



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

“GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DE FUSIÓN NUCLEAR”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
ÁREA MECÁNICA

PRESENTA:

ESTEBAN CAMPOS ANASTACIO

ASESOR:

M. en I. ALBERTO REYES SOLÍS



SAN JUAN DE ARAGÓN, ESTADO DE MÉXICO 2009



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.

El actual trabajo de tesis se lo dedico a toda mi familia que me ha apoyado incondicionalmente en la realización de mis estudios, en especial a mi hermano Víctor, a mi esposa Iriabhet, a mi hija Wendy Jazmín y a mis padres.

Quiero agradecer a todos mis hermanos, en especial a Víctor y a Gregorio por su apoyo económico y a mis padres por su apoyo moral.

Además quiero agradecer el apoyo de todos mis profesores en especial a mi asesor, el M. en I. Alberto Reyes Solís y a todos mis compañeros de generación.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1	6
FORMAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD ACTUALES	
1.1 NATURALEZA DE LA ELECTRICIDAD	6
1.2 BATERIAS	8
1.3 CELDAS SOLARES	10
1.4 CELDAS DE COMBUSTIBLE	14
1.5 CENTRALES DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	15
1.5.1 GENERADORES ELÉCTRICOS	16
1.5.1.1 Generadores de corriente continua	18
1.5.1.2 Generadores de corriente alterna (alternadores)	20
1.5.2 CENTRALES EÓLICAS	21
1.5.3 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	25
1.5.4 ENERGÍA TÉRMICA	28
1.5.4.1 Ciclo Rankine	28
1.5.4.2 Ciclo Brayton	30
1.5.4.3 Ciclo Otto	33
1.5.4.4 Ciclo Diesel	35
1.5.5 CENTRALES DE VAPOR	36
1.5.6 CENTRALES DE TURBOGAS	38
1.5.7 CENTRALES DE CICLO COMBINADO	39
CAPÍTULO 2	41
IMPORTANCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS FORMAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	
2.1 AGOTAMIENTO DE RECURSOS	41
2.1.1 LA SITUACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES	42
2.1.1.1 Recursos energéticos de origen orgánico o convencionales	42
2.1.1.2 Hidrocarburos naturales	42
2.1.1.3 Gas natural	43
2.1.1.4 El crudo o petróleo líquido	43
2.1.1.5 Los hidrocarburos sólidos	44
2.1.1.6 El carbón	44
2.1.2 LA SITUACIÓN DE COMBUSTIBLES NUCLEARES	45
2.2 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	48
2.2.1 CALENTAMIENTO GLOBAL	49
2.3 AUMENTO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA	50

2.4 PRINCIPALES FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA Y RENOVABLE	53
2.4.1 ENERGÍA EÓLICA	53
2.4.2 BIOCOMBUSTIBLES	54
2.4.3 ENERGÍA DEL OCEANO	55
2.4.4 LA OTRA OPCIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR	56
CAPÍTULO 3	57
LA ENERGÍA NUCLEAR	
3.1 ORIGEN DE LA ENERGÍA NUCLEAR	57
3.1.1 ESTRUCTURA DE LA MATERIA	57
3.1.1.1 Modelos Atómicos	58
3.1.1.2 Estructura Atómica	60
3.1.2 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA	62
3.2 USOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR	63
3.2.1 ARMAS NUCLEARES	63
3.2.2 PLANTAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	65
3.2.3 OTROS USOS DE LA INDUSTRIA NUCLEAR	68
3.3 TIPOS DE RADIACIÓN	71
CAPÍTULO 4	74
REACCIONES NUCLEARES	
4.1 REACCIONES DE FISIÓN NUCLEAR.	75
4.2 REACCIONES DE FUSIÓN NUCLEAR	76
4.3 COMPARACIÓN ENTRE LAS REACCIONES NUCLEARES Y REACCIONES QUÍMICAS	79
CAPÍTULO 5	82
ESTUDIO DE LA FUSIÓN NUCLEAR	
5.1 FUERZAS ELECTROSTÁTICAS	82
5.2 FUERZAS NUCLEARES	82
5.3 REACCIÓN DEUTERIO-TRITIO	83
5.3.1 DEUTERIO	84
5.3.2 TRITIO	85
5.4 EL PLASMA TERMONUCLEAR	88
5.5 PROBLEMÁTICA SOBRE EL CONFINAMIENTO DEL PLASMA TERMONUCLEAR	89

CAPITULO 6	90
CONFINAMIENTO MAGNÉTICO	
6.1 TRAMPAS MAGNÉTICAS	91
6.1.1 INSTALACIONES TOKAMAK	95
6.1.2 INSTALACIONES STELLARATOR	98
6.2 CALENTAMIENTO DEL PLASMA	101
6.2.1 CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	102
6.3 CONFIGURACIÓN DE LAS CENTRALES DE ELECTRICIDAD CON REACTORES DE CONFINAMIENTO MAGNÉTICO	104
CAPITULO 7	106
CONFINAMIENTO INERCIAL	
7.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS RAYOS LÁSER	107
7.1.1 INTERACCIÓN ÁTOMO-FOTÓN	107
7.1.2.-ABSORCIÓN Y AMPLIFICACIÓN ÓPTICA	109
7.1.3 AMPLIFICADORES ÓPTICOS	111
7.1.4 OSCILADOR ÓPTICO	113
7.1.5 PRODUCCIÓN DE PULSOS LÁSER ULTRACORTOS	114
7.1.6 LÁSERES PARA FUSIÓN NUCLEAR	117
7.2 CÁPSULAS DE COMBUSTIBLE PARA FUSIÓN NUCLEAR	119
7.2.1 RADIACIÓN LÁSER Y MATERIA	119
7.2.2 EXPLOSIONES E IMPLOSIONES	121
7.2.3 PLASMAS, PRESIÓN Y LUZ	123
7.2.4 LA INESTABILIDAD DE RAYLEIGH Y TAYLOR	125
7.2.5 SUAVIZACIÓN TÉRMICA	127
7.3 CONFIGURACIÓN DE UN REACTOR POR CONFINAMIENTO INERCIAL LÁSER	128
7.3.1 DETECCIÓN DE NEUTRONES	128
7.3.2 DISEÑO DE UN REACTOR POR CONFINAMIENTO INERCIAL	128
CAPITULO 8	131
PERSPECTIVAS A FUTURO SOBRE LA FUSIÓN NUCLEAR.	
8.1 PROYECTO ITER	131
8.1.1 SOCIOS	133
8.1.2 SELECCIÓN DE LA SEDE	134
CONCLUSIÓN	137
BIBLIOGRAFIA	139
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	139

GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DE FUSIÓN NUCLEAR

INTRODUCCIÓN

La vida del humano está llena de grandes necesidades que cubrir, desde alimentarse al igual que todos los seres vivos, hasta tener esparcimiento y recreación, todas estas necesidades deben de estar cubiertas en el más alto nivel y para ello se requieren varios factores importantes como la energía.

La energía permite transformar las cosas para poder ser aprovechadas de la manera correcta o en la manera en que la necesitamos, por ejemplo, si necesitamos papel para escribir lo podemos obtener de la madera, sin embargo, no podemos usar la madera tal cual, por lo que debe ser transformada, primeramente la madera debe de ser cortada en el lugar donde se encuentra, en seguida la madera se debe transportar hasta el lugar donde se tiene el equipo necesario para poder llevar a cabo la transformación para que de esta manera se pueda distribuir y llegar hasta donde se requiere. Para realizar todo lo anterior utilizamos diferentes equipos que consisten en diferentes tipos de máquinas, desde la de combustión interna (para cortar, transportar la madera y producir energía eléctrica), máquinas eléctricas (para realizar los diferentes procesos en la obtención de papel a partir de la madera) y máquinas manuales (para diferentes actividades auxiliares en el proceso), como se puede notar estas máquinas deben utilizar diversos tipos de energía para poder realizar su función de tal modo que se debe de obtener la energía adecuada y necesaria para que todo este proceso funcione y sea útil para cubrir la necesidad de tener papel.

De este mismo modo la mayoría de las necesidades que debemos cubrir requieren de que se transforme una materia o de que se produzcan condiciones especiales para tener un ambiente adecuado que nos haga sentir a gusto, se pueden citar ejemplos como el de cocinar algún tipo de alimento o tener un equipo de aire acondicionado para evitar sentir incomodidad al estar en algún lugar, entonces para conseguir la transformación de algún elemento para cubrir una necesidad se tiene que emplear energía, para lo que es necesario primero definir que es energía:

El concepto de energía está relacionado con la capacidad de poner en movimiento o transformar algo. En el ámbito económico y tecnológico, la energía hace referencia a un recurso natural y los elementos asociados que permiten hacer un uso industrial del mismo.

Para la física, la energía es una magnitud abstracta que está ligada al estado dinámico de un sistema cerrado y que permanece invariable con el tiempo. Se trata de una abstracción que se le asigna al estado de un sistema físico. Debido a diversas propiedades (composición química, masa, temperatura, etc.), todos los cuerpos poseen energía.

Entonces para obtener energía debemos conocer las fuentes de ésta. Con respecto a las máquinas mencionadas en el ejemplo de la obtención de papel a partir de la madera, decimos que para las máquinas de combustión interna se utilizan los hidrocarburos como fuente de energía, ya que la combustión de los hidrocarburos permite obtener suficiente cantidad de calor para mover émbolos o alabes que accionan a su vez a diferentes mecanismos para producir movimiento de elementos

que cortaran la madera o que permitirá llevar a cabo el transporte de ésta. En el caso de las máquinas eléctricas la energía utilizada es la energía eléctrica la cual consiste en una corriente de electrones provocada por un diferencial de potencial eléctrico que pasa a través de embobinados para crear campos y flujos magnéticos de tal manera que se produce la transformación del potencial eléctrico, en el caso de los transformadores y en el caso de los motores se produce movimientos para realizar diversos procesos, sin embargo, para obtener la energía eléctrica necesaria se deben de realizar varias transformaciones de energía de diferentes tipos como se muestra en el diagrama de la Fig. 1.

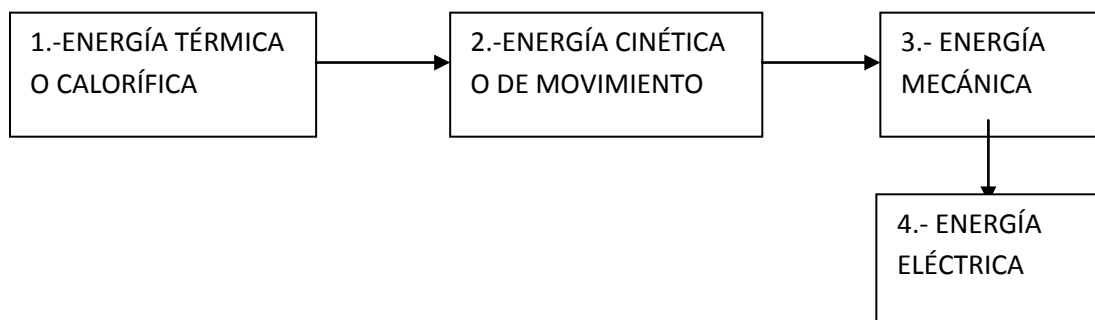


Fig. 1 Orden de las transformaciones que experimenta la energía para llegar a convertirse en energía eléctrica.

Como se puede observar, la energía térmica es con la se que inicia el proceso para poder obtener energía eléctrica, la cual en el presente y en el futuro a largo plazo es y será el tipo de energía más utilizada en todo el mundo, la obtención de ésta a gran escala se lleva a cabo en plantas de generación eléctrica, de las cuales tenemos diferentes tipos como son las termoeléctricas, las eólicas y las hidráulicas, a su vez las plantas termoeléctricas son las que mayor producción de energía eléctrica proporcionan a todo el mundo, vale la pena mencionar que las plantas de generación eólicas e hidroeléctricas no necesitan de la energía térmica, sino que aprovechan la energía cinética del aire y la energía potencial del agua respectivamente.

Para llevar a cabo la producción de energía térmica en las plantas termoeléctricas se utilizan diferentes métodos que dan el nombre a cada tipo de planta termoeléctrica entre las que se tienen:

1. Plantas geotermoeléctricas, aprovechan el calor existente en el manto terrestre.
2. Plantas termoeléctricas de turbo gas, aprovechan el calor proveniente de la combustión de gas natural.
3. Plantas termoeléctricas de ciclo Rankine, aprovecha el calor de la combustión de diversos combustibles como pueden ser gas natural, combustóleo, carbón, etc. para producir vapor, son las más utilizadas a nivel mundial.
4. Plantas de ciclo combinado, implementan el ciclo de turbo gas y el ciclo Rankine al mismo tiempo, aprovechan la energía de la combustión del gas natural.

Como se puede ver los hidrocarburos juegan un papel muy importante en la producción de energía eléctrica a nivel mundial, sin embargo, el consumo de energía eléctrica se va elevando constantemente mientras que la cantidad disponible de hidrocarburos es limitada, lo cual limita la cantidad de energía eléctrica que se puede generar, lo que a su vez afecta en que nuestras necesidades cotidianas no se podrán satisfacer al 100% en un futuro no muy lejano, por ello es indispensable buscar nuevas fuentes de energía que nos permitan generar energía eléctrica, pero que además cumpla con otro aspecto importante que es el de no contaminar el ambiente o de no contaminar demasiado el ambiente, los hidrocarburos tienen la característica de ser altamente contaminantes por lo que es otra razón para buscarles un reemplazo.

En la actualidad se han estudiado varias maneras de reemplazar a los hidrocarburos como fuente de energía principal, en este texto se hablará de la energía nuclear contenida en la materia, pero principalmente de la energía nuclear obtenida por medio de Fusión nuclear.

El actual trabajo consta de ocho capítulos, de los cuales se da una breve explicación a continuación:

1. **CAPÍTULO 1. FORMAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD ACTUALES:** En este capítulo se expone la naturaleza de la electricidad y las diferentes maneras de cómo obtener energía eléctrica tanto a baja escala como a gran escala, de tal manera que se exponen las centrales de generación de electricidad por medio de vapor de agua, las cuales son el eje central de la producción de electricidad.
2. **CAPÍTULO 2. IMPORTANCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS FORMAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD:** Este capítulo trata de la urgencia de encontrar nuevas formas de generar electricidad a gran escala, para lo cual se exponen los puntos en contra de las maneras actuales de generación de electricidad y se postula la Fusión Nuclear como una importante opción para suplir algunas formas de generar electricidad.
3. **CAPÍTULO 3. LA ENERGÍA NUCLEAR:** Consiste en exponer las ventajas y desventajas del uso de la energía nuclear, así como también su origen, todo esto enfocado a la generación de electricidad.
4. **CAPÍTULO 4. REACCIONES NUCLEARES:** Aquí se exponen las características más importantes de los dos diferentes tipos de reacciones nucleares usadas en la industria nuclear para generar electricidad, como lo son la Fisión Nuclear y la Fusión Nuclear.
5. **CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE LA FUSIÓN NUCLEAR:** En esta parte se expone más detalladamente la Fusión Nuclear, de tal manera que se muestran todas las características necesarias para que ésta sea viable en la producción de electricidad y las problemáticas que se tienen actualmente con este tipo de reacción, principalmente el problema del confinamiento o encierro del material fusionable.
6. **CAPÍTULO 6. CONFINAMIENTO MAGNÉTICO:** Se expone la naturaleza de los campos magnéticos y la implementación de éstos para confinar el plasma

adecuadamente, de tal manera que se presenta la configuración teórica de un reactor de confinamiento magnético.

7. **CAPÍTULO 7. CONFINAMIENTO INERCIAL:** En este capítulo se presenta el funcionamiento de los rayos láser utilizados para Fusión Nuclear y su utilización en la configuración teórica de un reactor de confinamiento inercial láser utilizado para generar electricidad.
8. **CAPÍTULO 8. PERSPECTIVAS A FUTURO SOBRE LA FUSIÓN NUCLEAR:** En este capítulo final se presenta un proyecto muy importante, el ITER, el cual es la fabricación de un reactor de Fusión Nuclear por confinamiento magnético y que promete ser la manera de generar electricidad del futuro.

Con estos capítulos se pretende demostrar al menos de manera teórica la viabilidad de la Fusión Nuclear en la generación de electricidad debido a sus enormes ventajas, las cuales se irán estudiando en la continuación de este texto.

CAPÍTULO 1

FORMAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD ACTUALES

Para comprender la manera de cómo opera la producción de energía eléctrica en nuestra vida cotidiana y poder tener un panorama de las características a favor y en contra de los métodos de generación eléctrica, se necesita primero saber cómo funcionan tales métodos. De tal manera que este capítulo está destinado a ello.

1.1 NATURALEZA DE LA ELECTRICIDAD

Lo primero que se debe de saber es: ¿qué es la electricidad?, para así comprender mejor las formas en que ésta se genera.

Toda la materia está formada por átomos. Cada átomo está constituido de partículas muy pequeñas llamadas protones, electrones y neutrones. Desde el punto de vista de la mecánica clásica, la forma como está constituido el átomo se compara con frecuencia con el sistema solar, como se muestra en la Fig. 1.1. Los neutrones y los protones forman el núcleo del átomo. Los neutrones tienen una carga eléctrica neutra y los protones carga eléctrica positiva. Los electrones del átomo giran con rapidez alrededor del núcleo. Los electrones tienen carga negativa.

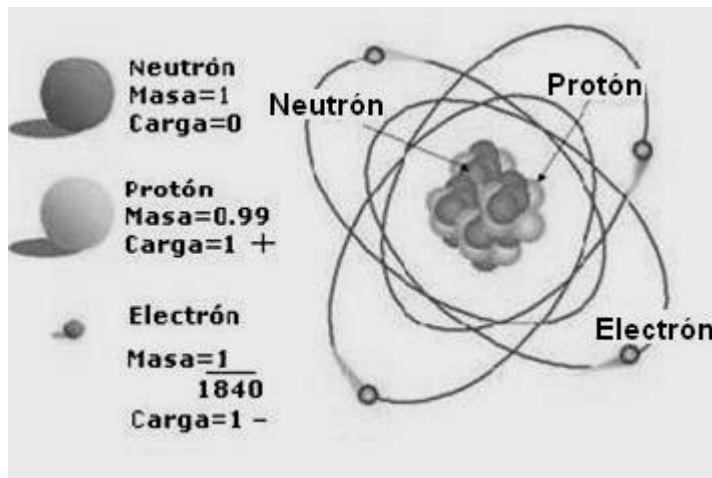


Fig. 1.1 Configuración de un átomo de acuerdo a la mecánica clásica.

Es difícil comprender que los átomos, incluso en los sólidos, están formados en su mayor parte por espacio vacío. Podría ayudarnos a comprender si los consideramos como un ventilador de dos aspas. Cuando gira el ventilador se ve como un disco plano, incluso cuando se sabe que hay mayor cantidad de espacio entre las aspas. Este disco actúa más como un sólido que como un espacio vacío, si se le arroja una pelota de hule las aspas golpearían a la pelota y esta rebotaría. Si el disco giratorio diera vuelta lo suficientemente rápido, parecería y se compararía con un disco sólido. Los átomos actúan de una forma semejante. Los electrones giran rápidamente

alrededor del núcleo a velocidades tan altas como 6400 km/s, lo que hace que el átomo parezca un sólido.

Los electrones giran alrededor del núcleo como un satélite gira alrededor de la Tierra. Los electrones cercanos al núcleo (como se verá más adelante) están enlazados estrechamente con el mismo, en tanto que los electrones de las orbitas exteriores de muchos materiales están enlazados débilmente. En algunos materiales pueden quitarse o añadirse electrones a la órbita exterior enlazada débilmente. Estos electrones entraran a la órbita de otros átomos o pueden transformarse en electrones libres. Normalmente los electrones se mueven o vagan a través de los átomos. Esto es, cada electrón que sale de la órbita de un átomo es reemplazado por un electrón que viene de otro átomo. Los elementos metálicos tienen muchos electrones que vagan libremente. A estos elementos se les llama conductores. Elementos conductores tienen tres o menos electrones en las órbitas exteriores de sus átomos. Los elementos con cinco o más electrones en su órbita exterior tienen un enlace más fuerte con el núcleo de tal manera que para que generen electrones libres es necesario aplicar una gran cantidad de energía. A estos materiales se le llama aislantes.

Los átomos que pueden captar un electrón extra en su órbita exterior tienen más electrones que protones y por consiguiente se dice que el átomo tiene carga negativa. Si un átomo cediera uno de sus electrones a un átomo vecino, tendría más protones que electrones, y en consecuencia tendría carga positiva. A los átomos que tienen electrones extra o a los que les falta se les llama iones. Si tienen electrones extra son iones negativos y cuando les faltan son positivos.

Cuando un material hecho con un elemento conductor tiene un extremo conectado a una fuente de electrones extra y el otro extremo conectado a un objeto que le faltan electrones, el flujo general de los electrones tenderá a alejarse de la fuente de electrones para ir hacia la parte que tiene menos electrones. Los electrones se alejarán de la fuente porque cargas iguales se repelen una a otra. Se mueven hacia la parte que tiene menos electrones porque cargas diferentes se atraen una a otra.

El flujo forzado de la colisión de los electrones causará una onda de energía que se mueve a través del conductor a una velocidad que se aproxima a la de la luz. Esta onda se mueve en una forma muy semejante a como se movería una serie de choques en la parte posterior de un automóvil en una carretera atiborrada, tal suceso puede apreciarse en la Fig. 1.2.

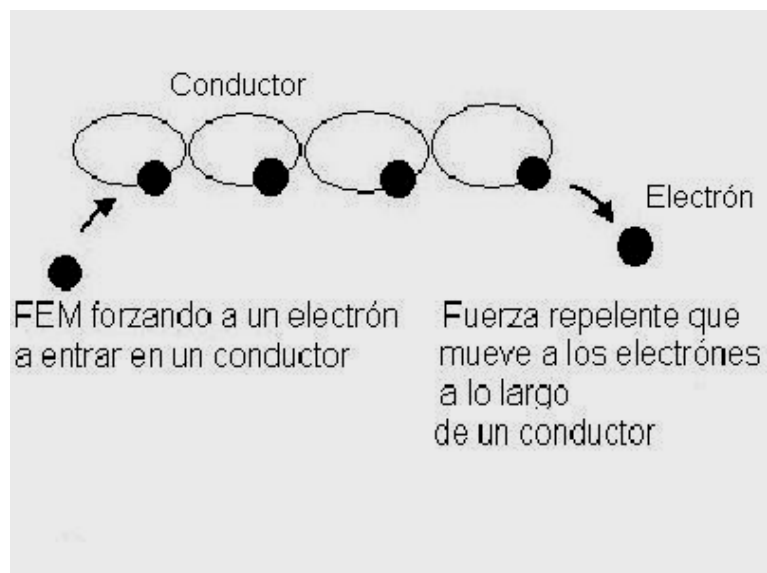


Fig. 1.2 Flujo forzado de electrones.

El flujo de electrones en una dirección se llama electricidad. La cantidad de electrones que fluyen en una dirección se llama corriente eléctrica. La fuerza eléctrica que hace que los electrones fluyan en una dirección se le llama fuerza electromotriz (FEM). La fuerza electromotriz (cantidad de presión eléctrica) se expresa como voltaje (V). Mientras más alto es el voltaje, mayor será la fuerza eléctrica que mueva a los electrones a través del conductor.

A continuación se analizan las formas más comunes de generar un voltaje.

1.2 BATERIAS

Las baterías son una fuente muy importante de electricidad debido a que son un modo muy versátil de producirla gracias a su portabilidad. Son el modo de generar electricidad más antiguamente conocido.

Las baterías basan su funcionamiento en las reacciones químicas entre materiales diferentes que hace que los electrones de los materiales se muevan desde unos átomos hacia otros. Cuando el movimiento de los electrones resulta de una reacción química se le llama proceso electroquímico.

Para ilustrar el funcionamiento de las baterías se analizará del caso de una batería automotriz.

Una batería automotriz de plomo-ácido es un dispositivo electroquímico. Tiene voltaje (presión eléctrica) y puede producir una corriente como resultado de las reacciones químicas que producen los materiales de la misma. Una corriente que pasa en sentido contrario al sentido en que la batería produce corriente causará reacciones químicas que restauran los materiales de la misma, tal es el caso de las recargas de las baterías, en el caso de las baterías recargables.

Una celda de la batería tiene dos materiales activos diferentes. Cada uno está formado por rejillas que constituyen placas. Los dos materiales del elemento se mantienen aparte mediante un separador. El elemento se pone en una solución electrolítica de ácido sulfúrico para formar la celda de la batería, Fig. 1.3. El electrolito es un material cuyos átomos se ionizan en solución. Estos átomos ionizados se mueven en él. El ácido que hay en el electrolito remueve los electrones de los materiales de la placa de manera que puedan fluir a través de las placas. Esto causa que se formen iones positivos y negativos en el material de la placa.

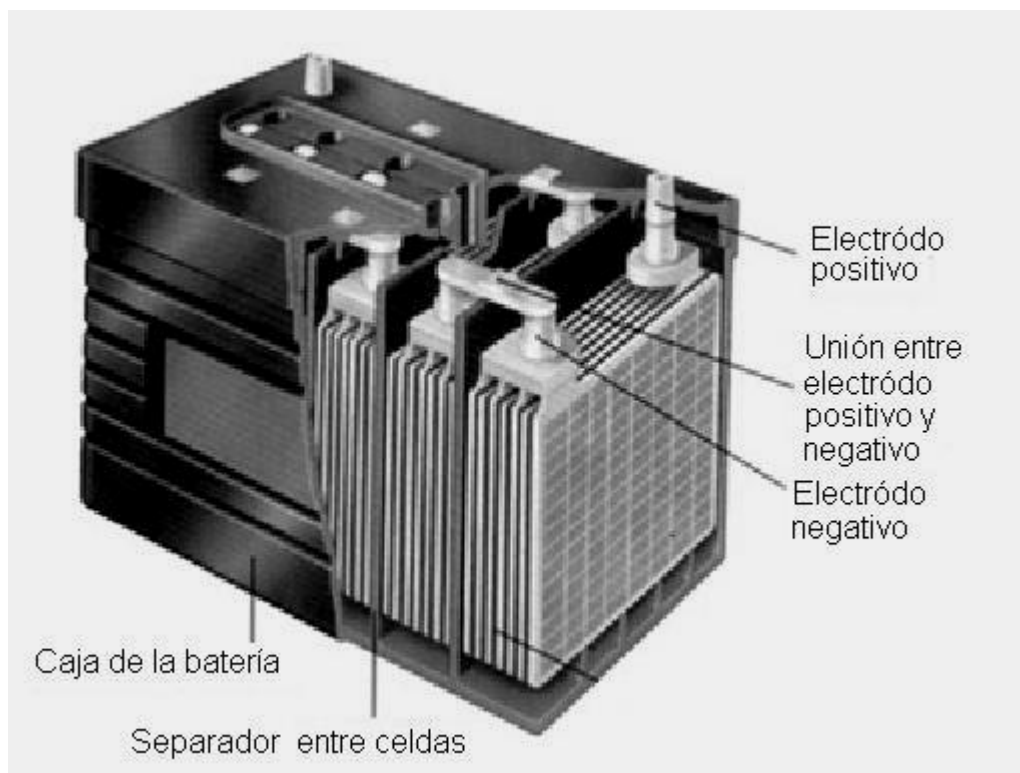


Fig. 1.3 Componentes de una batería automotriz.

El material activo en una de las placas es el dióxido de plomo, al que normalmente se le llama peróxido de plomo (PbO_2). Es un material cristalino café, de grano pequeño. El tipo cristalino de estructura muy porosa, como un filtro, de manera que el electrolito puede pasar a través de la placa. Los electrones salen de la placa de peróxido de plomo y entran al electrolito, dejando atrás de ellos iones positivos en la placa de peróxido de plomo. Esta es la placa positiva.

El material activo en la segunda placa es el plomo poroso o esponjoso. El electrolito que tiene muchos electrones de la placa positiva pasa a través de esta segunda placa. Los electrones dejan al electrolito y entran al plomo de la segunda placa. Esto le da a la placa de plomo esponjoso electrones extra que forman iones negativos en la misma. Esta segunda placa es la placa negativa.

La fuerza electromotriz (voltios) entre la placa positiva de peróxido de plomo y la placa negativa de plomo esponjoso es de 12.13 V. El voltaje de celda de una batería

es causado por el tipo de materiales empleados en las placas. El voltaje no se ve afectado por el tamaño de la placa, la forma de la misma o el número de placas que hay en una celda.

Si un alambre conecta a las placas pasando por un foco que este fuera de la celda, los electrones saldrán de las terminales de la placa negativa y pasarán a través de los alambres y el foco hasta las terminales de la placa positiva. Los electrones continúan fluyendo en tanto que la acción química en el interior de la celda transfiera electrones desde la placa negativa hacia la positiva. A este proceso se le llama descarga de la celda. Y de esta manera es como las baterías generan electricidad.

1.3 CELDAS SOLARES

También llamadas celdas fotovoltaicas son la conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico que hace que absorban fotones de luz y emitan electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

Las celdas solares están hechas de la misma clase de materiales semiconductores (tales como el silicio) que se usan en la industria microelectrónica. Para las celdas solares, una delgada rejilla semiconductor es especialmente tratada para formar un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro. Cuando la energía luminosa llega hasta la celda solar, los electrones son golpeados y sacados de los átomos del material semiconductor. Si ponemos conductores eléctricos tanto del lado positivo como del negativo de la rejilla, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de una corriente eléctrica, es decir, en electricidad. La electricidad puede entonces ser usada para suministrar potencia a una carga, por ejemplo para encender una luz o energizar una herramienta.

Las celdas solares de silicio se elaboran utilizando rodajas o placas (wafers) monocristalinas, policristalinas o láminas delgadas

Las placas monocristalinas (de aproximadamente 1/3 a 1/2 de milímetro de espesor) se cortan de un gran lingote monocristalino que se ha desarrollado a aproximadamente 1400°C, este es un proceso muy costoso. El silicio debe ser de una pureza muy elevada y tener una estructura cristalina casi perfecta.

Las placas policristalinas son fabricadas por un proceso de moldeo en el cual el silicio fundido es vertido en un molde y se le deja asentar. Entonces se rebana en placas. Como las placas policristalinas son hechas por moldeo son apreciablemente más baratas de producir, pero no tan eficiente como las placas monocristalinas. El rendimiento más bajo es debido a las imperfecciones en la estructura cristalina resultando del proceso de moldeo.

El silicio amorfo, una de las tecnologías de lámina delgada, es creado depositando silicio sobre un substrato de vidrio, a partir de un gas reactivo tal como silano (SiH_4). Este tipo de celda solar se puede aplicar como película a substratos de bajo costo tales como cristal o plástico. Otras tecnologías de lámina delgada incluyen lámina delgada de silicio multicristalino, las celdas de seleniuro de cobre e indio/sulfuro de cadmio, las celdas de telurio de cadmio/sulfuro de cadmio y las celdas del arseniuro de galio. Las celdas de lámina delgada tienen muchas ventajas incluyendo una deposición y un ensamblado más fácil, la capacidad de ser depositadas en substratos o materiales de construcción baratos, la facilidad de la producción en masa, y la gran conveniencia para aplicaciones grandes.

En la producción de celdas solares al silicio se le introducen átomos de impurezas (dopado) para crear una región tipo p y una región tipo n a fin de producir una unión p-n, Fig. 1.4. El dopado se puede hacer por difusión a alta temperatura, donde las placas se colocan en un horno con el dopante introducido en forma de vapor. Hay muchos otros métodos de dopar el silicio. En la fabricación de algunos dispositivos de lámina delgada la introducción de dopantes puede ocurrir durante la deposición de las láminas o de las capas.

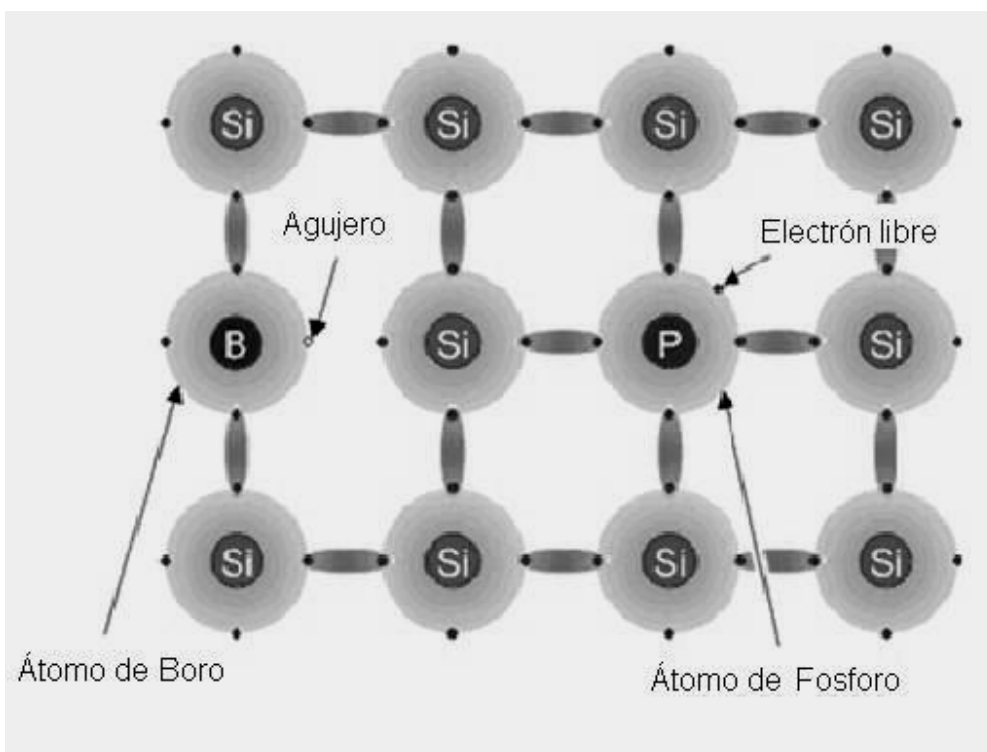


Fig. 1.4 Empleo de los átomos de fósforo y de boro para dopar al silicio.

Un átomo del silicio tiene 4 electrones de valencia (aquellos más débilmente unidos que se encuentran en la órbita externa), que enlazan a los átomos adyacentes. Substituyendo un átomo del silicio por un átomo que tenga 3 o 5 electrones de valencia, se producirá un espacio sin un electrón (un agujero) o un electrón extra que pueda moverse más libremente que los otros, ésta es la base del dopado. En el dopado tipo p, la creación de agujeros, se alcanza mediante la incorporación en el

silicio de átomos con 3 electrones de valencia, generalmente se utiliza boro. En el dopaje de tipo n, la creación de electrones adicionales se alcanza incorporando un átomo con 5 electrones de valencia, generalmente fósforo.

Una vez que se crea una unión p-n, se hacen los contactos eléctricos al frente y en la parte posterior de la celda. La parte posterior de la placa se puede cubrir totalmente por el metal, pero el frente de la misma tiene que tener solamente un patrón en forma de rejilla o de líneas finas de metal, de otra manera el metal bloquearía al sol del silicio y no habría ninguna respuesta a los fotones de la luz incidente.

Para entender la operación de una celda fotovoltaica, necesitamos considerar la naturaleza del material y la naturaleza de la luz del sol. Las celdas solares están formadas por dos tipos de material, generalmente silicio tipo p y silicio tipo n. La luz de ciertas longitudes de onda puede ionizar los átomos en el silicio y el campo interno producido por la unión que separa algunas de las cargas positivas (agujeros) de las cargas negativas (electrones) dentro del dispositivo fotovoltaico. Los agujeros se mueven hacia la capa positiva o capa de tipo p y los electrones hacia la negativa o capa tipo n, Fig. 1.5. Aunque estas cargas opuestas se atraen mutuamente, la mayoría de ellas solamente se pueden recombinar pasando a través de un circuito externo fuera del material debido a la barrera de energía potencial interna. Por lo tanto si se hace un circuito se puede producir una corriente a partir de las celdas iluminadas, puesto que los electrones libres tienen que pasar a través del circuito para recombinarse con los agujeros positivos.

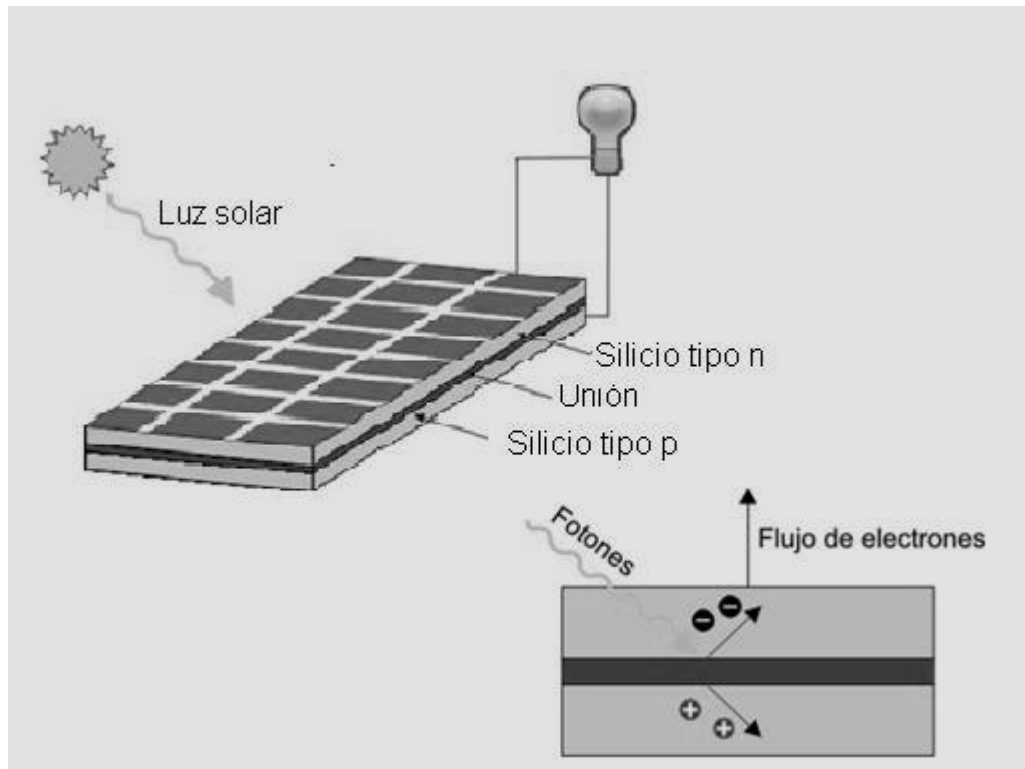


Fig. 1.5 Efecto fotovoltaico en una celda solar.

La cantidad de energía que entrega un dispositivo fotovoltaico está determinado por:

- El tipo y el área del material.
- La intensidad de la luz del sol.
- La longitud de onda de la luz del sol.

Por ejemplo, las celdas solares de silicio monocristalino actualmente no pueden convertir más del 25% de la energía solar en electricidad, porque la radiación en la región infrarroja del espectro electromagnético no tiene suficiente energía como para separar las cargas positivas y negativas en el material.

Las celdas solares de silicio policristalino en la actualidad tienen una eficiencia de menos del 20% y las celdas amorfas de silicio tienen actualmente una eficiencia cerca del 10%, debido a pérdidas de energía internas más altas que las del silicio monocristalino.

Una típica celda fotovoltaica de silicio monocristalino de 100 cm^2 producirá cerca de 1.5 watts de energía a 0.5 volts de Corriente Continua y 3 Amperes bajo la luz del sol en pleno verano (1000 W/m^2). La energía de salida de la celda es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz del sol.

Una característica importante de las celdas fotovoltaicas es que el voltaje de la celda no depende de su tamaño, y sigue siendo bastante constante con el cambio de la intensidad de luz. Sin embargo, la corriente en un dispositivo, es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz y al tamaño. Para comparar diversas celdas se les clasifica por densidad de corriente, o Amperes por centímetro cuadrado del área de la celda.

La potencia entregada por una celda solar se puede aumentar con bastante eficacia empleando un mecanismo de seguimiento para mantener el dispositivo fotovoltaico directamente frente al sol, o concentrando la luz del sol usando lentes o espejos. Sin embargo, hay límites a este proceso debido a la complejidad de los mecanismos, y de la necesidad de refrescar las celdas. La corriente es relativamente estable a altas temperaturas, pero el voltaje se reduce, conduciendo a una caída de potencia a causa del aumento de la temperatura de la celda.

1.4 CELDAS DE COMBUSTIBLE

En principio, una celda de combustible opera como una batería. Genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión. A diferencia de las baterías, una celda de combustible no se agota ni requiere recarga. Producirá energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de combustible. El único subproducto que se genera es agua 100% pura.

Una celda de combustible consiste en dos electrodos separados por un electrólito. El oxígeno pasa sobre un electrodo y el hidrógeno sobre el otro. Cuando el hidrógeno se ioniza pierde un electrón y al ocurrir esto ambos (hidrógeno y electrón) toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El hidrógeno migra hacia el otro electrodo a través del electrólito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor, Fig. 1.6. Este proceso producirá agua, corriente eléctrica y calor útil. Para generar cantidades utilizables de corriente las celdas de combustibles son “apiladas” en un emparedado de varias capas.

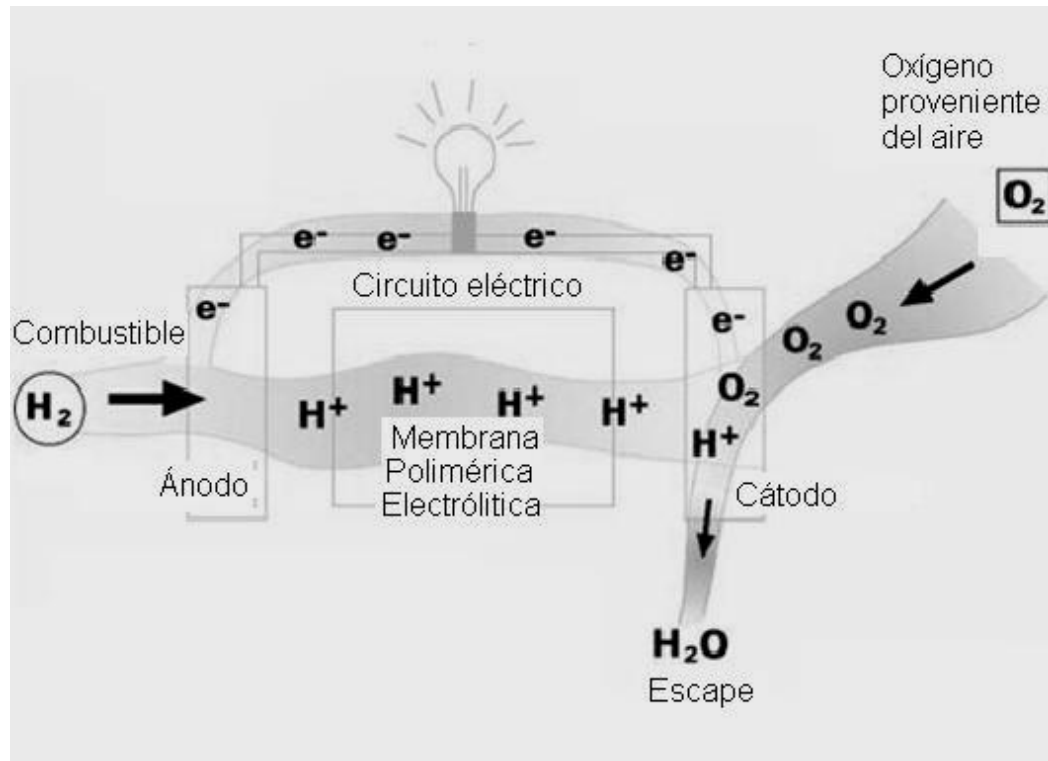


Fig. 1.6 Configuración de una celda de combustible.

Las celdas de combustible son una familia de tecnologías que usan diferentes electrólitos y que operan a diferentes temperaturas. Cada miembro de esa familia tiende a ser más apropiada para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, las celdas de combustible de membrana electrolítica polimérica han demostrado ser apropiadas para su aplicación en autos, mientras que las celdas de combustible de carbonatos fundidos parecen ser más apropiadas para uso con turbinas a gas.

1.5 CENTRALES DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

La finalidad de una central de generación de electricidad es la generación de energía eléctrica a gran escala para su posterior distribución, pero para lograr esto como ya se mencionó, se requiere de varias transformaciones de energía previas con la finalidad de producir energía mecánica para mover al generador eléctrico que es el elemento que finalmente lleva a cabo la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica utilizable, entonces, se puede decir que el generador eléctrico es la parte principal de las centrales de generación de electricidad, ya que en este dispositivo es donde se lleva a cabo la generación de voltaje. A continuación se procederá a estudiar los generadores eléctricos:

1.5.1 GENERADORES ELÉCTRICOS

Dos principios físicos relacionados entre sí sirven de base al funcionamiento de los generadores y de los motores eléctricos. El primero es el principio de la inducción descubierto por el científico e inventor británico Michael Faraday en 1831 el cual dice: “Si un conductor se mueve a través de un campo magnético, o si está situado en las proximidades de un circuito de conducción fijo cuya intensidad puede variar, se establece o se induce una corriente en el conductor”. El principio opuesto a éste fue observado en 1820 por el físico francés André Marie Ampère: “Si una corriente pasaba a través de un conductor dentro de un campo magnético, éste ejercía una fuerza mecánica sobre el conductor”.

Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos, llamados polos, terminales o bornes. Los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator), Fig. 1.7. Si mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generara una fuerza electromotriz (FEM).

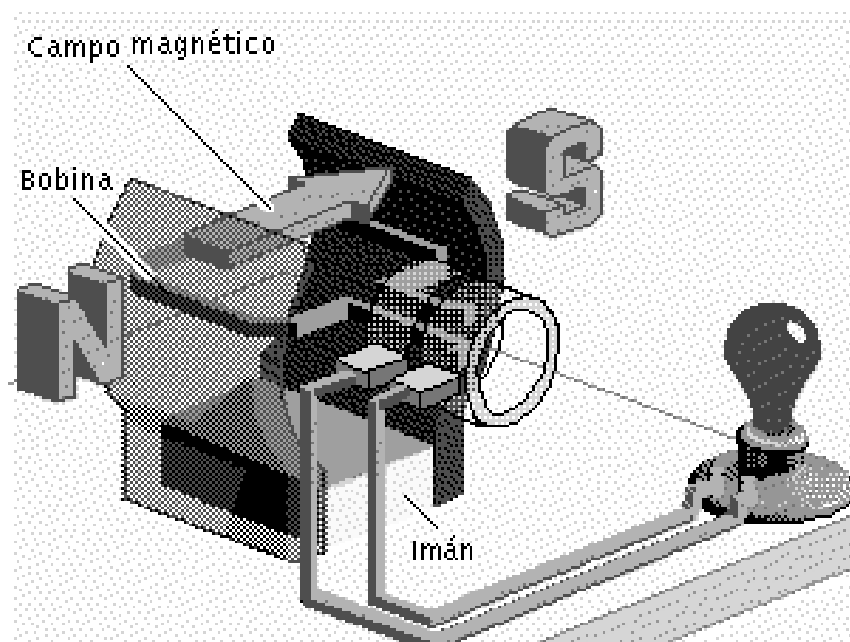


Fig. 1.7 Interacción entre el campo magnético y la bobina en un generador eléctrico.

