



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

LA INGENIERÍA NECESARIA PARA LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
MUNDIAL EN LOS PRÓXIMOS 25 AÑOS

T E S I S  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO MECÁNICO  
P r e s e n t a

Pablo Álvarez Watkins

280539



Director de Tesis: Ing. Manuel Viejo Zubicaray

México, D. F.

2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**




**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.



À mi madre,  
ejemplo de esfuerzo, responsabilidad,  
entrega, dedicación, entereza y amor.  
Tu ejemplo me obliga a dar lo mejor de mí.

A Tania, por tu alegría, tu vitalidad, tu inteligencia, tu belleza, tu paciencia, tu comprensión, tu apoyo, tu mirada, tu sonrisa, tu amor. Por estar y ser uno en mi corazón.

A Nana, por su cariño incondicional, el cual no encuentro cómo corresponder

A mi Padre, por su integridad, un ejemplo de ética y moral que espero emular por siempre. Con todo el cariño que nos une.

A Francisco, Javier, Rosanela y José Luis, unidos por siempre.

A toda mi familia: Chiqui, Piti, Tere, Fede, Grisha, Miguel, Helena, Grishita, Tania, Debi, Alex, Rodrigo, Iñaki, María, Luciana, Diego, Gala, Mariano; la familia lo es todo.

A los cuates que me han soportado académica y extraacadémicamente estos años: Laura, Juan Pablo, Tere, Mumu, Eduardo, Farah, Javier, Mauricio, Israel, Fernando, Germán, Claudia, Toño, Oscar, el primo, Carrera, Tair, Toña, Yusen, Emiliano, y a quienes compartieron el sueño de alcanzar las estrellas, Yoatzin, Luis, Carlos, Margarita, Francisco, Samantha, Penélope, Claudia, Nahúm, Sergio, Bernardo, Úrsula y Paola. Sin amigos no se puede vivir.

A Natalia, André y Claudia, a quienes no puedo pedir más, amigos por siempre.

A Julieta y a Miguel Ángel, por confiar y ayudar; por ser la guía a las estrellas.

Al Ing. de la Herrán, ejemplo del ingeniero que aspiro a ser y por indicarme, después de una conferencia, con sabiduría y con la simplicidad que la acompaña, cuál debe ser mi misión, por su apoyo, gracias.

A Led Zeppelin *Let the music be your master.*

A las instituciones que me formaron, el ILV y la UNAM. Mi deuda es infinita.

## Agradecimientos

Al Ing. Viejo Zubicaray por confiar en un sueño e impulsarlo para que fuera una realidad. Por sus enseñanzas y su ejemplo.

A la Facultad de Ingeniería, valuarle de excelencia a la que debo mi preparación.

# ÍNDICE

	Página
<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>Capítulo I: LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.</i>	
1.1.- Marco histórico general de los energéticos y la generación de energía eléctrica.	3
1.2.- Panorama actual del sector de generación de energía eléctrica.	10
<i>Capítulo II: LOS ENERGÉTICOS UTILIZADOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.</i>	
2.1.- Combustibles.	16
2.2.- Energéticos alternativos.	28
2.3.- Energéticos nucleares.	35
<i>Capítulo III: INGENIERÍA DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.</i>	
3.1.- Ciclos convencionales.	38
3.2.- Alternativas renovables.	44
3.3.- Opciones nucleares.	53
<i>Capítulo IV: CICLO COMBINADO, UNA ALTERNATIVA EMERGENTE.</i>	
4.1.- Conceptos básicos.	54
4.2.- Combustibles y recursos.	59
4.3.- Costos e impacto ambiental.	63

# ÍNDICE

## Capítulo V: *LA FISIÓN EN PERSPECTIVA FUTURA.*

5.1.- Teoría de fisión.	66
5.2 - Ingeniería avanzada necesaria para esta tecnología.	71
5.3.- Problemas e impacto ambiental.	94
5.4.- Política nuclear mundial.	106

## Capítulo VI: *LA FUSIÓN COMO EL ESQUEMA DE GENERACIÓN DEL FUTURO.*

6.1 - Teoría asociada y estado actual de la tecnología de fusión.	121
6.2.- Impacto ambiental.	137
6.3.- Ingeniería avanzada necesaria para esta tecnología.	140

