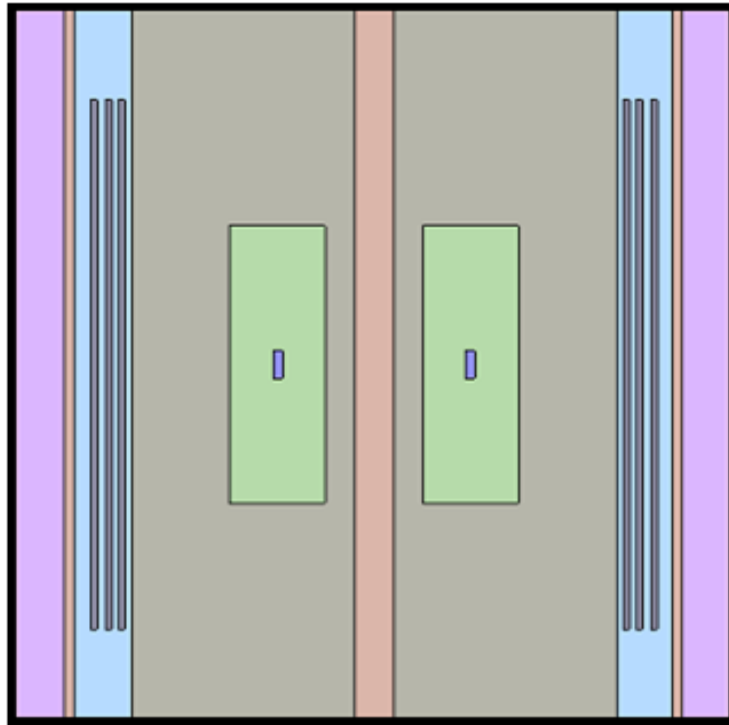
El refrigerante es una sección muy importante, ya que al remover el calor producido por las fisiones mantiene la temperatura del combustible en niveles aceptables, por lo que decidimos probar con otros refrigerantes, no obstante los valores de las simulaciones indicaron que el sodio es la mejor opción.

#### **4. Pared de Litio**

En esta etapa se busca un análisis neutrónico en la pared de litio, esto es introducir una capa de litio después de los anillos de combustible para obtener una producción de tritio sin comprometer el factor  $K_{eff}$  del reactor híbrido de fusión – fisión. Una vez que se tenga una distancia deseable, que no afecte el factor  $K_{eff}$  observar la producción de tritio.

Esta simulación introduce un anillo de litio entre el combustible y el material reflejante como se observa en la figura 5.11. Se observó la disminución o incremento del factor  $K_{eff}$

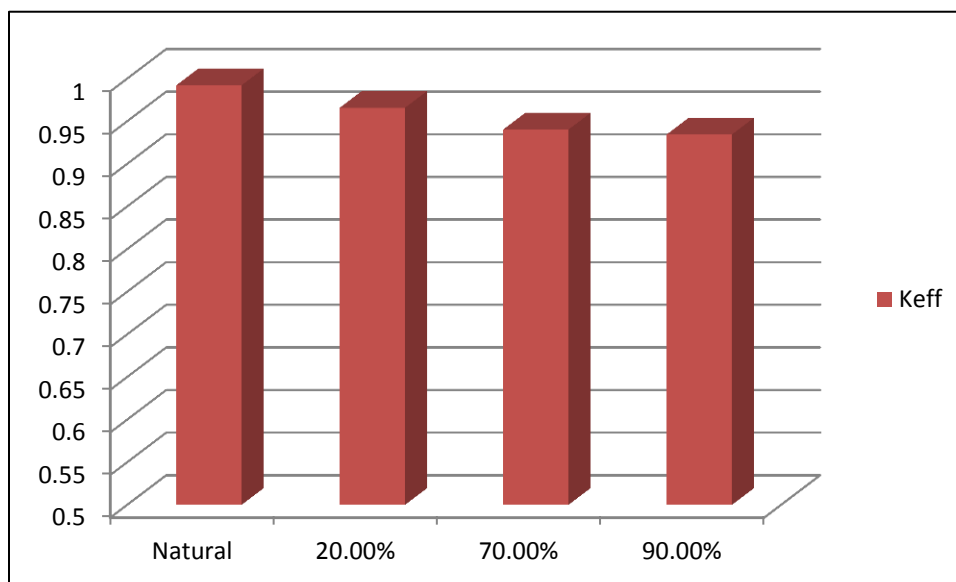
debido a los diferentes tipos de enriquecimientos de Litio-6: se utilizó litio natural (7.5%), litio con 20%, con 70% y con 90%. El factor  $K_{eff}$  tuvo una variación de 0.992123, 0.965749, 0.9402 y 0.934406, respectivamente, como se observa en la tabla 4 y en la figura 5.12. Ninguno de los valores anteriores obtuvo una  $K$  mayor o igual a uno, debido a la característica del litio de absorber neutrones para la producción de tritio.