Los generadores eléctricos se clasifican en dos tipos fundamentales: primarios y secundarios. Son generadores primarios los que convierten en energía eléctrica la energía de otra naturaleza que reciben o de la que disponen inicialmente, mientras que los secundarios entregan una parte de la energía eléctrica que han recibido previamente.

Desde el punto de vista teórico (teoría de circuitos) se distinguen dos tipos ideales de generadores eléctricos:

- **Generador de voltaje:** Un generador de voltaje ideal mantiene un voltaje fijo entre sus terminales con independencia de la resistencia de la carga que pueda estar conectada entre ellos.
- **Generador de corriente:** Un generador de corriente ideal mantiene una corriente constante por el circuito externo con independencia de la resistencia de la carga que pueda estar conectada entre ellos.

En la Fig. 1.8 se ve el circuito más simple posible, constituido por un generador de voltaje constante E conectado a una carga R_c y en donde se cumple la ecuación (1.1).

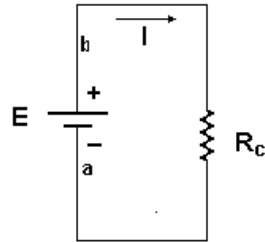


Fig. 1.8 Circuito simple de un generador eléctrico.

$$E = I \times R_c \quad (1.1)$$

El generador descrito no tiene existencia real en la práctica, ya que siempre posee lo que, convencionalmente, se ha dado en llamar resistencia interna, que aunque no es realmente una resistencia, en la mayoría de los casos se comporta como tal. En la Fig. 1.9 se puede ver el mismo circuito anterior, pero donde la resistencia interna del generador viene representada por una resistencia R_i , en serie con el generador, con lo que la ecuación (1.1) se transforma en la ecuación (1.2).

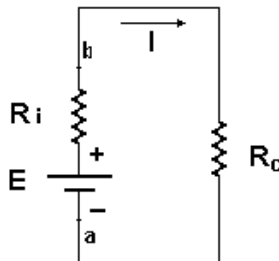


Fig. 1.9 Circuito de un generador eléctrico que incluye la resistencia de las bobinas R_i .

$$E = I \times (R_c + R_i) \quad (1.2)$$

Otra forma de clasificar a los generadores eléctricos es dividirlos de acuerdo al tipo de corriente que entregan, por ello existen los generadores de corriente continua y de corriente alterna.

1.5.1.1 Generadores de corriente continúa

Si una armadura gira entre dos polos de campo fijo, la corriente en la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución, y en la otra dirección durante la otra mitad, Fig. 1.10. Para producir un flujo de corriente constante en una dirección, o continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. En las máquinas antiguas esta inversión se llevaba a cabo mediante un conmutador, un anillo de metal partido montado sobre el eje de una armadura. Las dos mitades del anillo se aislaban entre sí y servían como bornes de la bobina. Las escobillas fijas de metal o de carbón se mantenían en contra del conmutador, que al girar conectaba eléctricamente la bobina a los cables externos. Cuando la armadura giraba, cada escobilla estaba en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador, cambiando la posición en el momento en el que la corriente invertía su dirección dentro de la bobina de la armadura. Así se producía un flujo de corriente de una dirección en el circuito exterior al que el generador estaba conectado. Los generadores de corriente continua funcionan normalmente a voltajes bastante bajos para evitar las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a voltajes altos. El potencial más alto desarrollado para este tipo de generadores suele ser de 1500 V. En algunas máquinas más modernas esta inversión se realiza usando aparatos de potencia electrónica, como por ejemplo rectificadores de diodo.

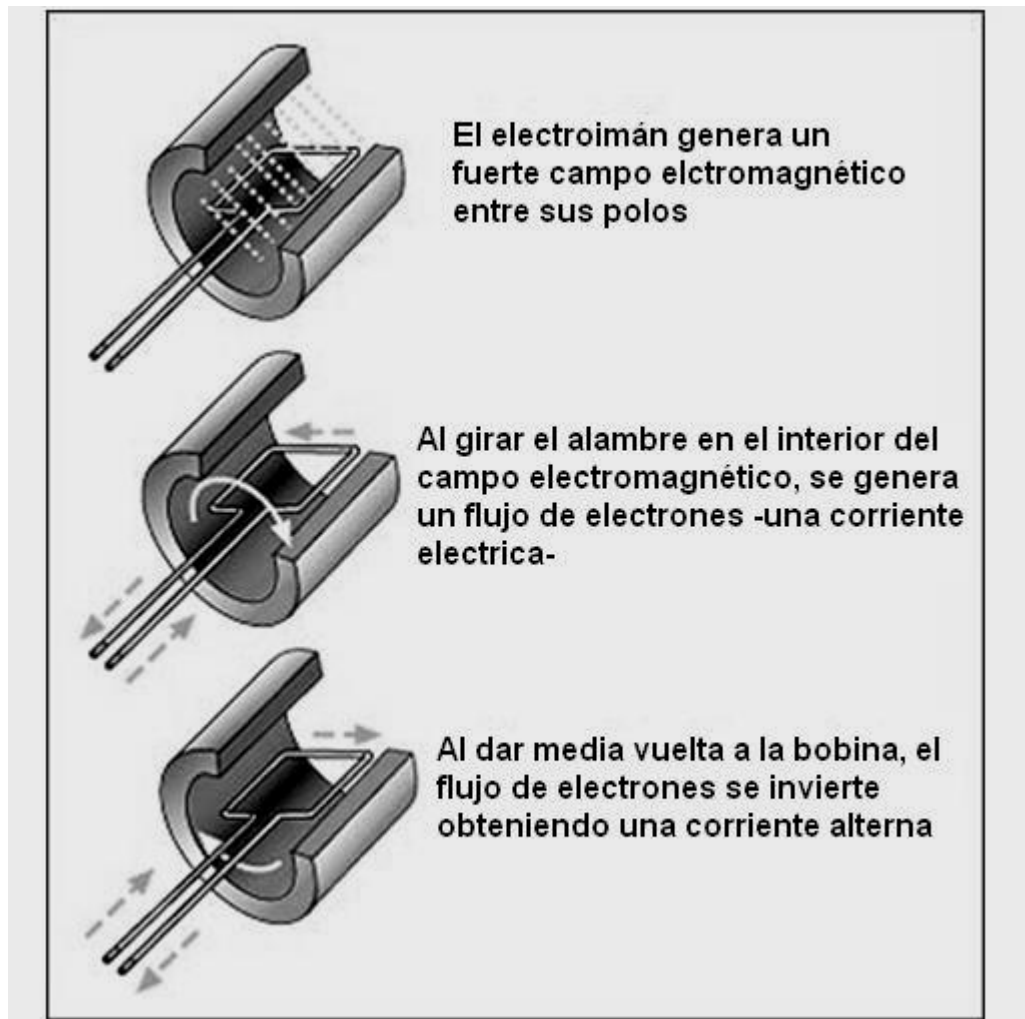


Fig. 1.10 La corriente que fluye a través del conductor que compone a la bobina del rotor cambia de sentido cada media vuelta.

Los generadores modernos de corriente continua utilizan armaduras de tambor, que suelen estar formadas por un gran número de bobinas agrupadas en hendiduras longitudinales dentro del núcleo de la armadura y conectadas a los segmentos adecuados de un conmutador múltiple. Si una armadura tiene un solo circuito de cable, la corriente que se produce aumentará y disminuirá dependiendo de la parte del campo magnético a través del cual se esté moviendo el circuito. Un conmutador de varios segmentos usado con una armadura de tambor conecta siempre el circuito externo a uno de cable que se mueve a través de un área de alta intensidad del campo, y como resultado la corriente que suministran las bobinas de la armadura es prácticamente constante. Los campos de los generadores modernos se equipan con cuatro o más polos electromagnéticos que aumentan el tamaño y la resistencia del campo magnético. En algunos casos, se añaden interpolos más pequeños para compensar las distorsiones que causa el efecto magnético de la armadura en el flujo eléctrico del campo.

1.5.1.2 Generadores de corriente alterna (alternadores)

Como se mencionó anteriormente, un generador simple sin conmutador producirá una corriente eléctrica que cambia de dirección a medida que gira la armadura.

Este tipo de corriente alterna es ventajosa para la transmisión de potencia eléctrica, por lo que la mayoría de los generadores eléctricos son de este tipo. En su forma más simple, un generador de corriente alterna se diferencia de uno de corriente continua en sólo dos aspectos: los extremos de la bobina de su armadura están conectados a los anillos colectores sólidos sin segmentos que se encuentran en el exterior del rotor generador, en lugar de los conmutadores, y las bobinas de campo se excitan mediante una fuente externa de corriente continua más que con el generador en sí, ver Fig. 1.11. Los generadores de corriente alterna de baja velocidad se fabrican con hasta 100 polos, para mejorar su eficiencia y para lograr con más facilidad la frecuencia deseada. Sin embargo, Los alternadores accionados por turbinas de alta velocidad, son a menudo máquinas de dos polos. La frecuencia de la corriente que suministra un generador de corriente alterna es igual a la mitad del producto del número de polos y el número de revoluciones por segundo de la armadura.

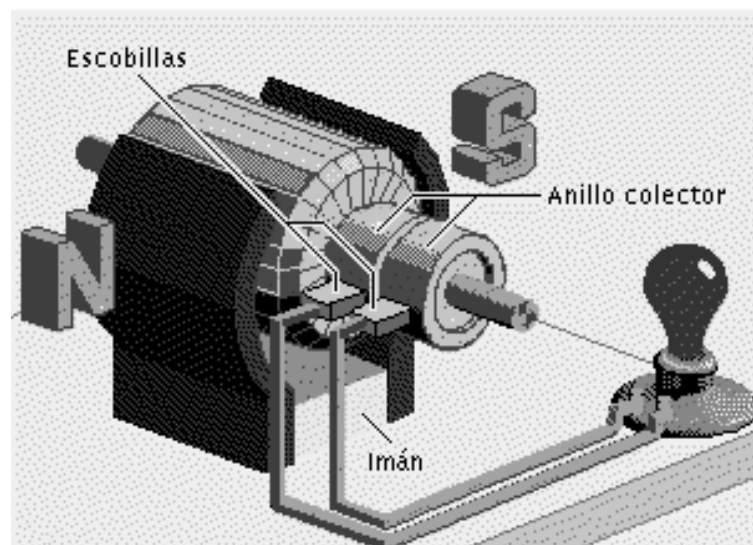


Fig. 1.11 Partes características de un generador de corriente alterna.

A veces, es preferible generar un voltaje tan alto como sea posible. Las armaduras rotatorias no son prácticas en este tipo de aplicaciones, debido a que pueden producirse chispas entre las escobillas y los anillos colectores, y a que pueden producirse fallos mecánicos que podrían causar cortocircuitos. Por tanto, los alternadores se construyen con una armadura fija en la que gira un rotor compuesto de un número de imanes de campo. El principio de funcionamiento es el mismo que

el del generador de corriente alterna descrito anteriormente, excepto que el campo magnético (en lugar de los conductores de la armadura) está en movimiento.

La corriente que se genera mediante los alternadores, aumenta hasta un pico, cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube otra vez a cero varias veces por segundo, dependiendo de la frecuencia para la que esté diseñada la máquina. Este tipo de corriente se conoce como corriente alterna monofásica. Sin embargo, si la armadura la componen dos bobinas, montadas a 90° una de otra, y con conexiones externas separadas, se producirán dos ondas de corriente, una de las cuales estará en su máximo cuando la otra sea cero. Este tipo de corriente se denomina corriente alterna bifásica. Si se agrupan tres bobinas de armadura en ángulos de 120° , se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica. Se puede obtener un número mayor de fases incrementando el número de bobinas en la armadura, pero en la práctica de la ingeniería eléctrica moderna se usa sobre todo la corriente alterna trifásica, con el alternador trifásico, que es la máquina dinamoeléctrica que se emplea normalmente para generar potencia eléctrica.

Como ya se mencionó, para generar electricidad mediante un generador eléctrico se necesita trabajo mecánico, el cual se puede obtener de diferentes maneras, las cuales se analizan posteriormente en este capítulo, describiendo así los diferentes tipos de centrales de generación de electricidad.

1.5.2 CENTRALES EÓLICAS

En las centrales eólicas se utilizan los aerogeneradores para generar electricidad, se muestra a continuación su funcionamiento.

Las turbinas eólicas basan su funcionamiento en la acción del viento sobre palas que están dispuestas en forma de hélices sobre el eje de estas. El viento produce dos efectos: arrastre y sustentación. Hay turbinas que actúan por uno u otro efecto o por una combinación de ambos como se muestra en la Fig. 1.12.

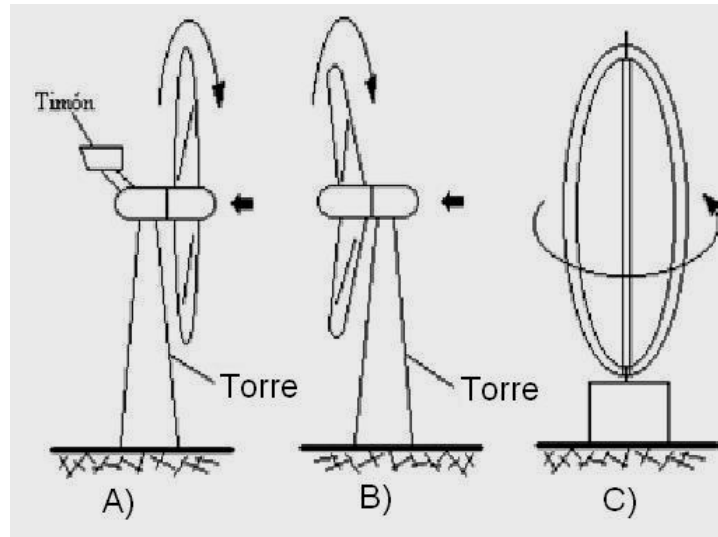


Fig. 1.12 A) Efecto de sustentación, B) Efecto de arrastre y C) Combinación de arrastre y sustentación.

La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, “ d ”, del área de barrido del rotor, “ A ”, y de la velocidad del viento, “ v ”.

La energía de una masa de aire, “ m ”, moviéndose a una velocidad, “ v ”, responde a la expresión:

$$E = 1/2 mv^2 \quad (1.3)$$

Si el volumen de aire que se mueve es “ V ” y tiene una densidad “ d ” su masa será: $m = Vd$, con lo que su energía cinética será:

$$E = 1/2 dVv^2 \quad (1.4)$$

La cantidad de aire que llegará al rotor de un aerogenerador en un tiempo “ t ” dependerá de: el área de barrido del rotor “ A ” y de la velocidad del viento como se muestra en la Fig. 1.13.

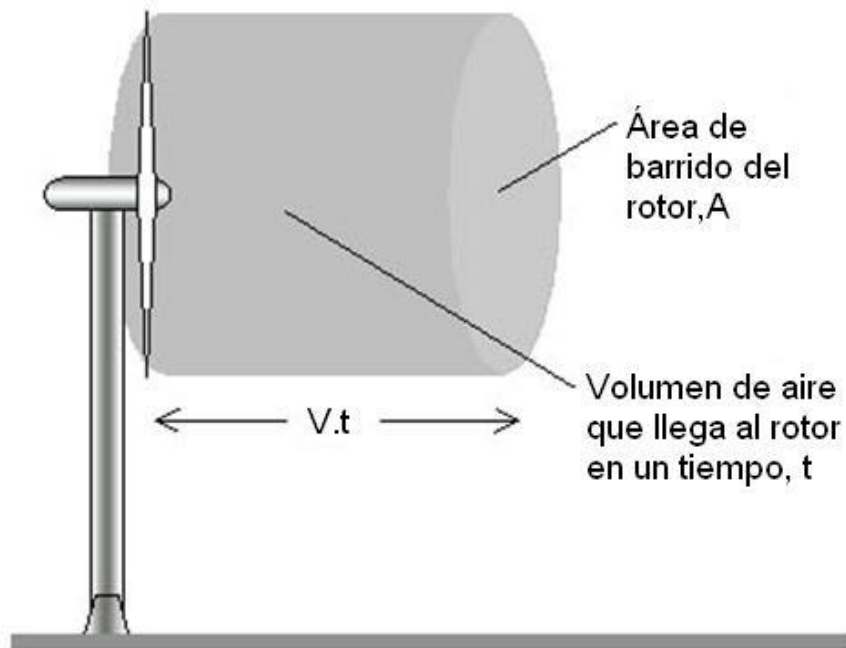


Fig. 1.13 El volumen de aire que llega a la turbina del aerogenerador depende del área de barrido y de la velocidad del aire.

El volumen del aire que llega al rotor será:

$$V = Avt \quad (1.5)$$

Por lo tanto la energía que aporta el aire al rotor en un tiempo "t" (potencia) será:

$$P = 1/2 dAvtv^2 \quad (1.6)$$

$$P = 1/2 dAtv^3 \quad (1.7)$$

Como se observa, la potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

La gráfica muestra que con una velocidad del viento de 8 m/s se obtiene una potencia de 314 W por cada metro cuadrado expuesto al viento (viento incidente perpendicularmente al área barrida por el rotor). A 16 m/s se obtendrá una potencia ocho veces mayor, 2.509 W/m² como se muestra en la Fig. 1.14.

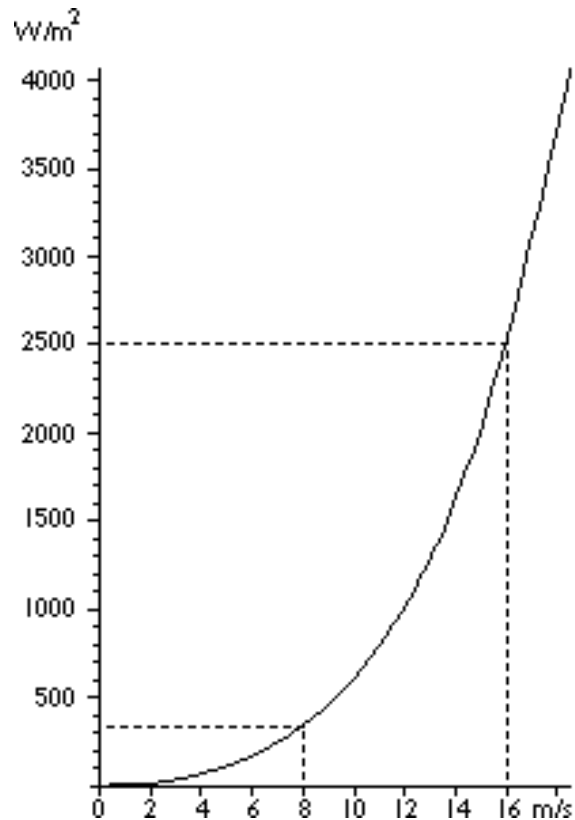


Fig. 1.14 De manera ideal la potencia por unidad de área de barrido de la turbina del aerogenerador aumenta exponencialmente de acuerdo con la velocidad del viento.

Es importante mencionar que el aerogenerador frena de manera parcial al viento al pasar por el rotor, hasta en $2/3$ de su velocidad inicial. Lo que significa que no se aprovecha toda la energía cinética que el viento aporta al rotor, existiendo una ley, llamada Ley de Benz que nos dice:

"Sólo puede convertirse menos de $16/27$ (el 59%) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador".

La curva de potencia de un aerogenerador es una gráfica que indica la potencia eléctrica que es capaz de generar con forme varía la velocidad del viento, ver Fig. 1.15, la cual muestra una curva de potencia de un aerogenerador típico de 600 kW.

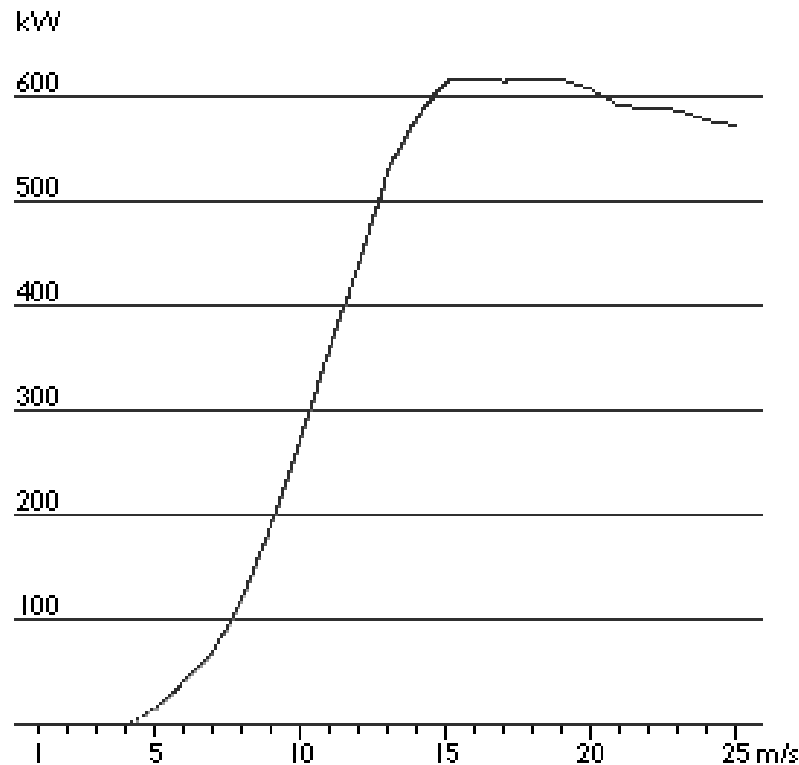


Fig. 1.15 En condiciones reales la potencia obtenida en un aerogenerador tiene un pico superior, después del cual si se aumentase la velocidad la potencia se mantiene casi estable.

Las curvas de potencia se obtienen a partir de medidas en campo, donde un anemómetro situado en un mástil toma velocidades del viento y la potencia eléctrica se lee directamente de los aparatos de control del aerogenerador.

1.5.3 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Una central hidroeléctrica es aquella que utiliza energía hidráulica para la generación de energía eléctrica. Son el resultado de la evolución de los antiguos molinos que aprovechaban la corriente de los ríos para mover una rueda, ver Fig. 1.16.

En general estas centrales aprovechan la energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como salto geodésico. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por una turbina hidráulica la cual trasmite la energía a un alternador el cual la convierte en energía eléctrica, Fig. 1.17.

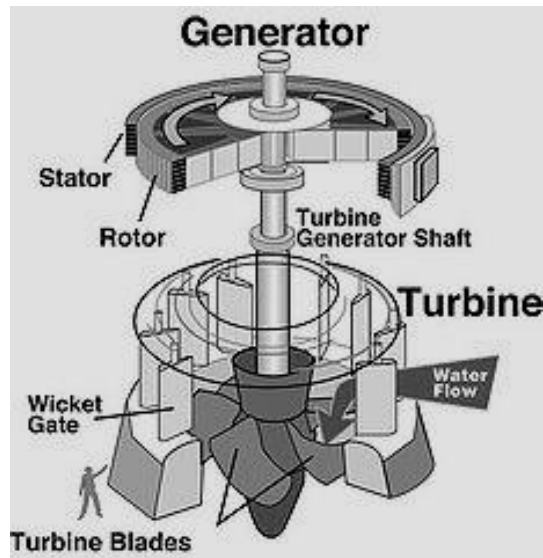


Fig. 1.16 Partes principales que conforman una central hidroeléctrica.

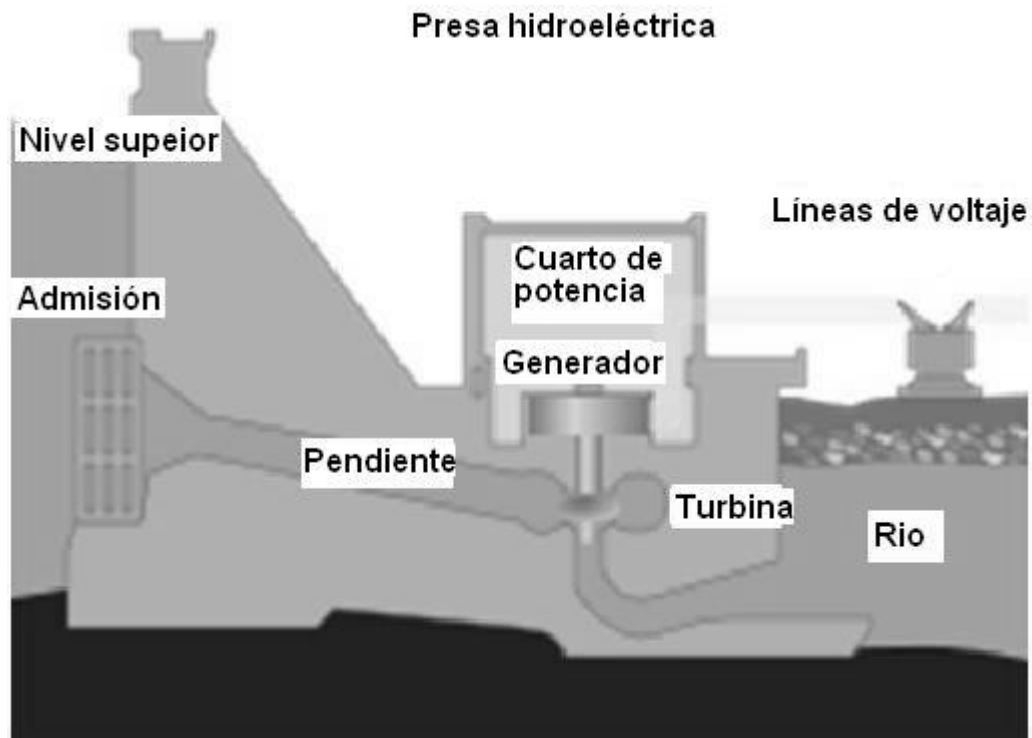


Fig. 1.17 Salto geodésico de una central hidroeléctrica.

La energía hidráulica es puesta a disposición por la naturaleza gracias al Ciclo hidrológico, el cual es motorizado por la energía solar, comenzando por la evaporación de diversas masas de agua y culminando con la precipitación. Los cauces de agua presentan dos formas fácilmente aprovechables de energía:

- La energía potencial gravitatoria, la cual se obtiene en virtud de un salto geodésico y puede superar los 3000 J/Kg para más de 300 m de desnivel.
- La energía cinética, la cual es despreciable en comparación con la potencial, ya que en los ríos en general el fluido no supera velocidades de 5 m/s.

Las formas más frecuentemente utilizadas para explotar esta energía son:

1.-Desvío del cauce de agua

El principio fundamental de esta forma de aprovechamiento hidráulico de los ríos se basa en el hecho de que la velocidad del flujo de estos es básicamente constante a lo largo de su cauce, el cual siempre es cuesta abajo. Este hecho revela que la energía potencial no es íntegramente convertida en cinética como sucede en el caso de una masa en caída libre, la cual se acelera, sino que ésta es invertida en las llamadas pérdidas, es decir, la energía potencial se "pierde" en vencer las fuerzas de fricción con el suelo, en el transporte de partículas, en formar remolinos, etc. Entonces esta energía potencial podría ser aprovechada si se pueden evitar las llamadas pérdidas y hacer pasar al agua a través de una turbina. El conjunto de obras que permiten el aprovechamiento ya descrito reciben el nombre de central hidroeléctrica.

Por otro lado el balance de energía arriba descrito puede ser ilustrado mejor a través del principio de Bernoulli en su forma energética aplicado entre dos secciones cualesquiera de un cauce de agua:

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = H_o + H_f + \frac{c_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (1.8)$$

Donde:

- Los subíndices 1 y 2 indican las respectivas secciones del cauce de agua.
- C = velocidad media del cauce.
- p = presión.
- z = altura respecto a alguna referencia estática.
- H_f = pérdidas de energía causadas por la fricción a lo largo del sistema hidráulico.
- H_o = Salto geodésico de la turbina.

La experiencia muestra en general, que en un cauce cualquiera se cumple que $c_1 = c_2$, igualmente como los cauces de agua siempre se encuentran en contacto con la atmósfera y su gradiente de presión hidrostática es muy pequeño, la presión es igual en ambas secciones: $p_1 = p_2$, así vemos que toda la energía potencial es disipada:

$$z_1 - z_2 = H_f + H_o \quad (1.9)$$

$$H_o = z_1 - z_2 - H_f \quad (1.10)$$

La ecuación (1.10) nos indica que el salto geodésico depende del desnivel que halla entre los puntos 1 y 2, los cuales son los extremos del sistema hidráulico que alimenta a la turbina.

2.- Intercepción de la corriente de agua

Este método consiste en la construcción de una presa que retenga el cauce de agua causando un aumento del nivel del río en su parte anterior a la presa, el cual podría eventualmente convertirse en un embalse. El dique establece una corriente no uniforme y modifica la forma de la superficie libre del río antes y después de éste, que toma forma de las llamadas curvas de remanso. El establecimiento de las curvas de remanso determina un nuevo salto geodésico H_0 aprovechable.

1.5.4 ENERGÍA TÉRMICA

La energía térmica es, como ya se mencionó, la energía que inicia la transformación en la cadena de transformaciones de energía para llegar a obtener energía eléctrica en las centrales de generación de electricidad térmicas (termoeléctricas), esta energía se presenta en forma de calor y se puede implementar de manera diferente para que cierto fluido siga un ciclo termodinámico y entregue trabajo de la manera más conveniente posible. Atendiendo a esto se presentan los ciclos termodinámicos más empleados para producir potencia.

1.5.4.1 Ciclo Rankine

El ciclo Rankine simplemente es el ciclo que comúnmente se aplica para todas las plantas generadoras de potencia con vapor. Este ciclo se concibe como un recurso para emplear las características del agua como fluido de trabajo y manejar el cambio de fase entre el líquido y el vapor. Naturalmente resulta posible usar muchas otras sustancias como fluidos de trabajo, en lugar del agua; la elección depende de varios factores, incluyendo la necesidad de ajustar las temperaturas de transferencia de calor a los estados de vapor y líquido, en tanto que se mantienen bajas presiones de vapor en el sistema.

En un ciclo Rankine simple idealizado, la transferencia de calor en la caldera tiene lugar hacia el fluido de trabajo, en un proceso a presión constante. La Fig. 1.18 representa el diagrama p-v de éste ciclo. El líquido entra a la caldera desde la bomba, a una temperatura relativamente baja (estado 3) y se calienta hasta la saturación a lo largo de la línea 3-4. El líquido experimenta un ligero aumento de volumen debido a la expansión térmica. En el punto entre 4 y 1, donde cruza la línea de saturación, ha alcanzado la temperatura de saturación. Como la caldera opera efectivamente a presión constante, una transferencia de calor posterior tiene lugar a temperatura constante y la energía agregada al fluido de trabajo se transforma en calor de vaporización, produciendo un calor que llega a tener una calidad del 100%

en el punto 1. Entonces el vapor se expande (en un proceso que se considera isentrópico en el ciclo simple) produciendo trabajo en la turbina, de donde sale al estado 2. La expansión está limitada en el ciclo práctico por la aparición de condensación de vapor en la turbina y por la presión de saturación disponible a la temperatura del medio de enfriamiento empleado en el condensador. Si se permitiese que una condensación excesiva tuviese lugar, las gotas del líquido condensado rápidamente erosionarían los álabes de la turbina.

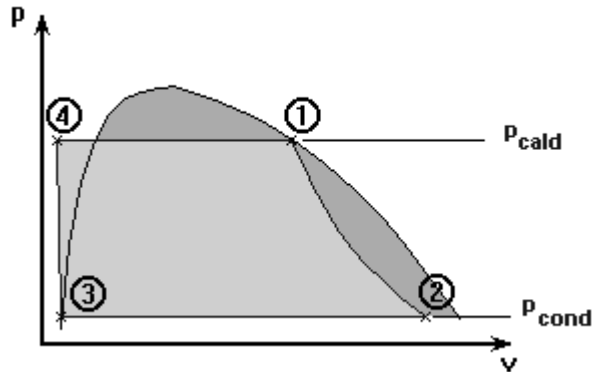


Fig. 1.18 Diagrama p-v del ciclo Rankine idealizado.

Al final del proceso de expansión (estado 2), el vapor a baja temperatura, pero con calidad bastante alta, sale de la turbina y es condensado hasta líquido al ponerlo en contacto con las superficies del condensador, que están frías. Puesto que el condensador opera casi a la temperatura del agua de enfriamiento, el proceso de condensación tiene lugar a una temperatura de ebullición por debajo de la normal (atmosférica) para muchos fluidos de trabajo. La presión del condensador en el lado del fluido de trabajo con frecuencia es subatmosférica. El líquido sale del condensador al estado 3.

Después de la condensación, el líquido entra a la bomba y el fluido de trabajo regresa a la alta presión necesaria para la adición de energía a la temperatura elevada de la caldera, repitiéndose en ciclo.

Para poder saber la cantidad de trabajo y la eficiencia de un ciclo Rankine, se hace necesario conocer y manejar las tablas de vapor saturado y de vapor sobrecalentado, para poder obtener las propiedades del vapor (como la entalpía, la entropía, etc.) en cada punto del proceso, de tal manera que se puedan aplicar las ecuaciones correspondientes, a saber:

$$W_B = \text{trabajo de la bomba} = h_4 - h_3 \quad (1.11)$$

$$W_T = \text{trabajo de la turbina} = h_1 - h_2 \quad (1.12)$$

$$W_n = \text{trabajo neto del ciclo} = W_T - W_B \quad (1.13)$$

$$\eta = \frac{\text{Trabajo neto del ciclo}}{\text{Calor suministrado al ciclo}} = \frac{W_n}{(h_1 - h_4)} \quad (1.14)$$

- Donde h son las entalpías del vapor en los diferentes estados del ciclo mostrado en la Fig. 1.18 y η es la eficiencia térmica del ciclo.

1.5.4.2 Ciclo Brayton

El ciclo Brayton, también llamado ciclo de Joule, se desarrolló originalmente empleando una máquina de pistones con inyección de combustible, pero ahora es común realizarlo en turbinas con ciclos abiertos o cerrados. La máquina de ciclo abierto puede emplearse tanto con combustión interna como con transferencia de calor externa. En primer lugar se examinará la máquina Brayton de aire estándar con ciclo cerrado.

El ciclo Brayton de aire estándar simple se compone de dos procesos de transferencia de calor a presión constante, separados por procesos de expansión y de compresión isentrópica, como se ve en los diagramas de este ciclo, Fig. 1.19 y Fig. 1.20:

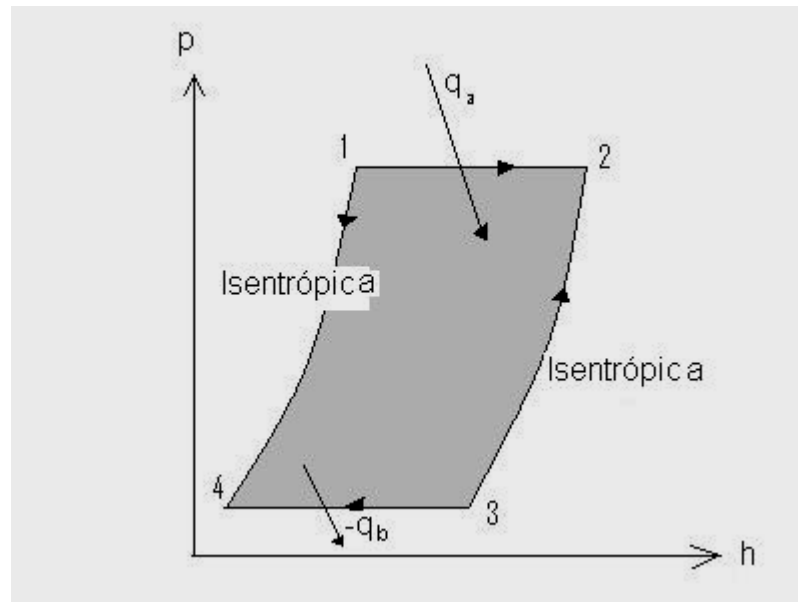


Fig. 1.19 Diagrama p-h del ciclo Brayton.

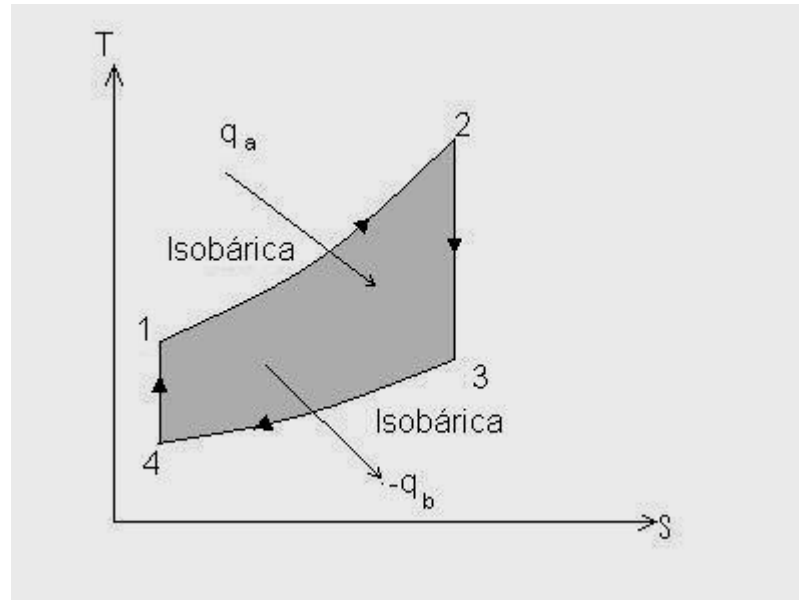


Fig. 1.20 Diagrama T-s del ciclo Brayton.

El sistema de turbina y compresor que emplea el ciclo se muestra en la Fig. 1.21.

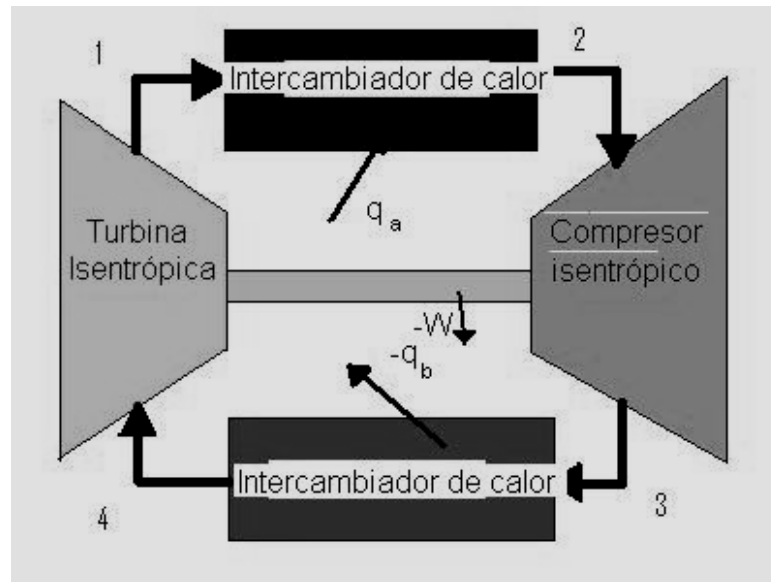


Fig. 1.21 Equipos utilizados en un sistema térmico de Ciclo Brayton cerrado.

El fluido de trabajo en el ciclo cerrado entra al intercambiador de calor de temperatura elevada en el estado 1, donde se agrega energía en un proceso a presión constante hasta que alcanza la temperatura elevada del estado 2. Entonces, el fluido entra a la turbina y tiene lugar una expansión isentrópica, produciendo cierta potencia. El fluido sale de la turbina en el estado 3 y pasa a ser enfriado, en un proceso a presión constante, en el intercambiador de calor de temperatura baja donde sale al estado 4, listo para entrar al compresor. Ahí el fluido es comprimido

isentrópicamente hasta el estado 1 y el ciclo se repite. Una considerable fracción del trabajo de la turbina se emplea para impulsar el compresor.

Cuando la energía que se agrega al fluido de trabajo de un ciclo Brayton se debe a la combustión en lugar de a una transferencia de calor en un intercambiador, el análisis del ciclo estándar no difiere del ciclo mostrado en los diagramas p-v y t-s anteriores. Sin embargo, ahora el ciclo debe manejarse como un ciclo abierto, Fig. 1.22. El fluido de trabajo cambia en cada ciclo, los gases de escape se expulsan y un nuevo oxidante se introduce para que se produzca una nueva combustión. Además, los equipos son muy diferentes a los del ciclo cerrado:

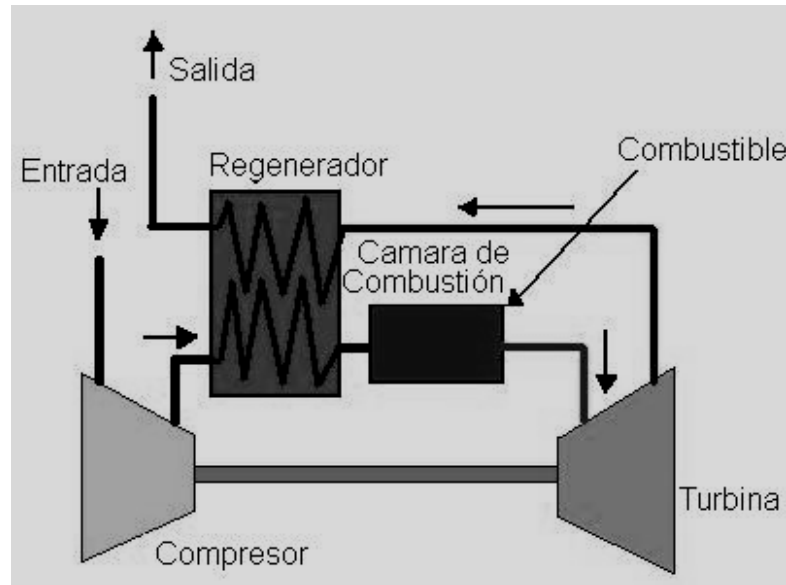


Fig. 1.22 Equipos utilizados en el ciclo Brayton abierto.

El ciclo Brayton abierto con combustión interna se emplea para analizar las turbinas de gas. La mayoría de las máquinas Brayton estacionarias (terrestres) se diseñan para que la entrega de trabajo por la turbina sea máxima y, por ende exceda al trabajo requerido por el compresor. El trabajo del eje excedente se emplea, por ejemplo, para impulsar un generador eléctrico o un compresor en una tubería. La energía total de los gases que salen de la turbina se minimiza para que la entrega de trabajo sea máxima.

Otro diseño posible es hacer máxima la energía de los gases de escape, tomando únicamente la energía suficiente para que el trabajo de la turbina sea justamente igual al necesario para impulsar el compresor. La energía que queda en los gases de escape se emplea para propulsión, generalmente arrojando los gases por una tobera de reacción. Un término medio entre el diseño de la máquina de propulsión y la turbina de una planta estacionaria está representado por el turboreactor. Esta máquina emplea gran parte de la energía de los gases calientes de la cámara de combustión para el trabajo de la turbina, para girar una hélice, así como para impulsar el compresor, pero también utiliza la energía remanente de los gases de escape para proporcionar un empuje adicional.

1.5.4.3 Ciclo Otto

Ciclo Otto es una idealización del ciclo que emplean las máquinas de gasolina, aunque su uso original fue en las máquinas que utilizaban gas natural o algún otro combustible gaseoso. El ciclo Otto de aire estándar se desvía sustancialmente del ciclo práctico real, pero aun así resulta instructivo examinar el ciclo ideal.

En la Fig. 1.23 se presenta el diagrama p-v del llamado ciclo Otto de dos tiempos que emplea muchas máquinas de gasolina pequeñas, en tanto que las Figuras 1.24 y 1.25 corresponden a los diagramas T-s y p-h, respectivamente.

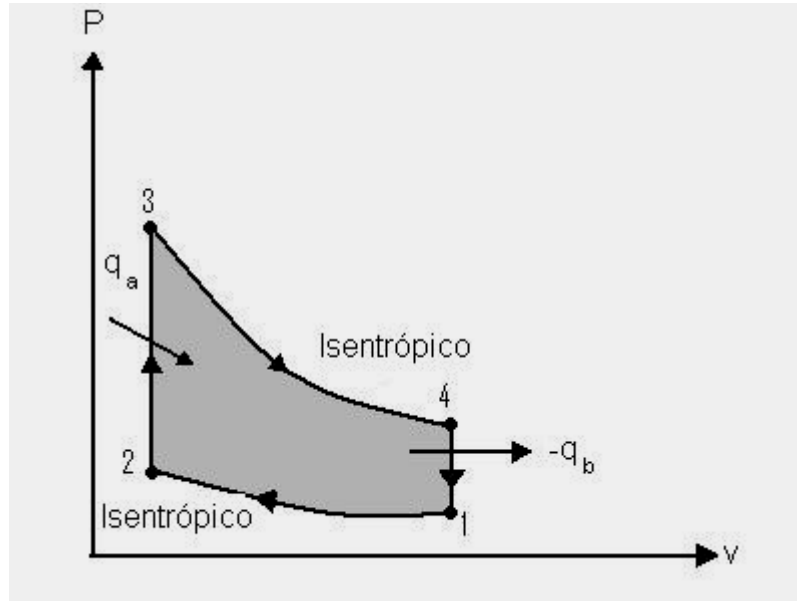


Fig. 1.23 Diagrama P-v para un ciclo Otto de dos tiempos.

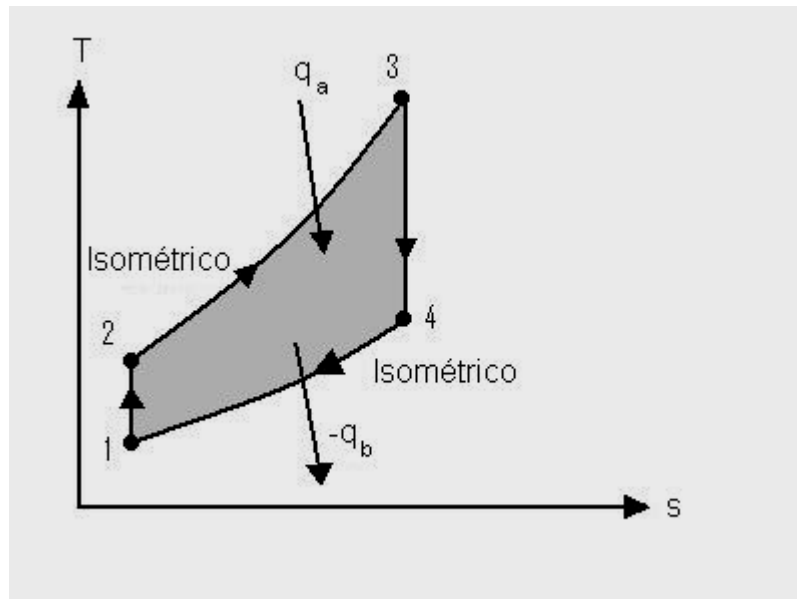


Fig. 1.24 Diagrama T-s para un ciclo Otto de dos tiempos.