<i>PROPUESTA ENERGÉTICA</i>	145
-----------------------------	-----

<i>Anexo: Tabla de Impacto ambiental.</i>	170
---	-----

<i>Glosario</i>	172
-----------------	-----

<i>Factores de conversión</i>	176
-------------------------------	-----

<i>Bibliografía</i>	177
---------------------	-----

## INTRODUCCIÓN

*La energía es un placer eterno.*  
William Blake

El uso de la energía eléctrica es una comodidad moderna que muchas veces se da por hecho, pero de ninguna manera está asegurada por siempre. En comparación con otras manifestaciones energéticas, la eléctrica sólo ha sido utilizada por la humanidad en su último periodo de existencia. Sin embargo, ha tenido un impacto tan profundo, que la sociedad moderna desprovista de esta energía no sería concebible. Su distribución y disposición no es equilibrada en el mundo y recientemente se ha resaltado el hecho de que su generación no le es inocua hacia nuestro entorno.

La humanidad parece convertirse en un ente consumidor de energía inconsciente y despreocupado, que no sacia su apetito, no vislumbra límites, no estima retroceso y no concibe avance técnico o social sin mayor consumo energético. La realidad del mundo pronostica desarrollo y avance acelerados y sostenidos por muchos años, para los cuales es imperante el suministro de energía como sustento inicial. Sin energéticos primarios para impulsar el desarrollo, tales no podrán realizarse. En particular, nuestra civilización parece haber elegido la energía eléctrica como la energía destinada a impulsar este desarrollo.



Si el avance del que se habla propicia un bienestar creciente y más homogéneo a la humanidad, éste está justificado y con él el consumo energético. Pero, aun así, este avance debe comprometerse con el cuidado del ambiente, no perjudicarlo, pues a la larga es un perjuicio contra nosotros, y debe comprometerse también con las futuras generaciones para asegurarles que ellos no tendrán un problema mayor al que enfrentamos hoy. Proporcionar un consumo energético creciente y mantener un equilibrio social, ambiental, económico y tecnológico, es la paradoja irresoluble de nuestra civilización. Nuestro compromiso es lograr que la paradoja se cierre sobre sí misma, tratado de conseguir lo imposible.

Los objetivos de este trabajo son inferir las necesidades energéticas mundiales en los próximos 25 años, analizar la viabilidad técnica, ambiental y económica de las actuales corrientes de generación de energía eléctrica y proponer un esquema de ingeniería avanzada viable de acuerdo con las necesidades energéticas y ambientales. En los primeros capítulos se hace una revisión de la situación actual y las tendencias futuras de las principales corrientes tecnológicas de generación de energía eléctrica, y en el último se proponen varios esquemas de generación viables y la metodología para hacer factible el desarrollo que nuestra civilización exige, desde el punto vista energético. Es ante todo un ejercicio de planeación energética destinado a proponer como tesis, una solución a la paradoja del dilema energético.

## LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### 1.1.- Marco histórico general de los energéticos y la generación de energía eléctrica.

Toda la energía que tenemos en este planeta proviene del Sol de alguna manera. La radiación solar nos abastece continuamente de energía, el movimiento, una constante en el planeta, de una u otra forma puede relacionarse a la radiación solar o a los efectos gravitacionales del astro rey y nuestra acompañante selenita. Incluso la materia que conforma nuestro planeta, todos sus elementos y nosotros mismos, somos materia estelar, muy probablemente materia solar. La cantidad de esa energía es cuantizable y podríamos decir constante si elegimos como sistema al Sol, la Tierra y la Luna. La Primera Ley de la termodinámica nos alienta a hacer con la energía de este planeta cuanto queramos, sea lo que sea, su cantidad no disminuirá. El eterno problema de aquellos que planeamos utilizar adecuadamente esa energía es que la Segunda Ley no sólo limita la cantidad de energía útil que podemos aprovechar de una transformación, sino de cierto modo, también de que tipo de transformaciones y sustancias se obtendrá mayor energía. Aquellas sustancias a las que se puede extraer energía mediante alguna transformación se le conoce como *energético*<sup>1</sup>. El concepto de energético nos acompaña desde hace poco, pero los energéticos en sí nos acompañan desde el principio de la humanidad.