**Figura 5.11** Modelo con una pared de litio.

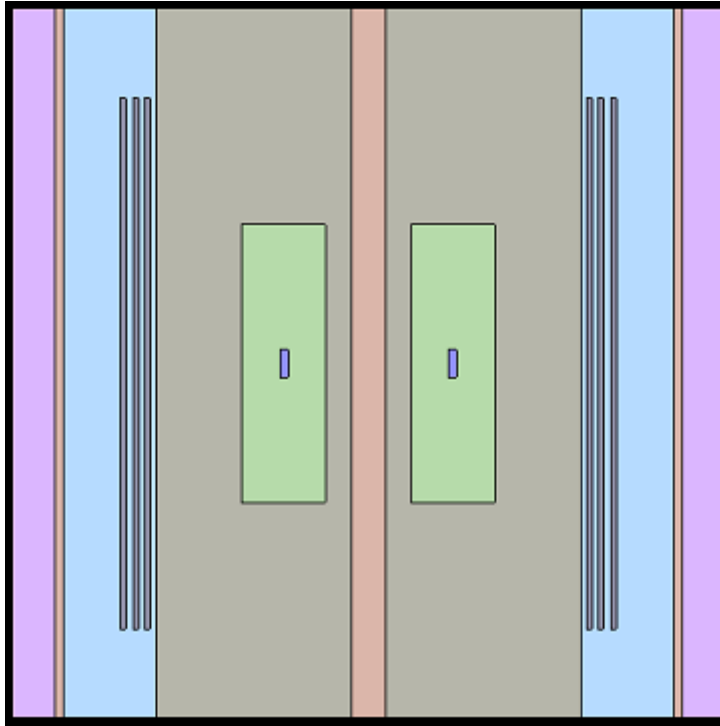
Tabla 4 Enriquecimiento del Litio			
Enriquecimiento	Litio		Keff
	Litio-6	Litio-7	
Natural	7.50%	92.50%	0.992123

<b>20.00%</b>	20.00%	80.00%	0.965749
<b>70.00%</b>	70.00%	30.00%	0.940209
<b>90.00%</b>	90.00%	10.00%	0.934406



**Figura 5.12. Keff en función del enriquecimiento del Li.**

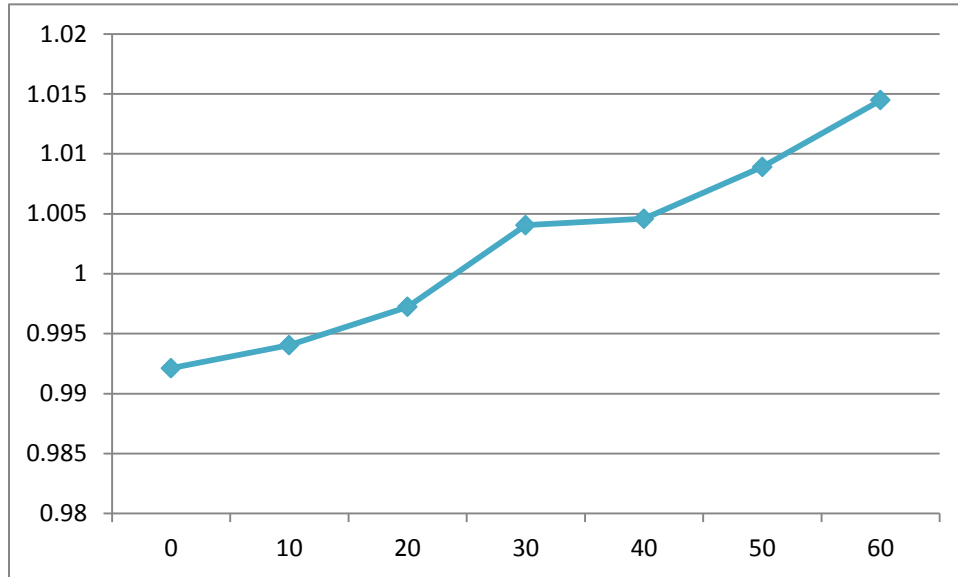
Para nuestro siguiente experimento utilizaremos el valor de enriquecimiento de Li-6 que tenga un factor K más próximo a uno; este valor es del litio natural. Se alejará la capa de litio determinados centímetros para incrementar el factor Keff. Por lo tanto, tenemos una capa de litio de 10 centímetros de espesor alejado 7.5 centímetros del combustible y con una altura de 8 metros equivalente a la altura del sistema. A esta distancia del combustible la nombraremos distancia cero y se le proporcionará incrementos de diez centímetros, para elegir una distancia adecuada en la cual podamos trabajar como se muestra en la figura 5.13. En la tabla 5 se puede observar que a partir de los 30 centímetros el valor de Keff es mayor a uno, sin embargo es importante incrementar más el valor como precaución a cualquier tipo de variación, por esta razón se utiliza la distancia de 60 centímetros, como se observa en la figura 5.14.