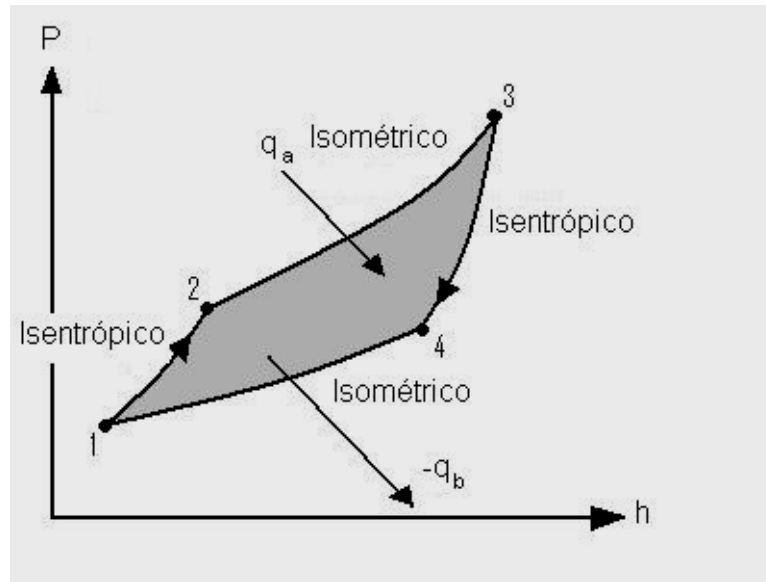


Fig. 1.25 Diagrama P-h para un ciclo Otto de dos tiempos.

En estos diagramas, el pistón empieza el movimiento de compresión en el estado 1, considerado como un proceso de compresión isentrópica, que se continúa hasta que el pistón llega al límite de su carrera en el estado 2. Se supone que el proceso de combustión tiene lugar instantáneamente y se modela como un incremento de la presión por adición del calor a volumen constante hasta el estado 3. El pistón comienza la carrera, de nuevo isentrópicamente, y la expansión continua hasta el estado 4, donde el pistón llega al límite de su carrera. Se abre la válvula de escape reduciendo la presión instantáneamente hasta el estado 1, en tanto que el volumen del cilindro permanece constante. El proceso se modela como un rechazo de calor a volumen constante. Se supone que la carga de aire y combustible entra al cilindro en el estado 1 y los procesos se repiten.

En el ciclo de aire estándar de cuatro tiempos mostrado en la Fig. 1.26 el pistón comprime el fluido de trabajo desde el estado 1 hasta que llega el punto muerto superior, estado 2; entonces la combustión tiene lugar instantáneamente. La presión aumenta a volumen constante hasta el estado 3. Luego el pistón permite una expansión isentrópica en la carrera de potencia hasta el estado 4, tal como en una máquina de dos tiempos. Ahora, se abre la válvula de escape y la presión cae a volumen constante hasta el estado 1. El pistón inicia su carrera de ascenso expulsando del cilindro los productos de combustión. Esta carrera de escape o barrido tiene lugar esencialmente a presión constante entre los estados 1 y 1'. En el punto muerto superior, la válvula de escape se cierra y se abre la válvula de admisión. Ahora el pistón desciende de nuevo a una presión constante y se admite una nueva carga de combustibles sin quemar y de aire dentro del cilindro en la carrera de admisión entre los estados 1' y 1. Debe observarse, como lo indica el diagrama p-v, que no hay trabajo neto en la combinación de las carreras de admisión

y de expulsión. La válvula de admisión se cierra en el estado 1 y el pistón inicia la carrera ascendente de compresión hasta el estado 2, continuando el ciclo.

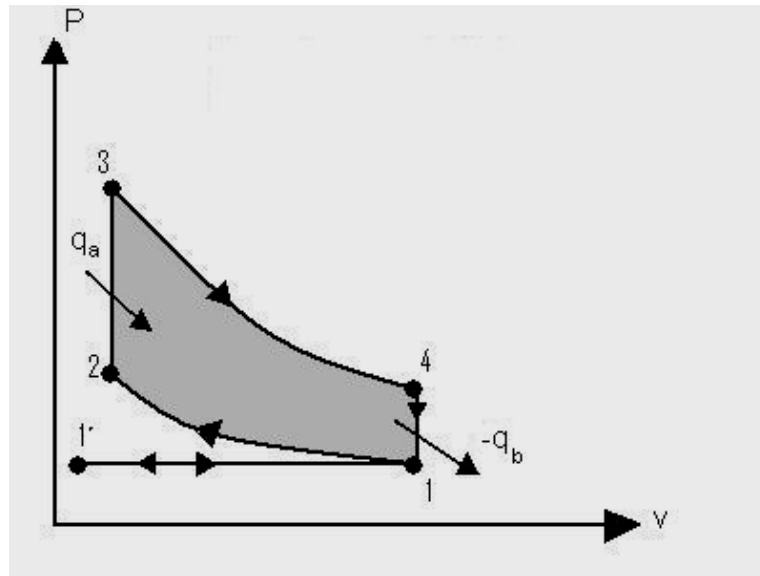


Fig. 1.26 Diagrama P-v para un ciclo Otto de cuatro tiempos.

1.5.4.4 Ciclo Diesel

El ciclo diesel es un intento para lograr una eficiencia lo más a fin posible a la del ciclo de Carnot en una máquina de combustión interna. De nuevo el ciclo real difiere considerablemente del comportamiento predicho por la versión del aire estándar.

La Fig. 1.27 representa el diagrama p-v para el ciclo diesel de aire estándar ideal. En el estado 1, el pistón inicia una compresión isentrópica del aire de combustión y continúa hasta el estado 2. En el estado 2 el combustible se inyecta en el aire. Cuando se emplea una relación de compresión lo suficientemente alta, la temperatura del aire comprimido es lo bastante elevada como para que el combustible se encienda sin necesidad de una fuente de encendido exterior. Se considera que el proceso de ignición tiene lugar con una rapidez tal que la energía añadida al cilindro es suficiente para mantener la presión constante en el cilindro en tanto que el pistón se mueve hasta que alcanza el estado 3. Se supone que el proceso de combustión termina en este punto y la expansión continúa como un proceso isentrópico hasta el estado 4. Se abre la válvula de escape y la presión cae hasta las condiciones iniciales del estado 1. Si se emplea el ciclo de cuatro tiempos, entonces los procesos de barrido y de admisión tienen lugar entre los estados 1 y 1', a una presión esencialmente constante.

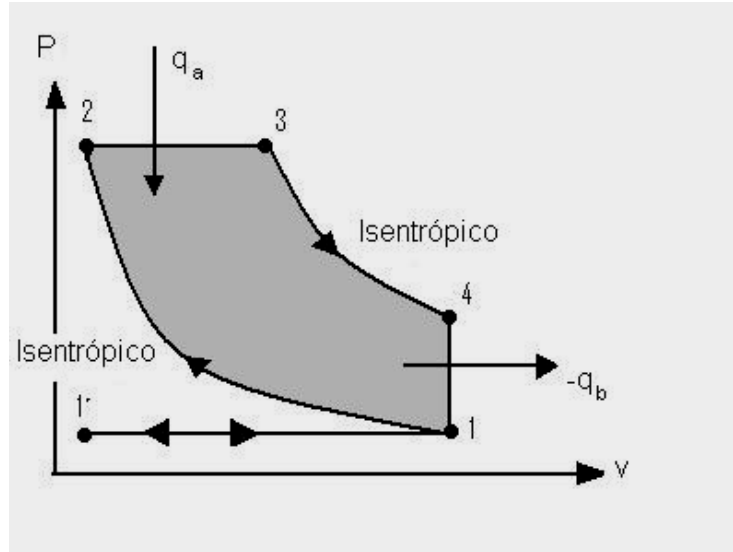


Fig. 1.27 Diagrama P-v para un ciclo Diesel.

Después del estudio de los ciclos termodinámicos es apreciables que cada uno de estos genera un trabajo utilizable dado por el movimiento de sus partículas con alta energía (energía cinética) las cuales son utilizadas para mover un generador eléctrico (energía mecánica), el cual produce la electricidad. De esta manera existen los distintos tipos de centrales termoeléctricas que se presentan a continuación.

1.5.5 CENTRALES DE VAPOR

En la Fig. 1.28 se puede apreciar un esquema que muestra los componentes característicos de una central con turbina a vapor. El combustible y el aire ingresan (2 y 3) al generador de vapor o como se conoce generalmente, caldera (1), produciendo el vapor a temperatura y presión adecuadas. El vapor se lleva a la turbina (6) en donde se expande y al hacerlo, entrega su energía en forma de movimiento rotativo en su eje, el que a su vez, impulsa al alternador (16) o generador asincrónico, que produce la red trifásica que el transformador (17) adapta para la red o la línea de transmisión. El vapor, una vez que entregó su energía en la parte rotante sale a baja presión y temperatura e ingresa en el condensador (12), en donde se transforma en agua mediante el enfriamiento que le produce el agua de refrigeración proveniente de una fuente adecuada. Una vez salida el agua del condensador, una bomba de extracción (13) y otra de alimentación (11) la ingresan a la caldera, para reiniciar el ciclo. Como este ciclo termodinámico no puede ser perfecto y hay pérdidas (de vapor y de agua) que es necesario reponer, la instalación está provista del sistema de agua de reposición, con un tanque de agua cruda (7), su depurador (8) y su desgasificador (9), como puede observarse una central de vapor e está regida por el ciclo Rankine.

También puede advertirse que el sistema muestra que de la turbina sale vapor que ya cumplió su misión pero aún conserva calor aprovechable y una extracción e intercambiador de calor (10) lo reingresan al ciclo. Este circuito muestra un sobrecalentador (5) que agrega más calor al vapor y un economizador (4) que calienta el agua al ingresar a la caldera para vaporizarse. Este ciclo termodinámico es muy sencillo y los que se emplean tienen más elementos, pero conservan los mismos lineamientos.

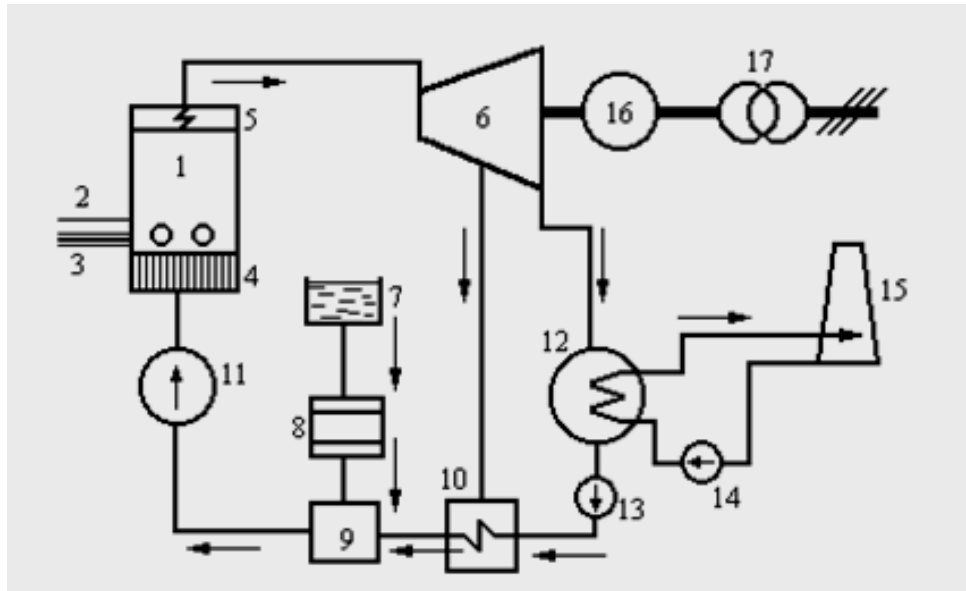


Fig. 1.28 Diagrama representativo de una central de vapor.

Como se trata de instalaciones que tardan alrededor de 12 hs. para su puesta en marcha, funcionan como centrales de base (más de 6000 horas. al año), en las instalaciones modernas se puede llegar un rendimiento del 45% que va disminuyendo a un 28% cerca del final de su vida útil (aprox. 30 años).

Su regulación es muy difícil y lenta a partir del 40% de su potencia nominal.

En todos los casos el generador es de 2 polos y en el eje tiene un grupo excitador que está compuesto por dos ó más alternadores con un puente de diodos giratorios.

Como desventaja pueden citarse elevados tiempos de arranque que van de las 20 a las 30 horas.

El período de amortización llega a los 30 años, tiempo tras el cual los gastos de mantenimiento la hacen antieconómica. El tiempo de construcción llega a un total de 6 años.

Fórmula de funcionamiento:

$$\eta = 860 / C \quad (1.15)$$

- C: consumo del ciclo térmico (Kcal/Kwh)
- η = eficiencia total de la central

1.5.6 CENTRALES DE TURBOGAS

Son grupos compactos, sencillos y fáciles de transportar de pequeña y media potencia entre 5 y 100 Mw, su diagrama general se muestra en la Fig. 1.29.

En un compresor se inyecta gas o combustible líquido finamente pulverizado y 16 partes de oxígeno. La mezcla se comprime y al salir estalla en la cámara de combustión, donde impulsa la turbina que produce la energía útil.

Al instalarse en contenedores o vagones con ruedas lo hace fácilmente transportable y rápidamente instalable ya que sólo hay que conectar la cañería de combustible y la línea de media tensión, al no precisar agua es el único apto para lugares desérticos o muy alejados.

La generación de energía eléctrica en las unidades turbogas se logra aprovechando directamente, en los álabes de la turbina, la energía cinética que resulta de la expansión de aire y gases de combustión, comprimidos. La turbina está acoplada al rotor del generador, dando lugar a la producción de energía eléctrica. Los gases de la combustión, después de trabajar en la turbina, se descargan directamente a la atmósfera.

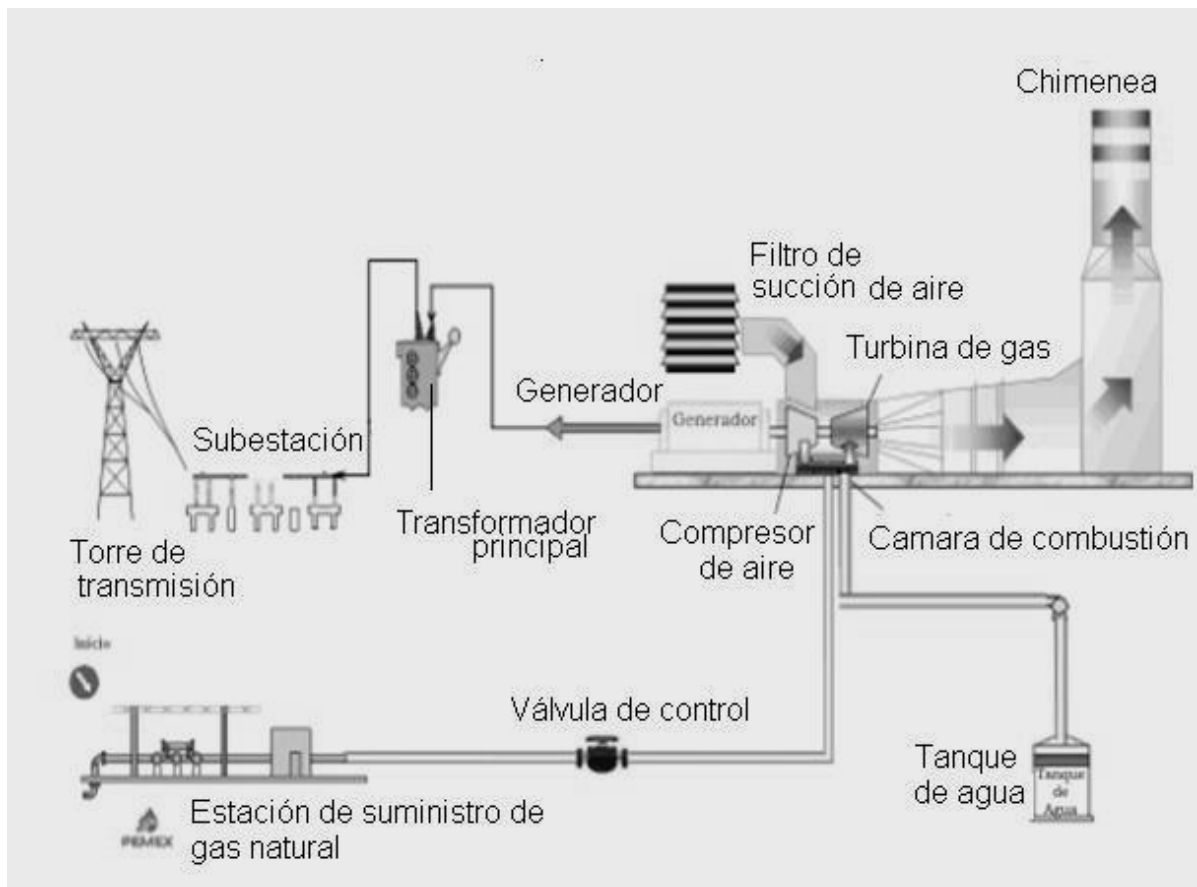


Fig. 1.29 Esquema de una central turbogas.

Estas unidades emplean como combustible gas natural o diesel. Desde el punto de vista de la operación, el breve tiempo de arranque y la versatilidad para seguir las variaciones de la demanda, hacen a las turbinas de gas ventajosas para satisfacer cargas de horas pico y proporcionar capacidad de respaldo al sistema eléctrico.

1.5.7 CENTRALES DE CICLO COMBINADO

Las centrales de ciclo combinado están integradas por dos tipos diferentes de unidades generadoras: turbogas y vapor, como se muestra en la Fig. 1.30. Una vez terminado el ciclo de generación de la energía eléctrica en las unidades turbogas, los gases desechados con una alta temperatura, se utilizan para calentar agua llevándola a la fase de vapor, la cual se aprovecha para generar energía eléctrica adicional.

La combinación de estos dos tipos de generación, permiten el máximo aprovechamiento de los combustibles utilizados, dando la mejor eficiencia térmica de todos los tipos de generación termoeléctrica.

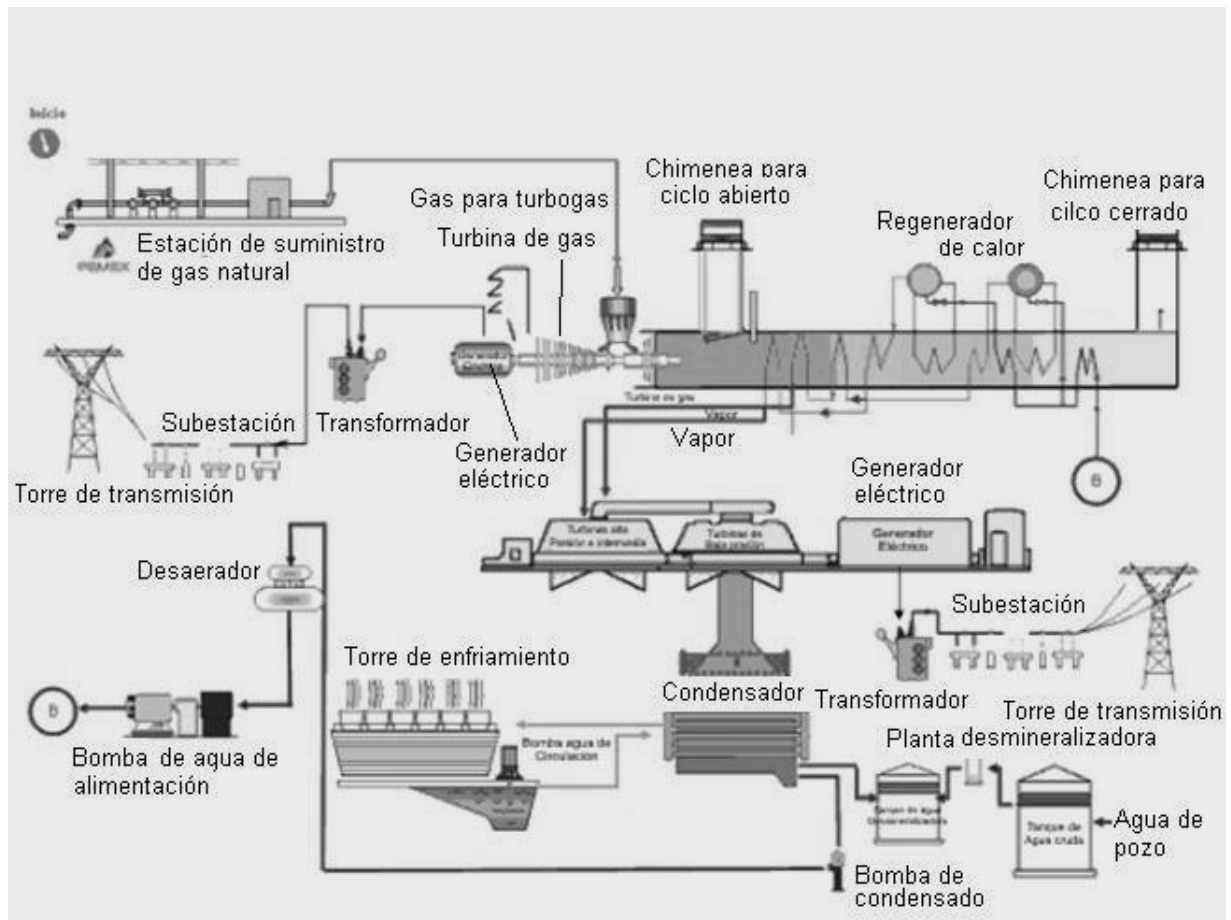


Fig. 1.30 Esquema de una central de ciclo combinado.

El paquete o arreglo general de una planta de ciclo combinado se puede esquematizar de acuerdo con diversas posibilidades. El número de unidades turbogás por unidad de vapor varía desde uno a uno hasta cuatro a uno. En cuanto al criterio de diseño de la fase de vapor existen tres variantes:

- a. Sin quemado adicional de combustible.
- b. Con quemado adicional de combustible para control de la temperatura.
- c. Con quemado adicional de combustible para aumentar la temperatura y presión del vapor.

Una ventaja de este tipo de plantas es la posibilidad de construirlas en dos etapas. La primera, turbogás, puede ser terminada en un plazo breve e inmediatamente iniciar su operación; posteriormente, se puede terminar la construcción de la unidad de vapor, y completarse así el ciclo combinado.

CAPÍTULO 2

IMPORTANCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS FORMAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

En el capítulo anterior se mencionó las diferentes maneras de cómo se puede generar energía eléctrica, y como es evidente, la mayor parte de la energía producida se obtiene a partir de las plantas termoeléctricas, que a su vez obtienen el calor necesario para funcionar a partir de la combustión de recursos diversos.

En el rubro de las plantas termoeléctricas las centrales de vapor son de las más importantes, ya que no se necesita de un combustible específico para generar vapor, por lo que se pueden aplicar varios métodos para llevar a cabo este proceso. Esto abre oportunidades para diversificar las formas de generar energía calorífica; sin embargo, se debe de hacer conciencia de las implicaciones de esas formas de generar la energía calorífica, ya que como se verá en lo que sigue, algunas de ellas tienen efectos muy dañinos para los ecosistemas, por lo que es importante hacer conciencia de la necesidad de la aplicación de nuevos métodos de generación de calor que no tengan un impacto en contra de la naturaleza.

2.1 AGOTAMIENTO DE RECURSOS

La disponibilidad de la energía y la habilidad del hombre para aprovechar esa energía en forma útil han transformado nuestra sociedad. Hace apenas unos siglos, la mayoría de la población luchaba por subsistir produciendo la comida de consumo local. Actualmente, en muchos países una pequeña fracción de la fuerza de trabajo total produce abundante comida para toda la población y mucha de esta gente queda libre para otras actividades. Es posible viajar grandes distancias en poco tiempo mediante la elección de transportes; es posible la comunicación instantánea con personas en cualquier lugar de la tierra, se tienen los medios para controlar grandes cantidades de energía a nuestro antojo personal en forma de automóviles, herramientas eléctricas, aparatos y condicionamiento del bienestar en las viviendas, sin embargo, desde la Revolución Industrial la humanidad ha consumido una gran cantidad de recursos naturales, como son los metales, los minerales y los combustibles fósiles, la demanda ha crecido constantemente, mientras que la cantidad de recursos ha disminuido de la misma manera, a tal grado que en un futuro no muy lejano habrá un agotamiento de estos recursos, ya que muchos de ellos no son renovables, por lo cual es necesario estudiar e implementar nuevas formas de producción de energía que sean renovables o que consuman recursos de gran abundancia en el planeta, por eso en las siguientes secciones se presenta un estudio de algunas de las situaciones que llevan a la necesidad de realizar la búsqueda de estos métodos, así como también se presenta una alternativa importante en este campo: “la alternativa de la fusión nuclear”.

2.1.1 LA SITUACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

Nuestro planeta almacena un capital de energía en forma de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural...) que se formaron en los últimos mil millones de años. El carbón tuvo su protagonismo durante la revolución industrial, proporcionando al menos el 80 % de la energía mundial; hoy en día fue relevado en gran parte por el petróleo, y en menor medida por el gas natural, que se hizo popular por la ausencia de contaminantes.

Los recursos energéticos de origen fósil son escasos. Es fácilmente previsible la crisis que se desatará en esos sectores en el curso de las primeras décadas del presente siglo. El aumento de la demanda de energía y el descenso de las reservas del planeta, llevarán obligadamente a la sustitución de esas fuentes.

Es probable que se recupere de nuevo el carbón a índices de consumo no recordados, cuyas reservas mundiales se estiman en cinco billones de toneladas, pero este siglo será sin duda el de la innovación tecnológica en cuanto a sistemas que trabajen con energías alternativas y no contaminantes.

Para conocer mejor la naturaleza de los combustibles fósiles es necesario presentar una breve reseña de estos.

2.1.1.1 Recursos energéticos de origen orgánico o convencionales

Se incluyen aquí fundamentalmente el carbón y los hidrocarburos naturales (petróleo y gas), que se forman no como consecuencia de la acumulación de los restos orgánicos de organismos (sedimentación bioquímica), sino de la acumulación, degradación y evolución de los propios restos orgánicos de estos organismos.

La principal diferencia entre los tipos señalados es que el carbón se forma fundamentalmente a partir de restos de vegetales superiores (hojas, tallos, troncos...), mientras que petróleo y gas se forman a partir de microorganismos (plancton, algas, bacterias...).

2.1.1.2 Hidrocarburos naturales

El petróleo y el gas natural, los hidrocarburos fósiles, están constituidos casi exclusivamente por hidrocarburos, es decir, compuestos orgánicos, más o menos complejos, de Carbono e Hidrógeno, mezclados en proporciones diversas entre sí, y con otros compuestos químicos.

Se originan como un paso intermedio de la degradación de la materia orgánica, en medio anaerobio, y en un rango concreto de presiones y temperaturas. El producto

intermedio que da origen a estos productos, a partir de las rocas que lo contienen, recibe el nombre de kerógeno. Los hidrocarburos se forman en rocas arcillosas que contienen este kerógeno (rocas madre). Sin embargo, para poder ser explotables (extraíbles por bombeo), estos hidrocarburos han de migrar a rocas porosas y permeables (las rocas almacén) y quedar atrapados por algún mecanismo que impida que la migración los lleve hasta la superficie: las trampas petrolíferas.

Los hidrocarburos en la naturaleza aparecen en tres formas principales:

- Como gas natural
- Como petróleo crudo, líquido
- Como arenas asfálticas y pizarras bituminosas.

2.1.1.3 Gas natural

Los yacimientos de gas natural están compuestos fundamentalmente por metano, que llega a constituir hasta el 100% de los mismos (gas seco). Además, puede incluir otros hidrocarburos gaseosos, como etano, propano, butano, etc., en proporción decreciente con el número de Carbonos. Otros constituyentes, minoritarios pero frecuentes, son: H₂S, N₂, He, Ar, etc.

Su poder calorífico constituye la base de su interés económico. Es variable, según la composición específica del gas.

2.1.1.4 El crudo o petróleo líquido

Está constituido fundamentalmente por hidrocarburos líquidos y puede tener en solución hidrocarburos gaseosos (los denominados crudos ligeros), o sólidos (crudos pesados). Otros constituyentes pueden ser: compuestos sulfurados en diversas formas orgánicas, compuestos nitrogenados, también de carácter orgánico, y compuestos oxigenados, como los ácidos grasos. Sus características físicas y económicas están muy relacionadas con la composición.

La principal característica económica de los petróleos es su poder calorífico, que hace que sean utilizables como fuentes de energía.

La principal aplicación del crudo es para obtención de energía, a través de sus productos refinados: gasolina, gas-oil (diesel), fuel-oil, keroseno, etc. Otros usos: materia prima para la industria petroquímica (polímeros, etc.); materia prima para lubricantes (aceites y grasas para motores); aglomerantes asfálticos (fracciones pesadas).

2.1.1.5 Los hidrocarburos sólidos

Se incluyen aquí los hidrocarburos naturales de carácter sólido. Pueden ser de dos tipos: hidratos de metano, y bitúmenes y asfaltos. Los hidratos de metano son muy poco abundantes en la naturaleza, por lo que no son muy importantes. La familia de los bitúmenes es mucho más importante, ya que aparece en dos tipos importantes de yacimientos: arenas asfálticas y pizarras bituminosas.

Los bitúmenes se pueden definir, desde el punto de vista de explotación, como mezclas viscosas naturales de hidrocarburos de molécula muy pesada, y productos sulfurados minoritarios. Su alta densidad y viscosidad impide su explotación convencional por bombeo.

Los hidrocarburos semirrefinados que se pueden extraer de los bitúmenes reciben el nombre de crudos sintéticos.

Las rocas que contienen proporciones importantes de estos bitúmenes pueden ser de dos tipos: Arenas asfálticas y pizarras bituminosas.

Las arenas asfálticas son rocas sedimentarias, consolidadas o no, que contienen productos petrolíferos pesados, de viscosidad muy elevada, que no pueden ser recuperados por medios tradicionales.

Se trata de arenas gruesas, bien clasificadas, porosas y permeables, en las que el bitumen representa del orden del 18 al 20% en peso de la roca.

Las pizarras bituminosas son rocas sedimentarias arcillosas. La materia orgánica que contienen está formada por restos de algas lacustres o marinas.

2.1.1.6 El carbón

El carbón se forma como consecuencia de la acumulación y evolución de la materia orgánica de origen vegetal que se produce en determinadas cuencas sedimentarias.

El carbón es una roca sedimentaria combustible con más del 50 % en peso y más del 70 % en volumen de materia carbonosa, formada por compactación y maduración de restos vegetales superiores.

Dentro de la composición química del carbón se debe diferenciar entre los datos correspondientes a la estructura química del carbón, y los correspondientes a su composición elemental. Asimismo, es necesario diferenciar aquellos datos relacionados con la medida de algunos parámetros de importancia tecnológica. Otros parámetros de gran importancia en la actualidad son los referidos al contenido en elementos menores que puedan liberarse durante el proceso de combustión, y que pueden tener efectos nocivos para la salud humana o del medio ambiente.

2.1.2 LA SITUACIÓN DE COMBUSTIBLES NUCLEARES

El uranio es el combustible nuclear empleado actualmente para producir energía nuclear en las plantas de generación de electricidad, empleando un método llamado fisión nuclear (el cual se explicará más adelante).

La fisión nuclear es esencialmente el resultado de la inestabilidad de los núcleos atómicos de algunos isótopos de determinados elementos naturales, como el Uranio y el Plutonio. El único isótopo fisionable existente en la naturaleza es el uranio 235 que se indica como U^{235} , en el que el exponente representa su peso atómico. Sin embargo, el Uranio 235 se halla contenido en cantidades mínimas en el uranio natural. En efecto, este último está constituido en su mayoría (99,3%) por el isótopo de peso 238 (U^{238}) y tan sólo en un 0,7% por el isótopo 235 (U^{235}).

Los dos núcleos fisionables con neutrones térmicos (es decir, capaces de ser empleados en reactores industriales) son el Uranio 235 y el Plutonio 239. No se hallan en la naturaleza, pero se obtienen por bombardeo neutrónico del Torio 232 (Th^{232}) y del Uranio 238.

En los reactores actuales se utilizan como combustibles el uranio natural (generalmente en forma de óxidos) o el uranio enriquecido, llamado así porque en él se incrementa artificialmente el porcentaje de Uranio 235.

El uranio como combustible nuclear experimenta un ciclo abierto, por lo que no es renovable.

El Ciclo del Combustible Nuclear, representado en al Fig. 2.1, son todos los procesos por los cuales se somete al Uranio desde que se extrae de la tierra hasta su utilización en el reactor y su posterior reelaboración o su almacenamiento como residuo. Consta de las siguientes etapas:

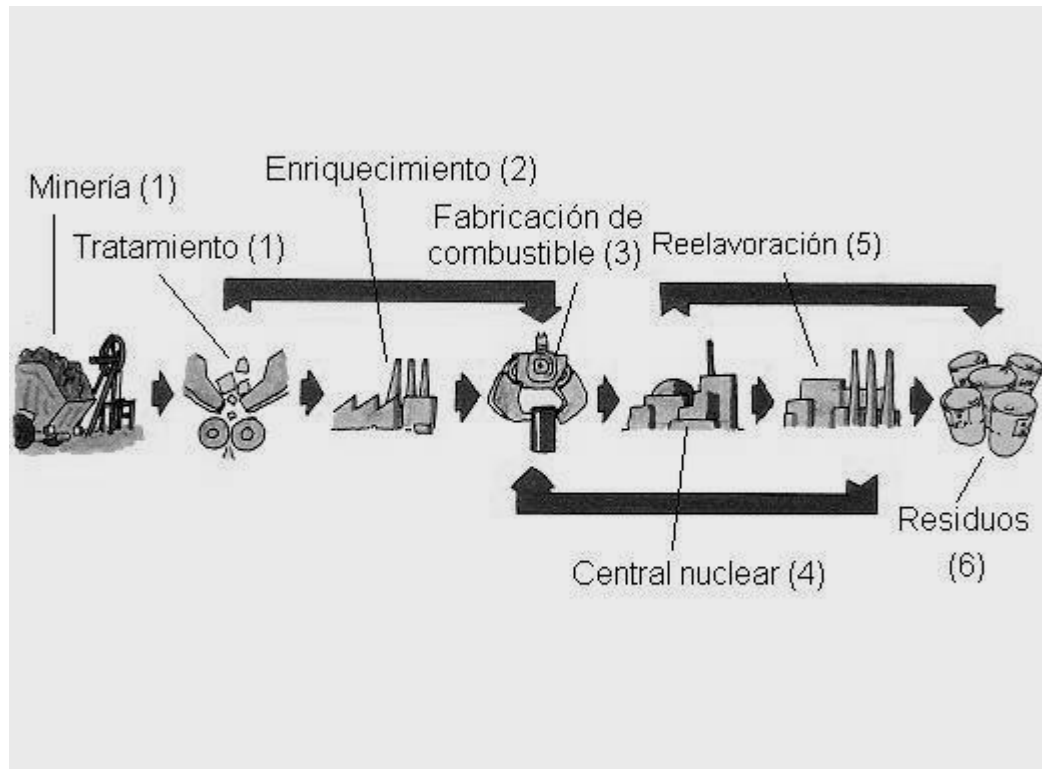


Figura 2.1 Etapas que recorre el combustible Nuclear.

1. Primera etapa de Minería y Concentración del Uranio.

En esta etapa se extrae el mineral y se separa el Uranio que contiene. Posteriormente se eliminan las impurezas que aún contiene el mineral de Uranio obtenido en el proceso de separación inicial. La concentración del mineral consiste en utilizar procesos físico-químicos para aumentar los contenidos de Uranio a valores superiores al 70%. En todo el proceso se utiliza Uranio natural cuya composición isotópica es de aproximadamente: 99% de Uranio 238, 0,7% de Uranio 235 y 0,006% de Uranio 234.

2. Segunda etapa de Conversión y Enriquecimiento.

El Uranio concentrado se purifica por medio de sucesivos tratamientos en disoluciones y precipitaciones hasta que se convierte en un compuesto llamado Hexafluoruro de Uranio. Posteriormente éste se enriquece, es decir, se aumenta la proporción de átomos de Uranio 235 con respecto al Uranio 238. Para ello se realiza una separación selectiva a nivel atómico, utilizando procesos de difusión gaseosa, ultra centrifugación, procesos aerodinámicos, intercambio químico o métodos de separación por láser.

3. Tercera etapa de Fabricación de Elementos Combustibles.

El Uranio enriquecido se somete a presión y altas temperaturas para transformarlo en pequeños cuerpos cerámicos. Las pastillas cerámicas se colocan en el interior de unas varillas huecas que se llenan posteriormente con un gas inerte. Las varillas se apilan en un tubo fabricado de una aleación de circonio, dando forma al llamado Elemento Combustible.

4. Cuarta etapa de Uso del Combustible en un reactor.

Los Elementos Combustibles se introducen en el interior del reactor y forman parte del núcleo del mismo. El Uranio presente en los Elementos Combustibles genera las fisiones que activan al reactor y a medida que transcurre el tiempo se gasta, dejando como desecho los productos de fisión, por ejemplo el Plutonio.

En las centrales de potencia el combustible gastado se almacena temporalmente en la propia instalación, en una piscina especialmente adecuada para ello, lo que permite bajar la actividad de los productos de fisión de vida corta.

5. Quinta etapa de Reelaboración.

Se sabe que en el combustible gastado se ha consumido sólo una pequeña fracción del Uranio que contiene. Se procede entonces a la reelaboración del combustible con el objeto de separar el Uranio que aún es utilizable. En el proceso de reelaboración también se pueden aislar ciertas cantidades de Plutonio u otros productos de fisión, los cuales son de utilidad en el funcionamiento de algunos tipos de reactores. La reelaboración es compleja y demanda fuertes inversiones en plantas industriales de alta tecnología.

6. Sexta etapa de Almacenamiento de Residuos.

El almacenamiento de los residuos puede ser temporal o definitivo. El almacenamiento temporal supone, en algunos casos, el control y posterior reelaboración del combustible gastado. Si no es posible llevar a cabo la reelaboración el combustible gastado se almacena en forma definitiva.

Los residuos radiactivos se pueden clasificar según su origen, su forma (sólidos, líquidos, gaseosos), su nivel de radiactividad, por la vida media de los isótopos radiactivos que contienen (de vida larga, de vida corta), por la intensidad de las radiaciones que emiten, por su radio toxicidad, o bien por sus necesidades de almacenamiento.

El almacenamiento definitivo generalmente se aplica a aquellos residuos de alta actividad y vida larga, y se puede realizar enterrándolos a distancias relativamente cortas respecto de la superficie terrestre (menos de 20 metros). También, se pueden almacenar en formaciones geológicas de mediana o gran profundidad (decenas a centenares de metros).

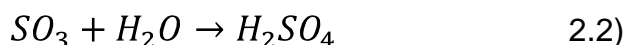
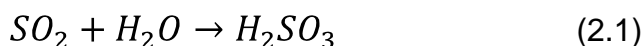
Es importante señalar, que el volumen de residuos radiactivos producidos por una central nuclear dependerá de las características de orden técnico del reactor que los produce. Es así como los reactores de investigación poseen un núcleo pequeño con alta emisión de neutrones, generando cantidades de residuos bastantes menores en comparación a los reactores de potencia.

2.2 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Uno de los efectos más importantes y, por desgracia, más comunes de la combustión es la contaminación del aire.

Esta contaminación consiste en la presencia en la atmósfera de una o varias sustancias en tales concentraciones que puedan originar riesgos, daños o molestias a las personas y al resto de seres vivos, perjuicios a los bienes o cambios de clima.

Los óxidos de azufre, SO_2 y SO_3 , son los agentes contaminantes más habituales en el aire. Proceden de la combustión de los combustibles utilizados en la industria y en la calefacción doméstica. El principal peligro que representan son las reacciones químicas a las que dan lugar en condiciones de humedad:



A fin de reducir las emisiones de óxidos de azufre, es preciso eliminar el azufre presente en los combustibles antes de proceder a su combustión. Si ya se ha producido ésta, hay que reducir en los gases de emisión los óxidos de azufre a azufre, el cual puede ser comercializado posteriormente.

Los óxidos de nitrógeno se encuentran entre los gases emitidos por los tubos de escape de los vehículos a motor. Se eliminan instalando un catalizador en el tubo de escape.

Al igual que los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno reaccionan con el agua que existe en la atmósfera y dan lugar a dos sustancias ácidas:



Todas estas sustancias ácidas forman lo que se ha denominado “lluvia ácida”, que destruye bosques, lagos de escasa profundidad y monumentos.

En la década de los 80 fue cuando la gente comenzó a darse cuenta de que los bosques de Europa, Escandinavia y Norteamérica enfermaban y morían marcados

por la lluvia ácida. En todo el mundo, los ríos se contaminaban con los productos químicos de la industria. En áreas deltaicas situadas a bajo nivel, como Bangladesh, las inundaciones originadas por la deforestación del Himalaya, a miles de kilómetros al norte, provocaron la muerte de miles de personas y arrojaron de sus casas a decenas de miles de damnificados. En el Caribe y en el Pacífico, las tormentas que antes azotaban estas zonas cada cien años empezaron a causar destrozos cada dos o tres años.

Otros tipos de contaminantes producidos por la combustión:

Monóxido de carbono - Es un gas incoloro, inodoro e insípido producido cuando el carbón, el petróleo o el gas arden con poco oxígeno. Reacciona con la hemoglobina de la sangre reemplazando al oxígeno impidiendo que llegue a las células, por consecuencia, es muy tóxico.

Sus principales efectos son:

Al ser su afinidad con la hemoglobina 250 veces mayor que la del oxígeno forma carboxihemoglobina, disminuyendo la cantidad de oxígeno que llega a los tejidos y actuando como agente asfixiante. Los efectos son más pronunciados e intensos en los fumadores y en las personas con problemas cardiacos. Los síntomas típicos son mareos, dolor de cabeza concentrado, náuseas, sonoridad en los oídos y latidos intensos del corazón. La exposición a altas concentraciones puede tener efectos graves permanentes y, en algunos casos, puede producir la muerte.

Hidrocarburos aromáticos - No todos los componentes de la gasolina se queman en los motores de los coches. Algunos hidrocarburos escapan a la atmósfera y producen daños en los seres vivos.

Partículas de la combustión - Incluyen una gama muy amplia de partículas químicas y físicas, incluyendo gotas de líquido. Afectan al funcionamiento de los pulmones. Las partículas más pequeñas (micrométricas) presentan el mayor riesgo, ya que son inhaladas más profundamente en los pulmones.

2.2.1 CALENTAMIENTO GLOBAL

El dióxido de carbono se origina por la combustión de los compuestos orgánicos e incide en el recalentamiento de la atmósfera, fenómeno conocido como “efecto invernadero”.

Las plantas toman dióxido de carbono del aire mediante la fotosíntesis y los seres vivos lo expulsan a la atmósfera en la respiración. Durante millones de años, estos procesos han mantenido en equilibrio la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Sin embargo, este equilibrio se ha roto, por la emisión masiva de dióxido de carbono procedente de las reacciones de combustión de los combustibles fósiles

y porque en muchas zonas del planeta la vegetación ha sido destruida en los últimos años.

Este exceso de dióxido de carbono en la atmósfera actúa como una pantalla sobre la Tierra, que evita que la energía pueda escapar.

La luz visible que llega a la Tierra desde el Sol pierde energía al atravesar la atmósfera terrestre y se transforma en radiación infrarroja. El dióxido de carbono absorbe esta radiación, impidiendo que escape de nuevo al espacio. Este efecto (efecto invernadero) es el responsable de que el hielo de las zonas polares se funda y del aumento de la temperatura media del planeta.

2.3 AUMENTO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La producción de energía en el mundo en 1991 fue de 11 a 12 billones de kW, lo cual, en relación con los 5 500 000 000 de habitantes que vivimos en el planeta, implica un consumo per cápita de aproximadamente 2.2 kW. De modo figurado podemos decir que 3 caballos trabajan día y noche por cada individuo que habita el planeta, aunque dado que un caballo sólo trabaja 8 horas diarias, entonces requerimos 3 turnos de 3 caballos por día o sea 9 caballos por habitante. Piénsese en las enormes caballerizas y en la gran pastura que se requeriría para mantener a 49 500 000 000 de caballos (9 x 5 500 000 000). Así tal vez se pueda percibir lo enorme de estas magnitudes.

Por otra parte, la producción y consumo de energía están estrechamente relacionados con factores económicos y sociales, y también directamente vinculados con el estándar de vida de todo pueblo. Como ejemplo, la Fig. 2.2 muestra la esperanza de vida y la mortalidad infantil como función del consumo de energía per cápita.

Actualmente las principales fuentes de energía primaria, como porcentaje del total y en números redondos son: petróleo (38%), carbón (28%), gas natural (21%), hidroeléctrica (7%) y nuclear (6%). Es decir que 87% de la energía total en el mundo se produce mediante combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas), que tienen el problema de ser recursos no renovables. Desde este punto de vista, las generaciones actuales están robando recursos a las futuras.

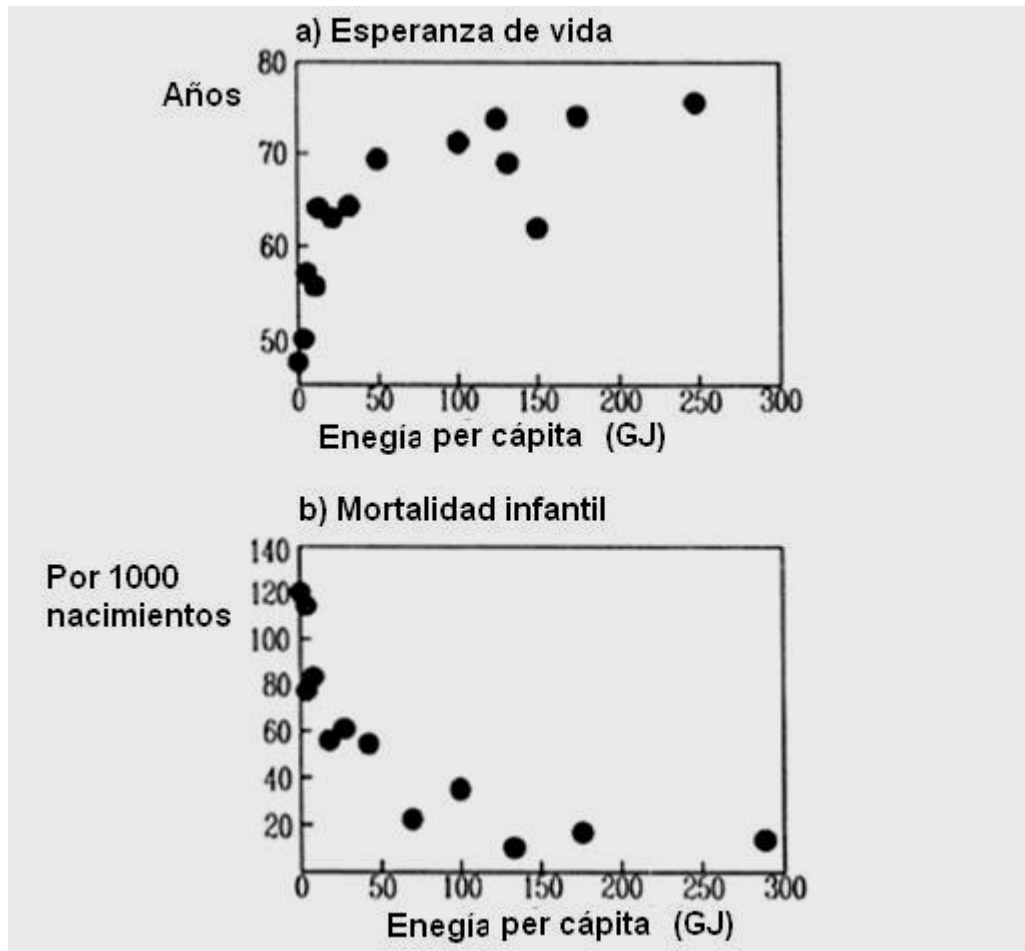


Figura 2.2 Las graficas muestran el consumo energético por persona en dos diferentes casos: cuando la esperanza de vida es grande hay un aumento, mientras que cuando la mortalidad infantil es baja se presenta también un aumento en el consumo de energía por persona.