Los antropólogos tienen como un marcador evolutivo el hecho que los ancestros de la humanidad hayan utilizado el fuego. Energéticamente es sin duda el momento en donde el humano primitivo usa por primera vez un energético y no su

---

<sup>1</sup> Este y otros conceptos importantes (en cursivas), se encuentran en el glosario. En particular, éste concepto se emplea según el sentido común y a la definición de la Enciclopedia Hispánica

propia energía. Dicho energético fue probablemente la leña, seguida de otros combustibles como pudieron haber sido la brea y el carbón.

El uso del fuego debió inspirar duda o incluso miedo en un principio, pero permitió grandes avances y comodidades, deslindarnos de su uso y con ello de sus ventajas, debió parecer inadmisibles para nuestros ancestros que balancearon ventajas contra desventajas y afortunadamente decidieron aceptar este nuevo recurso. Es paradójico pensar que millones de años más tarde la disyuntiva energética es la misma.

Para conseguir energía mecánica, el hombre primitivo recurría a su propia fuerza. Otro avance en la evolución fue la domesticación de animales y su utilización para conseguir mayor potencia y menor esfuerzo humano. La fuerza animal nos acompaña hasta nuestros días, su papel ha disminuido drásticamente pero sólo a partir de este siglo, y aun así los animales de carga como caballos, mulas, burros, bueyes, elefantes, camellos, e incluso perros, siguen usándose para aminorar los trabajos físicos del hombre. La dependencia en la fuerza animal no sólo está en la práctica, es increíble que en los albores del siglo XXI exista en uso común una unidad de potencia mecánica que hace referencia al caballo.

La perspicacia e inteligencia de nuestros antecesores les hizo aprovechar los energéticos naturales más sutiles, las corrientes de agua y aire. Gracias a la utilización de herramientas y posteriormente máquinas simples, lograron construir artefactos, máquinas que convirtieran la energía cinética de estas corrientes en energía mecánica. Así, nacen los molinos de grano y algunas bombas de agua, que prescindían de la fuerza animal. Este es otro paso decisivo en la evolución energética, ya que es la primera vez que el hombre construye un aparato que le permita acceder a una fuente de energía y transformarla.

Con estas formas de energía a su disposición el ser humano podía comenzar a transformar su entorno para su mejor adaptación a él. El calor se proveía por medio

de combustibles fósiles, el trabajo mecánico era suministrado por animales o las corrientes naturales, y esto impulsó no sólo el trabajo del ser humano en tareas cotidianas, de construcción, etc., también impulsó el transporte, una necesidad básica de nuestra especie.

La leña fue el energético por excelencia hasta cercano el s. XVII, cabe aclarar que no estuvo sólo, el hombre utilizaba carbón vegetal y mineral, petróleo y aceites desde tempranas fechas, sin embargo, la leña predominaba como suministro de calor mundial.

El sustituto natural de la leña fue el carbón mineral, dados los avances en minería y su mayor capacidad calorífica.

La era industrial comienza en el s. XVIII y con ella la era del vapor<sup>2</sup> como impulsor y la era del carbón como energético. El mundo entero se volcó sobre este energético, el empuje de la revolución industrial.

El s. XIX trajo grandes cambios, no sólo en cuanto al tipo de energético primario, sino a los usos de los energéticos secundarios, a los métodos de transformación de estos energéticos, y todo apoyado cada vez más por una técnica más sustentada en la teoría, y viceversa. Los descubrimientos teóricos sobre la estructura de la materia condujeron a teorizar sobre nuevas fuentes de energía en nuestro planeta y en el Universo. Los inventos de Tomas Alva Edison<sup>3</sup> en el terreno de la electricidad abrieron la puerta a su utilización generalizada, y así la primera central eléctrica (que Edison ayudó a construir) se instaló en Nueva York en 1882, era una central de vapor acoplada a un generador de corriente directa. En 1885 se

---

<sup>2</sup> Cabe aclarar que las características del vapor ya se conocían desde la época en que el Herón de Alejandría (s. II a. C.) diseñó algunos dispositivos que funcionaban gracias al intercambio de energía entre un combustible y el agua.

<sup>3</sup> Tomas Alva Edison (1847-1931) Inventor Norteamericano cuyas aportaciones como la bombilla eléctrica (1894), el fonógrafo, el mimeógrafo, el cinetoscopio, entre otros contribuyeron enormemente al desarrollo de la humanidad.

instala en el río Ames la primera central hidroeléctrica que contaba con una turbina Pelton acoplada al primer generador de corriente alterna.