**Figura 5.13** Modelo con una pared de litio alejado.

Tabla 5 Desplazamiento de la Capa de Litio	
Distancia [cm]	Keff
0	0.992123
10	0.994033
20	0.997234
30	1.00405
40	1.00458

<b>50</b>	1.0089
<b>60</b>	1.01447

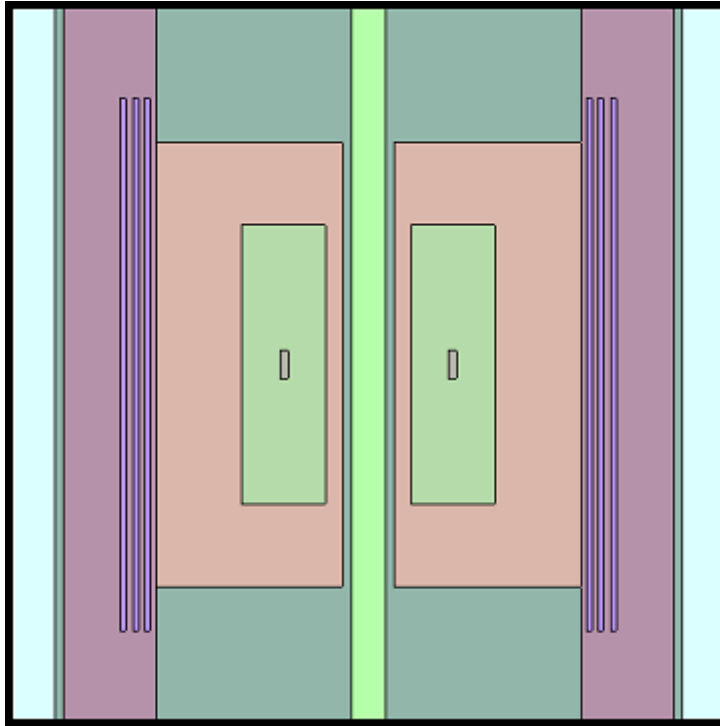


**Figura 5.14** Incremento de Keff dependiendo de la distancia.

En resumen tenemos que la capa de litio se encuentra a 67.5 centímetros de distancia del combustible, tiene una altura de 8 metros y un espesor de 10 centímetros.

Para incrementar la producción de tritio se cubrieron 3 diferentes regiones con litio. La parte superior en la sección del vacío, la parte inferior en la sección del vacío y alrededor de la columna interior, por lo tanto el modelo final resultó como la Figura 5.15.

El anillo de la capa de litio en la sección superior del vacío tiene una altura de un metro y medio, y un espesor de metro y medio igual que la sección inferior de la capa de litio; la sección de la capa de litio que cubre la columna interior es de diez centímetros de espesor por 8 metros de altura.

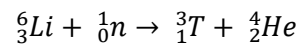


**Figura 5.11 Modelo final.**

Una vez terminado el modelo final del reactor híbrido de fusión – fisión, se realiza un análisis neutrónico en cada sector para conocer la producción de tritio en cada zona y el total en gramos.

Para conocer la cantidad de tritio es necesario desarrollar una ecuación para conocer la producción de tritio:

La reacción para la producción del tritio es:



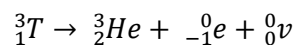
La ecuación diferencial de la concentración de tritio:

$$\frac{dT}{dt} = \sigma_L L_0 \Phi$$

Su solución:

$$T = \sigma_L L_0 \Phi t$$

Pero debido a la radioactividad del tritio emite una partícula beta y se transforma en helio-3.