La Fig. 2.3 muestra las reservas mundiales de combustibles fósiles y de uranio, así como (entre paréntesis) el consumo anual actual. Se puede ver que, suponiendo constante el consumo actual de petróleo, existen reservas de este energético sólo para poco más de cincuenta años. Esto es en teoría, pues en la práctica al disminuir el petróleo disponible éste aumentará su precio de modo tal que quizá nunca se llegue a consumir la última gota. Sin embargo, en esa misma figura se puede apreciar que, paradójicamente, siendo el petróleo el energético fósil del que menos se dispone, es el más utilizado: casi 40% del consumo mundial actual de energía procede de él. Desde cierto punto de vista esto es algo lamentable debido a que el petróleo podría ser más útil a la humanidad como materia prima de la industria química y no quemado como fuente de energía. Para ver esto de modo más claro, sólo hay que percatarse que los aviones, automóviles, aparatos domésticos, ropa, muebles e infinidad de otros artículos cotidianos están manufacturados en su totalidad o en un gran porcentaje a partir de derivados del petróleo.

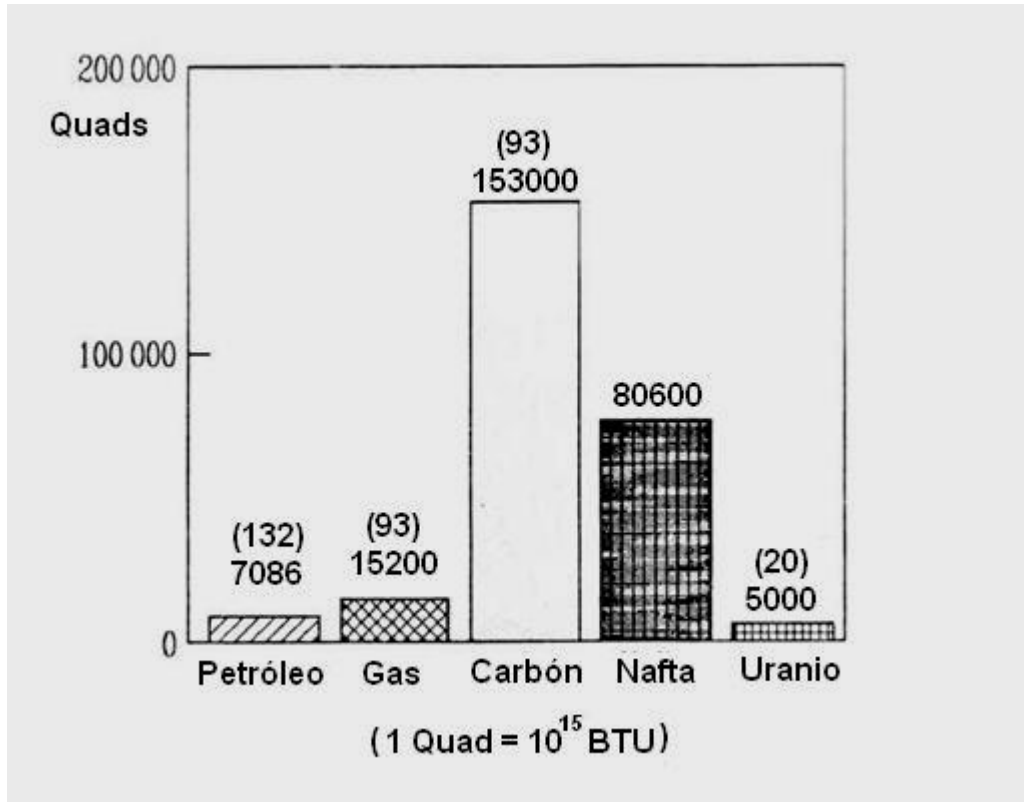


Fig. 2.3 Principales fuentes de energía y el poder calorífico obtenido de ellas.

De hecho en la Fig. 2.3 se puede ver que el planeta dispone de reservas energéticas para muchos años más. Sin embargo, uno de los más graves problemas que ocasiona el uso de combustibles fósiles es la emisión de bióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. Estas emisiones actualmente son de aproximadamente 24 billones de toneladas al año. Durante las pasadas décadas la cantidad de CO₂ en la atmósfera ha aumentado en casi 25%, lo cual es un hecho sin precedente en la historia de la humanidad, pues ha modificado el ambiente como nunca antes. Este cambio sustancial en uno de los componentes más importantes de la atmósfera es preocupante debido a las consecuencias que puede tener. Una primera propuesta es eliminar las emisiones de CO₂ a la atmósfera sustituyendo los combustibles fósiles por tecnologías energéticas limpias (es decir, tecnologías que su uso no produce CO₂) como la nuclear, hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, etc. Lamentablemente, la mayoría de estas fuentes son incapaces de proporcionar un porcentaje importante (por ejemplo 30 a 40%) de los requerimientos energéticos mundiales, excepto fisión y (en un futuro próximo) fusión nuclear. Todas las opciones energéticas mencionadas tienen sus puntos "a favor" y "en contra", excepto posiblemente la opción solar, en donde todo parece estar a favor menos el nivel actual de desarrollo tecnológico. La opción basada en la fisión nuclear se ha tomado seriamente en algunos países, los cuales extraen más de 50% de su energía de esta fuente; sin embargo, varios accidentes nucleares en el mundo han mostrado los altos riesgos de esta opción energética.

Debido a que muchos de los efectos de las combustiones son negativos y a que existe un agotamiento de los materiales combustibles se hace necesario realizar una búsqueda de nuevas formas de generar energía que sean limpias, que trate en la mayor medida ser renovables, pero además que generen suficiente energía como para satisfacer las necesidades humanas, por eso, se presenta a continuación un breve estudio de las principales fuentes de energía alternativas.

2.4 PRINCIPALES FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA Y RENOVABLE

2.4.1 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica ya ha sido estudiada en el capítulo pasado, pero es importante señalar que en este tipo de energía se ha invertido poco, ya que son pocas las centrales eólicas que se encuentran funcionando en el mundo, y para dar cuenta de esto se presenta la siguiente gráfica de la Fig. 2.4 que da una idea clara del porcentaje en que ésta forma de generación de electricidad limpia se ha implementado en nuestro país.

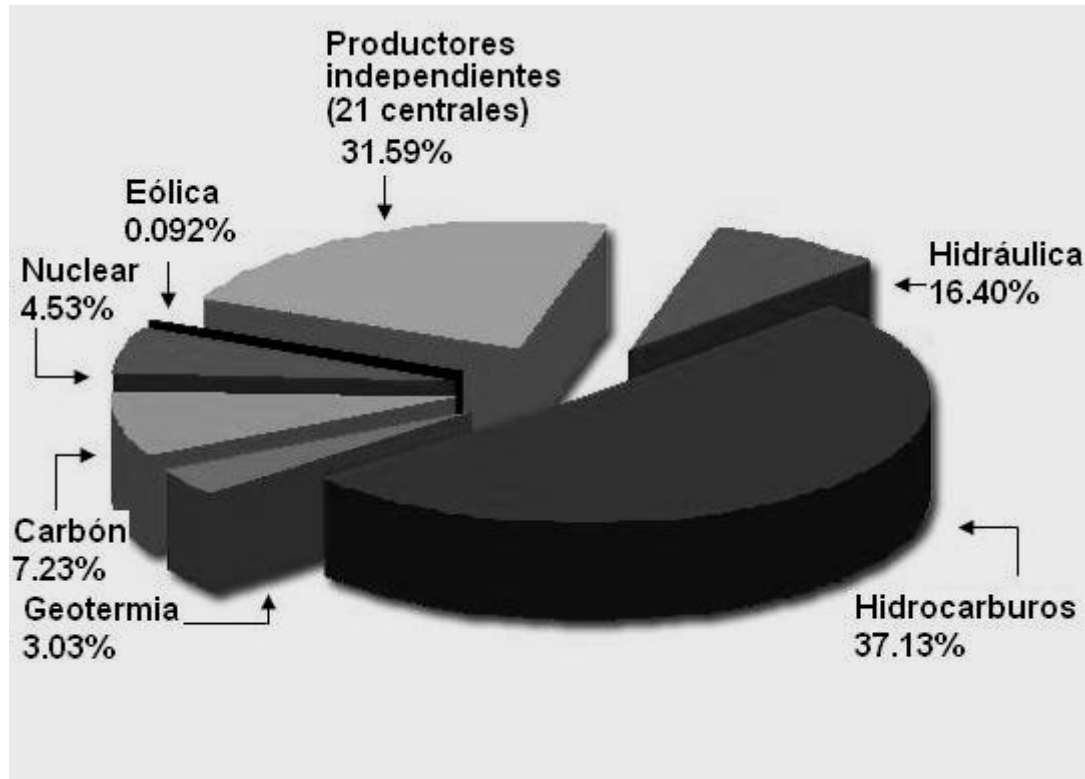


Fig. 2.4 Generación de electricidad de acuerdo a la fuente de energía.

Se nota que es necesario implementar más centrales de este tipo para poder satisfacer la demanda de energía eléctrica.

2.4.2 BIOCOMBUSTIBLES

El biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa (organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos), tales como el estiércol de la vaca. Los combustibles de origen biológico pueden sustituir parte del consumo en combustibles fósiles tradicionales (petróleo, carbón, etc.).

Su uso genera una menor contaminación ambiental y son una alternativa viable al agotamiento ya sensible de energías fósiles, como el gas y el petróleo, donde ya se observa incremento en sus precios. Es importante destacar que los biocombustibles son una alternativa más en vistas a buscar fuentes de energías sustitutivas, que sirvan de transición hacia una nueva tecnología como por ejemplo el hidrógeno.

El biodiesel es el combustible renovable que tiene el mayor potencial de desarrollo en el país. Se puede usar puro o mezclado con gasoil en cualquier proporción, en cualquier motor diesel.

De hecho, en el año 1900, Rudolf Diesel utilizó aceite de maní en el primer motor diesel. Actualmente el biodiesel se usa en varios países en mezclas con porcentajes diversos. Se obtiene a partir de aceites vegetales y/o grasas animales por ejemplo: la colza, girasol, palma, soya, sebo, etc., permitiendo al campo y la industria aceitera otra posibilidad de comercialización y de diversificación de la producción.

El bioetanol puede sustituir a la nafta como ya se hace en Brasil con el alcohol de caña, o el de maíz en los Estados Unidos. Permite sustituir los aditivos que se emplean actualmente y que generan contaminación ambiental.

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos, (bacterias), y otros factores, en ausencia de aire.

El artículo, “Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels” fue elaborado por varios científicos norteamericanos entre los que se encuentra el profesor, Erik J. Nelson, de la Universidad de Minnesota. En él se recogen las principales ventajas e inconvenientes de algunos biocombustibles.

Ventajas de los biocombustibles:

- Proporcionan una fuente de energía reciclable y, por lo tanto, inagotable.
- Las emisiones de gas del invernadero son reducidas el 12% por la producción y la combustión del etanol y el 41% por el biodiesel.
- Revitalizan las economías rurales, y generan empleo al favorecer la puesta en marcha de un nuevo sector en el ámbito agrícola.
- Mejoran el aprovechamiento de tierras con poco valor agrícola y que, en ocasiones, se abandonan por la escasa rentabilidad de los cultivos tradicionales.

- Mejora la competitividad al no tener que importar fuentes de energía tradicionales.

Inconvenientes de los biocombustibles:

- Los biocombustibles producidos a base de palma aceitera, caña de azúcar y soya conllevan graves impactos sociales y al medio ambientales
- Su uso se limita a motores de bajo rendimiento y poca potencia.
- Su producción sólo es viable mediante subvenciones, porque los costos doblan a los de la gasolina o el gasóleo. Se necesitan grandes espacios de cultivo, dado que del total de la plantación sólo se consigue un 7% de combustible.
- El combustible precisa de una transformación previa compleja.
- En los bioalcoholes, la destilación provoca, respecto a la gasolina o al gasóleo, una mayor emisión en dióxido de carbono.

2.4.3 ENERGÍA DEL OCEANO

Los científicos se han dado a la tarea de encontrar la manera de producir energía sin contaminar seriamente el ambiente. En la búsqueda de fuentes energéticas limpias se han investigado opciones como la energía solar, la energía del viento y la de las olas del mar.

La conversión de la energía océano-termal, también llamada OTEC, es un proceso que convierte la radiación solar que cae en los océanos en energía eléctrica. En el mar el agua tiene diferentes temperaturas. En la superficie el agua es más caliente mientras que en la profundidad el agua se torna más fría. El sistema OTEC aprovecha esta diferencia en temperaturas del océano y la emplea para producir energía. Para que funcione, es necesario que la diferencia en la temperatura de las cálidas aguas de la superficie y las frías aguas profundas sea de cerca de 20° C.

Para producir electricidad se usa un fluido que tenga un punto de ebullición bajo como el amoniaco. El fluido se convierte en vapor al calentarse con las aguas cálidas del mar. La presión del vapor de amoniaco se expande y mueve una turbina que produce electricidad. Entonces, el amoniaco gaseoso pasa a unos tanques de almacenamiento, donde las aguas frías del fondo del océano lo convierten de nuevo en líquido, y comienza de nuevo el ciclo.

A pesar de que muchos ingenieros entienden que este método para generar energía es eficiente, no existen plantas de OTEC funcionando comercialmente. En Hawaii opera una planta experimental pero sólo con fines de investigación. Esto no debe sorprendernos si consideramos lo poco que se han desarrollado otras fuentes de energía limpia, como la solar o la del viento.

Aunque muchos expertos reconocen que es difícil y costoso reemplazar el petróleo y el carbón con fuentes de energía más limpia, otros opinan que los beneficios hacia el ambiente, justifican el esfuerzo.

El océano además es una fuente inagotable de energía cinética. Los océanos pueden proveernos de energía mediante tres maneras: el movimiento de las olas, las mareas y la diferencia de temperatura entre las capas del océano, que ya se mencionó. La energía cinética de las olas y de las mareas puede ser utilizada para mover una turbina y generar electricidad.

Japón, Francia, Israel y Gran Bretaña son quienes más han avanzado en el estudio de la energía oceánica, diseñando estaciones experimentales.

2.4.4 LA OTRA OPCIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR

La energía nuclear es una enorme fuente de energía que aun no se ha aprovechado al máximo, ya que de las dos formas de generar energía nuclear sólo se ha implementado una, la Fisión Nuclear, mientras que la otra manera, la Fusión Nuclear, es una fuente de energía mayor y mucho más limpia que la Fisión, es por ello que el presente trabajo está centrado principalmente en el estudio de este fenómeno y de las características principales de ésta para su implementación en la generación de electricidad.

CAPÍTULO 3

LA ENERGÍA NUCLEAR

La energía nuclear, como se verá en este capítulo, ofrece una alternativa que puede proporcionar una producción de energía muy elevada, la Fusión Nuclear, pero para entender cómo funciona el mecanismo de la Fusión Nuclear, es necesario primero saber: ¿qué es la energía nuclear?.

3.1 ORIGEN DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Hablando Históricamente el origen de la energía nuclear se encuentra en los estudios de varios científicos, como Edward Teller, que dieron como fruto la invención de la bomba atómica en la Segunda Guerra Mundial.

La energía nuclear la consiguió por primera vez el científico italiano Enrico Fermi en 1942. Fermi construyó el primer reactor nuclear. En él se usaba uranio para producir calor. Este tipo de reactor se emplea solamente en las centrales nucleares de energía eléctrica.

En la década de los 70s, hubo una gran crisis energética originada por la escasez del petróleo. Esto promovió la construcción de las primeras centrales nucleares del mundo, teniendo por combustible el Uranio, evitando así, tener que depender del petróleo, y de los países exportadores, dado que con las reservas de Uranio, se puede seguir produciendo energía durante cientos de años. Actualmente, existen aproximadamente 450 reactores nucleares en el mundo, que generan aproximadamente el 16% del total de la energía mundial generada.

Por otra parte, hablando estructuralmente el origen de la energía nuclear, como su nombre lo dice, se encuentra en el núcleo de los átomos de los elementos, pero para comprender la estructura atómica y de cómo es que se genera energía a partir del núcleo atómico es necesario estudiar primero como es que está conformada la materia.

3.1.1 ESTRUCTURA DE LA MATERIA

En el Capítulo 1 se hablo un poco de la estructura atómica, sin embargo, fue una explicación rápida y sencilla, por lo que en este tema se hablará nuevamente de la estructura de la materia, además de que se mencionarán los diferentes modelos atómicos que se han desarrollado a lo largo de la historia de la humanidad, para así comprender el origen de la energía nuclear.

3.1.1.1 Modelos Atómicos

Uno de los logros más importantes de la física del siglo XX fue llegar a comprender la estructura atómica de la materia. El deseo por conocer cuáles son los bloques últimos que la constituyen ha acompañado al hombre seguramente desde tiempo inmemorial. Entre los griegos de la antigüedad existió la idea de que el Universo o cosmos que nos rodea surgió de un caos original. Pero no fue sino hasta el siglo V a. C. que el filósofo Demócrito propuso la teoría atómica según la cual la materia está constituida en su más íntima escala por partículas indivisibles llamadas átomos. De este modo los griegos hablaban, por ejemplo, de átomos de agua. Esta primaria teoría atómica evolucionó con el desarrollo científico de la humanidad y ahora sabemos que los átomos de agua de los antiguos griegos son en realidad moléculas, esto es, estructuras que a su vez están compuestas por los elementos simples que ahora conocemos como átomos.

En el siglo XVIII, los experimentos realizados por Dalton, Lavoisier, Cavendish y otros científicos mostraron claramente la existencia de átomos y moléculas pero no fue sino hasta el siglo XIX que los estudios de electrólisis realizados por Faraday dieron evidencia de la naturaleza atómica de la electricidad. Posteriormente Thomson, al estudiar la conducción de la electricidad a través de gases rarificados, descubre los rayos catódicos y muestra que éstos están compuestos por partículas con carga eléctrica negativa que llamó electrones. Éste fue un descubrimiento muy importante, pues mostró conclusivamente que los átomos contienen electrones, de lo cual se infiere que los átomos tienen de alguna manera una estructura interna.

El primer modelo moderno de un átomo fue propuesto por Thomson en 1907. De acuerdo con él, el átomo es una nube o pasta de carga positiva —requerida para equilibrar la carga negativa de los electrones, pues en total los átomos son neutros— que contiene a los electrones libremente en su interior en forma similar a un pastel con pasas, como de hecho se llegó a conocer ese modelo. No obstante, experimentos realizados por Rutherford en 1911, representados en la Fig. 3.1, mostraron que la carga positiva del átomo no se encuentra uniformemente distribuida como Thomson supuso en su modelo, sino concentrada en un punto llamado núcleo, alrededor del cual giran los electrones. Rutherford observó que la mayor parte de las partículas que atravesaban la lámina seguían una línea recta o se desviaban un ángulo muy pequeño de la dirección inicial. Solamente, muy pocas partículas se desviaban grandes ángulos, lo que contradecía el modelo atómico propuesto por Thomson. Rutherford supuso que dichas desviaciones provenían de una única interacción entre la partícula proyectil y el átomo, el cual debería alojar en su interior una fuente pequeña pero intensa de campo eléctrico, el núcleo, el cual provocaba las desviaciones a grandes ángulos de la partícula proyectil, las cuales eran muy pocas porque la mayoría del volumen del átomo es vacío, mientras que las pequeñas desviaciones se debían al choque de la partícula proyectil con alguna parte del átomo mucho más pequeña que el núcleo, el electrón, lo cual es probable gracias a que el electrón se encuentra viajando alrededor del núcleo atómico. El modelo

atómico de Rutherford explicaba algunos resultados experimentales observados, pero entró en conflicto con la teoría electromagnética clásica, que predice que toda partícula con carga eléctrica en movimiento acelerado debe radiar energía en forma de ondas electromagnéticas. Debido a que un electrón que se mueve en sentido circular uniforme está sometido a una aceleración —pues aunque no cambia la magnitud de la velocidad, cambia constantemente su dirección— éste radiará energía. Por tanto, el modelo de Rutherford predice que los átomos son inestables pues cada electrón, al girar alrededor del núcleo, radiará su energía y se colapsará hacia el núcleo atómico siguiendo una trayectoria espiral en un proceso que toma sólo una cien millonésima de segundo. Es decir que, ¡el Universo tal como lo conocemos no existiría!

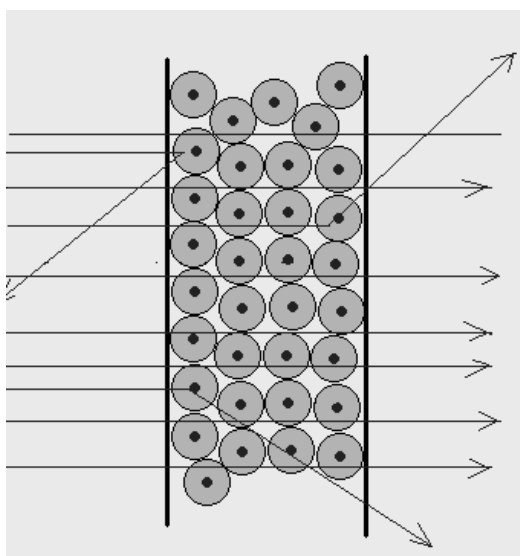


Fig. 3.1 Experimento de Rutherford.

La solución a este problema fue dada por el físico danés Niels Bohr en 1913. El modelo atómico de Bohr propone que los electrones únicamente pueden girar alrededor del núcleo en ciertas órbitas estables y que el pasar de una órbita estable a otra requiere del intercambio de cantidades cuantizadas de energía como lo muestra la Fig. 3.2. Este modelo tuvo gran éxito pues sus predicciones coinciden con las observaciones espectroscópicas del hidrógeno estudiadas por varios científicos como Balmer, Lyman y otros. Es decir, con su modelo Bohr no sólo explicó la estabilidad atómica sino que, tomando en cuenta las transiciones electrónicas entre las órbitas estables permitidas, pudo dar una base teórica a las observaciones espectroscópicas conocidas.

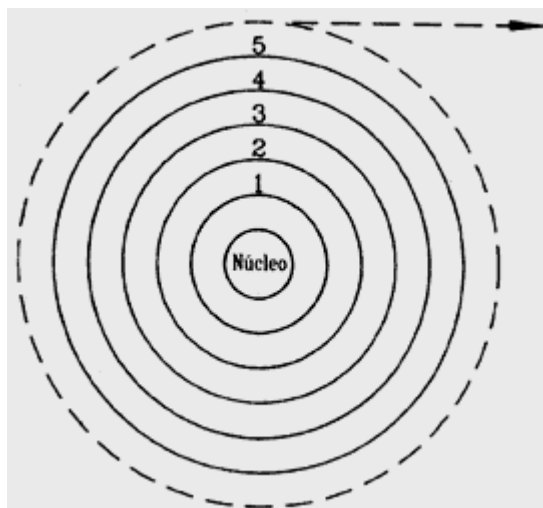


Fig. 3.2 Niveles energéticos del átomo propuestos por Bohr.

Posteriormente Heisenberg, Schrödinger, Born y otros científicos desarrollaron una herramienta teórica muy poderosa conocida como mecánica cuántica, con la cual es posible describir los procesos que ocurren a nivel atómico y subnuclear. Una asombrosa consecuencia de esta teoría es que establece un límite preciso a lo que podemos saber de un sistema cuántico. En particular, en el mundo cuántico no podremos conocer jamás la posición exacta de una partícula o de su energía. Por tanto, hablar de órbitas electrónicas como Bohr hizo, es rigurosamente incorrecto.

En 1932 Chadwick demuestra que el núcleo atómico no sólo contiene partículas positivas llamadas protones, sino también partículas neutras llamadas neutrones. Ahora sabemos que protones y neutrones están constituidos a su vez por partículas más pequeñas conocidas como cuarks y nuestra idea del átomo difiere considerablemente de lo que inicialmente Bohr y sus contemporáneos imaginaron. Sin embargo, por simplicidad, se hará uso únicamente de modelos atómicos basados en el modelo de Bohr.

3.1.1.2 Estructura Atómica

Como se ha visto de modo elemental, se puede considerar que todo átomo está compuesto de un núcleo alrededor del cual giran electrones en forma similar a un sistema planetario microscópico. A su vez los núcleos están formados por protones y neutrones. Los protones tienen carga eléctrica positiva, los electrones carga negativa y los neutrones son partículas sin carga.

El mundo macroscópico material que nos rodea es eléctricamente neutro; esto se debe a que en todo átomo el número de electrones coincide con el de protones. La Fig. 3.3 muestra esquemáticamente un átomo de hidrógeno y uno de carbono. Esta figura sólo pretende representar la cantidad de partículas que constituyen cada átomo y ¡de ningún modo deberán considerarse representaciones exactas. Es importante señalar que las órbitas electrónicas son tridimensionales, pero por

simplicidad se representan como círculos en un plano. También debemos mencionar el hecho de que los protones y los neutrones tienen una masa aproximadamente 1840 veces mayor que la masa de los electrones, aunque sus masas difieren un poco. El átomo de hidrógeno es el elemento más simple, compuesto únicamente por un electrón y un protón, mientras que un átomo de carbono es mucho más complejo pues lo forman seis protones, seis neutrones y seis electrones.

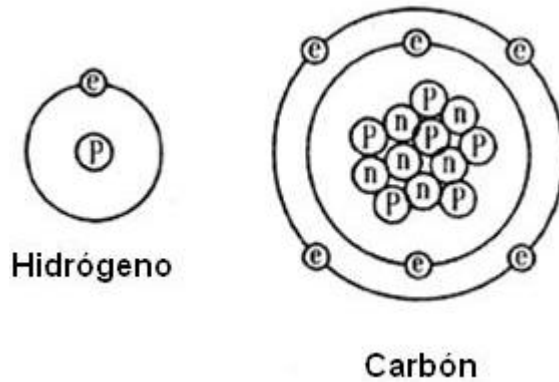


Fig. 3.3 Los neutrones y los protones se encuentran agrupados conformando el núcleo atómico, mientras que los electrones se encuentran girando alrededor de éste.

Para hacer referencia a un átomo se emplean generalmente dos números que son: el número atómico Z , que es el número de protones del átomo, y el número de masa A que es el número total de protones y neutrones del átomo. Estas dos últimas partículas en general son conocidas como "nucleones". La tabla T-3.1 muestra algunos átomos indicando sus números atómicos, de masa y su símbolo atómico. Por ejemplo, ahí vemos que el boro se representa por la letra B teniendo por subíndice el número atómico $Z = 5$, y por supra índice el número de masa $A = 11$; se observa que el número de neutrones en un núcleo de boro es $A - Z = 6$.

H_1^1	Hidrógeno
He_2^4	Helio
B_5^{11}	Boro
C_6^{12}	Carbono

Tabla T-3.1 Notación de los elementos químicos que incluye el número de masa y el número atómico.

Así como nuestro sistema planetario está en equilibrio debido a las fuerzas gravitacionales de atracción entre el Sol y los planetas, en un átomo el equilibrio depende de las fuerzas electrostáticas atractivas entre el núcleo, que tiene carga eléctrica positiva, y los electrones, que tienen carga eléctrica negativa.

Los átomos son diferentes, cuando se agrupan forman sustancias distintas conocidas como elementos. Cada elemento está formado por átomos con el mismo número atómico, sin embargo, pueden tener número de masa diferente. Los átomos de un mismo elemento se llaman isótopos y se diferencian entre sí por el número de masa.

El elemento uranio, cuyo número atómico es 92, tiene fundamentalmente dos isótopos con número de masa 235 y 238 respectivamente.

3.1.2 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

Ya que se conoce como está compuesta la materia podemos ahora presentar la llamada ecuación de la energía de Albert Einstein.

$$E = mc^2 \quad (3.1)$$

Donde:

- E = Energía en forma de calor
- m = Masa
- c = Velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s)

Con el factor multiplicador de la velocidad de la luz al cuadrado, se puede dar una cuenta de la pequeña cantidad de masa que se necesita para obtener una cantidad enorme de energía. Para tener una idea más clara de esto, considérese la conversión de un kilogramo de masa en energía pura y supóngase que el proceso se produce en circunstancias tan ideales que la conversión es completa y perfecta. Al hacer esto, se obtendría una energía de noventa mil billones de julios, o sea noventa millones de giga julios. Si este proceso se llevara a cabo en el transcurso de una hora aplicando la fórmula de potencia igual a trabajo (energía) dividido entre tiempo, nos da la nada despreciable cantidad de 25 mil gigawatios, es decir, la décima parte del consumo eléctrico en España durante 2005, concluyendo, con diez kilos de este combustible ideal se tendría suficiente cantidad para satisfacer las necesidades energéticas de un país moderno de más de cuarenta millones de habitantes.

De esta manera es como tiene su origen la energía nuclear, al alterar los núcleos atómicos se desprenden pequeñas cantidades de masa (conocidas como defecto de masa) a una velocidad cercana a la velocidad de la luz, lo cual proporciona la energía utilizable en forma de calor, que como se puede ver a continuación tiene varios usos:

3.2 USOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

3.2.1 ARMAS NUCLEARES

El uso de la energía nuclear para armas consiste en la fabricación de bombas de destrucción masiva las cuales son denominadas “bombas atómicas”.

Según el diseño y los materiales con las que se montan, las bombas atómicas pueden ser de varios tipos, siendo las más conocidas:

Bombas de Fisión Nuclear.

Las bombas de fisión basan su funcionamiento en el rompimiento de un núcleo pesado en elementos más ligeros, mediante el bombardeo de neutrones que, al impactar en dicho material, desencadenan una reacción nuclear en cadena. Para que esto suceda hace falta usar núcleos fisibles o físiiles como el Uranio-235 o el Plutonio-239. Según el mecanismo y el material usado se conocen dos métodos distintos para generar una explosión nuclear, estos son los siguientes:

- Bomba de Uranio

En este caso, a una masa de uranio llamada subcrítica se le añade una cantidad del mismo material para conseguir una masa crítica que comienza a fisionar por sí misma. Al mismo tiempo se le añaden otros elementos que potencian la creación de neutrones libres que aceleran la reacción en cadena.

- Bomba de Plutonio

Para el arma de plutonio, más moderna y de diseño más complicado, se rodea la masa fisionable de explosivos convencionales especialmente diseñados para comprimir el plutonio, de forma que una bola de plutonio del tamaño de una pelota de tenis se convierte casi al instante en el equivalente a una canica, aumentando increíblemente la densidad del material que entra instantáneamente en una reacción en cadena de fisión nuclear descontrolada, provocando la explosión y la destrucción total dentro de un perímetro limitado.

Bombas de fusión nuclear.

En cambio, las bombas de fusión consisten en la fusión de núcleos ligeros (isótopos del hidrógeno) en núcleos más pesados.

La bomba de hidrógeno, bomba nuclear de Fusión o bomba termonuclear se basa en la obtención de la energía desprendida al fusionarse dos núcleos atómicos, en lugar de la Fisión de los mismos.

La energía se desprende al fusionarse los núcleos de deuterio (H_1^2) y de tritio (H_1^3), dos isótopos del hidrógeno, para dar un núcleo de helio. La reacción en cadena se propaga por los neutrones de alta energía desprendidos en la reacción.

Para iniciar este tipo de reacción en cadena es necesario un gran aporte de energía, por lo que todas las bombas de fusión contienen un elemento llamado iniciador o primario, que no es sino una bomba de fisión. A los elementos que componen la parte fusionable (deuterio, tritio, etc.) se les conoce como secundario.

La primera bomba de este tipo se hizo estallar en Enewetak (a talón de las Islas Marshall) el 1 de marzo de 1954 con marcados efectos en la ecología de la región. La temperatura alcanzada en el "Punto Cero" (Lugar de la explosión) fue de más de 15 millones de grados, tan caliente como el centro del Sol. Literalmente vaporizó la isla.

Bombas de Fisión-Fusión-Fisión.

Otro tipo de arma nuclear son las bombas de «Fisión-Fusión-Fisión», que se basan en el principio de que la reacción de fusión puede incrementar al mismo tiempo la fisión de otros átomos pesados recubriendo el dispositivo nuclear con estos. El nombre de fisión-fusión-fisión describe los pasos que sigue la bomba para estallar. Primero, como en toda bomba-H existe una reacción cebadora de fisión que induce la fusión del hidrógeno. La novedad está en que una vez iniciada la reacción de fusión ésta provoca la fisión de una tercera capa de material que de otra manera sería imposible fisiónar, por ejemplo Uranio-238 u otros átomos menos pesados.

Lo que ocurre es que la lluvia de neutrones generada por la explosión termonuclear impacta de lleno en la cubierta férrea provocando la fisión de ésta con un rendimiento superior al de una reacción de fisión normal. Ésta es una manera relativamente barata de incrementar el rendimiento de los dispositivos termonucleares pero que también tiene nefastas consecuencias. El motivo de esto es que con la fisión de la capa externa se producen muchos átomos pesados radiactivos que además se extienden por una vasta área tras la explosión. Así la radiactividad de estas bombas es la mayor de todas. Por ello también se suelen llamar bombas nucleares "sucias".

A través del diseño de las armas nucleares también es posible dirigir la potencia del arma para hacerla más efectiva en función de los objetivos de la misma; de este modo, existen armas diseñadas con el objeto de provocar una devastación menos extendida, pero más intensa en el área de la explosión, o todo lo contrario, con el fin de extender al máximo las consecuencias perniciosas de la explosión.

Bombas de neutrones.

La bomba de neutrones, también llamada bomba N, es una bomba de radiación directa incrementada o bomba de radiación forzada, es un arma nuclear derivada de la bomba H que los Estados Unidos comenzaron a desplegar a finales de los años 70s. En las bombas H normalmente el 50% de la energía liberada se obtiene por

Fisión Nuclear y el otro 50% por Fusión. En la bomba de neutrones se consigue hacer bajar el porcentaje de energía obtenida por Fusión a menos del 50%, e incluso se ha llegado a hacerlo de cerca del 5%.

En consecuencia se obtiene una bomba que para una determinada magnitud de onda expansiva y pulso térmico produce una proporción de radiaciones ionizantes (radiactividad) hasta 7 veces mayor que las de una bomba H, fundamentalmente rayos X y gamma de alta penetración. En segundo lugar, buena parte de esta radiactividad es de mucha menor duración (menos de 48 horas) de la que sería de esperar de una bomba de Fisión.

Las consecuencias prácticas son que al detonar una bomba N se produce poca destrucción de estructuras y edificios, pero mucha afectación y muerte de los seres vivos, (tanto personas como animales), incluso aunque estos se encuentren dentro de vehículos o instalaciones blindados o acorazados.

3.2.2 PLANTAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

La primera aplicación práctica de la energía nuclear fue la bomba atómica, en la cual se liberó una energía de 12 kilotones (energía equivalente a 12.000 toneladas de explosivo TNT), destruyendo una ciudad entera. Esta es una forma de liberación de energía de forma incontrolada. En las centrales nucleares, el proceso está controlado, de forma que la energía no sea gigantesca, ya que destruiría el reactor, y se transformaría en una bomba atómica.

Una de las aplicaciones más importantes de la energía nuclear es el empleo de reactores en las centrales de producción de energía termoeléctrica. Su importancia reside principalmente en el hecho de que, incluso sin ser por ahora el costo de la energía producida competitivo con el de la energía eléctrica de las centrales tradicionales, existe la posibilidad de perfeccionar la técnica de funcionamiento y de preparar el personal especializado necesario para el manejo de instalaciones delicadas y complicadas como las nucleares.

Un reactor nuclear produce calor de la Fisión Nuclear, en la cual, el núcleo atómico se rompe liberando gran cantidad de energía. Las partes más importantes de un reactor nuclear se describen a continuación:

- El Combustible: Material fisionable utilizado en cantidades específicas y dispuesto en forma tal, que permite extraer con rapidez y facilidad la energía generada. El combustible en un reactor se encuentra en forma sólida, siendo el más utilizado el Uranio bajo su forma isotópica de Uranio 235. Sin embargo, hay elementos igualmente fisionables, como por ejemplo el Plutonio que es un subproducto de la fisión del Uranio.
- Barras de Combustible: Son el lugar físico donde se confina el Combustible Nuclear. Algunas barras de combustible contienen el Uranio mezclado en

Aluminio bajo la forma de láminas planas separadas por una cierta distancia que permite la circulación de fluido para disipar el calor generado. Las láminas se ubican en una especie de caja que les sirve de soporte.

- **Núcleo del Reactor:** Está constituido por las barras de combustible. El núcleo posee una forma geométrica que le es característica, refrigerado por un fluido, generalmente agua. En algunos reactores el núcleo se ubica en el interior de una piscina con agua, a unos 10 a 12 metros de profundidad, o bien al interior de un recipiente a presión construido de acero.
- **Barras de Control:** Todo reactor posee un sistema que permite iniciar o detener las Fisiones Nucleares en cadena. Este sistema lo constituyen las barras de control, capaces de capturar los neutrones que se encuentran en el medio circundante. La captura neutrónica evita que se produzcan nuevas fisiones de núcleos atómicos del Uranio. Generalmente, las barras de control se fabrican de Cadmio o Boro.
- **Moderador:** Los neutrones obtenidos de la fisión nuclear emergen con velocidades muy altas (neutrones rápidos). Para asegurar la continuidad de la reacción en cadena, es decir, procurar que los “nuevos neutrones” sigan colisionando con los núcleos atómicos del combustible, es necesario disminuir la velocidad de estas partículas (neutrones lentos). Se disminuye la energía cinética de los neutrones rápidos mediante choques con átomos de otro material adecuado, llamado Moderador. Se utiliza como Moderador el agua natural (agua ligera), el agua pesada (deuterada, la cual posee átomos de deuterio en lugar de átomos de hidrogeno), el Carbono (grafito), etc.
- **Refrigerante:** El calor generado por las fisiones se debe extraer del núcleo del reactor. Para lograr este proceso se utilizan fluidos en los cuales se sumerge el núcleo. El fluido no debe ser corrosivo, debe poseer gran poder de absorción calorífico y tener pocas impurezas. Se puede utilizar de refrigerante el agua ligera, el agua pesada, el anhídrido carbónico, etc.
- **Blindaje:** En un reactor se produce gran cantidad de todo tipo de radiaciones, las cuales se distribuyen en todas direcciones. Para evitar que los operarios del reactor y el medio externo sean sometidos indebidamente a tales radiaciones, se utiliza un adecuado “Blindaje Biológico” que rodea al reactor. Los materiales más usados en la construcción de blindajes para un reactor son el agua, el plomo y el hormigón de alta densidad, con al menos 1,5 metros de espesor.

Las barras de control absorben neutrones y se suben o bajan para controlar las reacciones que ocurren en el núcleo y la cantidad de calor producida.

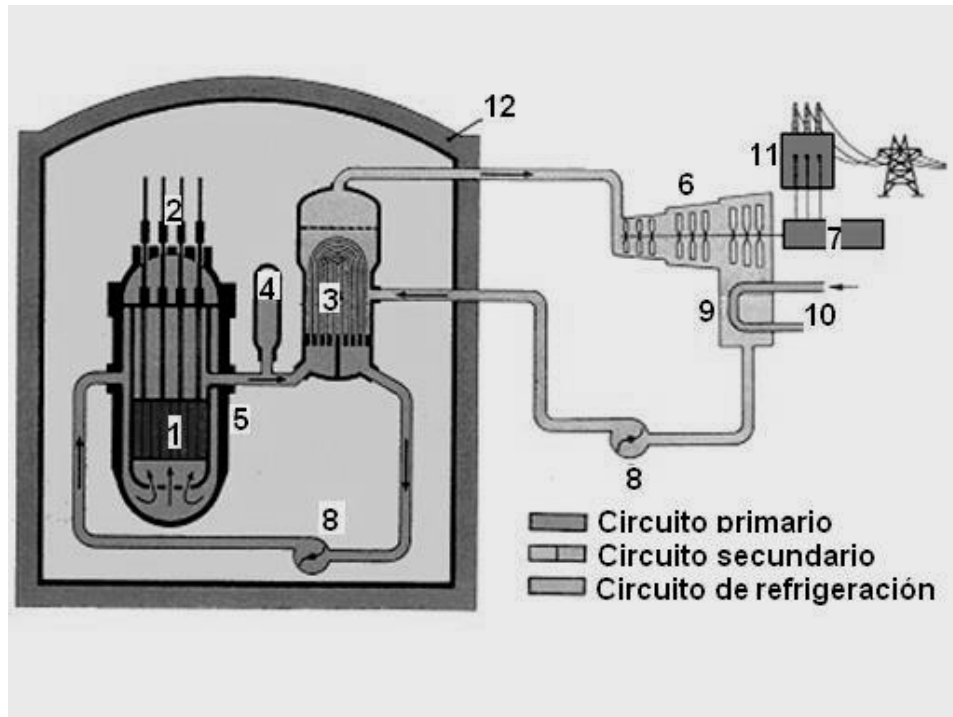
El tipo más común de reactor nuclear es el de agua presurizada, también conocido como de doble circuito de agua mostrado en la Fig. 3.4.

El combustible de un reactor nuclear, por ejemplo el Uranio, está ubicado dentro de unas vainas de un material especial, alrededor de las cuales circula el agua de refrigeración del circuito primario.

El circuito primario bombea agua fría al núcleo del reactor desde donde extrae el calor generado y pasa luego por los tubos del generador de vapor. Este circuito está presurizado, por lo que el agua permanece líquida aún a las temperaturas de salida elevadas.

En el circuito secundario el agua está a menor presión y se transforma en vapor al pasar por el generador de vapor. Este vapor es luego enfriado en el condensador por agua proveniente de un gran reservorio como por ejemplo un río o un lago. El agua así condensada es bombeada nuevamente hacia los generadores de vapor completando el circuito.

El vapor producido en el circuito secundario hace girar las turbinas, las que mueven a los generadores eléctricos produciendo la energía eléctrica que es enviada a la red a través de líneas de transmisión.



1. Núcleo del reactor.	5. Vasija.	9. Condensador.
2. Barras de control.	6. Turbina.	10. Agua de refrigeración.
3. Intercambiador de calor (generador de vapor).	7. Alternador.	11. Transformador.
4. Presionador.	8. Bomba.	12. Recinto de contención de hormigón armado.

Fig. 3.4 Partes de una central nucleoelectrica de doble circuito de agua.

3.2.3 OTROS USOS DE LA INDUSTRIA NUCLEAR

Gracias al uso de reactores nucleares, hoy en día es posible obtener importantes cantidades de material radiactivo a bajo costo, así mismo, desde finales de los años 40, se da un aumento en el empleo pacífico de diversos tipos de isótopos radiactivos en diversas áreas del quehacer científico y productivo del hombre. A continuación se hace un esbozo de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, aparte de la generación de electricidad.

EN AGRICULTURA Y ALIMENTACIÓN

Control de Plagas: Se sabe que algunos insectos pueden ser muy perjudiciales tanto para la calidad y productividad de cierto tipo de cosechas, como para la salud humana. En muchas regiones del planeta aún se les combate con la ayuda de gran variedad de productos químicos, muchos de ellos cuestionados o prohibidos por los efectos nocivos que producen en el organismo humano. Sin embargo, con la tecnología nuclear es posible aplicar la llamada "Técnica de los Insectos Estériles (TIE)", que consiste en suministrar altas emisiones de radiación ionizante a un cierto grupo de insectos machos mantenidos en laboratorio. Luego los machos estériles se dejan en libertad para facilitar su apareamiento con los insectos hembra. No se produce, por ende, la necesaria descendencia. De este modo, luego de sucesivas y rigurosas repeticiones del proceso, es posible controlar y disminuir su población en una determinada región geográfica. En Chile, se ha aplicado con éxito la técnica TIE para el control de la mosca de la fruta, lo que ha permitido la expansión de sus exportaciones agrícolas.

Mutaciones: La irradiación aplicada a semillas, después de importantes y rigurosos estudios, permite cambiar la información genética de ciertas variedades de plantas y vegetales de consumo humano. El objetivo de la técnica, es la obtención de nuevas variedades de especies con características particulares que permitan el aumento de su resistencia y productividad.

Conservación de Alimentos: En el mundo mueren cada año miles de personas como producto del hambre, por lo tanto, cada vez existe mayor preocupación por procurar un adecuado almacenamiento y mantenimiento de los alimentos. Las radiaciones son utilizadas en muchos países para aumentar el período de conservación de muchos alimentos. Es importante señalar, que la técnica de irradiación no genera efectos secundarios en la salud humana, siendo capaz de reducir en forma considerable el número de organismos y microorganismos patógenos presentes en variados alimentos de consumo masivo.

Hidrología: Gracias al uso de las técnicas nucleares es posible desarrollar diversos estudios relacionados con recursos hídricos. En estudios de aguas superficiales es posible caracterizar y medir las corrientes de aguas lluvias y de nieve; caudales de ríos, fugas en embalses, lagos y canales y la dinámica de lagos y depósitos. En estudios de aguas subterráneas es posible medir los caudales de las napas, identificar el origen de las aguas subterráneas, su edad, velocidad, dirección, flujo,

relación con aguas superficiales, conexiones entre acuíferos, porosidad y dispersión de acuíferos.

EN MEDICINA.

Vacunas: Se han elaborado radio-vacunas para combatir enfermedades parasitarias del ganado y que afectan la producción pecuaria en general. Los animales sometidos al tratamiento soportan durante un período más prolongado el peligro de re-infección siempre latente en su medio natural.

Medicina Nuclear: Se ha extendido con gran rapidez el uso de radiaciones y de radioisótopos en medicina como agentes terapéuticos y de diagnóstico. En el diagnóstico se utilizan radiofármacos para diversos estudios de: Tiroides, Hígado, Riñones, Metabolismo, Circulación sanguínea, Corazón, Pulmones, Tracto gastrointestinal. En terapia médica con las técnicas nucleares se puede combatir ciertos tipos de cáncer. Con frecuencia se utilizan tratamientos en base a irradiaciones con rayos gamma provenientes de fuentes de **Cobalto-60**, así como también, esferas internas radiactivas, agujas e hilos de Cobalto radiactivo. Combinando el tratamiento con una adecuada y prematura detección del cáncer, se obtienen terapias con exitosos resultados.