El carbón se usó desmedidamente hasta entrado el s. XX, para 1930 el 80 % de la necesidad de energía mundial era cubierta por este energético, un 10 % por petróleo y el resto todavía por leña, movimiento de agua y aire y la fuerza animal. Sin embargo, el petróleo ya figuraba de manera significativa y con el desarrollo de mejores técnicas para su extracción, el descubrimiento de grandes yacimientos y la necesidad creada por los conflictos mundiales de 1917 y 1940 se comenzó a revertir estas cifras.

El crecimiento promedio anual del petróleo entre 1950 y 1970 fue de 7 %, con lo que al final de este periodo logró ocupar el 50 % de las necesidades mundiales de energía<sup>4</sup>. En ese entonces, producción de calor y electricidad. En los setenta, la euforia petrolera con crecimientos anuales superiores al 10 % desembocó en una crisis o choque petrolero, provocada por un embargo de los países productores de petróleo. La disminución en la producción provocó un alza de los precios, que obligó a los países industrializados, importadores a promover la sustitución del petróleo por otras fuentes energéticas<sup>5</sup>. En siguiente página se muestra una tabla que expone la evolución en el precio del barril de petróleo promedio en los últimos años.

---

<sup>4</sup> CASTRO Díaz-Balart, Fidel, *Energía nuclear y desarrollo*, Cuba, Ciencias Sociales, 1990. p. 24.

<sup>5</sup> AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA, *Balance de Energía OCDE*, 1990.

Año	Pesos actuales <sup>6</sup>
1900	11.4
1950	16.15
1970	17.1
1980	332.5
1985	95
1990	198.93
1995	210.33
2000 (abril)	243.88

Tabla 1.1 Costo promedio anual del barril de petróleo crudo en este siglo<sup>7</sup>

Renace el concepto de energías renovables y comienza su estudio intensivo. Las opciones hidráulicas, solares, eólicas y biomasa, se vislumbran como una esperanza a la deficiencia de hidrocarburos. La esperanza de energía nuclear como sustitución a corto plazo apoyó el desarrollo de esta industria que ya tenía veinte años de existencia. En los primeros años de la década del setenta se pronosticaba que este tipo de generación se convertiría en el principal productor de energía eléctrica en menos de 30 años. Esto se aprecia en comentarios como:

" [...] al finalizar el siglo, alcanzará más del 70% " en cuanto a la cantidad de energía eléctrica producida por medio de la fisión, esto pensaba en 1977 Francisco

<sup>6</sup> Los precios se manejarán en pesos actuales considerando un cambio en relación al dólar de 9.5 pesos por dólar

<sup>7</sup> Datos tomados de: CASTRO Díaz-Balart, Fidel, *Energía nuclear y desarrollo*, Cuba, Ciencias Sociales, 1990, p. 25, El Informe anual de PEMEX para 1996 y del periódico *El financiero*, año XIX, número 5459, (México D.F. 18 de abril de 2000) p. 12 A.

Viscaíno Murray<sup>8</sup>, director del Instituto Nacional de Energía Nuclear (INEN) de 1977 a 1979. Solo en el ámbito nacional los pronósticos que favorecían esta industria planeaban que para los noventa se requerirían en México, al menos, veinte reactores nucleares en operación. Hoy en día México cuenta con cuatro reactores, dos para la generación de energía eléctrica, las unidades uno y dos de la central de Laguna Verde y los reactores TRIGA del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y el SUR-100 de la Universidad Nacional Autónoma de México.

La crisis del petróleo se mitigó con el descubrimiento de nuevos yacimientos en los mares del norte y su consumo continuó.