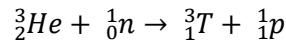
Por lo que la ecuación diferencial resulta:

$$\frac{dT}{dt} = \sigma_L L_0 \Phi - \lambda T$$

La solución de la ecuación diferencial es:

$$T = \frac{\sigma_L L_0 \Phi t}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

Si el helio-3 captura un neutrón se transforma en tritio, por lo tanto aporta a la cantidad total:



Las ecuaciones diferenciales son:

$$\frac{dT}{dt} = \sigma_L L_0 \Phi - \lambda T + \sigma_H \text{He} \Phi$$

$$\frac{dH}{dt} = \lambda T - \sigma_H H \Phi$$

La suma de las dos ecuaciones anteriores es:

$$\frac{d(T+He)}{dt} = \sigma_L L_0 \Phi$$

Que es igual a:

$$T + He = \sigma_L L_0 \Phi t$$

Por lo que  $H = \sigma_L L_0 \Phi t - T$ , sustituyendo en una de las ecuaciones iniciales tenemos que:

$$T = \frac{\sigma_L L_0 \Phi}{\lambda + \sigma_H \Phi} \left[ \frac{\lambda}{\lambda + \sigma_H \Phi} [1 - e^{-(\lambda + \sigma_H \Phi)t}] + \sigma_H \Phi t \right]$$

A la ecuación anterior de T hay que agregar la ecuación de cambio del litio:

$$\frac{dL}{dt} = -\sigma_L L \Phi$$

La que se integra como:

$$L = L_0 e^{-\sigma_L \Phi t}$$

En resumen, las ecuaciones diferenciales que afectan la producción de tritio son:

$$\frac{dL}{dt} = -\sigma_L L \Phi$$



$$\frac{dT}{dt} = \sigma_L L \Phi - \lambda T + \sigma_H He \Phi$$

$$\frac{dH}{dt} = \lambda T - \sigma_H He \Phi$$

Con la suma de las soluciones de las tres ecuaciones diferenciales se obtiene que:

$$T = L_0 \Phi \left[ \frac{\sigma_{He}}{\lambda + \sigma_{He}\Phi} (1 - e^{-(\lambda + \sigma_{He}\Phi)t}) - \frac{\sigma_{He} - \sigma_L}{\lambda + (\sigma_{He} - \sigma_L)\Phi} (e^{-\sigma_L\Phi t} - e^{-(\lambda + \sigma_{He}\Phi)t}) \right]$$

En la tabla 6 se tiene los valores para la sección exterior, interior, superior e inferior de litio respectivamente, los cuales fueron sustituidos en la fórmula para conocer el valor de tritio en términos de la cantidad inicial de litio-6 ( $L_0$ ).

Tabla 6 Variables y Constantes		
Símbolo	Valor	Detalles
$\Phi[n/(cm^2*s)]$	3.70E+11	Flujo de neutrones en la zona exterior (obtenido de la simulación)
$\Phi[n/(cm^2*s)]$	7.00E+12	Flujo de neutrones en la zona superior (obtenido de la simulación)
$\Phi[n/(cm^2*s)]$	7.10E+12	Flujo de neutrones en la zona inferior (obtenido de la simulación)
$\Phi[n/(cm^2*s)]$	6.10E+11	Flujo de neutrones en la zona interior (obtenido de la simulación)
$\sigma_{He} [cm^2]$	5.3E-21	Sección eficaz de la reacción (n,p)

		del helio-3
$\lambda$ [s]	1.83E-09	Ln2/vida media del tritio (12 años)
$t$ [s]	31536000	Tiempo en el que la planta trabaja
$\sigma_{Li}$ [cm <sup>2</sup> ]	9.4E-22	Sección eficaz de captura neutrónica del litio-6

El resultado que se obtiene sustituyendo los valores de las tablas anteriores son los que se encuentran en la tabla 7.

Tabla 7 Valor de Tritio		
Sección	Valor de tritio	
Superior	0.183548607	*Lo
Inferior	0.185920968	*Lo
Interior	0.017427722	*Lo
Exterior	0.010604896	*Lo