Radioinmunoanálisis: Se trata de un método y procedimiento de gran sensibilidad utilizado para realizar mediciones de hormonas, enzimas, virus de la hepatitis, ciertas proteínas del suero, fármacos y variadas sustancias. El procedimiento consiste en tomar muestras de sangre del paciente, donde con posterioridad se añadirá algún radioisótopo específico, el cual permite obtener mediciones de gran precisión respecto de hormonas y otras sustancias de interés.

Radiofármacos: Se administra al paciente un cierto tipo de fármaco radiactivo que permite estudiar, mediante imágenes bidimensionales (centelleografía) o tridimensionales (tomografía), el estado de diversos órganos del cuerpo humano.

De este modo se puede examinar el funcionamiento de la tiroides, pulmones, el hígado y riñones, así como el volumen y circulación sanguíneos. También, se utilizan radiofármacos como el Cromo-51 para la exploración del bazo, el Selenio-75 para el estudio del páncreas y el Cobalto-57 para el diagnóstico de la anemia.

MEDIO AMBIENTE.

En esta área se utilizan técnicas nucleares para la detección y análisis de diversos contaminantes del medio ambiente. La técnica más conocida recibe el nombre de Análisis por Activación Neutrónica, basado en los trabajos desarrollados en 1936 por el científico húngaro J.G. Hevesy, Premio Nobel de Química en 1944. La técnica consiste en irradiar una muestra a fin de obtener con posterioridad los espectros gamma que ella emite, para finalmente procesar la información con ayuda computacional. La información espectral identifica los elementos presentes en la muestra y las concentraciones de los mismos.

Una serie de estudios se han podido aplicar a diversos problemas de contaminación como las causadas por el bióxido de azufre, las descargas gaseosas a nivel del suelo, en derrames de petróleo, en desechos agrícolas, en contaminación de aguas y en el 'smog' generado por las ciudades.

INDUSTRIA E INVESTIGACIÓN.

Trazadores: Se elaboran sustancias radiactivas que son introducidas en un determinado proceso. Luego se detecta la trayectoria de la sustancia gracias a su emisión radiactiva, lo que permite investigar diversas variables propias del proceso. Entre otras variables se puede determinar caudales de fluidos, filtraciones, velocidades en tuberías, dinámica del transporte de materiales, cambios de fase de líquido a gas, velocidad de desgaste de materiales, etc.

Instrumentación: Son instrumentos radioisotópicos que permiten realizar mediciones sin contacto físico directo. Se utilizan indicadores de nivel, de espesor o bien de densidad.

Imágenes: Es posible obtener imágenes de piezas con su estructura interna utilizando radiografías en base a rayos gamma o bien con un flujo de neutrones. Estas imágenes reciben el nombre de Gammagrafía y Neutrografía respectivamente, y son de gran utilidad en la industria como método no destructivo de control de calidad. Con estos métodos se puede comprobar la calidad en soldaduras estructurales, en piezas metálicas fundidas, en piezas de cerámicas, para análisis de humedad en materiales de construcción, etc.

Datación: Se emplean técnicas isotópicas para determinar la edad en formaciones geológicas y arqueológicas. Una de las técnicas utiliza el Carbono-14, que consiste en determinar la cantidad de dicho isótopo contenida en un cuerpo orgánico. La radiactividad existente, debida a la presencia de Carbono-14, disminuye a la mitad cada 5730 años, por lo tanto, al medir con precisión su actividad se puede inferir la edad de la muestra.

Investigación: Utilizando haces de neutrones generados por reactores, es posible llevar a cabo diversas investigaciones en el campo de la ciencia de los materiales. Por ejemplo, se puede obtener información respecto de estructuras cristalinas, defectos en sólidos, estudios de monocristales, distribuciones y concentraciones de elementos livianos en función de la profundidad en sólidos, etc.

En el ámbito de la biología, la introducción de compuestos radiactivos marcados ha permitido observar las actividades biológicas hasta en sus más mínimos detalles, dando un gran impulso a los trabajos de carácter genético.

3.3 TIPOS DE RADIACIÓN

Uno de los inconvenientes de las instalaciones nucleares es la radiación la cual hemos escuchado nombrar un sinfín de ocasiones, pero es importante conocer la naturaleza de éstas para entender a la energía nuclear.

Existen varios tipos de radiación, de diferentes capacidades de penetración en diferentes materiales como se muestra en la Fig. 3.5:

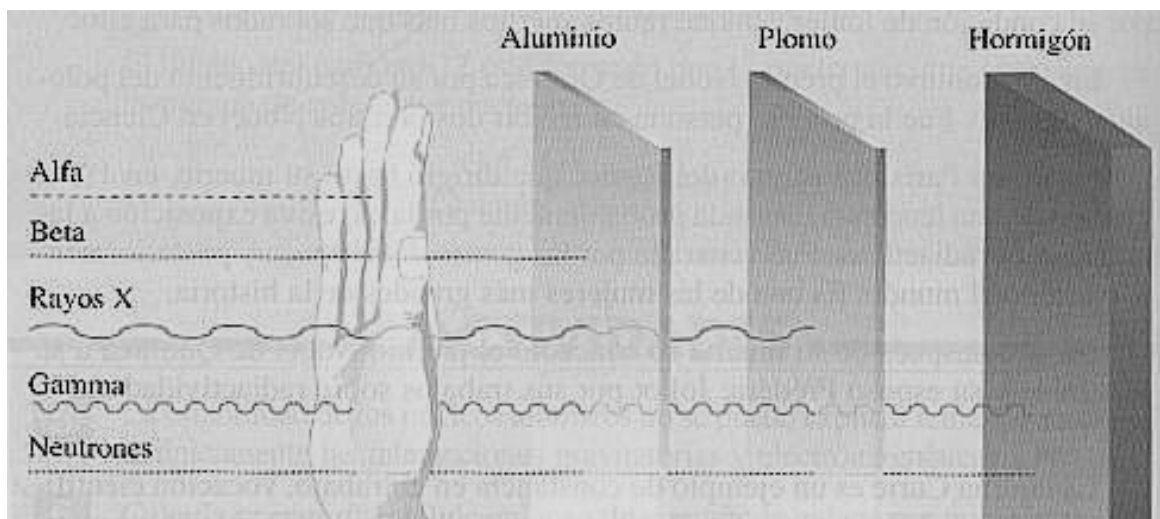


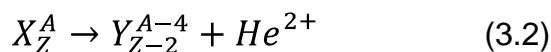
Figura 3.5 Existen diversos tipos de radiaciones que son capaces de penetrar diferentes materiales.

Radiación alfa

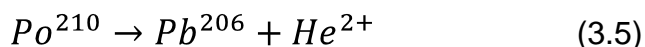
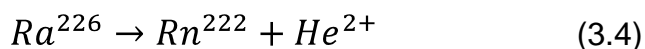
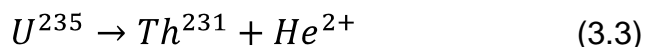
Es un tipo de radiación poco penetrante que puede ser detenida por una simple hoja de papel. Rutherford sugirió que los rayos alfa son iones de átomos de Helio (He^{2+}) moviéndose rápidamente, y en 1909 lo demostró experimentalmente.

Este tipo de radiación la emiten núcleos de elementos pesados situados al final de la tabla periódica (Número atómico >100). Estos núcleos tienen muchos protones y la repulsión eléctrica es muy fuerte, por lo que tienden a obtener N aproximadamente igual a Z, y para ello emite una partícula alfa (una partícula alfa está formada por dos neutrones y dos electrones). En el proceso se desprende mucha energía que se convierte en la energía cinética de la partícula alfa, es decir, que estas partículas salen con velocidades muy altas.

En el proceso un núcleo cualquiera de número másico A y número atómico Z, se convierte en otro núcleo con número másico A-4 y número atómico Z-2, y se emite una partícula alfa.



Como ejemplo tendríamos las siguientes desintegraciones:



Radiación beta

Su poder de penetración es mayor que las alfa. Son frenadas por metros de aire, una lámina de aluminio o unos centímetros de agua. Existen tres tipos de radiación beta:

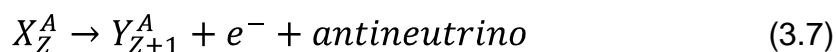
- Radiación Beta menos
- Radiación Beta mas
- Captura electrónica

La radiación beta aparece para cualquier tipo de núcleo, pero es típica de núcleos con exceso de neutrones, es decir $N > Z$. Es un mecanismo usado por los núcleos para llegar a la línea de estabilidad (N aproximadamente igual Z).

La radiación Beta⁻ consiste en la emisión espontánea de electrones por parte de los núcleos, pero en el núcleo sólo hay protones y neutrones, ¿cómo puede emitir electrones? En 1934 Fermi explicó esta radiación suponiendo que en la desintegración beta menos, un neutrón se transforma en un protón, un electrón y un antineutrino mediante la reacción:

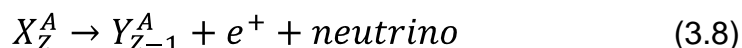


La emisión beta menos da como resultado otro núcleo distinto con un protón más, la reacción sería:



Mediante la radiación beta un núcleo emite espontáneamente positrones, e^+ , antipartículas del electrón de igual masa pero con carga eléctrica opuesta.

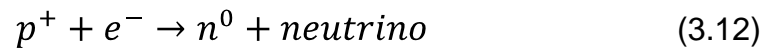
Lo que ocurre es que un protón del núcleo se desintegra dando lugar a un neutrón, un positrón o partícula Beta y un neutrino. Así el núcleo se desprende de los protones que le sobran y se acercan a la línea de estabilidad $N = Z$. Por ello se da en núcleos con exceso de protones. La reacción sería:



Algunos ejemplos son:



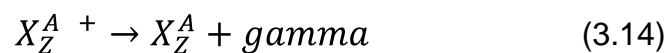
La captura electrónica se da en núcleos con exceso de protones. El núcleo captura un electrón de la corteza electrónica, que se unirá a un protón del núcleo para dar un neutrón.



Radiación gamma

En este tipo de radiación el núcleo no pierde su identidad. Mediante esta radiación el núcleo se desprende de la energía que le sobra para pasar a otro estado de energía más baja. Emite rayos gamma, o sea fotones muy energéticos. Este tipo de emisión acompaña a las radiaciones alfa y beta.

Es una radiación muy penetrante, atraviesa el cuerpo humano y sólo se frena con planchas de plomo y muros gruesos de hormigón. Al ser tan penetrante y tan energética, de los tres tipos de radiación es la más peligrosa.



CAPÍTULO 4

REACCIONES NUCLEARES

Anteriormente se ha hablado de algunas reacciones nucleares, pero es hasta este capítulo donde se tratará de manera más detallada las características de este tipo de reacciones.

Primeramente cabe señalar que como su nombre lo sugiere, las reacciones nucleares son interacciones que se llevan a cabo en el interior del núcleo del átomo de algún o algunos tipos de elementos.

Como lo sugiere la famosa ecuación desarrollada por Albert Einstein que relaciona la masa y la energía:

$$E = mc^2 \quad (3.1)$$

La masa se puede transformar en energía. Desgraciadamente no es posible convertir íntegramente una cantidad de masa dada en energía debido a que existe un principio de conservación en física nuclear conocido como principio de conservación del número bariónico. Los bariones son partículas pesadas, como por ejemplo los protones y los neutrones. Este principio implica que en toda reacción nuclear el número de bariones inicial y final debe ser el mismo. Por ejemplo, la Fig. 4.1 ilustra una reacción nuclear de fusión en la cual un átomo de deuterio y uno de tritio se combinan para producir un átomo de helio, un neutrón y liberar 17.58 MeV (**1 eV = 1.6×10^{-19} joule**) de energía. Se puede ver que antes y después de la reacción se tiene la participación total de tres neutrones y de dos protones. Pero entonces ¿cuál fue la masa que se convirtió en energía? La respuesta a esta pregunta es clara si se toma en cuenta que el tener una estructura nuclear también requiere de cierta energía, es decir, hay que pensar que una estructura nuclear no sólo es la adición de varias partículas sino que, además, su energía es la suma de las energías de las partículas individuales más la energía que requieren para constituir una estructura.

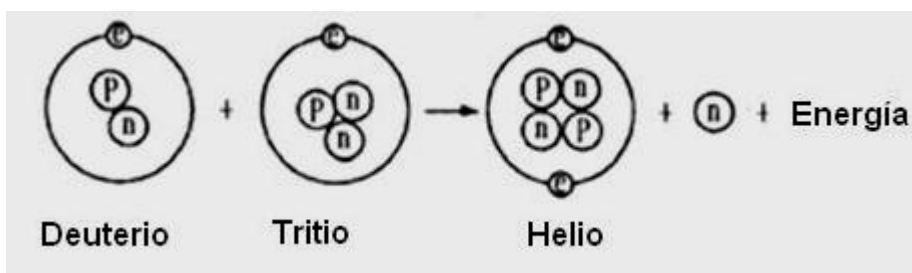
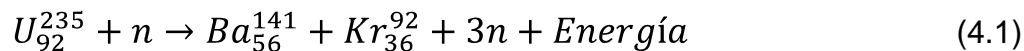


Fig. 4.1 Antes y después de la reacción de Fusión Nuclear el número de neutrones y protones es el mismo: 5.

Existen dos tipos de reacciones nucleares, las cuales son las reacciones nucleares a saber: de fisión y de fusión, las cuales a continuación se analizarán.

4.1 REACCIONES DE FISIÓN NUCLEAR.

Una reacción nuclear de fisión característica, como la que ocurre en muchos reactores nucleares, es:



La Fisión Nuclear es la reacción nuclear utilizada actualmente en las centrales nucleares. La Fisión Nuclear consiste en que cuando un átomo pesado (como por ejemplo el Uranio o el Plutonio) se divide o rompe en dos átomos más ligeros, la suma de las masas de estos últimos átomos obtenidos, más la de los neutrones desprendidos es menor que la masa del átomo original (defecto de masa), luego se verifica la ecuación de Albert Einstein $E=mc^2$, con lo que se desprende Energía. Para romper un átomo, se emplea un neutrón (ya que es neutro eléctricamente, y no es desviado de su trayectoria), que se lanza contra el átomo para romper, por ejemplo, Uranio. Al chocar el neutrón, el átomo de Uranio-235 se convierte en Uranio-236 durante un brevísimo espacio de tiempo, pues tiene un neutrón más que es el que ha chocado con él, siendo este último átomo sumamente inestable, dividiéndose en dos átomos diferentes y más ligeros que el Uranio-236 (por ejemplo Kriptón y Bario; o Xenón y Estroncio), desprendiendo 2 ó 3 neutrones y liberando energía. Los neutrones desprendidos, dependen de los átomos obtenidos, se tomará como ejemplo 3 neutrones, pero puede ser que solamente se desprendan 2. En caso de obtener Bario y Kriptón, se desprenden 3 neutrones; mientras que si se obtiene Xenón y Estroncio, sólo se liberan 2 neutrones. Estos 3 neutrones, vuelven a chocar con otros 3 átomos de Uranio-235, liberando en total 9 neutrones, energía y otros dos átomos más ligeros, y así sucesivamente, generando de esta forma una reacción en cadena.

Como se puede comprobar, en cada reacción sucesiva, se rompen 3^{n-1} átomos, donde n es $1^0, 2^0, 3^0, 4^0, \dots$, reacción, a este fenómeno se le llama reacción en cadena y se muestra en la Fig. 4.2, que dicho de otro manera es la reacción de todos los átomos contenidos en el combustible de manera que cada neutrón desprendido golpea un núcleo hasta que se agotan los núcleos, generalmente esta reacción ocurre de manera muy rápida y la energía se libera de manera incontrolada (en las bombas nucleares) o de forma controlada (en los reactores nucleares). De esta forma, donde más energía se libera es al final, ya que se rompen gran cantidad de átomos, según la relación 3^{n-1} , liberándose gran cantidad de energía.

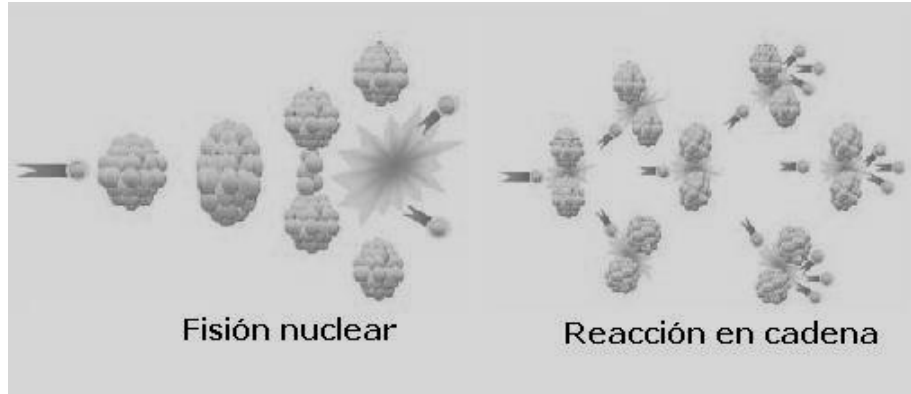


Fig. 4.2 La reacción en cadena se caracteriza por rompen más núcleos después de cada fisión.

4.2 REACCIONES DE FUSIÓN NUCLEAR

La Fusión Nuclear es un proceso consistente en la unión de dos núcleos de átomos ligeros en uno más pesado. La energía liberada en este proceso es del orden de 4 veces mayor que la liberada en la fisión. La más sencilla de las reacciones de Fusión, es aquella en la que núcleos de dos isótopos del hidrógeno (Deuterio y Tritio) se fusionan para dar lugar a un núcleo de Helio y un neutrón, Fig. 4.3. La reacción de Fusión es la que se produce en el Sol constantemente.

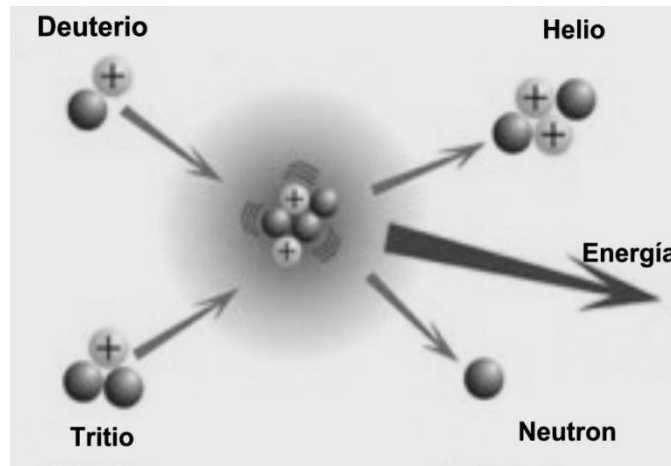
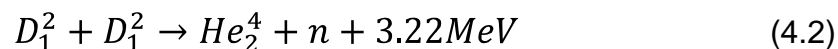


Fig. 4.3 Ilustración de una reacción de fusión Deuterio-Tritio.

Como se mencionó anteriormente, la Fusión Nuclear es el proceso de combinación de dos núcleos ligeros para formar uno más pesado, con el desprendimiento de energía correspondiente a la diferencia entre la energía de ligadura de los productos y la suma de las energías de la ligadura de los dos núcleos ligeros. Se puede poner como ejemplo la reacción de fusión nuclear:



Estas reacciones sólo pueden tener lugar si los núcleos reactantes poseen la energía suficiente para superar la fuerza de repulsión de Coulomb.

La Fusión Nuclear está actualmente en líneas de investigación, debido a que todavía hoy no es un proceso viable, ya que se invierte más energía en el proceso para que se produzca la fusión, que la energía obtenida mediante este método.

La Fusión es un proceso natural en estrellas, produciéndose reacciones nucleares por fusión debido a la elevadísima temperatura de estas estrellas, que están compuestas principalmente por Hidrógeno y Helio. El hidrógeno, en condiciones normales de temperatura, se repele entre sí cuando se intenta unirlo (fusionarlo) a otro átomo de hidrógeno, debido a su repulsión electrostática. Para vencer esta repulsión electrostática, el átomo de hidrógeno debe chocar violentamente contra otro átomo de hidrógeno, fusionándose, y dando lugar a Helio, que no es fusionable. La diferencia de masa entre el átomo obtenido y el original es mayor que en la fisión, liberándose así una gran cantidad de energía (muchísimo mayores que en la fisión). Estos choques violentos, se consiguen con una elevada temperatura, que excita los átomos de hidrógeno, y se mueven muy rápidamente, chocando unos contra otros.

La primera reacción de fusión realizada por el ser humano, tuvo origen militar, con una bomba termonuclear (o también llamada bomba-H o de Hidrógeno), que para obtener la temperatura adecuada (casi la del Sol, unos 20 millones de grados centígrados), se utilizó una bomba atómica. Esta bomba termonuclear libera grandes cantidades de energía. Las bombas termonucleares actuales, alcanzan los 60 megatonnes (equivalente a 60 millones de toneladas de explosivo TNT), lo cual puede arrasarlo todo lo que haya en un radio de 40 ó 50 Kilómetros a la redonda, eso sin incluir la radiación electromagnética y la onda expansiva, así como la lluvia ácida.

Un ejemplo para visualizar más claramente de donde proviene la energía de la fusión nuclear correspondiente a la ecuación de Einstein es el siguiente: un electrón, un neutrón y un protón pueden constituir un átomo de hidrógeno más un neutrón libre o un átomo de deuterio, como se muestra en la Fig. 4.4. Sin embargo, la masa de un átomo de deuterio es de 2.014102 u ($1 \text{ u} = 1.6604 \times 10^{-27} \text{ kg}$), mientras que la masa de un átomo de hidrógeno más la de un neutrón es:

$$\begin{aligned} \text{MASA (hidrógeno)} + \text{MASA(neutrón)} &= 1.007825\text{u} + 1.008665 \text{ u} \\ &= 2.016490 \text{ u} \end{aligned}$$

Que es ¡0.002388 u mayor! A esta diferencia se le conoce como defecto de masa y esta masa, que tiene su origen en la energía nuclear de enlace entre las partículas, es la que se libera en una reacción nuclear. Así, tenemos que $0.002388 \text{ u} = 2.23 \text{ MeV}$; por tanto, cuando un núcleo del átomo de deuterio (llamado deuterón) se forma a partir de un protón libre y un neutrón, se liberan 2.23 MeV. Inversamente, hay que proporcionar 2.23 MeV para obtener un protón y un neutrón a partir de un deuterón.

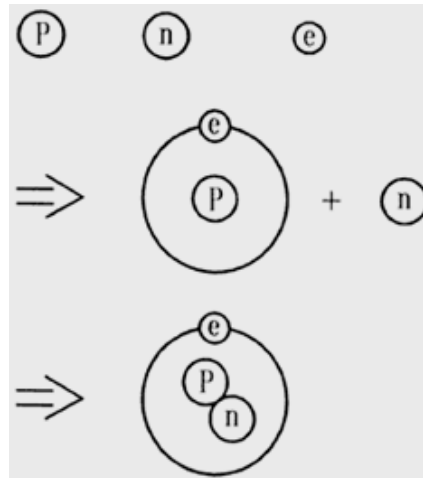


Figura 4.4 Fusión de un electrón, un protón y un neutrón.

La equivalencia del defecto de masas anterior en energía se puede ver de la siguiente manera:

Defecto de masa estudiado = 0.02388 u ($1 \text{ u} = 1.6604 \times 10^{-27} \text{ kg}$)

Energía estudiada = 2.23 MeV ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joule}$)

Se tiene que:

$$0.002388u = 0.002388u \frac{1.6604 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1u} = 3.965 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

$$2.23 \text{ MeV} = 2.23 \times 10^6 \text{ eV} \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 3.568 \times 10^{-13} \text{ J}$$

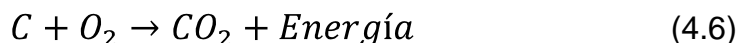
Aplicando la ecuación de Einstein se tiene:

$$E = (3.965 \times 10^{-30} \text{ kg})(3 \times 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 3.5685 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Se observa claramente que la reacción nuclear de fusión se rige por esta ecuación de Albert Einstein, la cual da origen al cálculo de la energía obtenida por medio de reacciones nucleares.

4.3 COMPARACIÓN ENTRE LAS REACCIONES NUCLEARES Y REACCIONES QUÍMICAS

Cuando se quema carbón, gasolina, madera, o bien cuando se hace explotar pólvora o dinamita, se libera energía. Una pregunta cuya respuesta es muy importante para los objetivos de este trabajo es: ¿en estos ejemplos de dónde procede la energía liberada? Para responder a esta preguntase puede tomar un caso particular: la combustión del carbón. En este proceso cada átomo de carbón se combina con dos átomos de oxígeno que son tomados del medio ambiente, dando como resultado una molécula de bióxido de carbono, como se muestra en seguida:



Es importante notar que, en sí mismos, los núcleos de los átomos de carbono y de oxígeno no sufren ninguna alteración en la reacción. Si ahora se calcula la energía total antes y después de la reacción, se tendrá que la energía total del átomo de carbono y de la molécula de oxígeno es mayor que la energía de la molécula de bióxido de carbono resultante. Sin embargo, dado que la energía no se puede crear ni destruir sino sólo transformar, se puede concluir que la diferencia de energía antes y después de la reacción química, es la energía liberada en forma de calor al ocurrir la combustión del carbón.

La molécula de bióxido de carbono se mantiene unida debido a las fuerzas de enlace electrónico que existen entre los tres átomos de la molécula. Después de ocurrir la reacción química, los electrones que inicialmente giraban en torno de los núcleos de los átomos originales, describen complicadas trayectorias alrededor de los tres núcleos de la molécula de bióxido de carbono que se formó, manteniendo así su unidad.

Se debe destacar una vez más que en cualquier reacción química la estructura interna de los núcleos de los átomos participantes no se modifica en absoluto. Como se verá en seguida, los núcleos de los átomos que intervienen en la reacción sólo se modifican cuando ocurren reacciones nucleares; en las reacciones químicas los núcleos no cambian.

La energía que mantiene unidos los átomos de una molécula es mucho menor que la energía que une los protones y neutrones del núcleo de un átomo. Existen reacciones químicas mediante las cuales es posible liberar la energía de las moléculas, y existen reacciones nucleares que logran liberar la energía de los núcleos. Dada la naturaleza distinta del enlace químico y del enlace nuclear, una reacción nuclear desarrolla una cantidad de energía incomparablemente mayor que una reacción química. La energía liberada por una reacción nuclear es varios millones de veces mayor que la liberada por una reacción química.

La energía producida por la fisión de 1 kg de Uranio-235, es equivalente a la energía que se puede obtener de la combustión de 2 400 toneladas de carbón. El desarrollo de energía va acompañado de una desaparición de masa, según la ley de equivalencia entre masa y energía descubierta por Albert Einstein, la famosa fórmula

$E=mc^2$, donde E es la Energía liberada, m la diferencia de masa o incremento de masa, y c es la velocidad de la luz. Esta ecuación significa que la masa se puede transformar en Energía y al revés, la energía en masa. Según esta fórmula, cuando en un proceso se pierde masa, ésta no desaparece, sino que, se transforma en energía, según la fórmula anterior. Según ésta, una pequeña cantidad de masa libera gran cantidad de energía, ya que la velocidad de la luz al cuadrado es: 90.000.000.000.000.000, que al multiplicarlo por la masa, resulta una energía grande en comparación con la masa transformada. Por ejemplo, si se transforma un miligramo de masa en energía, se tendrá que la Energía liberada es:

$$E = 0.000001\text{Kg} \times 90.000.000.000.000.000 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 90.000.000.000 \text{ julios} = 90 \text{ giga julios.}$$

Para darse una idea de la energía desprendida, supóngase que se tiene un reactor nuclear que es capaz de transformar un miligramo de masa en energía en una hora, y que se aprovecha toda la energía. La potencia estará dada por $W = E / T$, donde E es la Energía y T el tiempo. Una hora son 3.600 segundos, luego $W = 90.000.000.000 / 3600 = 25.000.000 \text{ Watios} = 25 \text{ megawatios}$. Una casa convencional, consume unos 3,3 kilowatios/hora. Considerando lo anterior, se tiene que con esa energía se podría satisfacer a 7.576 hogares que cuenten con un TV, horno, refrigerador, estufa, etc., aunque tomando en cuenta que no llegan a la máxima potencia, ya que casi nunca se llega a 3300 watios/hora, y que por la noche apenas consumen energía, se podría satisfacer a más del doble de hogares. En las centrales nucleares, hay muchos cilindros de Uranio, y con ello se consigue una gran cantidad de energía, ya que se puede tener una potencia de unos 900 megawatios, siendo la energía suministrada por las centrales nucleares.

Ahora que se conocen las reacciones nucleares es posible hacer una comparación de éstas con respecto a las reacciones químicas de combustión mencionadas en este tema, esta comparación se puede ver claramente en las tablas T-4.1 y T-4.2.

Reacción Nuclear	Reacción química ordinaria
1.) Los elementos pueden transformarse uno en otro.	1.) No pueden producirse elementos nuevos.
2.) Participan partículas del interior del núcleo.	2.) Por lo general, sólo participan los electrones más externos
3.) Se liberan o absorben cantidades considerables de energía.	3.) Se liberan o absorben cantidades relativamente pequeñas de energía.
4.) La velocidad de reacción no depende de factores externos.	4.) La velocidad de reacción depende de factores como concentración, temperatura, catalizador y presión.

Tabla T-4.1 Diferencias entre las reacciones químicas de combustión y las reacciones nucleares.

Combustible	CARBÓN	FUEL-OIL	URANIO
Consumo medio	380 gr.Kw/h	230 gr.Kw/h	4,12 mg.Kw/h
Consumo anual	2.500.000 toneladas	1.520.000 toneladas	27,2 toneladas
Transporte anual	66 barcos de 35.000 t. o 23.000 vagones de 100 t.	5 petroleros de 300.000 t. + oleoductos	3 ó 4 camiones
CO₂	7.800.000 toneladas	4.700.000 toneladas	Cero
SO₂	39.800 toneladas	91.000 toneladas	Cero
NO₂	9.450 toneladas	6.400 toneladas	Cero
Cenizas de filtros	6.000 toneladas	1.650 toneladas	Cero
Escorias	69.000 toneladas	Despreciables	Cero
Cenizas volantes	377.000 toneladas	Cero	Cero
Radiación(g)	0,02-6 Curios/año	0,001 Curios/año	1,85 Curios/año
Radiación(l)	Cero	Cero	0,1 Curios/año
Radiación(s)	Despreciable	Cero	13,5 m ³ (alta) 493 m ³ (media y baja)

Tabla T-4.2.- Consumos y residuos de carbón, fuel-oil y uranio para una central tipo 1000 MW

Como se puede observar la implementación de la energía nuclear puede traer grandes beneficios para la producción de energía en todo el mundo, entre las cuales se contemplan la gran cantidad de energía que se puede generar para satisfacer la demanda por parte de la población, la disminución de contaminantes que se liberan a la atmósfera y la consecuente detención de calentamiento global del planeta.

Ahora que ya se conocen los beneficios que puede proporcionar la energía nuclear, se estudiará más a fondo la segunda opción de la energía nuclear, la cual puede proporcionar más beneficios a un costo menor, con el consumo de recursos de gran abundancia en la tierra, a saber la Fusión Nuclear.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO DE LA FUSIÓN NUCLEAR

La fusión nuclear es la unión de dos átomos ligeros para formar uno más pesado, pero como ya se ha mencionado esta unión se lleva a cabo en los núcleos atómicos. Para entender cómo se puede llevar a cabo dicha unión, es necesario conocer las fuerzas que actúan a nivel atómico, las cuales son indispensables para comprender la Fusión Nuclear.

5.1 FUERZAS ELECTROSTÁTICAS

Las fuerzas electrostáticas son las fuerzas que presentan las partículas de acuerdo a su carga eléctrica, siendo bien conocidas y se comportan de tal manera que al acercarse dos partículas del mismo signo, éstas presentan una repulsión entre ellas, mientras que si las partículas que se acercan tienen cargas eléctricas diferentes, habrá entre éstas una fuerza de atracción.

Sabiendo que los electrones tienen carga eléctrica negativa, los protones carga eléctrica positiva y que los neutrones no tienen carga eléctrica, es fácil suponer que al acercarse dos núcleos atómicos (ambos con carga eléctrica positiva) habrá una repulsión entre ellos y se alejarán por la interacción de las fuerzas electrostáticas.

Sin embargo, para llevar a cabo la fusión nuclear es necesario acercarse los núcleos atómicos para que estos se fusionen, se puede llevar a cabo la fusión gracias a la existencia de las llamadas fuerzas nucleares.

5.2 FUERZAS NUCLEARES

Dado que las cargas eléctricas de signos opuestos se atraen y que las de signos iguales se repelen, debe haber algo que permita que los protones permanezcan juntos en el núcleo de un átomo.

La respuesta es que los núcleos de los átomos del Universo son estables debido a que existe otra fuerza, diferente y mucho más intensa que la fuerza electrostática de repulsión entre los protones: la fuerza nuclear. Las fuerzas nucleares son fuerzas atractivas muy intensas y de muy corto alcance pues su radio de acción se limita a los confines del propio núcleo atómico; es decir, esta fuerza atractiva intensa actúa solamente a distancias menores de 10^{-15} metros (el diámetro característico de un núcleo atómico). Las fuerzas nucleares son las que mantienen unidos a los protones y demás nucleones que constituyen los núcleos atómicos. Estas fuerzas son aproximadamente 137 veces más fuertes que las electrostáticas; sin embargo, como ya se ha dicho, tienen un alcance muy corto. Por lo tanto, si se colocan dos protones a una distancia mayor de 10^{-15} metros, una fuerza electrostática repulsiva actuará entre éstos y se alejarán uno del otro. Pero si se colocan dos protones a una

distancia menor de 10^{-15} metros, estas partículas permanecerán unidas debido a la enorme fuerza nuclear atractiva. Las situaciones descritas se ilustran en la Fig. 5.1.

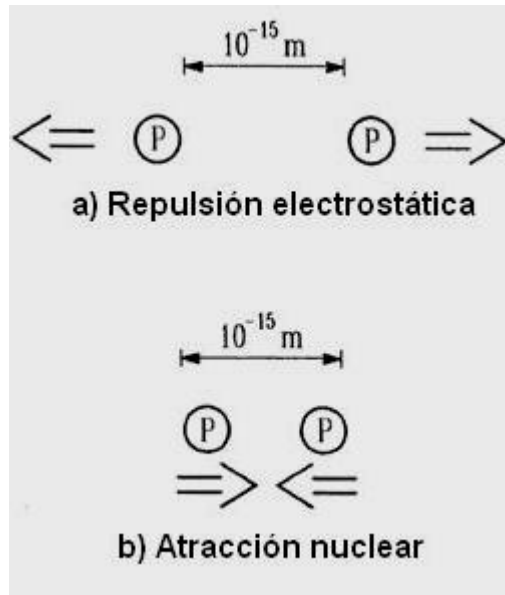


Fig. 5.1 Las fuerzas de atracción nuclear actúan en partículas con mismo signo eléctrico pero solo a distancias menores que 10^{-15} metros.

5.3 REACCIÓN DEUTERIO-TRITIO

No todas las reacciones de fusión producen la misma energía, depende siempre de los núcleos que se unen y de los productos de la reacción. La reacción más fácil de conseguir es la del deuterio (un protón más un neutrón) y la del tritio (un protón y dos neutrones) para formar helio (dos neutrones y dos protones) y un neutrón, liberando una energía de 17,6 MeV ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$), mostrada en la Fig.5.2.

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

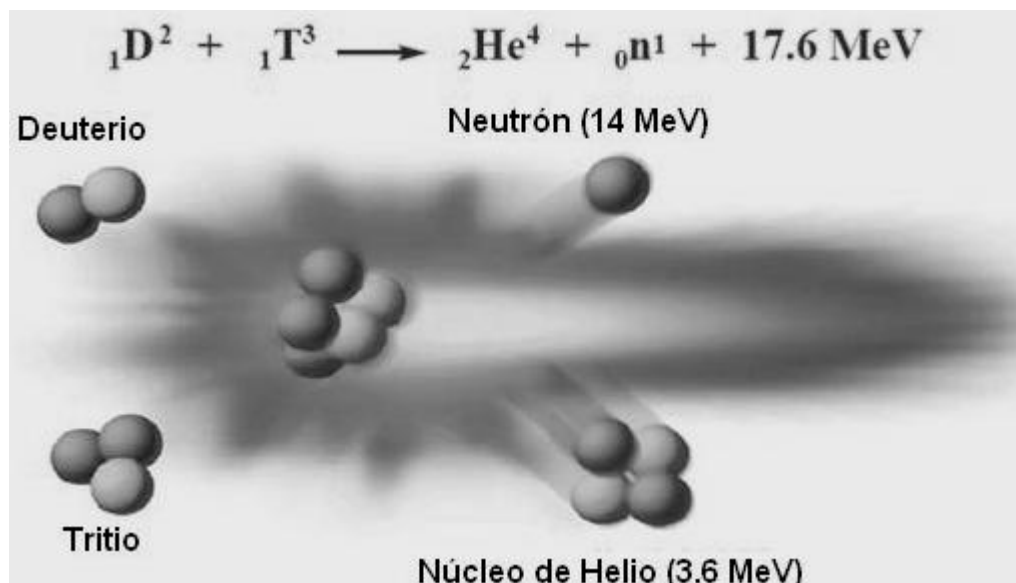
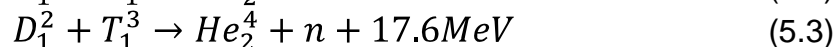
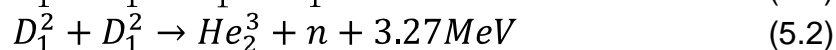
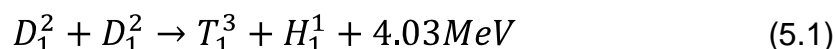


Fig. 5.2 La reacción de Fusión Nuclear Deuterio-Tritio proporciona 17.6 MeV.

Por otra parte, ejemplos característicos de reacciones de fusión son los siguientes:



Como puede observarse, la mayoría de las reacciones nucleares de fusión conocidas consisten en la unión de dos isótopos del hidrógeno, el Deuterio y el Tritio, motivo por el que es importante el estudio de dichos isótopos.

5.3.1 DEUTERIO

El deuterio, cuyo símbolo es H_1^2 , es un isótopo estable del hidrógeno que se encuentra en la naturaleza con una abundancia de uno de cada 6500 (0,015%) átomos de hidrógeno. El núcleo del deuterio está formado por un protón y un neutrón (el hidrógeno tiene un solo protón). Cuando el isótopo pierde su electrón el ion resultante recibe el nombre de deuterón.

El deuterio también recibe el nombre de hidrógeno pesado. Aunque no es un elemento en el sentido estricto (es hidrógeno) se suele nombrar con la letra D. La diferenciación entre las propiedades de los isótopos es tanto más acusada cuanto más ligero sea el elemento químico al que pertenecen. En el caso del deuterio las diferencias son máximas ya que tiene el doble de masa atómica que el hidrógeno.

El Deuterio fue detectado por Harold Clayton Urey, un químico de la Universidad de Columbia. Urey ganó, en 1934, el Premio Nobel de química por este trabajo.

La existencia del deuterio en la tierra, en otras partes del Sistema Solar (según lo confirmado por las sondas planetarias), y en los espectros de estrellas, es un dato importante en cosmología. La fusión estelar destruye el deuterio, y no hay procesos naturales conocidos con excepción de la nucleosíntesis, que pudieran haber producido el deuterio en la abundancia natural en la que se presenta este isótopo. Esta abundancia parece ser una fracción muy similar a la del hidrógeno, dondequiera que se encuentre éste. Así, la existencia del deuterio es una de las discusiones a favor de la teoría del Big Bang en vez de la teoría del estado estacionario del universo.

El deuterio combinado con el oxígeno forma agua pesada.

El Deuterio es útil en los procesos de fusión nuclear junto con el Tritio debido al gran rango de probabilidad reacción eficaz. También se experimenta con él en otras reacciones como la Deuterio + Deuterio o Deuterio + Helio-3.

En química y bioquímica, el Deuterio se utiliza en moléculas como trazalíneas isotópico no radiactivo, para estudiar reacciones químicas y cambios metabólicos, debido a que químicamente se comporta en forma semejante al hidrógeno ordinario, pero puede ser distinguido de éste por su masa, usando espectrometría de masa o espectrometría infrarroja.

5.3.2 TRITIO

El Tritio es un isótopo natural del hidrógeno y es radiactivo. Su símbolo es H_1^3 . Su núcleo consta de un protón y dos neutrones. Tiene una semivida de uno a tres años. El Tritio se produce por bombardeo con neutrones de blancos de Litio, Boro o Nitrógeno.

Al tener en su núcleo dos neutrones que participan en la interacción fuerte, y sólo un protón cargado eléctricamente, con el Tritio se puede realizar fusión nuclear más fácilmente que con el isótopo más común del hidrógeno (Hidrógeno-1).

El Tritio (Hidrógeno-3) es producido naturalmente por la acción de rayos cósmicos sobre gases atmosféricos. También puede ser obtenido artificialmente en laboratorio.

Es un gas incoloro e inodoro, más liviano que el aire. Está presente en el aire y en el agua formando el compuesto conocido como agua tritiada en todo el mundo, y es habitualmente ingerido e inspirado por todos los seres vivientes los cuales poseen trazas de tritio, así como de otros isótopos radiactivos que se producen de forma natural.

Muchos isótopos son estables y mantienen su estructura indefinidamente. Sin embargo, algunos isótopos, incluido el tritio, no son estables y se dice que son radiactivos. A medida que el núcleo del tritio se degrada, emite un electrón, causando

una liberación de energía en forma de radiación beta. Se forma entonces un nuevo núcleo con dos protones y un neutrón, de forma tal que se convierte en una forma no radiactiva de helio (Helio-3).

El tritio produce emisiones beta de baja energía y no emite ningún otro tipo de radiación primaria. De hecho, el tritio emite el nivel más bajo de energía por radiación beta de todos los isótopos (en la práctica implica que sus partículas beta son fácilmente detenidas por capas finas de cualquier material sólido). A pesar de ello el tritio es radiotóxico por inhalación e ingestión.

Como anteriormente se mencionó, para que ocurra una reacción de fisión como la mostrada, se requiere de la presencia de un neutrón que inicie la reacción. Sin embargo, para que se produzca una reacción de fusión como la mostrada en la Fig. 5.2, se debe primero acercarse a los núcleos reactantes lo suficiente para que actúen entre ellos las fuerzas nucleares (que son de muy corto alcance) y pueda de este modo ocurrir la reacción de fusión. Acercar los núcleos es difícil debido a que existe una fuerte repulsión electrostática entre ellos. Este fenómeno se puede ver claramente en la Fig. 5.3, a gran distancia prácticamente no hay fuerza entre ellos, sin embargo, al acercarlos empieza a crecer la fuerza electrostática de repulsión, hasta que se llega una distancia R a partir de la cual empiezan a actuar las fuerzas nucleares que son fuertemente atractivas.

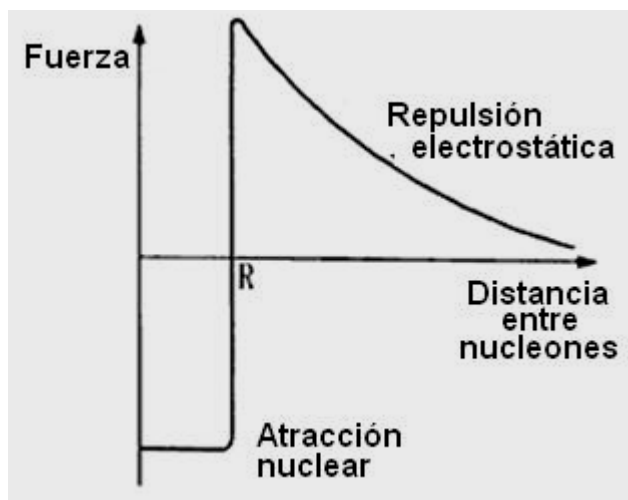


Fig. 5.3. La atracción nuclear actúa únicamente a una distancia entre nucleones muy corta.

Por lo tanto, para que existan reacciones de Fusión es necesario proporcionar a las partículas reactantes suficiente energía para que puedan sobrepasar la repulsión electrostática y acercarse lo suficiente como para llegar a la región donde actúan las fuerzas nucleares. El proporcionar esta energía implica un gran problema pues se requiere aumentar la temperatura de las partículas reactantes entre 50 y o 100 millones de grados centígrados. Por ejemplo, para lograr que una bomba H de fusión explote es necesario primero "calentar" el combustible nuclear de fusión a los 50 o 100 millones de grados centígrados requeridos, lo cual sólo puede hacerse detonando primero una bomba A de Fisión.

Por otra parte, para lograr que las reacciones de fusión ocurran de modo eficiente, también es necesario alcanzar una concentración mínima de partículas durante un tiempo suficientemente largo. Esta última condición se conoce como el **criterio de Lawson**, el cual establece que el producto de la densidad (partículas por unidad de volumen) y del tiempo de confinamiento (medido en segundos) debe exceder un valor de 10^{14} (partículas/ (segundo cm^3)) para reacciones de Deuterio-Tritio, y de 10^{16} (partículas/ (segundo cm^3)) para reacciones de Deuterio-Deuterio. El hecho de que sea más difícil lograr reacciones de fusión en mezclas de Deuterio-Deuterio se puede ver en la Fig.5.4, donde en el eje vertical se muestra la probabilidad de colisión por unidad de tiempo entre los núcleos, y en el eje horizontal la temperatura a la que se encuentran. Se puede notar que para una misma temperatura se obtienen más reacciones entre núcleos de deuterio-tritio que entre deuterio-deuterio. Debido a esto todos los intentos actuales de fusión están basados en la reacción entre deuterio y tritio.

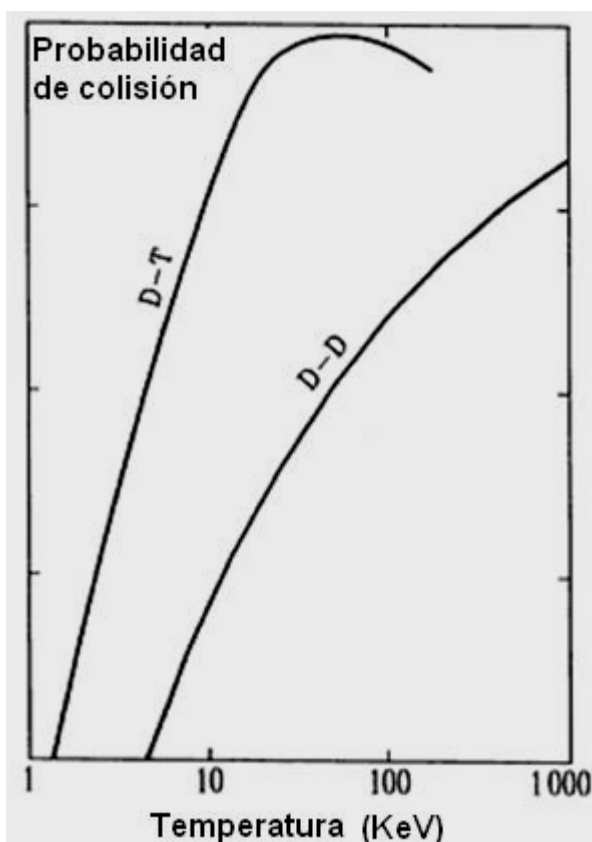


Fig. 5.4 La probabilidad de que las fusiones nucleares D-T se presenten de manera exitosa son mayores y a una temperatura menor que las reacciones D-D.