Finales de la década de los setenta y a principios de los ochenta surge una nueva variable al problema energético, el medio ambiente. A principios de siglo, ciudades como Londres, grandes urbes modernas tenían un problema serio con la contaminación del aire a raíz del uso desmesurado del carbón y se tomaron acciones para contrarrestar estos problemas, pero en general se tenía la visión de considerar al medio como un gran sumidero infinito, capaz de soportar y asimilar cualquier tipo de descarga. En la década de los setenta se alzaron algunas advertencias que contradecían esta visión y se hizo claro que el impacto que el ser humano tiene sobre su entorno no sólo no es grande, sino perdurable. Todos los aspectos de intervención humana fueron razón de escrutinio, nuestro uso de los recursos naturales, la transformación de esos recursos, los productos artificiales que la ciencia es capaz de generar, los accidentes que se suceden por la negligencia humana, las implicaciones de cambios sobre ecosistemas establecidos, etc. El impacto ambiental surge, y advierte sobre las consecuencias y la responsabilidad de la humanidad sobre nuestro planeta. Posteriormente se acuña otro concepto, el desarrollo sostenible o

---

<sup>8</sup> VIZCAÍNO Murray, Francisco, *México ante la energía nuclear*, México, Unidad de difusión institucional del INEN, 1977, p.11.

sustentable. Basado en el concepto que cualquier acción humana, por insignificante que ésta sea, tiene un impacto sobre el medio ambiente, pero que la civilización exige avance, y no sólo exige, se encamina sin detenerse hacia él, así que se debe conseguir un equilibrio entre dicho avance y el impacto que éste provoque. En particular la generación de energía tiene un papel determinante, ya que cualquier desarrollo se propicia gracias a que existen energéticos y distintos tipos de energía que puedan aprovecharse.

En los albores del s. XXI el equilibrio que pretende el desarrollo sostenible esta lejos de alcanzarse. La preocupación de los setenta se vuelve una urgencia de los primeros veinticinco años del próximo siglo. En general, los problemas a los que se enfrenta la generación de energía eléctrica son: escasez de recursos energéticos , a corto plazo en términos de civilización; incapacidad tecnológica para generar las fuentes energéticas que se necesitan, desarrollo desmesurado e imparable, problemas ambientales, y políticas de planeación más comprometidas con los intereses económicos y políticos existentes que con necesidades reales del sector.



## 1.2.- Panorama actual del sector energético mundial <sup>9</sup>.

Según el documento de estadística energética de las Naciones Unidas, el conocer y analizar las estadísticas en este sector permite un fundamento más sólido para generar políticas energéticas. Es claro que una parte fundamental de cualquier análisis son los criterios o condiciones de inicio, así considero importante analizar la historia energética, que da razón de las condiciones actuales, esto se hizo en el subcapítulo anterior, En este se analizarán diversos indicadores actuales sobre el sector.

En términos generales los energéticos que se producen, consumen e intercambian son varios, a continuación se manejan datos de producción y consumo que consideran energéticos primarios como el petróleo, carbón, gas natural, gas sintético, etc. Estos energéticos después se transforman principalmente en calor y electricidad, los cuales se obtienen por los reportes internacionales en producción, compra y venta de energéticos primarios.

La producción global de energía comercial en 1995 alcanzó 3 671 EJ <sup>10</sup> (87 mil millones toneladas métrica de equivalente en petróleo). Un dato apreciable es que en términos de petróleo crudo el consumo mundial superó a la producción por 40 millones de toneladas. Esto indica claramente que las reservas energéticas del mundo se gastan año con año, aunque este gasto sean a un ritmo de 0.05 % anual. En términos generales se demanda más de los que se oferta.

---

<sup>9</sup> Los datos que contiene esta sección tiene diversas fuentes, todas ellas incluidas en la bibliografía, sin embargo, la principal fuente es la 39ª Estadística anual de Energía de las Naciones Unidas (1992-1995), liberada a la prensa el 1º de diciembre de 1997, con número EN/241. STAT/437. Esta estadística engloba los datos de 215 países

<sup>10</sup> 1 EJ = 10<sup>18</sup> J.

Los países con mayor producción energética mundial son las potencias mundiales, Estados Unidos de Norteamérica, la Federación Rusa y La República Popular China, con una generación de 21, 12 y 10 % del total en el mundo respectivamente. Esto significa que el 43 % de toda la energía del mundo se concentra en sólo tres países, la distribución energética no es homogénea, nunca lo ha sido, sin embargo, las diferencias no parecen mitigarse, y a fines de siglo existen países en vías de desarrollo que no alcanzan, ni siquiera, la mitad de la unidad porcentual en producción, que es el caso de México que produjo el mismo año un total de energía primaria de 8.75 EJ<sup>11</sup> un 0.23 % del total mundial. En cuanto al crecimiento del sector energético se puede decir que de 1990 a 1995 la producción creció un 8 %, pero la demanda mundial de energía aumentó en 9 %.