Los valores obtenidos en la tabla 7 están en términos de Lo por lo que aún se deben multiplicar por la cantidad de litio-6 inicial que se tiene en cada sección; Lo es la cantidad de átomos que se encuentra en cada centímetro cubico (volumen) de cada sección de litio. En la tabla 8 se encuentran los datos para obtener Lo, se deben sustituir en la siguiente ecuación:

$$Lo = \frac{(Numero\ de\ Avogadro)(Densidad)}{Masa\ del\ litio} 7.5\%$$

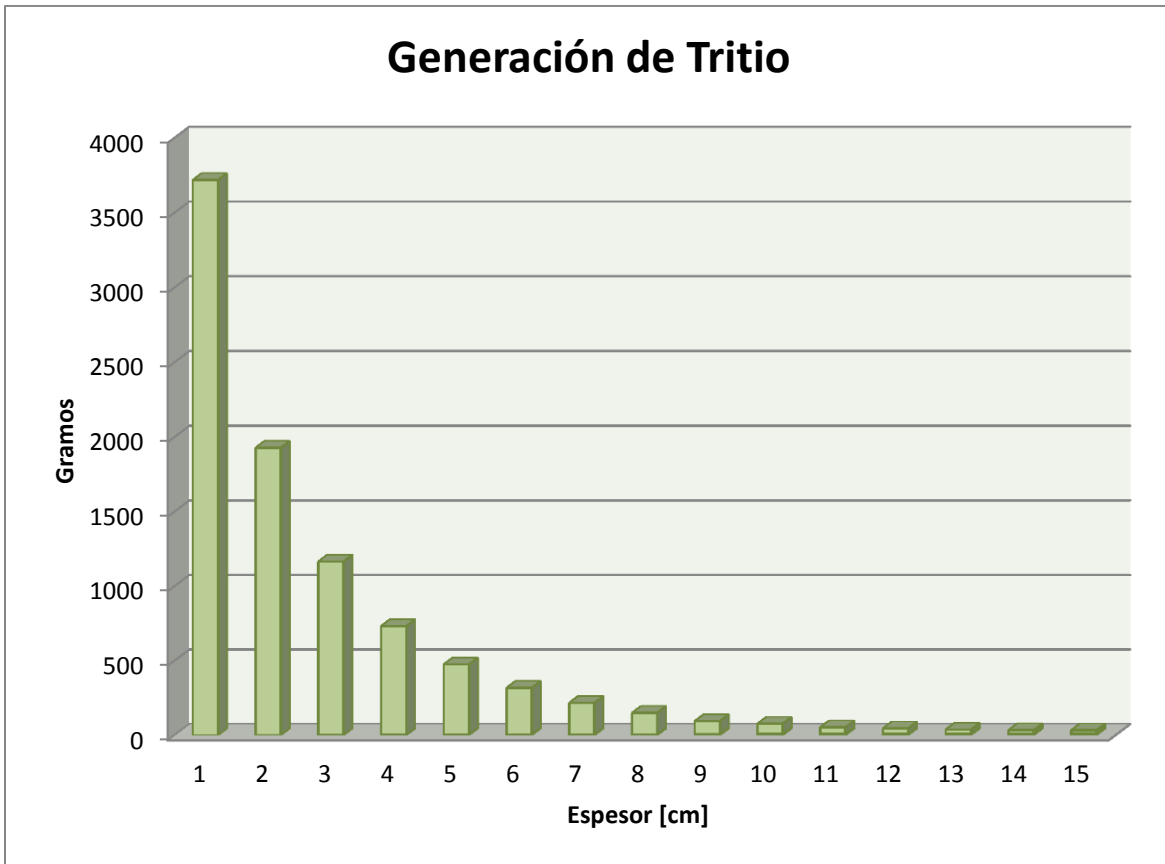
<b>Tabla 8 Datos para Obtener Lo</b>
--------------------------------------

	Valor	Unidades
<b>Fórmula</b>	3.97964E+21	[átomo/cm <sup>3</sup> ]
<b>Número de Avogadro</b>	6.02E+23	[átomo/mol]
<b>Porcentaje</b>	7.5	[%]
<b>Densidad</b>	0.53	[g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Peso atómico del Litio-6</b>	6.015122291	[g/mol]

Al obtener  $L_0$  en términos del volumen ya se puede multiplicar por los valores obtenidos en la tabla 8, por lo tanto la tabla 9 contiene los valores de tritio en términos del volumen en cada sección de tritio.

<b>Tabla 9 Cantidad de tritio en átomos/cm<sup>3</sup></b>	
<b>Superior</b>	7.30457E+20
<b>Inferior</b>	7.39898E+20
<b>Interior</b>	6.9356E+19
<b>Exterior</b>	4.22037E+19

En la siguiente etapa del análisis de la capa de litio es necesario conocer el volumen de litio en las diferentes secciones, pero multiplicar todo el volumen del litio es un error, puesto que el tritio no se produce de manera uniforme en todo el volumen de la capa de litio. Como se puede observar en la figura 5.12, en los primeros centímetros de la capa es donde se produce la mayor cantidad de tritio (Fierro, En proceso) El resultado es que los neutrones actúan principalmente en los primeros tres centímetros de profundidad para la producción de tritio.