Entonces, para que una reacción de fusión ocurra se debe de calentar la mezcla de combustible hasta una temperatura de varios millones de grados, con lo cual se llega al cuarto estado de la materia, conocido como plasma.

5.4 EL PLASMA TERMONÚCLEAR

Cualquiera sustancia que se calienta a una temperatura entre 50 y 100 millones de grados se convierte en lo que se llama plasma. Es decir, se vuelve una sustancia compuesta esencialmente por núcleos y electrones libres. El plasma se conoce también como el cuarto estado de la materia, donde el primero, segundo y tercero estados son, respectivamente: el estado sólido, el líquido y el gaseoso.

Para comprender qué es un plasma imagine una barra de plomo. Inicialmente la barra se encuentra en estado sólido, lo cual significa que sus átomos constituyentes están atados a posiciones fijas alrededor de las cuales sólo pueden vibrar ligeramente. Si se calienta se le proporciona una energía a los átomos de la barra y la magnitud de las vibraciones aumentará hasta llegar a una transición de fase en la cual la barra de plomo se funde, quedando líquida. Si en este estado líquido se le continúa proporcionando energía (calentando aún más), los átomos de plomo finalmente van a adquirir la suficiente energía que dejarán de formar un plomo líquido para constituir un gas de átomos de plomo. Finalmente, si en el estado gaseoso se le continúa proporcionando energía a los átomos del gas, los electrones de éstos saldrán de sus órbitas atómicas terminando con un gas formado por núcleos y electrones libres; esto es lo que se llama plasma. Todo ello se muestra esquemáticamente en la Fig. 5.5.

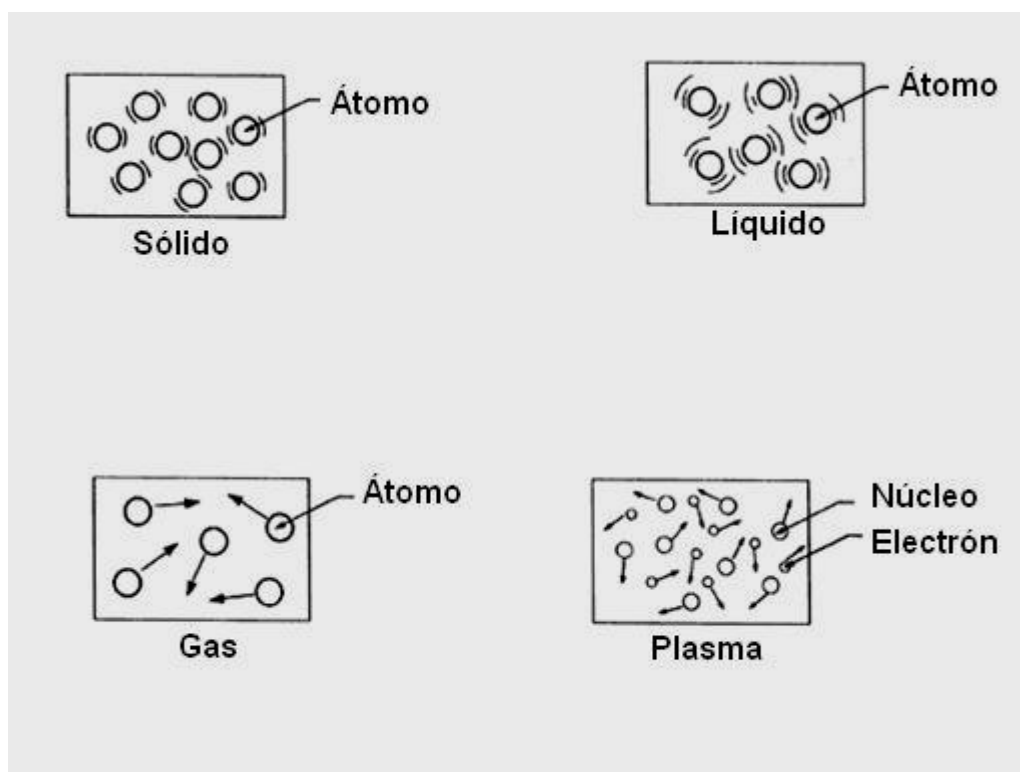


Fig. 5.5 En el estado plasma se presenta la separación del núcleo atómico y de los electrones, lo cual facilita las reacciones de Fusión Nuclear.

Se puede resumir la idea diciendo que, para obtener reacciones nucleares de fusión es necesaria la presencia de un plasma a una temperatura de entre 50 a 100 millones de grados, donde se satisfaga el *criterio de Lawson*. Las reacciones de fusión se llevan a cabo en el plasma debido a la agitación térmica que se presenta en éste, proporcionando la fuerza suficiente para vencer a las fuerzas electroestáticas, dando lugar a la acción de las fuerzas nucleares.

5.5 PROBLEMÁTICA SOBRE EL CONFINAMIENTO DEL PLASMA TERMONUCLEAR

Una vez establecidas las condiciones que se deben dar para lograr reacciones de fusión, el problema que se presenta es el de contener el plasma a las temperaturas indicadas, ya que ningún recipiente podría contener una sustancia a esa temperatura; por lo tanto, es necesario buscar opciones adecuadas. Principalmente se han estudiado dos soluciones a este problema que son: el confinamiento magnético y el confinamiento inercial.

CAPÍTULO 6

CONFINAMIENTO MAGNÉTICO

Una reacción termonuclear se producirá si los núcleos de los átomos de Deuterio o Tritio en colisión adquieren una energía tan alta que logren vencer las fuerzas electrostáticas de repulsión, choquen y entren en interacción. Esto será posible únicamente si el gas se calienta hasta la temperatura de varios millones de grados.

Para permitir que el plasma termonuclear pueda generarse en el interior del reactor es necesario que el plasma no toque las paredes de éste, ya que de lo contrario éstas quedarían fundidas por la alta temperatura del plasma.

Apenas el plasma, calentado hasta millones de grados, toque las paredes del recipiente, bien se enfriará hasta la temperatura a la cual la reacción será imposible, bien sublimará las paredes como sucedió con la pared de la torre de acero y la arena durante la explosión termonuclear en Bikini. Ningún material puede resistir temperaturas tan altas y por eso la forma de poder contener el plasma atrajo gran atención de los científicos del mundo entero en los años cincuenta.

Los físicos de la Unión Soviética, EE.UU. e Inglaterra, el "trío atómico" del siglo pasado separados por las barreras impenetrables de confidencia empezaron a estudiar este problema más o menos al mismo tiempo. Cuando esas barreras fueron eliminadas, se vio que los físicos de los tres países habían llegado a la misma conclusión: la única posibilidad de contener el plasma y no permitirle enfriarse consistía en utilizar un campo magnético. Este campo, invisible e impalpable, por medio de una imperceptible red de líneas de fuerza, retendrá el plasma lejos de las paredes de cualquier recipiente, las que podría reducir a cenizas.

Para ello se ha estudiado un método denominado confinamiento magnético, el cual consiste en contener el plasma termonuclear en una serie de campos magnéticos que guían el movimiento del plasma y evitan que éste toque las paredes del reactor denominado reactor de confinamiento magnético, llevándose a cabo la llamada fusión lenta.

En la fusión lenta se inyecta una mezcla de combustible de fusión nuclear (deuterio y tritio) en forma gaseosa para calentarla por medio de la acción de ondas electromagnéticas hasta llegar a la temperatura a la que la mezcla gaseosa se convierte en el plasma termonuclear; para comprender el funcionamiento de los reactores de confinamiento magnético es necesario estudiar varias características de ellos.

6.1 TRAMPAS MAGNÉTICAS

La idea de termoaislamiento magnético del plasma se basa en la propiedad que presentan las partículas cargadas eléctricamente que se desplazan en un campo magnético, de encorvar su trayectoria y moverse por espiral a lo largo de las líneas de fuerza del campo. Esa curvatura de la trayectoria en un campo magnético heterogéneo conduce a que la partícula sea expulsada a la zona donde el campo magnético es más débil. La tarea consiste en rodear al plasma con un campo magnético intenso. Este problema está siendo estudiado en muchos laboratorios del mundo.

El proceso de dirigir las partículas (el plasma representa infinidad de partículas cargadas: átomos cargados positivamente, carentes de sus capas electrónicas y, aparte, las capas electrónicas sin átomos) a la zona del campo magnético más débil, sigue siendo un problema difícil de resolver. Debido a ese movimiento dirigido, los primeros dispositivos termonucleares basados en la constricción resultaron relativamente poco eficientes. El efecto de constricción se muestra en la Fig. 6.1.

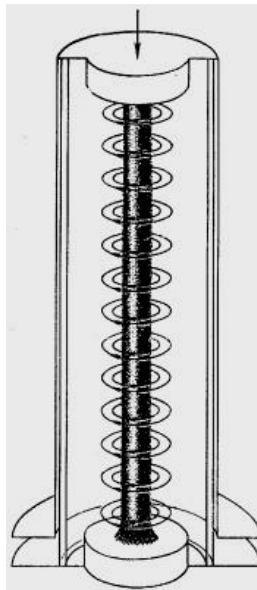


Fig. 6.1 **Efecto de constricción** (pinch effect). La corriente que circula por el plasma crea alrededor un campo magnético que comprime al plasma en un fino cordón en medio del recipiente. En principio, esto debería facilitar el despegue del plasma de las paredes del recipiente, realizando así su aislamiento térmico.

Si en el plasma existe cierto movimiento ordenado de partículas cargadas en una sola dirección, esto quiero decir, que el plasma es un cordón flexible por el cual pasa la corriente eléctrica, ya que a partir de la definición de corriente eléctrica, ésta es el movimiento ordenado en una cierta dirección de partículas cargadas.

Cada corriente crea en torno a ella un campo magnético, cuyas líneas de fuerza circundan el cable por el cual pasa. Una de las propiedades importantes de las líneas de fuerza es la tendencia, que les es inherente, de seguir el camino más corto, su elasticidad y tensión maxwelliana, que conduce a que las líneas de fuerza tiendan a comprimir el conductor de corriente que rodean. En el caso de los cables de cobre comunes, la elasticidad de las líneas de fuerza no puede reducir el diámetro del cable, por cuanto la red cristalina de los cuerpos sólidos es un esqueleto fuerte, bastante resistente a la deformación. Pero, si la corriente circula por un cordón de plasma, la elasticidad de las líneas de fuerza que lo rodean conduce a que la sección del cordón disminuya y éste se aparte de las paredes de la cámara. Este fenómeno, denominado constricción, al parecer, resuelve íntegramente el problema de termoaislamiento magnético del plasma. Podría parecer que bastaría hacer pasar la corriente por el plasma para que éste se aparte de las paredes por cuenta propia y se comprima en un fino cordón en el centro del recipiente.

Sin embargo, aquí empieza a actuar la propiedad de las partículas cargadas (por consiguiente, del plasma en su conjunto) de moverse hacia la zona más débil del campo magnético, en el cual hay menos líneas de fuerza y éstas no se hallan dispuestas tan densamente. Esa propiedad conduce a que el más pequeño defecto del cordón de plasma, como puede ser una curvatura o estrechamiento local, degenera en un proceso de inestabilidad. Si se supone, por ejemplo, que, debido a alguna circunstancia casual en el cordón se haya formado una flexión pequeña, en la parte convexa del cordón encorvado las líneas de fuerza del campo magnético se separan, mientras que en la cóncava, se vuelven más densas. El cordón de plasma empieza a moverse hacia fuera de la zona donde las líneas de fuerza están dispuestas más densamente, es decir, hacia las paredes del recipiente. Como resultado, la flexión del cordón de plasma aumenta y el plasma, por último, toca las paredes de la cámara. Ocurre lo mismo que en un largo resorte comprimido que, como se sabe, es inestable respecto a las deformaciones transversales. De la misma manera un estrechamiento local del cordón de plasma conduce a un estrechamiento mayor aún y, acto seguido la ruptura. Algunas formas de inestabilidades del plasma se muestran en la Fig.6.2.

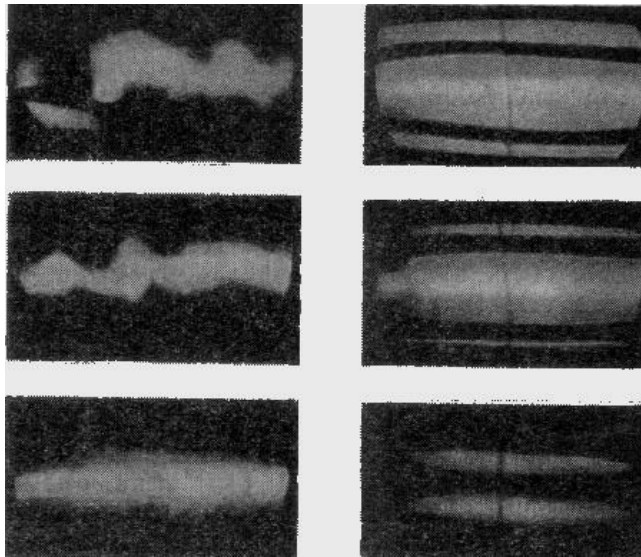


Fig.6.2 Cuadros de la inestabilidad de plasma. Lamentablemente, de momento no se ha logrado hallar tal forma de campo magnético que permita al plasma mantener durante mucho tiempo su forma sin tocar las paredes del recipiente.

Contra ese fenómeno se puede actuar mediante el campo magnético. Si a lo largo del cordón de plasma pasan las líneas de fuerza del campo magnético creado por una fuente ajena, la elasticidad de esas líneas conducirá a que cualquier flexión casual del cordón se liquide igual que un estrechamiento accidental del mismo.

Para que el retorno a la estabilidad transcurra más eficientemente, es necesario crear en el plasma un campo magnético longitudinal muy fuerte.

Otro método eficaz de superar las curvaturas del cordón de plasma, sobre todo las de radio grande, es mediante la utilización de una funda metálica más o menos maciza en el recipiente que contiene el plasma. Entre la funda y el cordón de plasma pasa cierto flujo magnético, es decir, existe un campo magnético con sus líneas de fuerza convencionales, si el cordón de plasma cambia su posición, el campo magnético dentro éste y la funda se alterará y se deformará. En un lugar las líneas de fuerza quedarán estrechadas, en otro, extendidas.

La estabilización del plasma por medio de un campo magnético longitudinal es singularmente eficiente cuando se logra hacer que éste exista sólo en el plasma, mientras que fuera del plasma, es decir, en el espacio entre las paredes de la cámara y el cordón no exista. Esto se puede hacer en el caso de que el cordón de plasma, que se comprime al pasar una corriente fuerte, arrastre consigo todas las líneas de fuerza del campo longitudinal creado en el volumen total de la cámara. Al desprenderse de las paredes de la cámara, el cordón de plasma arrastra consigo todas las líneas de fuerza magnéticas que existían antes en la cámara, creando entre las paredes de ésta y el cordón un vacío magnético respecto al campo longitudinal.

Todas estas ideas empezaron a aplicarse en la práctica tan sólo en los años cincuenta. Ciertamente que también en las postrimerías de la 2ª guerra mundial, se realizaban experimentos sobre el confinamiento magnético del plasma, sin embargo, estos perseguían fines militares y los dirigían en EE.UU. Enrico Fermi y Edvard Teller, unos de los creadores de la bomba atómica norteamericana.

Los intensos trabajos en la esfera de la fusión termonuclear controlada comenzaron casi simultáneamente en la URSS, EE.UU. e Inglaterra. Las primeras instalaciones eran cámaras toroidales de vidrio, de porcelana o de cuarzo (más tarde, las cámaras, por regla general, se construían de acero inoxidable no magnético) dentro de las cuales se ubicaban las cámaras de trabajo de paredes de cobre gruesas, denominadas, forros. Sobre la cámara se enrollaba el devanado que creaba el campo magnético longitudinal estabilizador con intensidad de hasta 500 Oe. La cámara toroidal interior se llenaba de gas. Esa espira anular de gas servía de devanado secundario del transformador. El papel de devanado primario, que se alimentaba de una potente batería de condensadores, lo cumplía la funda metálica exterior de la cámara. Para mejorar el acoplamiento magnético, dentro del toro se instaló un núcleo de hierro. A veces se utilizaba como devanado primario un arrollamiento de cobre común.

En una de las primeras instalaciones "Zeta", el transformador se componía de dos núcleos aislados, provistos de orificios interiores redondos, a través de los cuales pasaba la cámara de descarga. Los núcleos de 1,5 m de diámetro interior y 3 m de diámetro exterior fueron devanados con acero en bandas para transformadores. Al aplicar un potente impulso de corriente de la batería de condensadores al devanado primario del transformador, surge también corriente en la espira de gas secundaria. Esa corriente, atravesando el gas, lo calienta a una temperatura elevada y lo transforma en plasma. Sometido a la acción de la corriente el cordón de plasma se comprime y se desprende de las paredes.

De construcción similar eran también algunas otras instalaciones experimentales, "Scepter", "Alpha" y "Perhapstron", en las cuales se realizaron numerosos experimentos, cuyos resultados, provocaron pesimismo en los científicos. Se aclaró que el campo longitudinal estabilizador, pese a los pronósticos iniciales, resultó insuficiente para que el cordón de plasma fuera estable ante toda una clase de perturbaciones casuales. El campo magnético longitudinal era demasiado débil respecto al propio campo del plasma.

Para eludir esa dificultad, fue necesario aumentar considerablemente el campo longitudinal y disminuir el campo propio del cordón. Ese problema fue resuelto con las instalaciones tipo "Tokamak".

6.1.1 INSTALACIONES TOKAMAK

Un Tokamak es una cámara toroidal, que tiene forma de cilindro anular toroide, algo parecido a una rosquilla, Fig. 6.3. Por su interior circula el plasma a más de 150 millones de grados, que es guiado desde el exterior por un campo magnético, con la finalidad de que el plasma no toque las paredes del Tokamak y pierda temperatura.

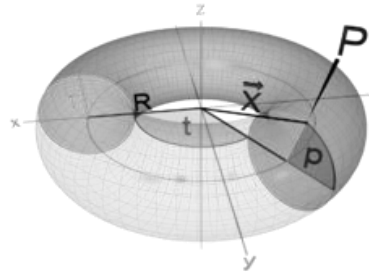


Fig. 6.3 Forma de una cámara TOKAMAK.

La palabra **Tokamak**, que procede del ruso, es un acrónimo de **TO**rodal**naya**, **KA**mera, **MAG**netitaya: **cámara toroidal con bobinas magnéticas**, Fig. 6.4.

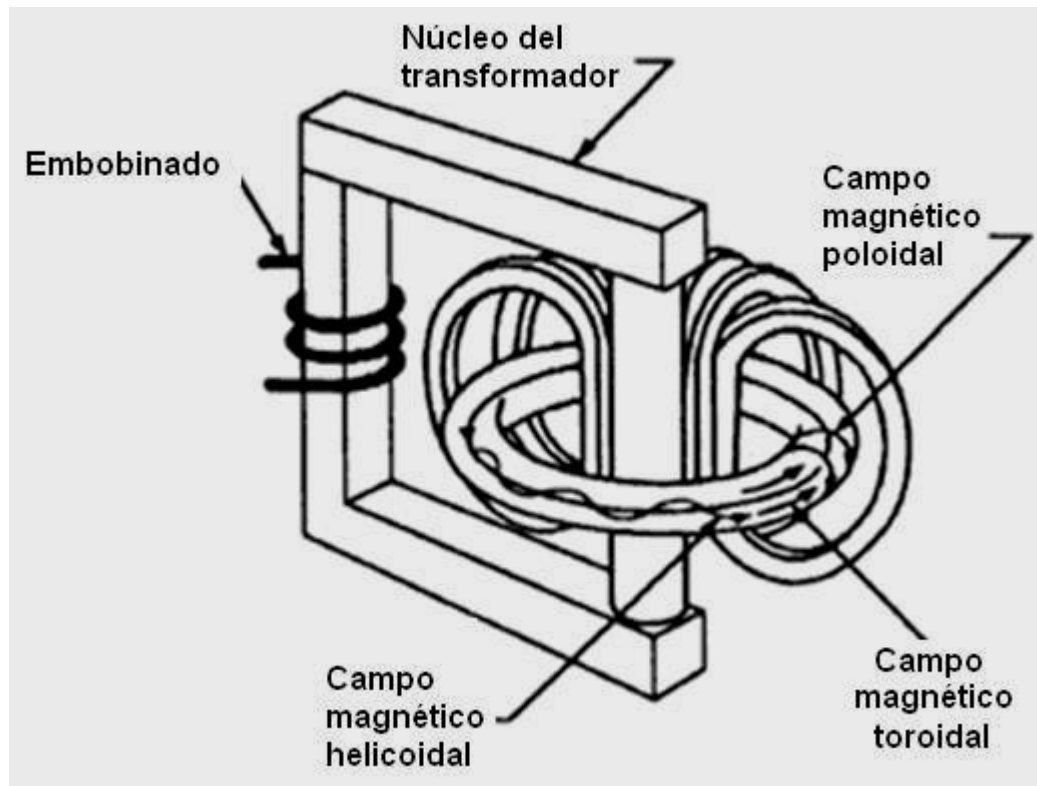


Fig.6.4 La figura muestra los devanados principales de un reactor TOKAMAK.

En el TOKAMAK, además de la corriente toroidal que va a mantener confinado el plasma a través del campo magnético poloidal que genera, se tiene un campo magnético toroidal que le da estabilidad, evitando que se desarrollen inestabilidades que deformen o rompan la columna de plasma. La combinación de los dos campos da lugar también al enroscamiento de las líneas de campo sobre las superficies magnéticas; con ello se evita que el plasma se escape como consecuencia de la deriva magnética de las partículas.

Una característica del TOKAMAK es que el campo toroidal es mucho mayor que el campo poloidal, por lo que las líneas no se enroscan mucho. En las figuras 6.5 y 6.6 se muestran la vista exterior e interior de un Tokamak respectivamente.

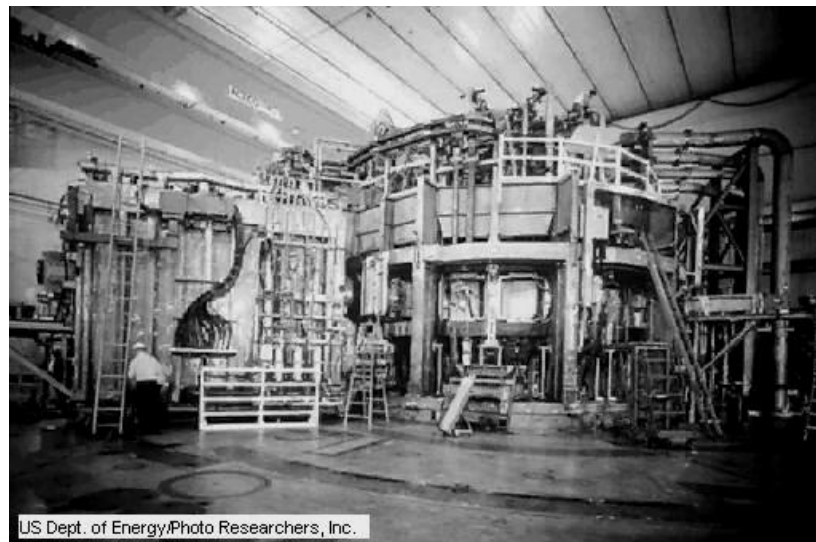


Fig. 6.5 Vista exterior de un reactor TOKAMAK.

Para crear un campo magnético longitudinal intenso en este sistema, se utilizaron bobinas muy potentes que resistían la presión de un campo magnético de 100 atm. Fue necesario alimentar esos enormes solenoides por medio de generadores de impulsos potentes, que comúnmente se usan para excitar **sincrotrones**. A pesar de que el campo magnético creado por semejantes sistemas es impulsivo (un impulso dura 1/5 s, aproximadamente), supera centenares de veces por su duración el tiempo de descarga y, prácticamente, es constante.

El campo magnético longitudinal de las instalaciones tipo "Tokamak" llega a valores de **35-50 mil Oe**, o sea, es centenares de veces mayor que el de las instalaciones tipo "Zeta" y "Alfa".

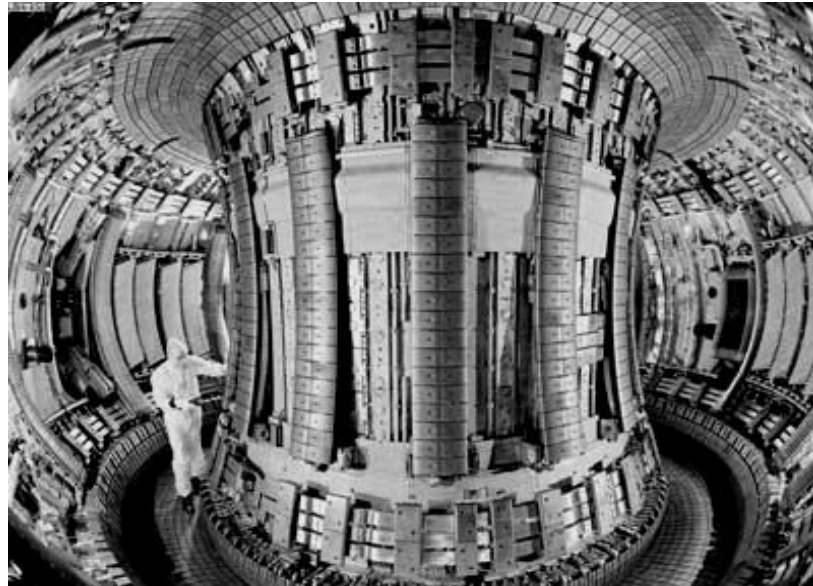


Fig. 6.6 Vista interior de un reactor TOKAMAK.

Por otra parte, al disminuir el radio, aumenta el campo propio del cordón y las ventajas, logradas mediante la utilización de un campo magnético longitudinal potente, serán reducidas a cero. Sin embargo, si el campo del cordón es pequeño, éste quedará demasiado ancho. Tocaré las paredes de la cámara y se enfriará. Para superar esa condición, los diseñadores de las instalaciones tipo "Tokamak" decidieron aplicar en la cámara toroidal diafragmas con orificios pequeños en comparación con el diámetro de la cámara. Los experimentos mostraron que esa construcción aseguraba la formación de un cordón de sección limitada debido a las dimensiones de los orificios del diafragma. En la instalación "Tokamak-3", puesta en funcionamiento en 1962 en el Instituto de Energía Atómica, el diámetro de los orificios del diafragma fue de 20 cm, el de la sección transversal del forro, 40 cm y el de la funda exterior, 50 cm. El toro tenía 2 m de diámetro. El campo magnético longitudinal con intensidad hasta 40 mil Oe lo crearon ocho bobinas con diámetro exterior de 1 m, aproximadamente. Cada bobina es un monolito de 352 espiras de cobre. Las bobinas se alimentan de un generador de impulsos, es decir, de funcionamiento breve, de unos 75 mil kw de potencia. En 1964 fue puesta en marcha la instalación perfeccionada "Tokamak-5" de control automático de la posición del cordón de plasma en la cámara.

Se han obtenido resultados bastante buenos también con la instalación tipo "Levitron", construida en el Laboratorio de Livermore bajo la dirección de Colgate. La idea de semejante instalación, formulada por los científicos soviéticos todavía en el año 1951, consiste en que el plasma, comprimido por el campo propio, está sometido a una contracción adicional por el campo magnético de un conductor especial colocado en el centro del cordón de plasma (y, claro está, aislado de éste). En el "Levitron", el cordón de plasma tiene en sección transversal la forma de anillo y posee alta estabilidad. Al mismo tiempo, la necesidad de aislar el conductor anular

estabilizador del plasma y fijarlo en el centro de la cámara reduce las posibilidades de utilizar ampliamente ese sistema en la práctica.

6.1.2 INSTALACIONES STELLARATOR

Una dirección completamente distinta de los trabajos de confinamiento magnético del plasma trazaron los académicos soviéticos, quienes en 1950 propusieron confinar el plasma en las llamadas trampas magnéticas (o, como las llaman a menudo, "botellas magnéticas"), encomendando en este caso al campo magnético propio del plasma un papel secundario. La primera trampa era una cámara toroidal con el campo magnético longitudinal. Cualquier partícula cargada, que caía en la cámara, debía desplazarse de tal modo que sus trayectorias "se enrollasen" sobre las líneas de fuerza magnéticas. Sin embargo, dichos investigadores descubrieron en su sistema un serio defecto, descubrieron que en la cámara toroidal, donde las líneas de fuerza magnéticas estaban encorvadas, la intensidad o la inducción del campo magnético (la densidad de las líneas de fuerza) era mayor junto a la pared interior del tubo que junto a la exterior. Esto se explica por la elasticidad de las líneas de fuerza y su tendencia de contraerse lo más posible. Como resultado, junto a la pared interior, donde el camino es más corto, se acumula un número mayor de líneas de fuerza que junto a la exterior.

Esa heterogeneidad del campo magnético cambia el carácter espiral de las órbitas de las partículas, es decir, en las inmediaciones de la superficie interior, donde el campo es mayor, las partículas deberían desplazarse por una órbita de radio menor que cerca de la superficie exterior, sin embargo, las partículas cargadas "derivan" a través de las líneas de fuerza del campo magnético, chocando los núcleos cargados positivamente con el "techo" del tubo, en tanto que los electrones, con su "fondo".

La separación de las cargas por su signo provoca el surgimiento en el espacio de la cámara de un campo eléctrico imprevisto, que deforma completamente las órbitas de las partículas, lanzándolas contra las paredes de la cámara.

La heterogeneidad mostrada en el campo magnético se podría lograr si se obligara a la línea de fuerza que pasa a lo largo de la superficie interior de la cámara a intercambiar en cierto tramo de lugar con la línea que se desplaza junto a la superficie exterior. Entonces, el largo de todas las líneas de fuerza sería igual y todas se verían en condiciones iguales.

Se podría lograr tal efecto enrollando las líneas de fuerza alrededor del eje del toro. En este caso, las líneas de fuerza tendrían una forma más o menos parecida a la de los hilos de un estrobo. En un campo magnético con estas características, la deriva de las partículas se reduciría al mínimo.

En un campo magnético "torcido" transformado giratoriamente, la deriva de las partículas se reduciría al mínimo, debido a que a lo largo de cierta línea se cambiaría

la polaridad de los campos magnéticos, de tal manera que cuando los núcleos se dispusieran a chocar con el techo del tubo se cambie la polaridad del campo magnético para provocar un cambio en la trayectoria de éstos de tal manera que se evite el choque con el techo, sucediendo lo mismo con los electrones.

Las partículas, que se desplazan rápidamente a lo largo de las líneas de fuerza siguiendo el contorno del eje de la cámara, no pueden caer sobre las paredes inferior o la superior. Cuando una partícula que deriva hacia arriba se halla por debajo del eje, tiende, naturalmente, a apartarse de éste; mientras que al hallarse abajo, la propia deriva hacia arriba compensa el desplazamiento anterior de la partícula, acercándola al eje. Como resultado, la distancia media entre la partícula y el eje permanece invariable. Sin embargo, para lograr ese efecto es necesario conseguir que la línea de fuerza magnética, que describe en el toro un anillo, al mismo tiempo gire constantemente alrededor del eje de la cámara. Esto se puede lograr usando devanados de gran paso helicoidal. Semejantes arrollamientos se han aplicado en el stellarator tipo "C", construido relativamente hace poco en EE.UU. Su cámara tiene en el plano el aspecto de la pista en un estadio. El radio interior de la cámara tiene 20 cm, el largo axial, 12 m, la intensidad del campo magnético, unos 50 mil Oe. La potencia de la instalación eléctrica de alimentación es de 15 mil kw.

El otro método de "transformación giratoria" o de "torsión" de las líneas de fuerza magnéticas fue propuesto por el físico norteamericano L. Spitzer y el físico soviético L. Artsimóvich.

Como se mencionó anteriormente un campo magnético longitudinal común "no torcido" posee heterogeneidades que conducen a las partículas negativas a chocar contra el "piso", mientras que las positivas lo hacen contra el "techo" de la cámara. Sin embargo, si se transforma el toro dejando una mitad de éste intacta y la otra mitad se maneja de manera que se confunda el "techo" con el "piso", o dicho de otra forma, si el toro (rosca) se transforma en un ocho, entonces cuando la partícula empieza a caer en la primera mitad del toro, en la siguiente deberá "caer hacia arriba" y de esta manera en promedio permanecerá a una distancia invariable del eje de la cámara.

Apreciando las cámaras toroidales tipo "stellarator" con devanado helicoidal y las transformadas en un ocho, se puede sacar en conclusión que los stellarators son actualmente los sistemas magnéticos considerados mejores para el confinamiento del plasma. Su desventaja consiste en la dificultad para su fabricación y su alto costo.

Una de las principales dificultades que se presenta en la fabricación de este sistema, radica en la creación de un campo magnético con la geometría y valor requeridos. A pesar de que los campos magnéticos en las actuales trampas termonucleares son relativamente débiles y teniendo en cuenta los enormes volúmenes de las cámaras, la ausencia del núcleo ferromagnético, así como las exigencias especiales que se presentan en la forma del campo magnético que dificultan la creación de semejantes sistemas, debe reconocerse que las trampas existentes constituyen ya un gran logro

técnico. Y las trampas que en un futuro las relevarán serán el orgullo de una nueva rama de la física: la física de los campos magnéticos potentes y superpotentes.

Los Stellarators son toroides con un campo magnético poloidal producido por bobinas exteriores al plasma, Fig. 6.7. Su funcionamiento es continuo ya que no existe ninguna corriente de plasma inductiva y no existe el riesgo de perturbaciones ya que no se tiene una corriente interna en el plasma; los actuales stellarators están dando buenos resultados, igualándose a los resultados obtenidos en tokamaks.

Existen tres tipos de stellarators:

1 - **Torsatrons**: Tienen bobinas helicoidales continuas.

2 - **Modulares**: Sus bobinas no son planas.

3 - **Heliacs**: Conjunto de bobinas planas circulares, distribuidas a lo largo de una Hélice enrollada alrededor de una bobina central circular.

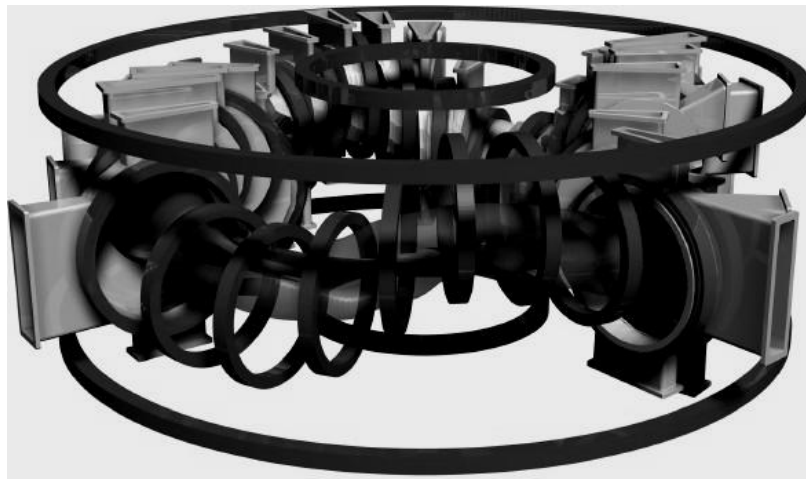


Fig. 6.7 Líneas magnéticas de los STELLARATORS.

La diferencia del Stellarators con el Tokamak es que en el segundo las fuerzas magnéticas son generalmente perpendiculares al movimiento, el plasma que se mueve alrededor del toroide será así forzado para arriba o abajo, teniendo como consecuencia que golpee los bordes del tubo, Fig. 6.8.

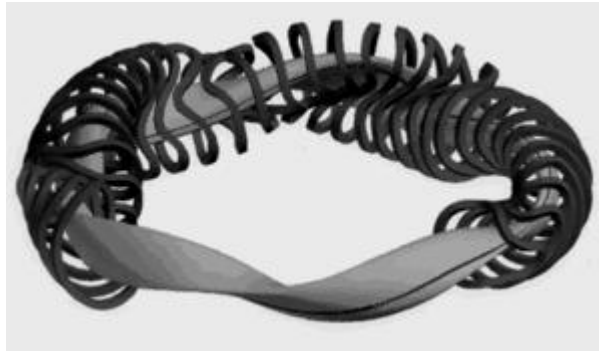


Fig. 6.8 Trayectoria del plasma en el interior de un STELLARATOR.

El Stellarator evita esto de una manera "sencilla": el toroide está doblado en una figura en forma de ocho, como se muestra en la Fig. 6.8, de manera que cuando una partícula de plasma se mueve en órbita alrededor del tubo, pasa la mitad del tiempo en el interior del tubo y la otra mitad en el exterior. Esto iguala las fuerzas, por lo menos relativamente, y la partícula experimenta una fuerza mucho menor que deriva hacia los bordes.

6.2 CALENTAMIENTO DEL PLASMA

La corriente que fluye a través del plasma en un Tokamak contribuye a calentarlo. A medida que la temperatura del plasma sube, este calentamiento óhmico va siendo menos efectivo, de manera que la temperatura sólo llega a alcanzar unos pocos millones de grados, es decir, alrededor de un factor 10 por debajo del valor necesario para que ocurran reacciones de fusión en gran cantidad. Para alcanzar temperaturas más elevadas hay que proporcionar más calentamiento al plasma mediante fuentes externas. También, se inyectan en el plasma haces de partículas neutras energéticas que penetran en su seno y le transfieren su energía cinética mediante colisiones con las partículas que lo componen. El calentamiento mediante alta frecuencia utiliza ondas electromagnéticas con alta potencia y a diferentes frecuencias que transfieren su energía al plasma mediante absorción resonante, Fig. 6.9.



Fig. 6.9 Tres diferentes métodos externos al plasma que sirven para calentar a éste.

Se están desarrollando tres de estos sistemas: el calentamiento resonante a la frecuencia ciclotrónica de los iones (Ion Cyclotron Resonance Heating, ICRH, a frecuencias entre 20 y 55 MHz), el calentamiento resonante a la frecuencia ciclotrónica de los electrones (electrón Cyclotron Resonante Heating, a frecuencias entre 100 y 200 GHz), y el calentamiento en la frecuencia híbrida inferior (Lower Hybrid Heating, LHH, a frecuencias entre 1 y 8 GHz).

6.2.1 CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Los principios básicos de la inducción electromagnética son ya conocidos. Una corriente eléctrica que circula por un conductor en forma de bobina (inductor) genera un campo magnético en sus alrededores. La mayor intensidad del campo se da en el núcleo de la bobina, y depende de la fuerza de la corriente de excitación y del número de espiras de la bobina.

Si se coloca un elemento de material ferromagnético dentro de un campo magnético alterno, se “inducen” corrientes eléctricas mayormente concentradas hacia la superficie, denominadas corrientes parásitas o de Foucault. Estas corrientes se cierran (neutralizan) dentro del mismo medio formando torbellinos, y son las responsables de la generación de calor por efecto Joule, Fig. 6.10. El campo magnético alterno también produce magnetizaciones y desmagnetizaciones

sucesivas en el material sometido al campo magnético, que se traduce en ciclos de histéresis sucesivos, los cuales también producen pérdidas de energía electromagnética que se manifiestan en forma de calor.

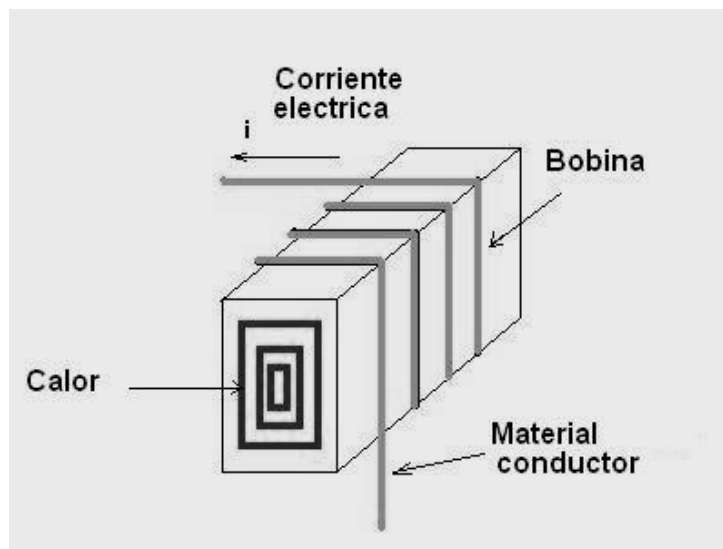


Fig. 6.10 calentamiento por inducción electromagnética.

El uso de transistores ha permitido alcanzar oscilaciones o frecuencias del campo magnético tan altas como desde 60 Hz hasta los 60 MHz, y por ende se pueden alcanzar temperaturas de miles de grados, con distinta profundidad de alcance sobre el cuerpo a calentar, en tiempos mínimos con gran precisión y consistencia.

Las ventajas principales del calentamiento por inducción se resumen en:

- Ausencia de contacto físico (propiedad clave para la producción del plasma termonuclear)
- Generación de calentamiento en el lugar requerido
- Ausencia de pérdidas por transferencia de calor
- Rapidez y precisión
- Fácil automatización y control del ciclo de trabajo

6.3 CONFIGURACIÓN DE LAS CENTRALES DE ELECTRICIDAD CON REACTORES DE CONFINAMIENTO MAGNÉTICO

La Fig. 6.11 muestra la configuración teórica de una central de fusión nuclear por confinamiento magnético.

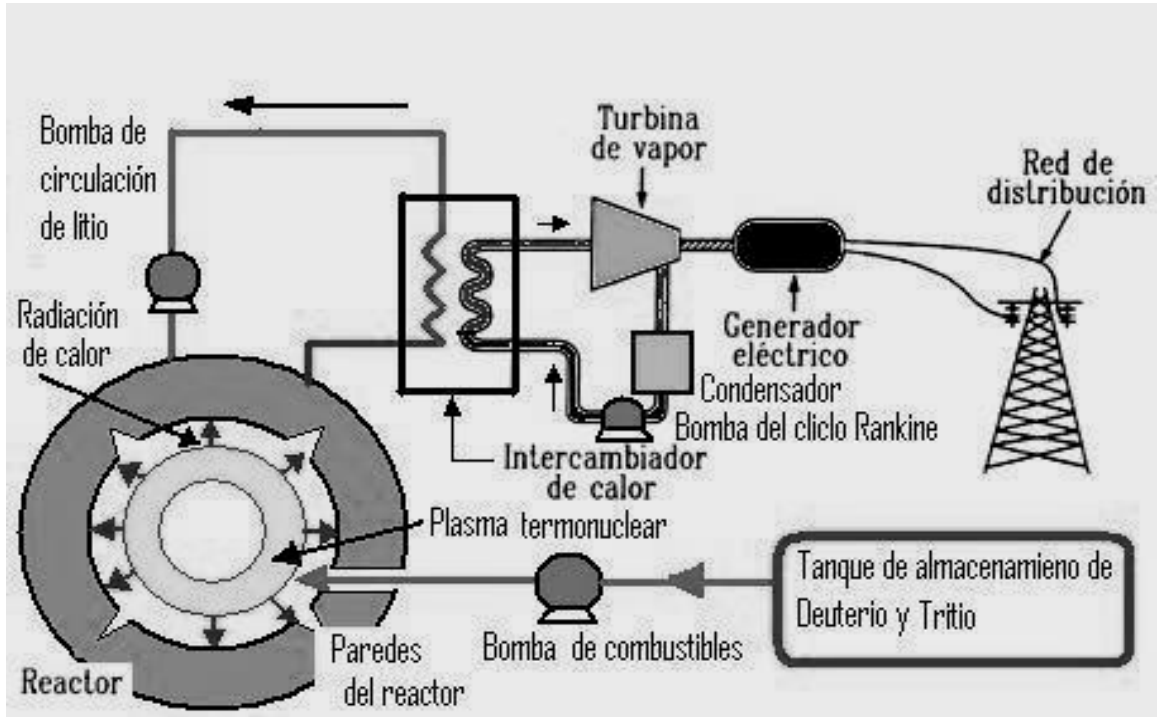


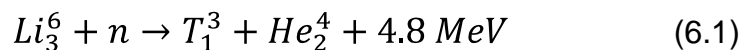
Fig. 6.11.- Configuración teórica de una central de generación de electricidad con reactor de Fusión Nuclear por confinamiento magnético.

Como se puede ver en el reactor se encuentra la figura toroidal que toma el plasma en el interior de la trampa magnética.

En este sistema, como se analizó anteriormente, se eleva la temperatura de la mezcla Deuterio –Tritio para formar el plasma con la finalidad de que se produzcan las reacciones nucleares de Fusión que nos proveerán de energía calorífica.

La energía calorífica se irradia a las paredes del reactor, las cuales no tienen contacto directo con el plasma gracias a las trampas magnéticas. Las paredes implementan un sistema de enfriamiento que tiene un manto de litio que absorbe calor hasta lograr una temperatura aproximada de 800 °C. Estas temperaturas son lo suficientemente elevadas para que en el intercambiador de calor se pueda producir vapor (en un circuito diferente, como en los reactores de agua liviana de Fisión Nuclear) a las condiciones requeridas para poder emplearlo en un ciclo Rankine.

Se hace necesaria la implementación del litio debido a que es necesaria la producción de Tritio, mediante la siguiente reacción:



Para controlar la reacción sólo se inyecta una pequeña cantidad de combustible fusionable para que reaccione cierto tiempo (se considera inyectar combustibles sólo para 10 segundos), además se considera que una vez que se den las reacciones de fusión, éstas mantendrán la temperatura del plasma, por lo que se requerirá del calentamiento únicamente cuando entre la nueva mezcla de combustible, de tal manera que el reactor se podrá automantener en operación, llamando a este fenómeno ignición.