De los energéticos analizados por la Naciones Unidas el que me parece importante resaltar es el del gas natural, ya que éste ha tenido, no sólo el mayor crecimiento entre los demás sectores, sino que su crecimiento ha sido notable en términos reales. La producción de gas natural en el mundo creció entre 1990 y 1995 un 17 %, el consumo de este energético primario creció también un 18 %. Esto es relevante por varias razones. Por un lado, se explica el crecimiento debido a las demandas ambientales que exigen combustibles cada vez mas "limpios". Comparado con los otros combustibles primarios el gas natural resulta ambientalmente "amigable" y además posee un costo muy accesible. Por otro lado, el observar que la demanda supera a la oferta, y que las expectativas son que esto continúe, conlleva la perspectiva de un alza de precios considerable. Los crecimientos en producción y consumo de petróleo en la década de los setenta marcan un antecedente objetivo a este nuevo energético. Estas razones del crecimiento en la producción del gas se acompañan de un desarrollo tecnológico amplio en las turbinas de gas.

---

<sup>11</sup> SECRETARÍA DE ENERGÍA, *Balance Nacional*, energía 1995, México, SE, 1996, p. 15.

En específico el sector eléctrico mundial cuenta con una producción total de 1.3097 billones de kWh ( $1.3 \times 10^{12}$  kWh =  $4.68 \times 10^{15}$  kJ). La generación de esta energía mundial se reparte en un 63 % en combustibles fósiles, 19 % de generación hidroeléctrica y un 17 % nuclear, el 1 % restante se reparte en las energías renovables.

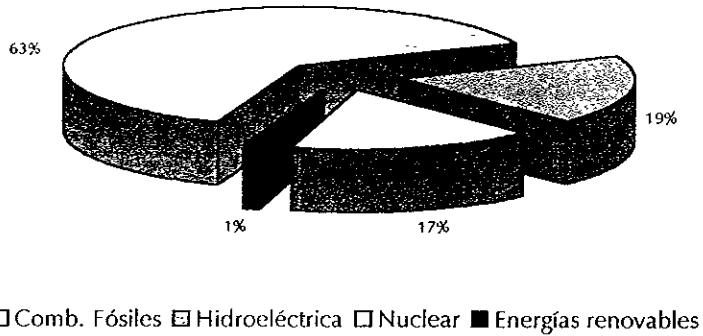


Figura 1.1.- Distribución de energéticos en el sector eléctrico mundial.

Cabe hacer notar que pese a que ha habido un retroceso en el uso de hidrocarburos en relación a los setenta, su dependencia supera más de la mitad de la producción. Esto es preocupante dado que las reservas probadas de petróleo en el mundo para fines de 1987 eran de 121 mil millones de toneladas, y en esa época se consideraba que, dado un consumo de crecimiento regular, dichas reservas alcanzarían unos 40 años, esto es 2030, sin considerar que el consumo neto de energéticos supera la producción como ya se mencionó.

El energético que le sigue, el recurso hidroeléctrico, tiene expectativas de crecimiento en el próximo siglo, con grandes proyectos como el de "Tres cañones" en China, sin embargo, el potencial mundial tope está cerca. En cuanto a la energía

nuclear es apreciable que el 60 % de dicha producción se concentra en sólo tres países, Estados Unidos de Norteamérica, Francia y Japón. A finales de 1996 existían 437 reactores funcionando en el mundo con una capacidad total instalada de 344 GWe<sup>12</sup>, 39 reactores estaban en construcción con otros 33 GWe netos, esto en realidad representa un decrecimiento en construcción de reactores en relación a otros periodos. Dado el alto porcentaje de energía que representa la energía nuclear y la gran cantidad de reactores nucleares que tiene Francia, y dado que es el país con un programa más ambicioso, tiene que ser considerada como la vanguardia para el diseño y la tecnología necesarias para este tipo de generación.

El país que ha tenido un crecimiento mayor en el sector eléctrico para el periodo comprendido entre 1990 y 1995 es China, con un crecimiento espectacular del 60 % en el consumo eléctrico, en 1995 su consumo anual es de 10.07 mil millones de kWh (36.252 mil millones de kJ).