**Figura 5.12. Generación de tritio en función del espesor de la capa de litio (Fierro, En proceso).**

En la tabla 10 se tienen los valores de volumen original, también tenemos el volumen con arreglo; esto lo obtuvimos multiplicando el área en contacto con los neutrones, ya sea 2.2 metros si es la sección superior e inferior, u 8 metros si es la sección interior o exterior, por los 2.41 centímetros de profundidad, que es la sección donde los neutrones reaccionan. Este último valor se multiplica por los valores de la tabla 13 y se obtiene el valor de cría de tritio en átomos que se encuentra en la tabla 10.

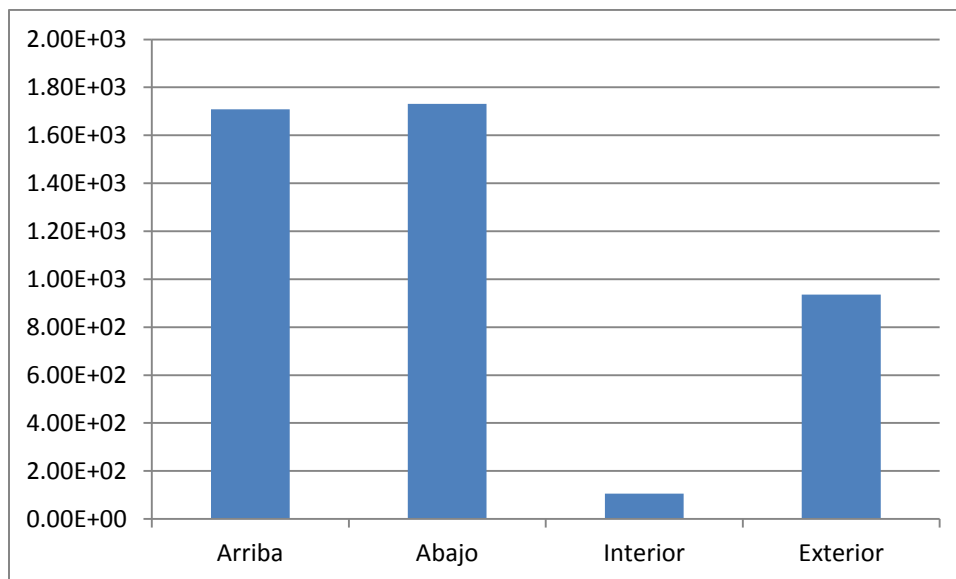
Tabla 10 Cría de tritio en átomos			
	Volumen original [cm <sup>3</sup> ]	Volumen con Arreglo [cm <sup>3</sup> ]	Cría de Tritio [átomos]
<b>Superior</b>	29029316	467058	3.411661E+26

<b>Inferior</b>	29028316	467058	3.455757E+26
<b>Externo</b>	18346901	4427957	2.103462E+25
<b>Interno</b>	1256637	303284	1.868759E+26

La última etapa del análisis neutrónico de la cría de tritio es obtener la producción de tritio en gramos. Para obtener el valor en gramos es necesario dividir el peso atómico del tritio entre el número de Avogadro para conocer los gramos en cada átomo de tritio. En la tabla 11, se tiene los resultados.

<b>Tabla 11 Cría de tritio en gramos</b>		
	Valor	Unidades
<b>Numero de Avogadro</b>	6.02E+23	átomo/mol
<b>Peso atómico del Tritio</b>	3.016049268	g/mol
<b>Resultado</b>	5.01E-24	g/átomo