Las plantas de generación de este tipo deben de producir una cantidad de energía eléctrica tal que pueda ser capaz de proporcionar energía a la red de distribución, al reactor para alimentar el sistema de calentamiento del plasma y a la trampa magnética, encontrándose estos dos últimos en el reactor. Se han realizado estudios, los cuales señalan que para que una planta de este tipo sea rentable es necesario que produzca 5 veces más de la energía necesaria para calentar el plasma a la temperatura idónea de fusión nuclear. Esto se muestra esquemáticamente en la Fig. 6.12:

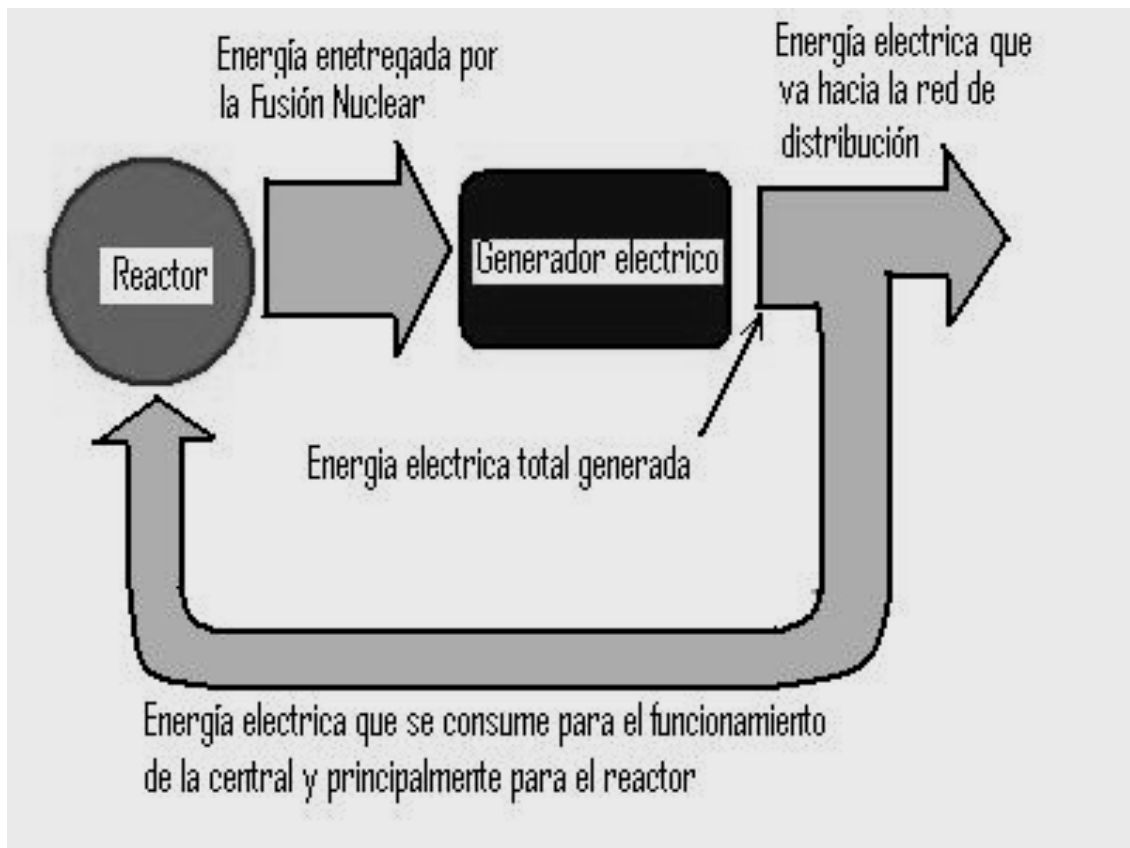


Fig. 6.12 Distribución ideal de la energía generada por la fusión nuclear.

CAPÍTULO 7

CONFINAMIENTO INERCIAL

El confinamiento inercial consiste en producir el plasma termonuclear utilizando láseres o haces de partículas que son enfocados en esferas microscópicas (de aproximadamente un milímetro de diámetro) que contienen el combustible fusionable. Esto se muestra esquemáticamente en la Fig. 7.1. Así, se pueden producir y contener plasmas de muy alta densidad a las temperaturas requeridas durante tiempos cortos (de alrededor de cien millonésimas de segundo). El nombre de confinamiento inercial aplicado a este método es debido a lo siguiente: La primera ley de Newton (que también se conoce como principio de inercia y que originalmente fue propuesto por Galileo), establece que: todo cuerpo en reposo, o movimiento uniforme no acelerado, permanece en ese estado a menos de que sea perturbado por alguna fuerza externa. Por lo tanto, debido a que la fuerza producida por los láseres es simétrica (en todas direcciones alrededor de la esfera) éste no ejerce fuerza neta resultante en la microesfera. Por otra parte, el peso de la esfera es tan pequeño que durante el breve lapso en que es irradiada por el láser, ésta prácticamente no tiene tiempo de caer, y para cualquier fin práctico podemos considerarla inmóvil, es decir, que durante las millonésimas de segundo en que el proceso de irradiación láser ocurre, la microesfera, por su propia inercia, permanece inmóvil y es así como en ese breve instante el plasma es confinado.

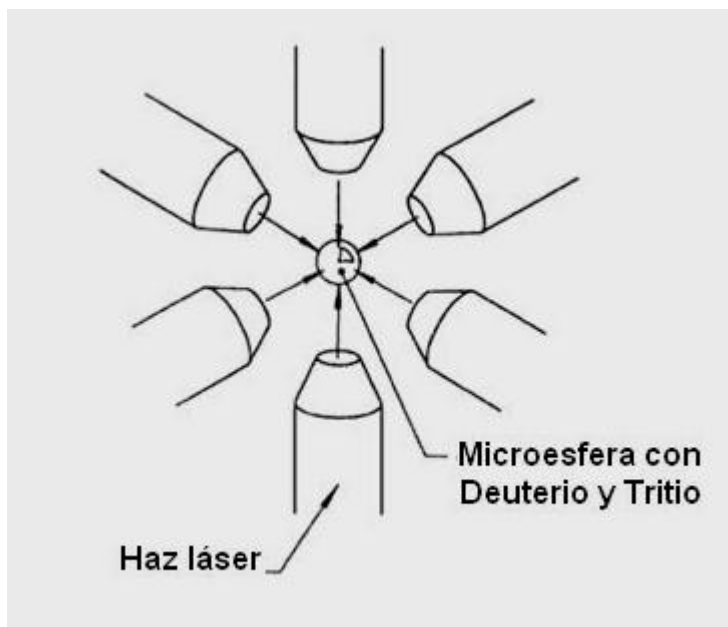


Fig. 7.1 Confinamiento inercial de una esfera que contiene material fusionable.

7.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS RAYOS LÁSER

7.1.1 INTERACCIÓN ÁTOMO-FOTÓN

La Fig. 7.2 muestra esquemáticamente la estructura básica de un átomo de acuerdo con el modelo de Bohr. Se puede ver que éste consta esencialmente de un núcleo alrededor del cual giran electrones en determinadas órbitas. Como se vio anteriormente, el modelo de Bohr mostró que un electrón no se puede encontrar en cualquier órbita alrededor de un núcleo, sino sólo alrededor de determinadas órbitas estables y que los intercambios de energía son cuantizados. Además de esto, la energía de un electrón en una órbita se incrementa entre mayor sea la órbita en que se encuentra. De este modo, en la Fig. 7.3 se muestra la energía correspondiente a cada una de las órbitas mostradas en la Fig. 7.2. Se puede notar que la órbita de menor energía es la primera órbita; cuando el átomo se encuentra en esta situación decimos que se encuentra en su *estado base* o estado de menor energía. Debido a la diferencia de energía entre cada órbita se tiene que, para pasar de una órbita inferior a una superior (por ejemplo, de la segunda a la tercera órbita), se debe recibir un cuanto de energía, es decir, una cantidad de energía exactamente igual a la diferencia de energía entre esas dos órbitas; mientras que si se pasa de una órbita superior a una inferior (por ejemplo, de la cuarta a la tercera órbita), el átomo debe emitir un cuanto de energía. Por otra parte, también se puede apreciar en la Fig.7.2 que hay un límite superior a la energía que un electrón puede adquirir. Pasando ese límite ya no hay órbitas superiores que sobrepasar y entonces el electrón queda libre, dejando un átomo ionizado, es decir, un átomo que ha perdido uno o varios de sus electrones.

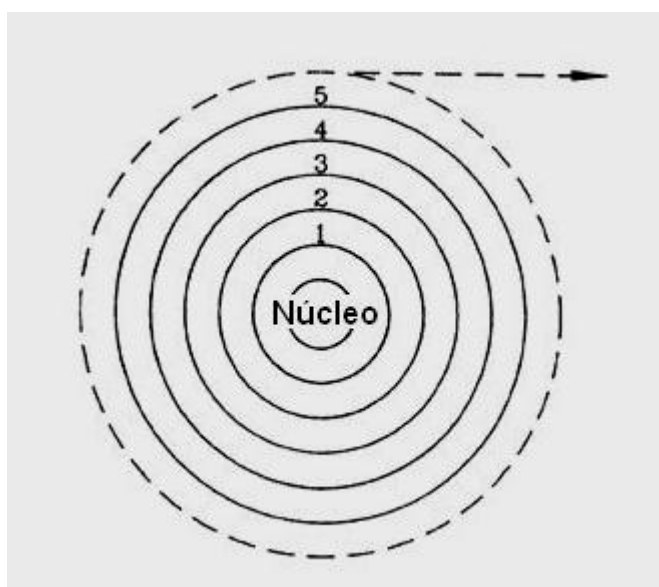


Fig. 7.2 Estructura atómica de acuerdo al modelo de Bohr.

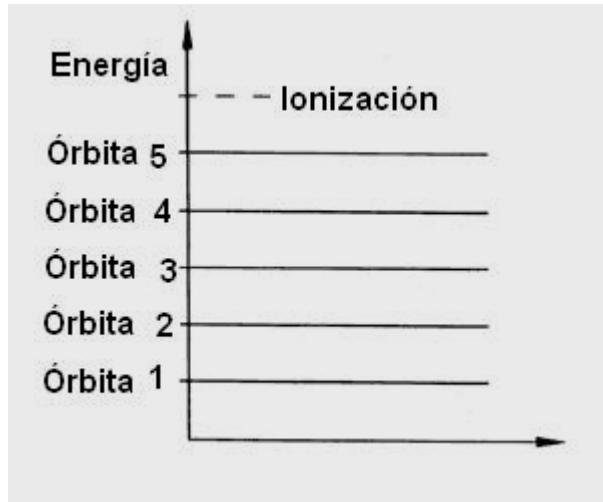


Fig.7.3 Energía correspondiente a cada orbita propuesta por Bohr.

Considerar los procesos de interacción entre radiación electromagnética y materia en su más pequeña escala se reduce a estudiar la interacción entre cuantos de energía y átomos. Estos cuantos de energía también se conocen como fotones. Por simplicidad se considerarán átomos con sólo dos niveles de energía: uno inferior de energía E_1 y uno superior de energía E_2 .

La Fig. 7.4 muestra el proceso de absorción en el cual un fotón incide en un átomo que inicialmente se encuentra en su estado base o no excitado. En este caso, y suponiendo que la energía del fotón sea idéntica a la diferencia de energía entre los dos niveles del átomo (lo cual siempre será), se tiene como resultado que éste absorbe la energía del fotón incidente, pasando por tanto de su estado base a su estado excitado de mayor energía.

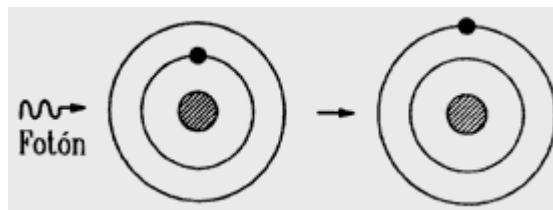


Fig. 7.4 Proceso de absorción.

La Fig. 7.5 muestra el proceso de emisión. En este caso un átomo inicialmente excitado de manera espontánea pasa a un estado de menor energía, emitiendo en el proceso un fotón con energía igual a la diferencia de energía entre los dos niveles. El fotón se emite en una dirección totalmente arbitraria.

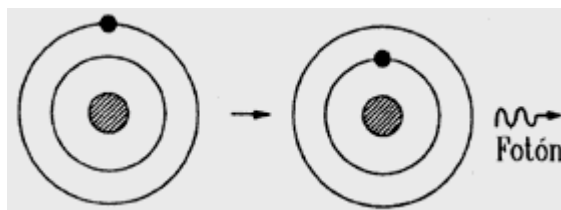


Fig. 7.5 Proceso de emisión.

La Fig. 7.6 muestra el proceso de emisión estimulada, cuya existencia fue propuesta por Albert Einstein en 1917, y es el proceso fundamental gracias al cual existe el láser. En este proceso se tiene la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en un estado excitado. Como resultado de esta interacción el átomo pasa a su estado base, emitiendo en el proceso un fotón que tiene las mismas características de dirección y de fase que el fotón inicial. Cuando esto último ocurre decimos que la radiación electromagnética resultante es coherente. Es importante notar que en este proceso está ocurriendo realmente un proceso de amplificación de fotones, pues inicialmente se tiene un sólo un fotón y después del proceso de emisión estimulada se tiene como resultado dos fotones. Se puede afirmar que el germen que dio origen al desarrollo del láser surgió cuando el fenómeno de emisión estimulada fue propuesto. De hecho la palabra láser es el acrónimo de la expresión en inglés: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, que en español se puede traducir como "amplificación de la luz por la emisión estimulada de radiación".

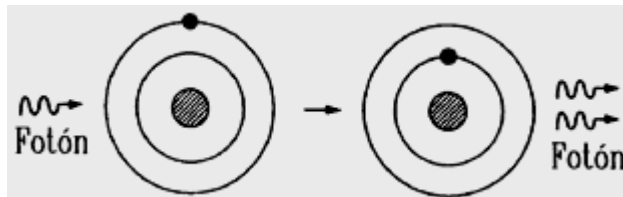


Fig. 7.6 Proceso de emisión estimulada.

7.1.2.-ABSORCIÓN Y AMPLIFICACIÓN ÓPTICA

A continuación se va a considerar la interacción no entre un átomo y un fotón, sino entre una gran cantidad de fotones y un gran número de átomos desde una perspectiva más real. La Fig. 7.7 muestra una cavidad en la que se encuentran N átomos de los cuales una cantidad N_2 son átomos que están en su estado excitado y N_1 son átomos que se encuentran en su estado base o no excitado. Al propagarse un flujo S de fotones a través de la cavidad y entrar en interacción con átomos que están excitados, ocurrirá el proceso de emisión estimulada. Como se ha visto, este proceso traerá como consecuencia la amplificación del flujo inicial de fotones S . Esto se debe a que cada fotón del flujo incidente que interactúe con un átomo inicialmente excitado dará origen, por medio del proceso de emisión estimulada, a la emisión de un segundo fotón junto con la transición del átomo del estado excitado al estado

base o no excitado. Sin embargo, debido a que en dicha cavidad también hay átomos que se encuentran en su estado base, al interactuar el flujo de fotones con estos átomos ocurrirá el proceso de absorción de fotones y ocasionará una disminución del flujo inicial S de fotones. Esto se debe a que cada fotón que interactúe inicialmente con un átomo en su estado base, será absorbido por dicho átomo y éste pasará a un estado excitado.

En la práctica se debe de considerar simultáneamente los procesos de emisión y de absorción. El primero tiende a amplificar el flujo incidente dependiendo de la cantidad de átomos que se encuentren en el nivel superior N_2 , mientras que el segundo tiende a disminuir el flujo incidente dependiendo de la cantidad de átomos que se encuentren en el nivel base N_1 . Al considerar de manera simultánea los dos procesos, el resultado final depende de la cantidad de átomos que se encuentran tanto en el estado excitado como en el estado base. Si estas cantidades son iguales se tendrá entonces que, en promedio, la amplificación y la absorción que sufre el pulso inicial son iguales, y por lo tanto el flujo final no será ni mayor ni menor que el flujo de fotones inicialmente incidente. Esto es, si $N_1 = N_2$ el cambio neto del flujo de fotones es cero, es decir, la cantidad de fotones que sale de la cavidad cilíndrica mostrada en la Fig. 7.7 es la misma que la que entró.

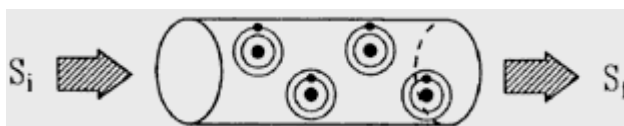


Fig. 7.7 Los átomos son estimulados por medio de fotones en una cámara cilíndrica.

Por otra parte, si el número de átomos excitados N_2 que hay en la cavidad es menor que el número de átomos en su estado base N_1 , el resultado promedio total será de una reducción del flujo inicial de fotones. Esto es, si $N_2 < N_1$, el flujo inicial de fotones será absorbido. Ello implica que a lo largo de su propagación por la cavidad cilíndrica mostrada en la Fig. 7.7, el flujo inicial de fotones disminuye como se muestra en la Fig. 7.8.

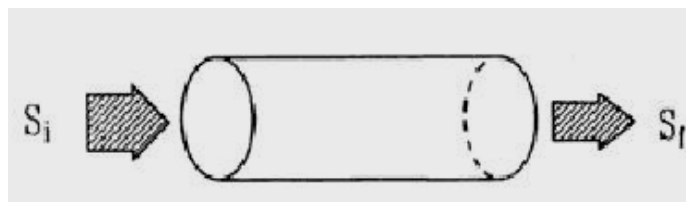


Fig. 7.8 Proceso de absorción estimulada.

Finalmente, si el número de átomos excitados N_2 que hay en la cavidad es mayor que el número de átomos en estado base N_1 , el resultado promedio total será de un incremento al flujo inicial de fotones. Es decir, si $N_2 > N_1$, el flujo inicial de fotones se incrementará a lo largo de su propagación por la cavidad cilíndrica mostrada en la Fig. 7.7. El flujo de fotones es entonces ampliado por el medio, como se muestra en la Fig. 7.9.

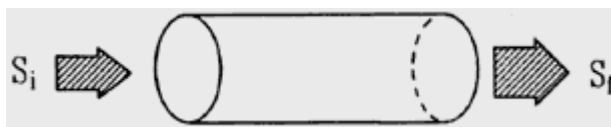


Fig. 7.9 Proceso de emisión estimulada.

7.1.3 AMPLIFICADORES ÓPTICOS

Con base en lo antes mencionado se puede comprender la operación de un amplificador óptico, también conocido como amplificador láser. Este es un sistema que proporciona a la salida un flujo final de fotones S_f mayor que el flujo inicial S_i . Dichos amplificadores ópticos generalmente tienen un aspecto similar al mostrado en la Fig. 7.7, es decir, cilíndrico. Por un extremo entra un flujo inicial de fotones y por otro sale el flujo final de fotones amplificado.

Como se vio en la sección anterior, la condición necesaria para tener amplificación del flujo inicial de fotones S_i , es que el número de átomos excitados N_2 que se encuentra en la cavidad amplificadora sea mayor que el número de átomos que se encuentra en su estado base N_1 . La condición anterior se conoce como inversión de población y el problema central para la realización práctica de un amplificador óptico está en cómo lograrla. Es decir, el problema es conseguir que la mayoría de los átomos que se encuentra en la cavidad amplificadora pase de su estado base, a un estado excitado.

Para lograr dicha inversión de población es necesario algún dispositivo que proporcione la energía que los átomos de la cavidad amplificadora requieren para pasar de su estado base a un estado excitado. Este dispositivo recibe el nombre de sistema de bombeo y puede ser de varios tipos, aunque los más usuales son de tipo óptico o de tipo eléctrico.

Lo que se tiene en el caso de un sistema de bombeo de tipo óptico es la cavidad amplificadora circundada por una o varias lámparas luminosas de destello (flash) muy potentes. Al ser disparadas dichas lámparas, los fotones que emiten son absorbidos por los átomos de la cavidad amplificadora, los cuales pasan de su estado base a un estado excitado. Con ello se logra la inversión de población. La Fig. 7.10 muestra la sección transversal de dos posibles arreglos para colocar las lámparas flash en un amplificador bombeado ópticamente.

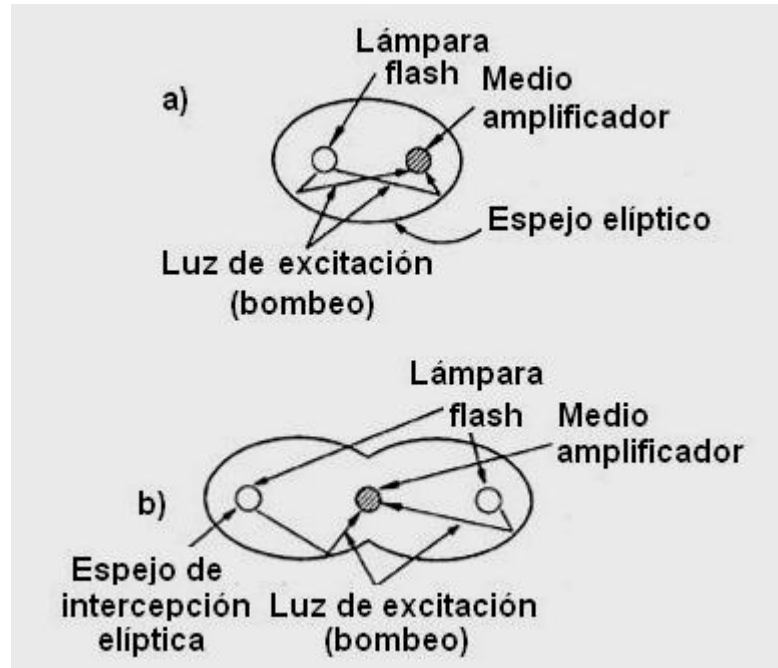


Fig. 7.10 Arreglos de lámpara Flash para estimular la absorción de fotones por parte de los átomos.

En un sistema de bombeo de tipo eléctrico se produce una descarga eléctrica intensa en los átomos que se encuentran en la cavidad amplificadora. De este modo, los electrones energéticos de la descarga transfieren parte de su energía por colisiones electrón-átomo a los átomos contenidos en la cavidad, logrando que éstos pasen de su estado base a uno excitado. Así se da la inversión de población. La Fig. 7.11 muestra la sección transversal de un amplificador óptico bombeado eléctricamente, usando un cañón de electrones.

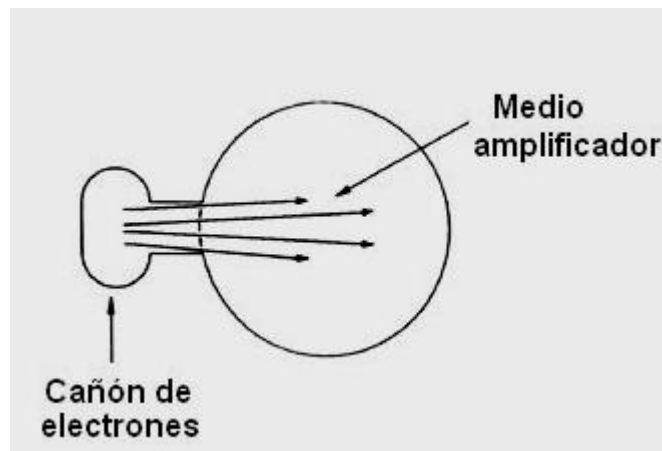


Fig. 7.11 Sección transversal de un amplificador óptico.

Para amplificar un pulso de luz usando un amplificador óptico dotado de un sistema de bombeo óptico o eléctrico, se sincroniza el paso del pulso de luz con el disparo del sistema de bombeo. Es importante que estos dos hechos estén perfectamente

sincronizados, pues si el sistema de bombeo se dispara antes o después de que llegue el pulso de luz al amplificador, este pulso no será amplificado. La Fig. 7.12 muestra la simulación computacional de la amplificación de un pulso de luz que pasa a través de un amplificador óptico. Se pueden observar el pulso inicial y el pulso final amplificado.

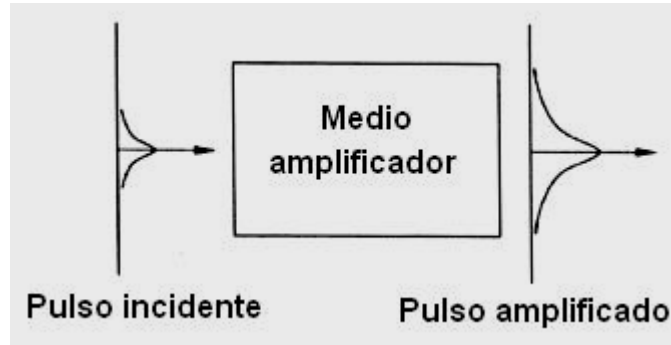


Fig. 7.12 Pulso amplificado.

7.1.4 OSCILADOR ÓPTICO

Después de haber expuesto el principio básico de operación de un amplificador óptico, se puede comprender fácilmente el principio de funcionamiento de un oscilador óptico, también conocido como oscilador láser, o sencillamente láser.

Considérese una cavidad amplificadora con un sistema de bombeo (representado por las flechas perpendiculares en la Fig. 7.13), a la cual se le ha colocado en sus extremos un par de espejos planos (o ligeramente cóncavos) tal como ahí se muestra, donde la línea punteada indica el eje óptico del sistema. Este par de espejos paralelos recibe el nombre de resonador óptico. Uno de los espejos del resonador es casi 100% reflejante, y el otro tiene una reflectancia que es de manera característica de alrededor de 90 por ciento.

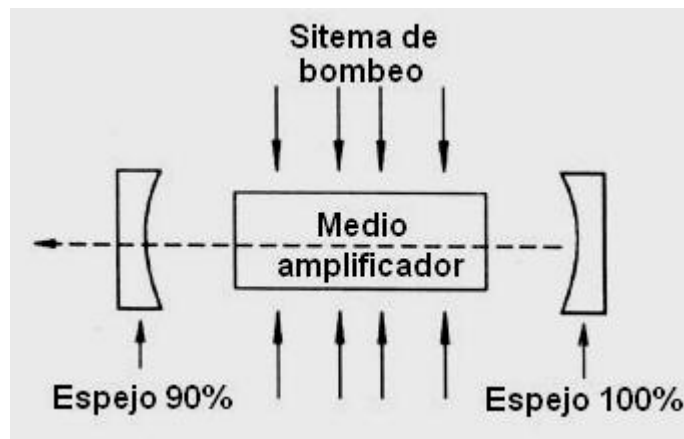


Fig. 7.13 Conjunto de amplificador y resonador óptico.

Para comprender qué función tiene el resonador óptico hay que remitirse a la Fig. 7.14, la cual muestra al oscilador óptico inmediatamente después de que el sistema de bombeo fue disparado. Cualquier fotón que sea emitido en una dirección diferente de la definida por el eje óptico del resonador óptico se perderá, mientras que cualquier fotón emitido a lo largo del eje óptico del oscilador será amplificado por el proceso de emisión estimulada. Inmediatamente se generará un enorme flujo de fotones confinados por el resonador óptico, que se propagarán a lo largo del eje óptico. Si el resonador óptico no estuviera allí, después de disparar el sistema de bombeo los átomos que fueron excitados pasarían a su estado base debido al proceso de emisión espontánea, emitiendo fotones en todas direcciones y perdiendo la energía recibida por el sistema de bombeo.

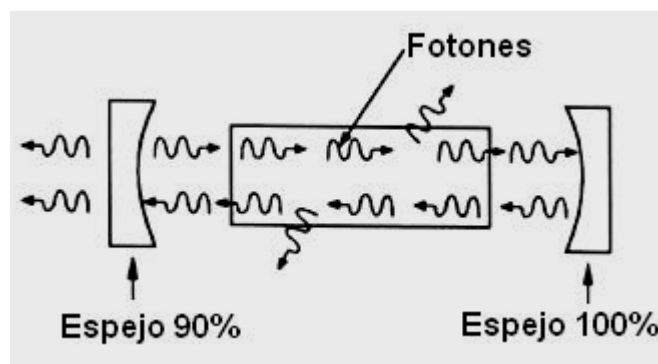


Fig. 7.14 El Oscilador óptico sirve para dirigir el flujo de fotones.

La presencia del resonador óptico permite extraer de modo eficiente la energía que el sistema de bombeo ha depositado en los átomos contenidos en la cavidad amplificadora. Debido a que uno de los espejos del resonador tiene reflectancia de 90%, el 10% de los fotones que incide allí será transmitido fuera del resonador óptico, formando un haz de luz muy intenso, que además es monocromático (formado por fotones de idéntica energía), coherente (pues todos sus fotones están en fase, ya que fueron producidos por el proceso de emisión estimulada) y altamente direccional. Estas son las propiedades fundamentales de la luz láser que es generada por todo oscilador óptico.

7.1.5 PRODUCCIÓN DE PULSOS LÁSER ULTRACORTOS

Al excitar por medio de un pulso óptico o eléctrico el medio activo en un resonador óptico, se produce un pulso láser. La duración de este pulso es, en general, similar a la del pulso de excitación y característicamente es entre 500 y 1 000 microsegundos. Para muchas aplicaciones prácticas, como la fusión nuclear vía láser, o para la soldadura o el corte de placas de acero, la duración de tales pulsos es muy grande y su intensidad demasiado pequeña. Debido a esto se han diseñado varias técnicas que permiten obtener pulsos láser de muy corta duración y de muy alta intensidad. Una de las técnicas más empleadas para producir pulsos ultracortos de alta intensidad se conoce como conmutación de Q.

En todo sistema físico que presente oscilaciones, desde un columpio hasta un láser, se define una cantidad llamada factor de calidad, que se denota por la letra Q . Si el valor de Q en un láser es pequeño implica que en la cavidad láser se tienen muchas pérdidas ópticas, mientras que si el valor de Q es grande implica que casi no hay pérdidas en la cavidad.

La Fig. 7.15 muestra un oscilador óptico con altas pérdidas, es decir, con un bajo valor de Q . Las pérdidas en este caso son producidas al introducir un "objeto extraño" en el interior del resonador óptico que impide que el sistema entre en oscilación y que el proceso de amplificación estimulada pueda ser eficiente. Por otra parte, la Fig. 7.13 muestra un oscilador óptico con bajas pérdidas y por tanto con un alto valor de Q . En este último caso no hay nada que impida la oscilación óptica del sistema.

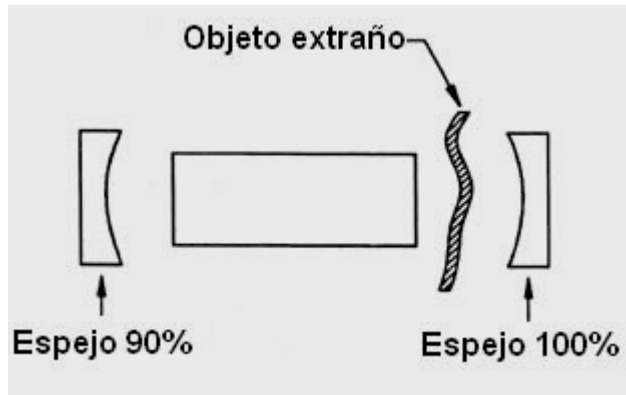


Fig. 7.15 Oscilador óptico con pérdidas de fotones.

Es posible construir un oscilador óptico que contenga en el interior de su resonador un interruptor óptico que nos permita variar a voluntad el valor Q de la cavidad. Esto se muestra en la Fig. 7.16. Si el interruptor está encendido, el flujo de fotones puede pasar a través de él y esto nos da un alto valor de Q . Por otro lado, si el interruptor está apagado, el flujo de fotones no puede atravesarlo y tenemos entonces un bajo valor de Q .

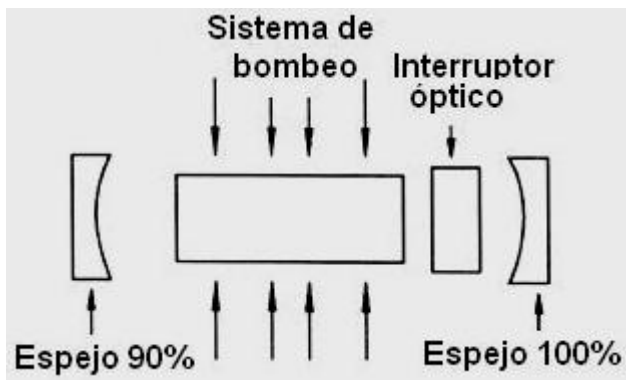


Fig. 7.16 Interruptor óptico en el interior de un resonador.

Si el interruptor óptico está apagado (o sea, un bajo valor de Q) y simultáneamente se dispara el sistema de bombeo, el sistema no puede entrar en oscilación láser y por lo tanto no puede perder energía emitiendo radiación láser hacia el exterior. De esta forma, toda la energía depositada por el sistema de bombeo será asimilada por los átomos contenidos en la cavidad amplificadora. Así, casi todos los átomos pasarán a su estado excitado y muy pocos permanecerán en su estado base. Así, el nivel de inversión de población que se define como la diferencia $N_2 - N_1$, alcanzará un valor muy grande. Si en este momento —en el que se tiene un valor de inversión de población muy alto—, repentinamente se enciende el interruptor óptico (obteniéndose así un alto valor de Q) el sistema entrará violentamente en oscilación y muy pronto se generará un pulso de luz láser corto e intenso. Esto se muestra en la Fig. 7.17. Allí se puede ver el valor inicial bajo de Q . El disparo del sistema de bombeo se inicia produciendo un incremento en el valor del nivel de inversión de población. En el instante t_i en que se acciona el interruptor óptico y se tiene un alto valor de Q , el nivel de inversión de población rápidamente decrece, produciéndose un pulso de luz láser corto e intenso. Algunos valores característicos de duración y potencia de pulsos láser generados mediante esta técnica son del orden de 10×10^{-9} segundos de duración y entre 1×10^6 y 1×10^8 watts de potencia. Sin embargo, existen sistemas láser para lograr la fusión nuclear que pueden alcanzar potencias de hasta 20×10^{12} watts (20 giga watts) en pulsos de 1 nanosegundo (1×10^{-9} segundos).

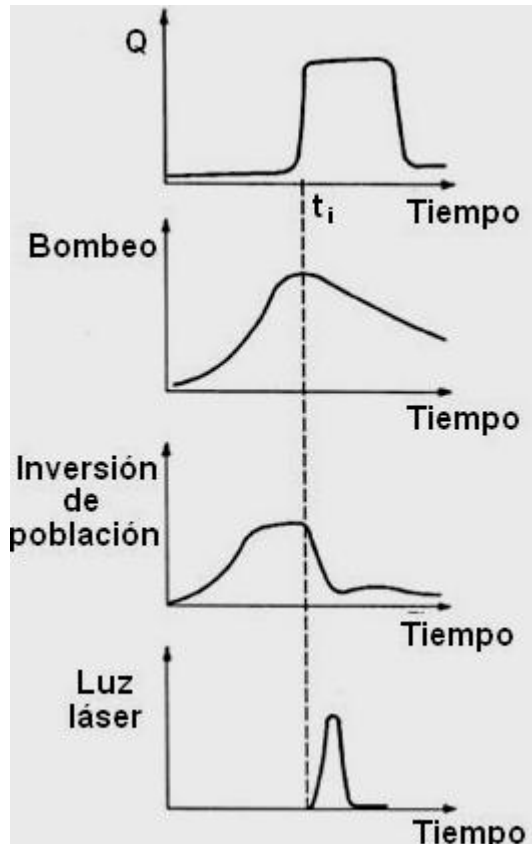


Fig. 7.17 Las gráficas muestran claramente la acción del interruptor óptico que se abre en un tiempo t_i .

7.1.6 LÁSERES PARA FUSIÓN NUCLEAR

Para realizar investigación sobre fusión vía láser se han construido varios láseres en el mundo. La tabla T-7.1 muestra algunos de los más importantes así como sus parámetros técnicos. Dentro de las características más importantes en la elección de un láser para este tipo de aplicaciones destacan la duración de los pulsos láser producidos, su energía, la longitud de onda de operación (el color de la luz emitida) y el número de haces láser disponibles para ser simétricamente focalizados en el blanco (que son las microesferas con mezcla de deuterio y tritio). Cada una de estas características es importante para mejorar diferentes aspectos del proceso de fusión. La longitud de onda del láser es una de las características más importantes para la fusión. De hecho, para lograr el proceso de fusión, entre más corta sea mejor.

País	Láser	Laboratorio	Energía/duración de pulso	Haces láser	Longitud de onda μm
EUA	Nova	Livermore	70 KJ/2.5 nseg.	10	0.35
	Omega	Rochester	3 KJ/1 nseg.	24	0.35
	Chroma	Kms fusión	0.7 KJ/1 nseg.	2	0.53
Japón	Gekko XII	Osaka	15 KJ/1 nseg.	12	0.53
Francia	Luli	Ecole Poly	0.7 KJ/0.6 nseg.	6	1.06
		Palaiseau	0.2 KJ/0.5 nseg.		0.25
Gran Bretaña	Vulcan	Rutherford	3 KJ/1 nseg.	12	0.53
	Helen	Aldermaston	1.3 KJ/0.2 nseg.	3	
Rusia	Delfin	Lebedev	3 KJ/1 nseg.	108	1.06
China	Shenguan	Shanghai	2 KJ/1 nseg.	2	1.06
Italia	—	Frascati	0.2 KJ/3 nseg.	2	1.06

Tabla T-7.1 Láseres para Fusión Nuclear.

La lista mostrada en la tabla T-7.2 muestra algunos láseres de alta energía y potencia así como sus longitudes de onda características

Láser de CO ₂	10.6 μm
Láser de CF ₃ I	1.31 μm
Láser de neodimio	1.06 μm (o 0.35 μm)
Láser de rubí	0.69 μm
Láser de KrF	0.24 μm

Tabla T-7.2 Láseres con amplificadores de diferentes materiales.

Por razones técnicas y económicas casi todos los sistemas láser construidos en el mundo para aplicación en fusión por láser son de neodimio. Los sistemas láser de bióxido de carbono (CO₂), a pesar de su alta eficiencia (mayor a 15%), prácticamente no se utilizan debido a su larga longitud de onda de emisión; los láseres de rubí tampoco se usan debido a que resultan demasiado caros, pues el rubí es un cristal muy costoso de producir. Los únicos competidores actuales de los láseres de neodimio son los de CF₃I y los de KrF; sin embargo, los problemas técnicos de construcción y operación de estos láseres son mayores que los del neodimio, por ejemplo, requieren del manejo de sustancias altamente corrosivas.

La Fig. 7.18 muestra el diagrama simplificado del láser Vulcan del laboratorio Rutherford Appleton en Didcot, Inglaterra. Ahí se tiene el más importante sistema láser de Europa para investigación en fusión. La mesa del oscilador contiene un láser cuya función es proporcionar pulsos con perfiles temporal y espacial determinados. Los pulsos láser ahí obtenidos son de baja intensidad y es necesario amplificarlos. Esto se hace pasando cada pulso a través de una serie de amplificadores, denotados como A16, A25, A32 y A45. Estos amplificadores son barras de neodimio de 16, 25, 32 y 45 milímetros de diámetro. En esta misma figura se pueden identificar aisladores ópticos, que operan variando la polarización de los pulsos láser, denotados como WP y FR, e interruptores ópticos como PC. Para corregir defectos y optimizar el perfil de intensidad transversal de los pulsos de láser producidos se usan filtros que se denotan como AP y VSF. Finalmente, como DA se encuentra un conjunto de amplificadores de disco de 108 y 150 mm de diámetro. Estos amplificadores de disco son amplificadores láser que no consisten en barras sólidas

de neodimio sino de discos de neodimio con dos a tres centímetros de espesor. Separados entre sí, cuatro o seis de estos "discos" (que de hecho son en forma elíptica), se colocan en cada tubo amplificador. Este diseño de amplificador tiene la ventaja de que su enfriamiento después de cada disparo láser es más rápido y eficiente de lo que sería usando una barra sólida de neodimio de igual diámetro.

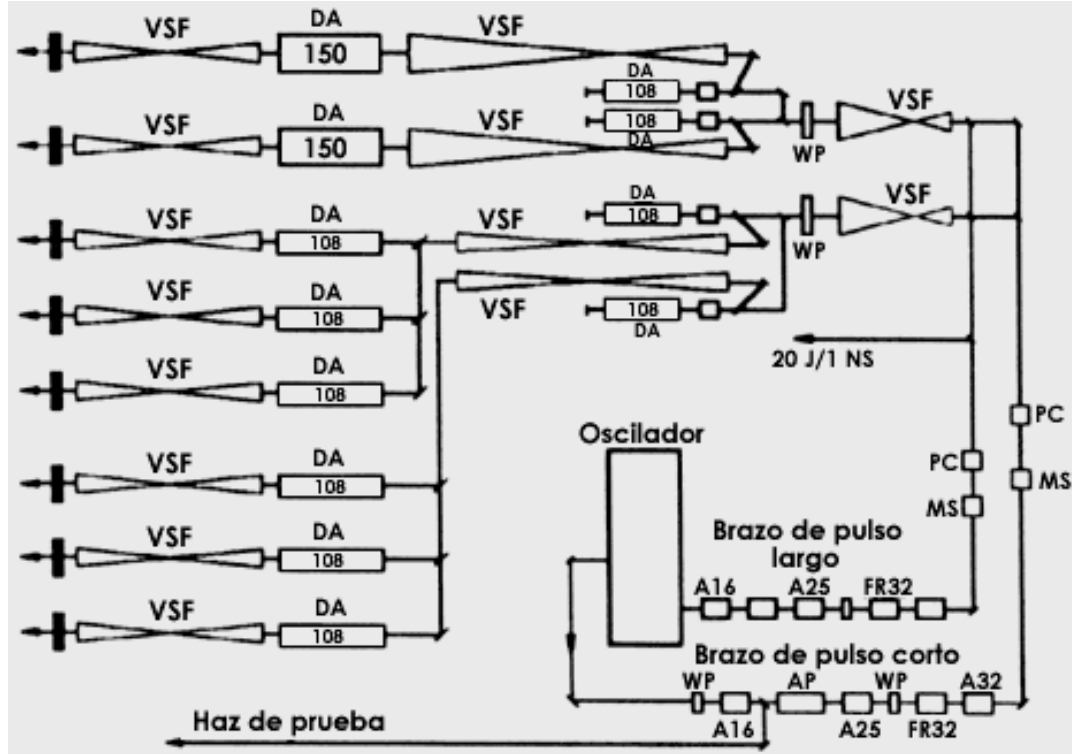


Fig. 7.18 Láser Vulcan del laboratorio Rutherford Appleton en Didcot, Inglaterra.

7.2 CÁPSULAS DE COMBUSTIBLE PARA FUSIÓN NUCLEAR

7.2.1 RADIACIÓN LÁSER Y MATERIA

En un día soleado, la superficie de la Tierra recibe del Sol en forma de radiación aproximadamente 250 watts por metro cuadrado (0.025 W/cm^2). Esto es suficiente para broncear el cuerpo de una persona en la playa y calentar ligeramente los objetos que nos rodean. Por otra parte, usando el láser como fuente de radiación se pueden alcanzar intensidades altísimas (hasta 10^{20} W/cm^2 o aun más) con lo cual es posible obtener usos espectaculares.

Por ejemplo, con intensidades de hasta 10^8 W/cm^2 se puede dar "tratamiento térmico" a los materiales; los valores exactos de intensidad dependen del material y del láser utilizado; lo mencionado en esta sección sólo tienen un propósito ilustrativo. Con este proceso se endurece la superficie de piezas metálicas, lo cual para algunas aplicaciones industriales es de mucha utilidad.

Con intensidades entre 10^8 y 10^{10} W/cm² se puede fundir un metal. Esto último también tiene una aplicación industrial importante, pues permite soldar materiales: juntando dos placas metálicas e irradiándolas con un láser a lo largo de su línea de contacto, éstas se funden en la zona irradiada, con lo cual el metal fundido de las dos placas se mezcla quedando soldado, al enfriarse.

Por otra parte, con intensidades láser entre 10^{10} y 10^{12} W/cm² casi todos los materiales se vaporizan. Esto tiene aplicaciones científicas e industriales; por ejemplo, en la deposición de películas delgadas sobre superficies ópticas el material a depositar se vaporiza usando un láser.

Finalmente, con intensidades de láser mayores a 10^{12} W/cm², todo material no sólo se vaporiza sino que se convierte en un plasma, que es un gas de muy alta temperatura en el cual sus átomos han perdido algunos o todos sus electrones: el material es un gas ionizado.

Cuando un láser se focaliza sobre una superficie y genera un plasma, el gas ionizado así producido se expande rápidamente debido a su muy alta temperatura y alcanza velocidades de hasta 10^7 cm/seg, que son similares a las presentadas en fenómenos astrofísicos, como la explosión de las supernovas. Esto es algo que intuitivamente podemos percibir en una cocina si vemos la rapidez con la que se expande el vapor de una olla de presión cuando ésta se abre por accidente antes de ser debidamente enfriada. Basta con pensar que el vapor de la olla de presión se encuentra a poco más de 100 grados centígrados, mientras que nuestro plasma o gas ionizado producido con láser se encuentra a millones de grados.

Como consecuencia de la expansión del plasma —que ocurre en dirección opuesta a la dirección de incidencia de la radiación láser— se produce una presión muy fuerte en la superficie del material ya que a toda acción corresponde una reacción igual, y en dirección opuesta. Esto último es consecuencia de la tercera ley de movimiento de Newton y esquemáticamente se muestra en la Fig. 7.19. Las presiones que pueden generarse de este modo son altísimas y similares a las que ocurren en el interior de las estrellas. Como se verá a continuación, este hecho proporciona la clave para todos los intentos de confinamiento inercial por medio del láser.

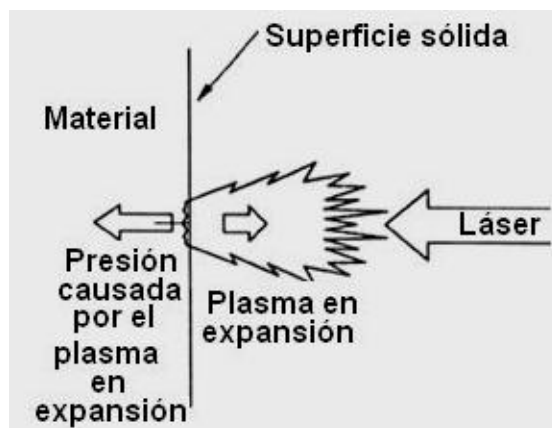


Fig. 7.19 La expansión del plasma ocurre en dirección opuesta a la dirección del láser.

7.2.2 EXPLOSIONES E IMPLOSIONES

En la sección anterior se vio que una de las más importantes consecuencias de focalizar la radiación láser tan intensa sobre un material, es que éste se volatiliza casi instantáneamente convirtiéndose en un plasma que se aleja a muy alta velocidad. Como resultado de esto, se produce una presión muy alta en la superficie del material.

Si la radiación láser incide sobre una superficie plana, como se muestra en la Fig. 7.19, no ocurre nada particularmente interesante. Sin embargo, si la luz láser incide de manera uniforme sobre una esfera, como se muestra en la Fig. 7.20, su superficie se vaporiza formando un plasma que, como una explosión, se aleja simétricamente de la esfera. Como consecuencia de esto, la superficie de la esfera es sometida a una presión sumamente alta y uniforme y el interior de ésta sufre una violenta implosión (una explosión "hacia adentro"). La densidad y la temperatura en el interior de la esfera alcanzan valores sumamente elevados. Si esta esfera contiene material nuclear fusionable, se pueden alcanzar las condiciones para que la fusión nuclear ocurra, con lo cual se produce una microexplosión termonuclear.