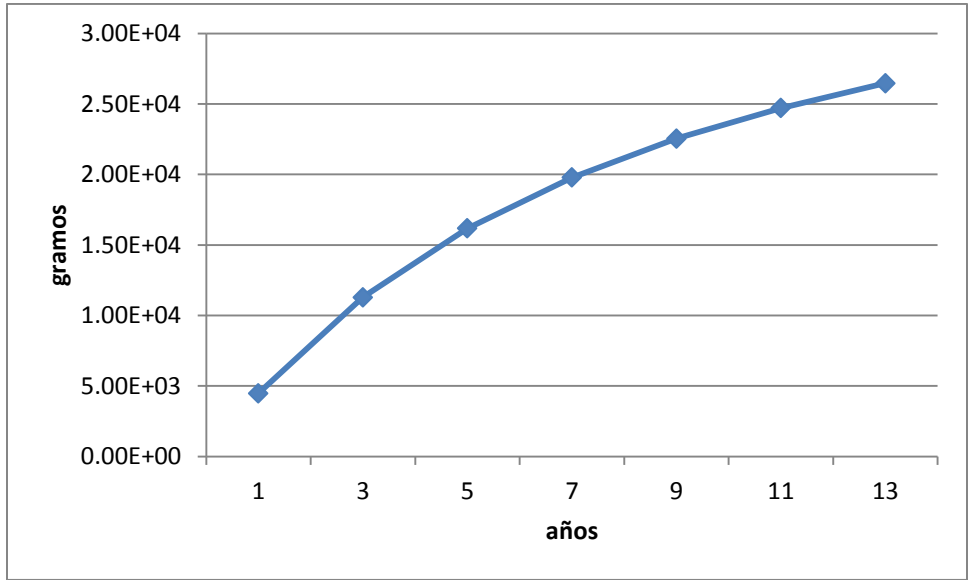
El valor obtenido en la tabla 11 se multiplica por los valores en la tabla 10 para obtener los valores en un año. En la tabla 12 se pueden observar los valores en un año y en la figura 5.13 se observa que la sección interior de la capa de litio produce menos tritio, esto es porque hay menos volumen en contacto que en las otras secciones.



**Figura 5.13 Producción de tritico anual (gramos).**

En la tabla 12 se tiene la producción de tritico en uno, tres, cinco, siete, nueve, once y trece años en cada una de las capas, y la producción total en gramos acumulada en estos años (también en la figura 5.14).

Años	1	3	5	7	9	11	13
Arriba	1.71E+03	4.16E+03	5.76E+03	6.82E+03	7.51E+03	7.98E+03	8.28E+03
Abajo	1.73E+03	4.20E+03	5.81E+03	6.86E+03	7.55E+03	8.01E+03	8.31E+03
Interior	1.05E+02	2.95E+02	4.63E+02	6.13E+02	7.50E+02	8.77E+02	9.94E+02
Exterior	9.36E+02	2.64E+03	4.14E+03	5.49E+03	6.72E+03	7.85E+03	8.89E+03
Total	4.48E+03	1.13E+04	1.62E+04	1.98E+04	2.25E+04	2.47E+04	2.65E+04



**Figura 5.14 Producción de tritio en trece años.**

Por último, es necesario saber cuál es la cantidad de tritio en gramos que utiliza el híbrido de fusión – fisión anualmente y observar si la producción de tritio en las capa de litio compensa este valor. Para obtener el valor de tritio que utiliza un híbrido de fusión – fisión se utiliza la siguiente formula (McMorrow, 2011):

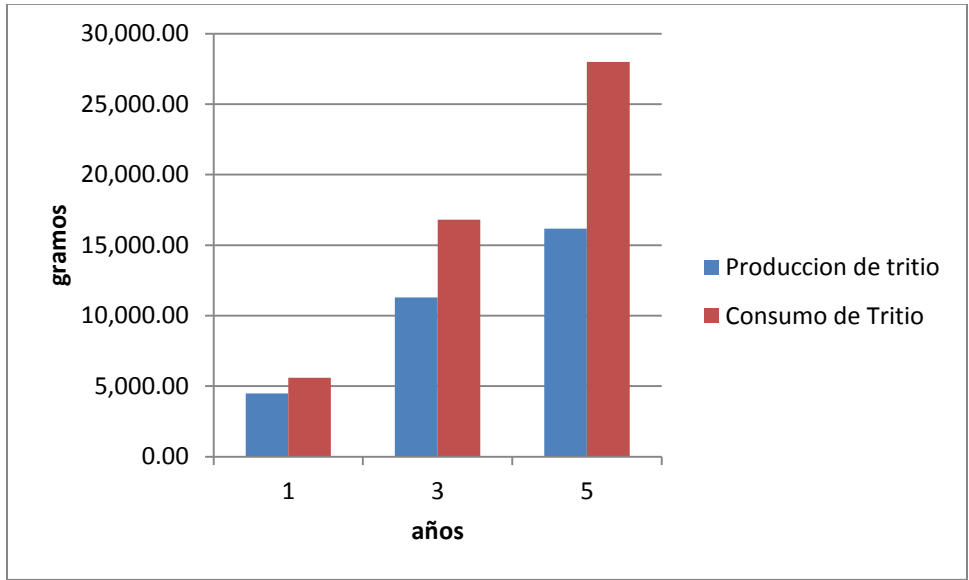
$$T = 56 (Potencia de Fusión)(Años)$$

La tabla 13 muestra el consumo de tritio en cinco años, con estos valores se puede realizar una comparación para saber cuánto porcentaje de tritio podemos ahorrar con las capas de litio. En la figura 5.15 se observa la comparación de producción y consumo. Al hacer los cálculos obtenemos que en el primer año se ahorra 80% de tritio, en el tercer año 68% de litio y en el quinto año se ahorra 58%, por lo que utilizar litio en el reactor fusión – fisión ayuda a la producción de su propio energético.