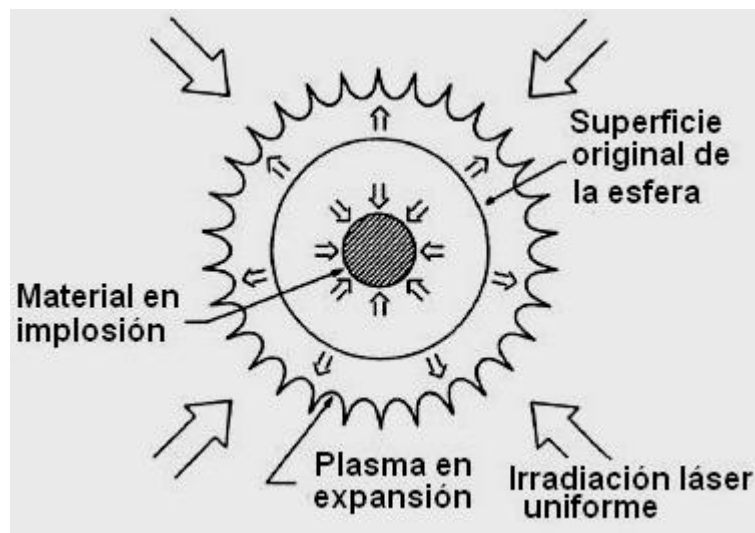


Fig. 7.20 Incidencia uniforme de láseres en una esfera.



Fig. 7.21 Cápsula de combustible preparada para el reactor de fusión de confinamiento inercial NIF, rellena de Deuterio y Tritio.

La Fig. 7.22 muestra el corte transversal de una microesfera diseñada con este objetivo. Los radios característicos de estas esferas son de 0.5 mm. La capa externa de la esfera está hecha de algún material de alta densidad como, por ejemplo, el silicio. Esto se debe a que esta capa es la que recibirá la radiación láser y la que, por tanto, se vaporiza formando el plasma en expansión. Entre mayor sea la densidad de esta capa externa, mayor será también la presión que producirá la implosión del interior de la esfera.

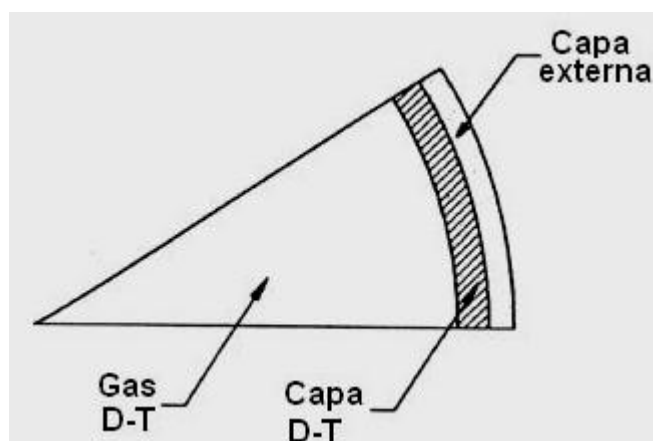


Fig. 7.22 Corte transversal de una microesfera de Deuterio y Tritio.

Una vez que incide la radiación láser, la capa externa de la microesfera "explota" en forma de plasma en expansión, mientras que el deuterio y tritio sólido y gaseoso del interior sufre una implosión que aumenta su temperatura y densidad a más de 100 000 000 °C y más de 200gr/cm³. En estas condiciones (que son similares a las que se dan en las estrellas) la fusión nuclear ocurre entre los átomos de deuterio y tritio y se libera la energía nuclear de fusión. Si estas microexplosiones son producidas aproximadamente 10 veces por segundo se podría hacer uso de la energía de fusión así liberada. Éste es precisamente el objetivo buscado. Como se verá a continuación, para que esto sea posible se deben satisfacer ciertas condiciones y vencer algunos de los problemas que serán descritos.

7.2.3 PLASMAS, PRESIÓN Y LUZ

Anteriormente se mencionó que para la irradiación de microesferas se prefiere hacer uso de láseres de longitud de onda corta. Ello se debe al hecho de que la presión producida en la superficie de un material irradiado por láser depende de la longitud de onda y de la intensidad de la radiación láser usado. Entre mayor sea la intensidad láser y menor la longitud de onda, mayor será la presión producida. Por lo tanto, usando intensidades altas y longitudes de onda cortas se pueden producir presiones mayores, tales que al irradiar microesferas de deuterio y tritio causen densidades y temperaturas mayores durante su implosión.

Para explicar por qué la luz de longitud de onda corta produce mayor presión, hay que recordar que esta presión es generada por el plasma o gas ionizado de muy alta temperatura en expansión. Por tanto, entre más plasma se tenga y mayor sea su temperatura, más grande será la presión ejercida. Por otra parte, un plasma es un gas ionizado formado por iones y electrones que están en rápido y constante movimiento. El continuo desplazamiento vibracional de los iones y electrones se caracteriza por una cantidad llamada la frecuencia de plasma n_p que nos indica la rapidez con la que las partículas del gas ionizado oscilan en el plasma. Esta cantidad depende de la densidad del plasma, pues entre más grande sea ésta, la frecuencia del plasma aumenta.

La Fig. 7.23 muestra la variación de la densidad de un plasma cuando la luz láser de alta intensidad incide en una superficie sólida (como en la Fig. 7.19). Como se puede ver, la densidad n_p del plasma es menor entre mayor sea la distancia de éste respecto a la superficie sólida original. De hecho, se nota que la densidad del plasma producido, varía de manera continua desde un valor alto cerca de la superficie sólida, hasta un valor muy pequeño para distancias suficientemente lejanas. Este resultado implica que la frecuencia de plasma n_p también varía de manera continua de igual modo que la densidad: es decir, tiene un valor alto cerca de la superficie del sólido y decrece conforme nos alejamos, de modo similar a como varía la densidad en la Fig. 7.22.

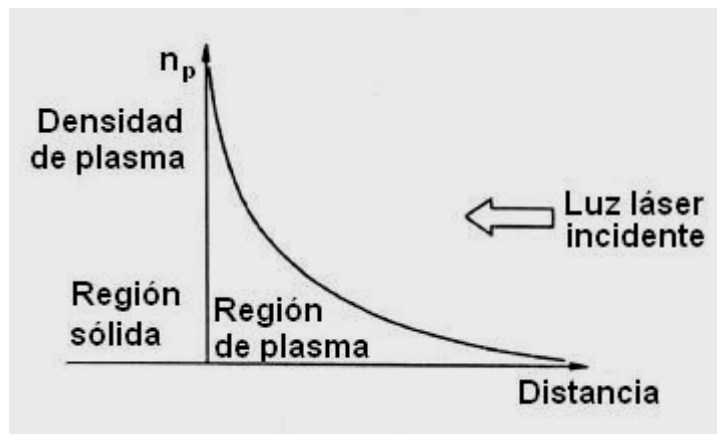


Fig. 7.23 La densidad del plasma es mayor en las cercanías de la región sólida.

La frecuencia del plasma es muy importante debido a que la luz (como la luz láser incidente utilizada) sólo puede propagarse en un plasma cuya frecuencia sea menor que la de la luz utilizada. Cuando la luz de frecuencia n_1 se propaga en un plasma y encuentra una región donde la frecuencia del plasma n_p es igual a la frecuencia de la luz n_1 , ocurre una reflexión total de la luz incidente, es decir, en la región donde la densidad del plasma es tal que $n_p = n_1$, el plasma se comporta como un espejo. A esta región del plasma se le llama región de densidad crítica. Esto se muestra en la Fig. 7.24, se puede ver que la luz roja dentro del plasma se propaga hasta una región de menor densidad que la luz azul debido a que la frecuencia de la luz roja es menor que la de la luz azul. Por lo tanto, usando luz azul se puede penetrar regiones de más alta densidad dentro del plasma. Esto es, si se utiliza luz de alta frecuencia (como el azul o el ultravioleta) se puede producir y calentar más plasma que si se usa luz de baja frecuencia (como el rojo o el infrarrojo), pudiéndose producir mayores presiones en las superficies donde se generan estos plasmas. Esto explica por qué se prefiere usar láseres de neodimio y no de bióxido de carbono para experimentar en la fusión por láser.

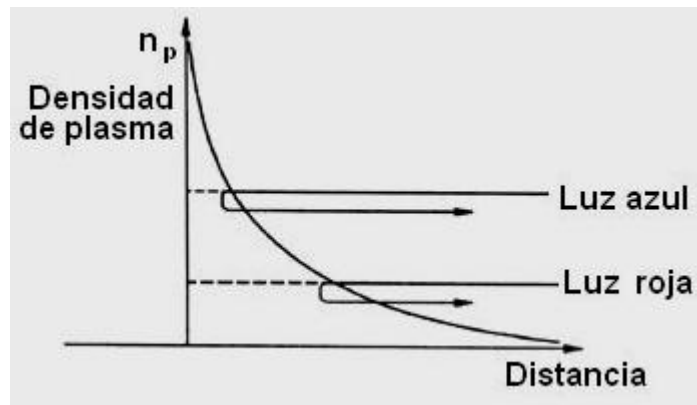


Fig. 7.24 La luz azul penetra más que la luz roja.

7.2.4 LA INESTABILIDAD DE RAYLEIGH Y TAYLOR

Lograr la implosión simétrica de una microesfera es un problema técnicamente muy complejo. Con frecuencia ocurre una implosión frustrada como se muestra en la Fig. 7.25 y no una implosión simétrica, como la que se esquematiza en la Fig. 7.20.

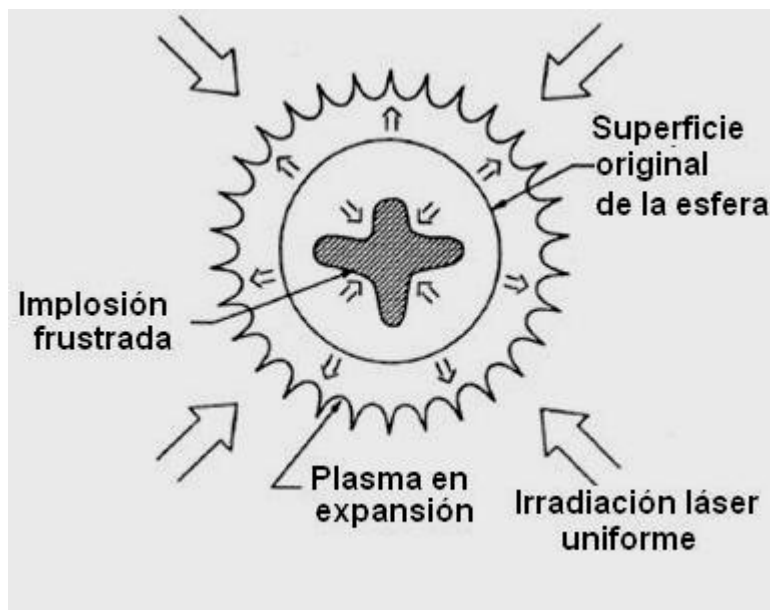


Fig. 7.25 La incidencia uniforme de pocos láseres no garantiza una implosión simétrica.

La razón por la que es muy difícil lograr implosiones simétricas perfectas, se explica por un proceso conocido como inestabilidad de Rayleigh y Taylor, ya que estos científicos fueron los primeros en estudiarlo. Comprender en qué consiste esta inestabilidad es sencillo si se hace lo siguiente: se llena un vaso con agua, y una vez que el agua esté en reposo, repentinamente se voltea el vaso y se observa qué ocurre con el agua, más allá de que se sabe que se va a salir del vaso y caerá al piso. La parte importante del experimento, lo que realmente interesa, es ver cómo sale el agua fuera del vaso. A manera de ayuda, en la Fig. 7.26 se proponen dos resultados posibles para el experimento. La experiencia indica que al salir el agua del vaso ésta caerá formando protuberancias arbitrarias y gotas como se muestra en la Fig. 7.25a y nunca caerá conservando intacta la forma original que tenía al estar en el interior del vaso, como se muestra en la Fig. 7.25b. Este resultado, tan sencillo y cotidiano, es consecuencia de la inestabilidad de Rayleigh y Taylor: cuando se tienen en contacto dos sustancias de diferente densidad y existe una fuerza dirigida de la zona de alta densidad a la de baja densidad, cualquier perturbación en la zona de interface crecerá rápidamente hasta convertirse en una notable protuberancia que finalmente podrá separarse en forma de gota. Esto es precisamente lo que se observa durante el experimento con el vaso de agua, pues al voltearlo, lo que instantáneamente se tiene son dos sustancias de diferente densidad con una superficie de contacto y una fuerza entre ellas. En otros términos, se tiene el agua que está "arriba" y el aire que está "abajo", así como la fuerza causada por el peso del agua.

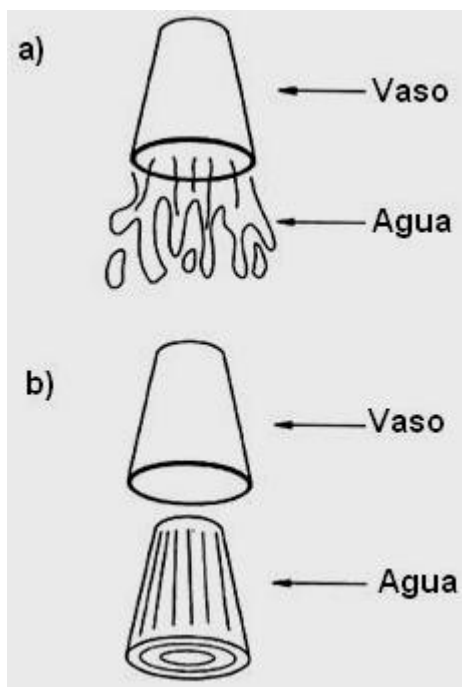


Fig. 7.26 Inestabilidad de Rayleigh y Taylor.

Ahora sólo basta percatarse que durante la irradiación con luz láser de una microesfera ocurre una situación muy similar, pues se tiene una zona de baja densidad (el plasma o gas ionizado), en contacto con una región de alta densidad (la mezcla de deuterio y tritio del interior de la esfera), así como una fuerza entre éstas causada por la presión del plasma en expansión. No es de extrañar que la inestabilidad de Rayleigh y Taylor, que causa que el agua de un vaso caiga tal y como lo hace, sea el mismo proceso que dificulta enormemente el comprimir simétricamente una microesfera de Deuterio y Tritio.

Para lograr una implosión uniforme se requiere que la presión que el plasma en expansión produce sobre la superficie de la esfera sea uniforme. Sin embargo, dado que esta presión depende de la intensidad del láser incidente, lo que se requiere es una uniformidad de iluminación de la microesfera. Lograrlo es técnicamente difícil, pues para iluminar una esfera se requieren necesariamente varios haces de láser que incidan desde diferentes ángulos. Por razones geométricas resulta inevitable que estos rayos se traslapen en algunas zonas de la esfera causando heterogeneidades en la iluminación.

La Fig. 7.1 muestra la distribución de haces en un sistema láser compuesto por seis diferentes rayos. En este caso la uniformidad de iluminación no podrá exceder en el mejor de los casos de un 15%. Diversos estudios y simulaciones computacionales muestran que la inestabilidad de Rayleigh y Taylor puede eliminarse prácticamente (durante el corto tiempo que duran los pulsos láser incidentes) usando uniformidades de iluminación de 1 a 2%. Esto es algo que sólo podrá lograrse si se utilizan sistemas láser de gran multiplicidad, para lo cual se requieren alrededor de 50 haces láser que iluminen las microesferas.

7.2.5 SUAVIZACIÓN TÉRMICA

Aunque la uniformidad de presión exige mucho desde el punto de vista técnico, por fortuna existen varios procesos que pueden ayudar a solventar dicha situación. En particular, un proceso que ayuda a que la microesfera en implosión "no sienta" la presencia de la diminuta falta de homogeneidad de la irradiación láser incidente es el de suavizamiento térmico.

Para explicar en qué consiste este proceso supóngase que se desea cocinar un gran trozo de carne en una sartén, con la condición de que la carne quede cocinada uniformemente. Por desgracia, nuestra estufa tiene defectos en sus quemadores, y el fuego que produce es muy irregular; es decir, hay regiones donde la flama es muy intensa y otras donde es muy débil. Ante esta situación, el cocinero debe elegir entre dos sartenes disponibles: una de lámina muy delgada y otra de lámina más gruesa. La Fig. 7.27 a y b muestran las dos situaciones descritas. En el primer esquema de la figura se representa la sartén delgada y se puede notar cómo las irregularidades de la flama son transmitidas al trozo de carne que se desea cocinar, lo cual producirá un cocimiento igualmente disparejo. Por otra parte, el segundo esquema de la figura muestra el resultado de usar una sartén de fondo más grueso. En este caso, el grosor de la sartén ayuda a que las irregularidades originales de la flama sean "suavizadas", lo cual se debe al fenómeno de difusión térmica dentro de la sartén. De este modo se puede ver que contar con una sartén lo suficientemente gruesa puede corregir la falta de homogeneidad original de la flama y dar como resultado una fuente de calor uniforme.

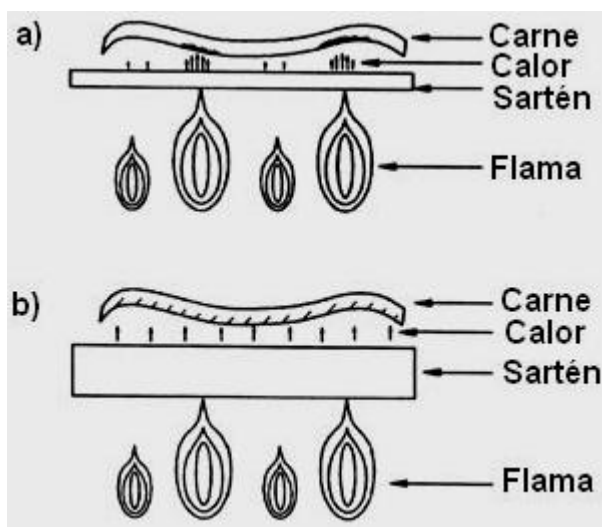


Fig. 7.27 La suavización térmica provoca la uniformidad de la cantidad de calor en la superficie a utilizar.

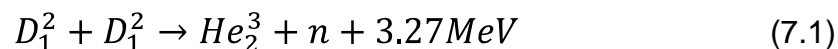
Algo semejante a lo anterior ocurre en el plasma producido por medio del láser durante la irradiación de una microesfera. De este modo, y gracias al proceso de difusión térmica en el plasma, las pequeñas irregularidades en la iluminación se suavizan. Todo lo cual contribuye a obtener presiones uniformes que facilitan la implosión del deuterio y tritio en el interior de las microesferas.

7.3 CONFIGURACIÓN DE UN REACTOR POR CONFINAMIENTO INERCIAL LASER

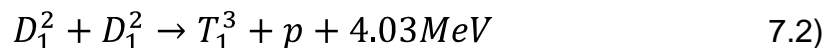
7.3.1 DETECCIÓN DE NEUTRONES

La probabilidad de que ocurra una reacción de fusión depende de la temperatura a que se encuentra la mezcla de material fusionable. Por otra parte, como resultado de la fusión deuterio-deuterio o deuterio-tritio se obtienen neutrones de energía particular. Por ejemplo, la reacción de D-D produce neutrones con energía de 2.45 MeV y, por lo tanto, detectar neutrones con esta energía es una indicación de que están ocurriendo reacciones de fusión, así como de la temperatura y densidad a las cuales se encuentra el interior de la microesfera. Midiendo la diferencia entre el instante en que se empiezan a detectar neutrones en relación con el haz láser incidente, se puede saber qué tan rápido ocurrió la implosión. Midiendo el tiempo que dura y la intensidad del pulso de neutrones se puede calcular la temperatura máxima alcanzada.

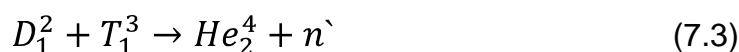
Al irradiar una microesfera llena de deuterio pueden ocurrir dos reacciones de fusión:



y:



La primera reacción produce un neutrón de 2.45 MeV de energía, mientras que la segunda produce un protón de 2.45 MeV más un tritón de 1 MeV. Si el combustible de deuterio se comprime a una densidad suficientemente alta, existe la posibilidad de que el tritón de 1 MeV se fusione con un deuterón antes de escapar de la zona comprimida. Así, se produce la reacción:



Donde el neutrón secundario n' tiene una energía de 12 a 17 MeV. Es decir, que este neutrón secundario se mueve mucho más rápidamente que los neutrones primarios originados en la reacción D-D. De aquí que midiendo el tiempo entre pulsos de neutrones y la intensidad de éstos, es posible determinar con precisión la densidad del combustible de fusión en compresión. Utilizando ideas semejantes es posible tener reacciones de tercer orden, en las que la energía de los neutrones terciarios n'' sea de hasta 30 MeV. Existen técnicas semejantes que se emplean cuando el combustible nuclear es D-T.

7.3.2 DISEÑO DE UN REACTOR POR CONFINAMIENTO INERCIAL

La idea básica de un reactor de fusión accionado por láser se muestra en la Fig. 7.28. Se puede ver que consta de un núcleo en el centro al cual convergen varios

haces de láser que inciden en una microesfera que contiene una mezcla de deuterio y tritio (D-T) en su interior. A través del canal de inyección entran las microesferas a razón de aproximadamente 10 esferas por segundo. Debido a la intensa irradiación láser en la superficie de cada microesfera se forma un plasma en expansión. Éste ocasiona la implosión de la mezcla de D-T del interior y eleva su temperatura y su densidad a valores en los que la fusión nuclear entre los átomos de deuterio y tritio ocurre de acuerdo con la reacción:

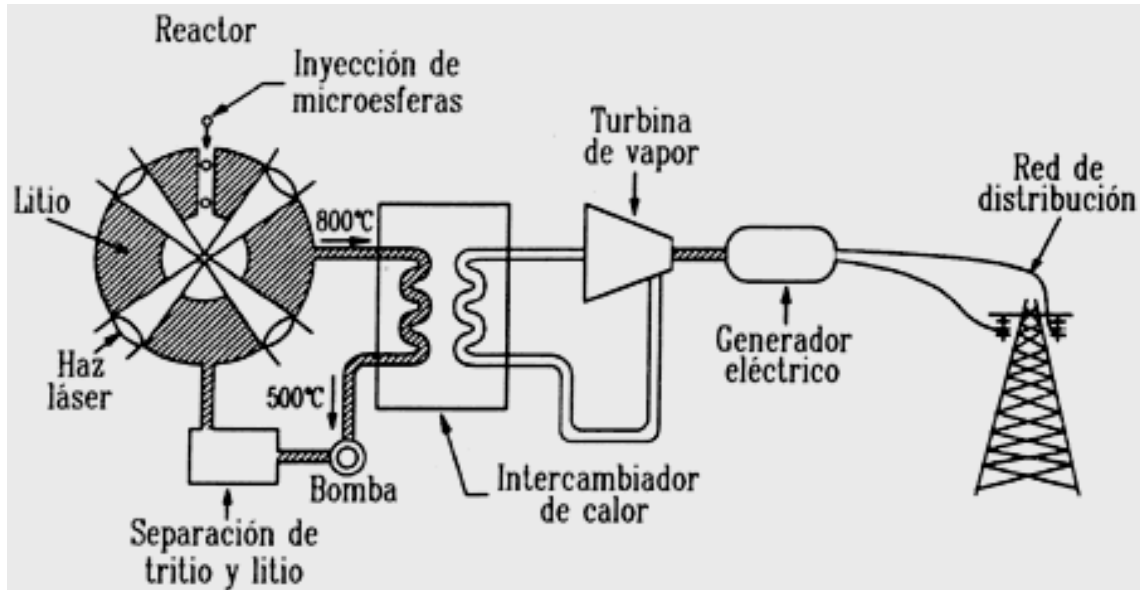
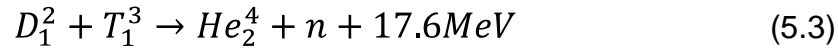
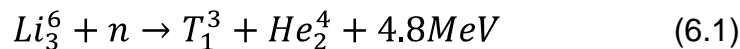


Fig. 7.28 Configuración Teórica de una central de generación de electricidad con reactor de Fusión Nuclear por confinamiento inercial láser.

La energía liberada en esta microexplosión termonuclear aumenta la temperatura del Litio líquido que se encuentra en el interior del reactor hasta aproximadamente 800 °C. El litio caliente se extrae del reactor y en un intercambiador de calor produce vapor de agua que acciona una turbina de vapor. A continuación, el eje de rotación de la turbina de vapor conectado a un generador eléctrico produce electricidad que se transmite a través de líneas de distribución convencionales.

Como se ha mencionado, el combustible nuclear utilizado es una mezcla de deuterio y tritio. El deuterio existe en abundancia y se extrae fácilmente del agua de mar que contiene un átomo de deuterio por cada 6 500 átomos de hidrógeno. Sin embargo, es necesario producir tritio mediante la reacción:



Debido a esto, se utiliza litio para extraer la energía de fusión liberada en la reacción de D-T, ya que el litio, además de su función como elemento de transporte térmico, al ser bombardeado por los neutrones de fusión liberados produce el tritio, que posteriormente se mezcla con el deuterio para ser usado como combustible del reactor en las microesferas utilizadas.

Desde luego que la operación del láser utilizado y de la planta de separación del litio y tritio requiere energía y ésta debe ser proporcionada por el propio reactor. La Fig. 7.29 muestra que un reactor útil debe producir mucha más energía de la que consume. De hecho, el problema más grave actualmente para construir un reactor de fusión por medio del láser es la baja eficiencia de los láseres disponibles, que característicamente es menor a 1% (eficiencia láser de 1% implica que por cada cien unidades de energía eléctrica que consume produce una unidad de energía de radiación láser). El usar estos láseres de tan baja eficiencia en un reactor daría el absurdo resultado de que casi toda la energía producida por el reactor sería consumida por el propio láser. Debido a esto, es hoy un tema de gran prioridad la investigación en láseres eficientes de alta potencia que emitan radiación de longitud de onda corta.

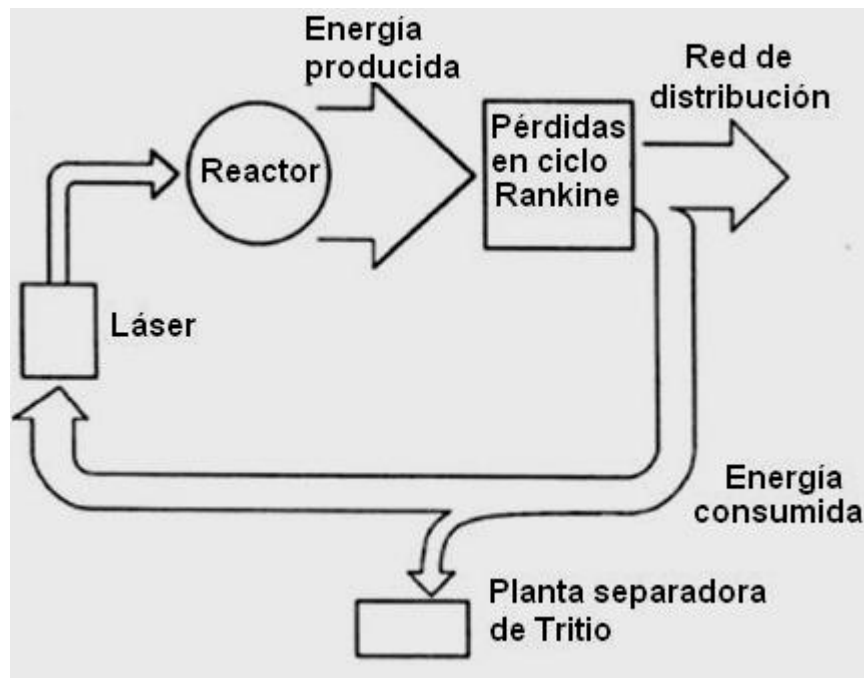


Fig. 7.29 La producción los rayos láser requiere de una gran cantidad de energía que puede ser tomada de la que se genera por medio de la Fusión Nuclear.

Una característica de estos reactores es su seguridad intrínseca, debido a que sólo utilizan el combustible suministrado. No es posible que el núcleo de un reactor explote debido a que se genere energía de fusión en exceso (lo cual sí ha ocurrido en reactores de fisión) ya que aun si deliberadamente se intentara producir una explosión introduciendo una microsfera más grande (o con más combustible) el láser no sería capaz de llevar esa nueva microsfera a la temperatura y densidad adecuadas para que ocurra la Fusión Nuclear.

CAPÍTULO 8

PERSPECTIVAS A FUTURO SOBRE LA FUSIÓN NUCLEAR

8.1 PROYECTO ITER

Desde hace algunos años diferentes países han estado trabajando en la implementación de la fusión nuclear como forma de generación de energía, de tal manera que se ha estado llevando a cabo un proyecto de nombre ITER.

El **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor, en español Reactor Termonuclear Experimental Internacional) es un consorcio internacional formado, en 1986, para demostrar la factibilidad científica y tecnológica de la fusión nuclear. El ITER que se construirá en Cadarache (Francia) y costará 10.300 millones de euros, convirtiéndolo en el segundo proyecto más caro después de la Estación Espacial Internacional.

ITER -“el camino” en latín- será la próxima gran instalación de tipo tokamak. Su objetivo es “demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la energía de fusión para fines pacíficos”. ITER ha sido diseñado en el marco de una colaboración internacional. ITER pretende lograr y estudiar plasmas de fusión en condiciones próximas a la ignición, muy similares a las esperadas en un reactor de fusión. Debe producir una potencia de fusión de 500-700 MW con un factor de amplificación de energía de al menos 10. Su objetivo también es demostrar el buen funcionamiento en régimen estacionario, la disponibilidad e integración de las tecnologías esenciales para las centrales de fusión y probar componentes para un futuro reactor, incluyendo prototipos de mantos fértiles de Tritio.

ITER incorporará tecnologías clave para las centrales de fusión mediante la construcción y uso de componentes con el tamaño y los requisitos de un reactor: bobinas superconductoras, figuras 8.1 y 8.2, componentes para alto flujo de calor, sistemas de mantenimiento remoto e instalaciones para el manejo de Tritio. Durante los 10 últimos años muchos de los puntos críticos de estas tecnologías han sido resueltos satisfactoriamente, en concreto a través de siete grandes proyectos de I+D que han proporcionado una base técnica sólida para la construcción del dispositivo ITER.



Fig. 8.1 Prototipo de la bobina de campo toroidal en la instalación para ensayos TOSKA (Karlsruhe, Alemania).



Fig. 8.2.-Integración de un prototipo de divertor.

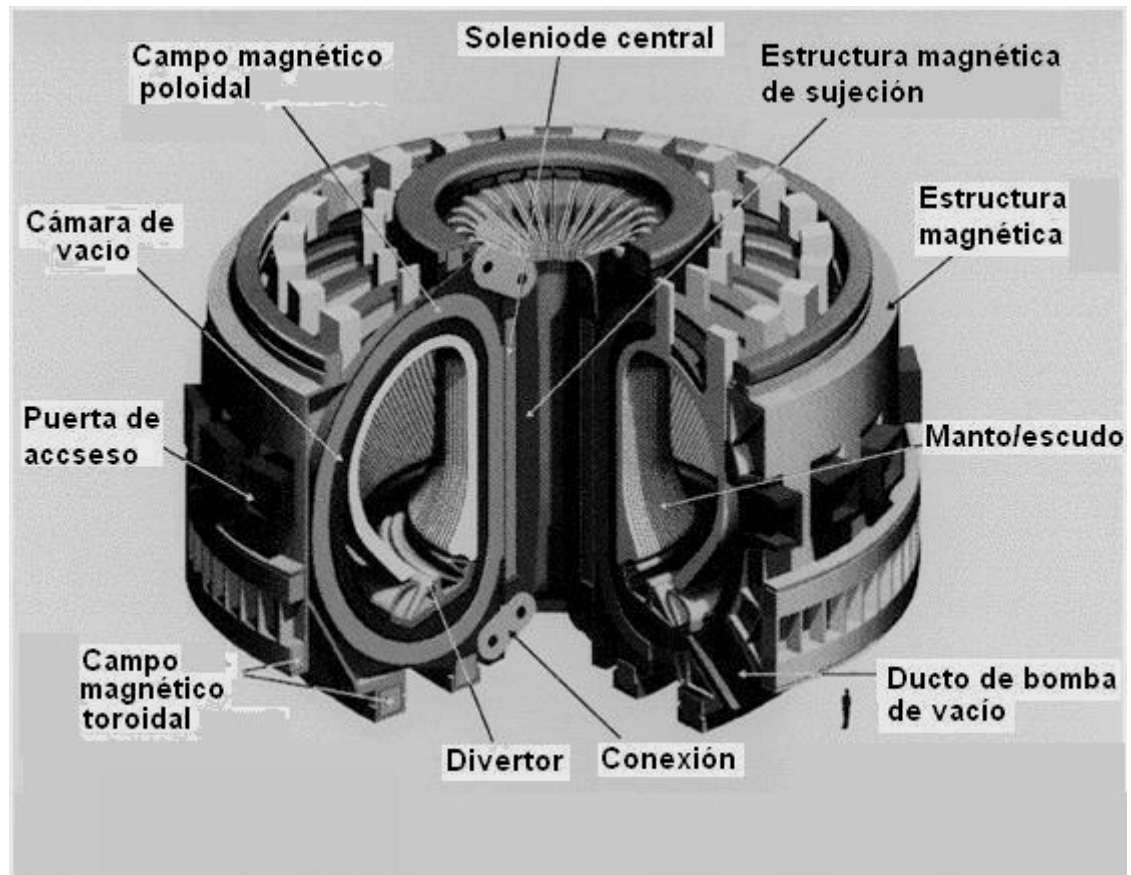


Fig. 8.3.- Configuración del ITER.

8.1.1 SOCIOS

Los actuales socios del consorcio son: Unión Europea (UE), Rusia (en reemplazo de la Unión Soviética), Estados Unidos (entre 1999-2003 decidió no participar), Japón, China (desde febrero 2003), Corea del Sur (desde mayo 2003) e India (desde diciembre 2005). Entre 1992-2004 participó Canadá.



Fig. 8.4.-Países Socios Proyecto ITER.

El 21 de mayo de 2006 se anuncia que físicos estadounidenses han superado uno de los problemas de la fusión nuclear usando el modelo Tokamak, el fenómeno llamado modos localizados en el borde, o ELMs (por sus siglas en inglés) que provocaría una erosión del interior del reactor, obligando a su reemplazo frecuentemente.

En un artículo publicado el domingo 21 de mayo de 2000 en la revista británica Nature Physics, un equipo dirigido por Todd Evans de la empresa General Atomics, California, anuncia que descubrieron que un pequeño campo magnético resonante, proveniente de las bobinas especiales ubicadas en el interior de la vasija del reactor, crea una interferencia magnética “caótica” en el borde del plasma que detiene la formación de flujos.

El 24 de mayo de 2006 los siete socios del proyecto **ITER** --Unión Europea, Japón, Estados Unidos, Corea del Sur, la India, Rusia y China-- firmaron en Bruselas el acuerdo internacional para el lanzamiento del reactor de fusión internacional con el modelo Tokamak, que se construirá en Cadarache, en el Sudeste de Francia usando el diseño Tokamak. Los costos de construcción del reactor se estimaron en 4.570 millones de euros y la duración de la construcción en 10 años. La UE y Francia se comprometieron a contribuir con el 50% del costo, mientras que las otras seis partes acordaron aportar cada una alrededor del 10%.

8.1.2 SELECCIÓN DE LA SEDE

Durante el proceso para definir emplazamiento del centro de investigación y del futuro reactor de fusión se presentaron varios inconvenientes. Durante el mes de

Noviembre existió una pugna entre Francia y España por la obtención de la candidatura de la UE para situar el ITER. La opción española tras descartar algunas fue Vandellós. El 26 de Diciembre de 2003, se elige finalmente la candidatura de Cadarache como la opción de la UE. En diciembre de 2003 los seis miembros no pudieron decidirse entre situarlo en Francia o en Japón. Al parecer, por motivos políticos los Estados Unidos estuvieron en contra de la candidatura de Francia (presumiblemente por su negativa a apoyar la invasión de Irak de 2003), lo cual dificultó la decisión definitiva.

Se llegó a plantear la posibilidad de que la UE siguiese adelante con el proyecto sin Japón y Estados Unidos. Esto fue sugerido por la Comisión Europea y por Francia, que contaban con que la aportación de estos dos países podría sustituirse con la entrada de nuevos socios y con aumentos de los países de la UE. Se había anunciado que India, Suiza y Brasil estarían dispuestos a participar en el proyecto europeo.

Los sitios candidatos fueron:

- Cadarache (Cerca de Marsella), (contaba con el apoyo de la UE, Rusia y China)
- Rokkasho, Japón (contaba con el apoyo de Estado Unidos, Japón y Corea del Sur)

El 28 de junio de 2005 en Moscú, se llegó finalmente a un acuerdo sobre la localización del reactor, que será ubicado en Cadarache.



Fig. 8.5 Vista panorámica Cadarache, Francia.

La UE asumirá el 40% de los costos de construcción, Francia costeará un 10% adicional mientras que los cinco socios restantes sufragarán 10% cada uno.

El Primer ministro de Francia, Dominique de Villepin, considera que el ITER conllevará la creación de 4.000 puestos de trabajo en su país.

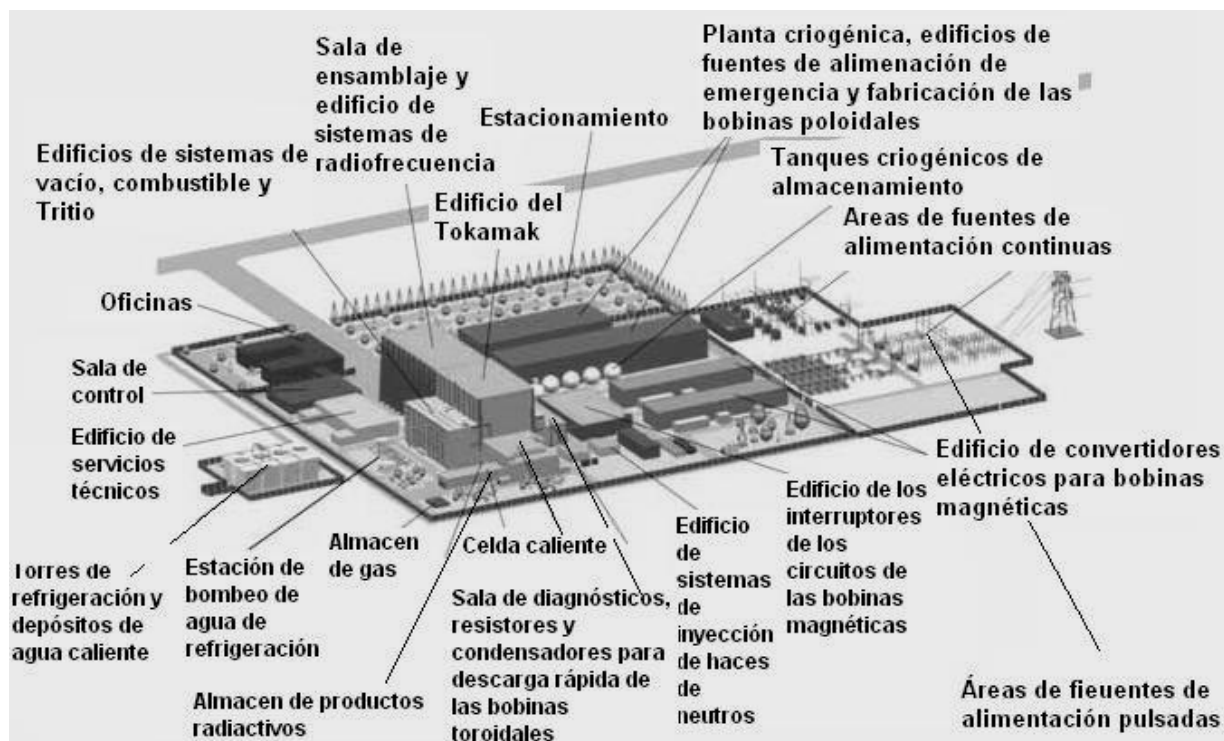


Fig. 8.6 Maqueta del proyecto ITER.

En paralelo a la construcción y la puesta en funcionamiento del ITER, se llevará a cabo un programa de I+D tanto en física como en tecnología para preparar el siguiente paso, DEMO, el cual es la implementación del resto de la planta Termonuclear. Este programa probablemente incluirá una Instalación Internacional de Irradiación de Materiales para Fusión (IFMIF). Esta fuente de neutrones de alta intensidad es necesaria para probar y verificar el comportamiento de los materiales necesarios para los futuros reactores de fusión, en particular los de baja activación. DEMO entrará en funcionamiento unos 30-35 años después de la construcción del ITER y demostrará la producción de energía eléctrica y su autosuficiencia con respecto al consumo de tritio. DEMO conducirá a la fusión a su era industrial.

CONCLUSIÓN

El actual texto cumple con su propósito de demostrar teóricamente la viabilidad de la Fusión Nuclear en la producción de energía eléctrica, debido a que señala ampliamente las ventajas que ésta tiene a favor, tales como:

El combustible: El Deuterio y el Tritio, elementos ligeros, lo que da como resultado que en poca cantidad de masa se puedan contener una enorme cantidad de átomos, el Deuterio es un isótopo del hidrógeno de gran abundancia en el planeta, mientras que el Tritio también es un isótopo del hidrogeno de baja radiactividad que se puede producir mediante una reacción de fisión a partir del Litio, dicha reacción se puede dar en el interior del Reactor Nuclear de Fusión Nuclear, estas características de los combustibles de la Fusión Nuclear Deuterio-Tritio nos dice que se puede contar con una reserva de combustible de gran abundancia como lo son el Hidrógeno y el Litio.

La cantidad de energía liberada: Los experimentos con bombas termonucleares han demostrado que la cantidad de energía liberada en una reacción de Fusión Nuclear es del orden de cuatro veces mayor que la energía liberada en la Fisión Nuclear, sin embargo, para llevar a cabo la Fusión Nuclear se necesita de un aporte energético inicial.

El control de la reacción: El control de la reacción de Fusión Nuclear está gobernado por la cantidad de combustible que se inyecte ya sea en forma de cápsulas, como en el confinamiento inercial, o en forma gaseosa, como en el confinamiento magnético, y por la energía que detona las reacciones de Fusión Nuclear y que es suministrada al reactor, como lo son los rayos laser o el calentamiento por ondas electromagnéticas, para el confinamiento inercial y magnético respectivamente, tales rubros son fácilmente controlables, por lo tanto teóricamente el control de un reactor de Fusión Nuclear es mucho más fácil que el control de un reactor de Fisión Nuclear y por lo tanto es mucho más seguro.

Por las características anteriores, el Reactor de Fusión Nuclear ITER es un proyecto muy importante para el avance de la tecnología humana que debe de terminarse lo más pronto posible, aunque sea como lo han llamado algunos escritores “un hoyo negro de dinero”, ya que está en fase de investigación, siendo éste un prototipo que costará aproximadamente 14200 millones de dólares americanos, mientras que una central de Fisión Nuclear cuesta aproximadamente 151 millones de dólares americanos, ese es dinero que en el futuro generará grandes cantidades de energía que se puedan repartir a todo el mundo, que se pueda producir de una manera más barata a largo plazo y lo más importante que no dañe a los ecosistemas del planeta.

Por último, se hace necesario señalar que la Fusión Nuclear es la forma de generar energía del futuro y que indudablemente cualquier avance en investigaciones

relacionadas a ésta, por mínimo que sea, dará grandes resultados para el bienestar de la humanidad.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) John R. Howell, Richard O. Buckius. “Capítulo 6 Ciclos termodinámicos y sistemas energéticos usuales”. Principios de Termodinámica para ingenieros, Traducción: Ileana Velasco Ayala, Revisión Técnica: Félix Núñez Orozco, Editorial McGraw Hill.
- (2) Soria Ferrer Antonio, Ros Martínez Eduardo. Física de partículas y de astropartículas, Editorial PUV.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

(1)

[http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/nucleoel%
c3%a9ctrica/Laenerg%
c3%adanuclear.htm?Combo=Laenerg%
c3%adanuclear](http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/nucleoel%c3%a9ctrica/Laenerg%c3%adanuclear.htm?Combo=Laenerg%c3%adanuclear)

(2)

<http://www.cepb.una.py/nuclear/energia.html>

(3)

[http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/135/html/fusion.html\(4
\)](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/135/html/fusion.html(4)

<http://www.zonaeconomica.com/biocombustibles>

(5)

[http://investigacion.universia.es/seccionEspecial.jsp?idEspecial=9&idSeccion=4207&
title=BIOCOMBUSTIBLES-VENTAJAS-E-INCONVENIENTES](http://investigacion.universia.es/seccionEspecial.jsp?idEspecial=9&idSeccion=4207&title=BIOCOMBUSTIBLES-VENTAJAS-E-INCONVENIENTES)

(6)

http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_at%C3%B3mica

(7)

<http://www.cepb.una.py/nuclear/energia.html>

(8)

<http://www.cepb.una.py/nuclear/fision.html>

(9)

<http://www.cepb.una.py/nuclear/fusion.html>

(10)

<http://erenovable.com/2006/06/01/iter-el-reactor-nuclear-para-probar-la-fusion/>

(11)

<http://enciclopedia.us.es/index.php/Deuterio>

(12)

http://www.cienciapopular.com/n/Ciencia/Fusion_Nuclear/Fusion_Nuclear.php

(13)

<http://es.wikipedia.org/wiki/Tritio>

(14)

<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/135/html/fusion.html>

(15)

<http://perso.wanadoo.es/chyryes/glosario/motores.htm>

(16)

<http://omega2.inin.mx/paraconocer/reactoresnucleares.pdf>

(17)

http://www.fisicanet.com.ar/energias/nuclear/en14/nuclear_23.jpg

(18)

<http://www.monografias.com/trabajos/enuclear/enuclear.shtml>

(19)

http://es.wikipedia.org/wiki/Reactores_de_confinamiento_magn%C3%A9tico

(20)

<http://ciencia.vndv.com/tecnologia/27-12-07/te27-12-07.htm>

(21)

<http://www.geocities.com/tresmileniosdeliman/tema11.html>

(22)

<http://www.anes.org/tutorial/cell.html>

(23)

<http://www.textoscientificos.com/energia/celulas>

(24)

http://www.claudio-otero.cl/fuel_cells/

(25)

<http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo4a.html>

(26)

<http://www.textoscientificos.com/energia/centrales-electricas/eolicas>

(27)

http://es.wikipedia.org/wiki/Central_hidroel%C3%A9ctrica

(28)

<http://www.textoscientificos.com/energia/centrales-electricas/vapor>

(29)

<http://www.cfe.gob.mx/es/Templates/nivel4/Contenido.aspx?NRMODE=Published&NRNODEGUID=%7B7E6F51C4-8065-4414-9850-A5A71F1BDD74%7D&NRORIGINALURL=%2Fes%2FLaEmpresa%2Fgeneracionelelectricidad%2Ftermoelectrica%2Fturbogas%2F&NRCACHEHINT=NoModifyGuest>

(30)

<http://www.cfe.gob.mx/es/Templates/otras/cmsVerImprimible.aspx?guid=%7B9488007B-263B-4D49-8429-8D6892784101%7D>

(31)

http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/03/09/140431.php

(32)

<http://www.elmundo.es/elmundo/2003/graficos/nov/s1/iter.html>

(33)

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/rutherford/rutherford.html>

(34)

<http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0504-01/tipos-rad.html>