**Tabla 13 Consumo de tritio**

<b>PF [GWt]</b>	0.1	0.1	0.1
<b>Constante [1]</b>	56	56	56
<b>Tiempo [años]</b>	1	3	5
<b>Total [Kg]</b>	5.6	16.8	28

<b>Total [g]</b>	5600	16800	28000
------------------	------	-------	-------



**Figura 5.15** Producción y consumo de tritio.



## **Bibliografía**

Fierro, A. A. (En proceso). *Diseño de una cobija productora de tritio en un reactor híbrido fusión-fisión. Teis de maestría*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Guzman, J. R. (2008). *Diseño y optimización de combustible nuclear para el reciclado de combustible gastado en reactores de agua en ebullición. Tesis de doctorado*. Universidad Nacional Autónoma de México.

M. Kotschenreuther<sup>1</sup>, P. V. (12 de febrero de 2010). *The super X divertor SXD and a compact fusion neutron source (CFNS)*. Obtenido de [stack.iop.org/NF/50/035003](http://stack.iop.org/NF/50/035003)

McMorrow, D. (Noviembre de 2011). *Tritium*. Virginia: The MITRE Corporation.

## VII. Conclusiones

Los combustibles fósiles están encaminados a agotarse; sin embargo, la rapidez en la que se acaben es una variable con la que debemos trabajar para decir que vivimos en un mundo sustentable; ser sustentable implica hacer uso de recursos naturales sin comprometer los recursos de las generaciones futuras. Por lo tanto, para asegurar el futuro de los diferentes tipos de combustibles, es necesario reducir la explotación y el consumo de éstos. Actualmente los combustibles más utilizados son los combustibles fósiles: la única energía capaz de sustituir a los combustibles fósiles es la energía nuclear. Uno de los beneficios que tiene la energía nuclear es que no emite gases de efecto invernadero; al implementar la energía nuclear en cualquier país se diversifican los combustibles, por lo que no dependerá de un solo tipo de energético y su economía no se verá tan afectada si el precio de algún combustible se incrementa exponencialmente.

Los reactores de fisión son productores de energía en forma masiva con una mínima cantidad de energético. Hoy en día las plantas tienen un gran desarrollo tecnológico en su seguridad y eficiencia, también han reducido sus costos. La desventaja que tiene una planta nuclear es la producción de desechos con alta radioactividad y la acumulación de éstos en almacenes.

La energía de fusión es una tecnología experimental, la cual no se sabe exactamente en qué momento se podrá utilizar. Los reactores de fusión que actualmente operan utilizan más energía para fusionar los elementos, de entrada, que la energía que genera, de salida. De igual forma los laboratorios que trabajan con fusión, confirman que el primer reactor de fusión será una fuente de neutrones; por esto, el CFNS es tan importante, será de los primeros reactores utilizando la fusión.

El reactor híbrido de fusión – fisión utiliza los residuos de plantas nucleares, por lo que ayuda a disminuir el volumen de los residuos en los sectores de almacenamiento y transmuta los elementos radiactivos para reducir su vida media. Como se observó en las simulaciones de esta tesis, es factible utilizar residuos reprocessados como combustible, que en su mayor parte contienen plutonio como elemento fisil. Por otro lado, la capa de litio en el reactor cumplió con su cometido. Se rellenaron espacios del reactor con litio, que en algún punto estaban inutilizados. Los neutrones que llegan a la capa de litio son absorbidos por el litio-6 para producir tritio, que es combustible para la fuente de neutrones de fusión. El resultado es que genera más de cincuenta por ciento de la cantidad de tritio necesaria para operar. La producción de tritio se podría aumentar si se

enriquece el litio natural al 90% de litio-6: éste es un trabajo futuro que se podría realizar como continuación de esta tesis.

En conclusión, el modelo cumple satisfactoriamente las expectativas, utilizando tres anillos de combustible, que es una configuración más próxima a la realidad, con las diferentes capas de litio para la generación de tritio.