En 1995 México producía 8.75 EJ de energía primaria, en específico el sector eléctrico produjo 142 344 GWh (0.512 EJ), de los cuales el 48 % se generan de producto petrolíferos, 19 % con energía hidroeléctrica, 13 % con gas natural, 10 % con carbón, 6 % con energía nuclear, 4 % con energía geotérmica y 0.004 % con energía eólica. Cabe destacar que la generación a partir de productos petrolíferos disminuyó con respecto a 1994 un 12 %, mientras que todos los demás rubros aumentaron. En cuanto al tipo, capacidad y número de unidades generadoras de electricidad en México, a principios de 1996 se contaba en México con:

---

<sup>12</sup> VÉLEZ Ocón, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997, p. 99 (Documentos de análisis y prospectiva del Programa Universitario de Energía)

Tipo de central	número de centrales en el país	Unidades totales	$\eta$ (%)	Capacidad total en MW	%
Vapor	28	91	34.736	13 370	41.57
Hidroeléctrica	62	176	35.12	9 056	28.15
Carboeléctrica	2	7	36.883	2 250	7
Dual	1	6	34.736	2 100	6.52
Ciclo combinado	5	27	35.233	1 890	5.9
Nucleoeléctrica	1	2	35.16	1 309	4.1
Turbo Gas	29	63	35.233	1 178	3.66
Geotérmica	5	28	35.12	753	2.34
Turbo Gas móvil	-	11	35.233	130	0.4
Combustión interna	11	54	34.736	86	0.27
Combustión interna móvil	-	52	34.736	42	0.131
Eoloeléctrica	1	7	35.12	2	0.006
<b>TOTAL</b>	<b>145</b>	<b>524</b>	<b>-</b>	<b>32 166</b>	<b>100</b>

Tabla 1.2 Unidades de generación de comisión Federal de electricidad para 1996<sup>13</sup>.

Según el Informe de Ejecución 1999 del Plan Nacional de Desarrollo, emitido por el Poder Ejecutivo Federal la capacidad instalada hasta ese año era de 35 666.6 MW. El crecimiento del sector en cuanto a capacidad instalada de 1995 a 2 000 fue del 12.7 % pero la cantidad de usuarios creció un 19.8 %, esto indica un sector con grandes expectativas de crecimiento. Sólo en año pasado se instalaron 411.1 MW que representan un 5.8 % de crecimiento con respecto a 1998. ¿Cuál será el crecimiento del sector en el futuro? Según el informe de Ejecución se necesitarán en los próximos 8 años, 21 mil MW extras que requieren una inversión de 460 mil millones de pesos. También se comenta en este informe que la capacidad instalada hasta enero de este años se repartía de la siguiente forma: los hidrocarburos tienen

<sup>13</sup> CFE, Catálogo de servicios 1995, México, división internacional CFE, 1996, p. 22. y CFE, *Balance Nacional de energía 1995*, p. 46

21 329 MW (59.8 %), las carboeléctricas 2 603.6 MW (7.3%), las hidroeléctricas con 9 630 MW (27 %), la nucleoelectrica con 1 355.33 MW (3.8 %) y la geotermia alcanza 749 MW (2.1 %).

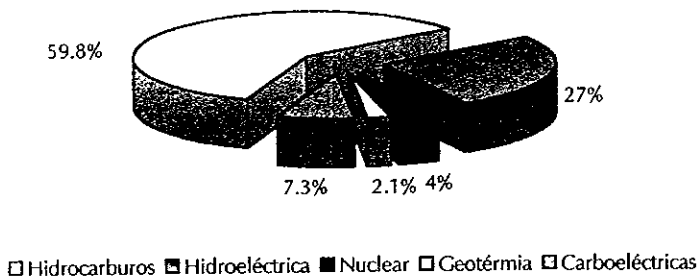


Figura 1.2.- Distribución de la capacidad instalada en México para 1999.

Con esta capacidad salimos del s. XX. Nuestras necesidades actuales están cubiertas. Según el informe del ejecutivo más del 94 % de los Mexicanos cuentan con el servicio de energía eléctrica. El futuro sin embargo no esta tan claro, es lógico pensar que se utilizarán varios energéticos y técnicas, algunas de las cuales se comentan en los próximos capítulos. Sin embargo, es importante resaltar el uso desmedido de los Hidrocarburos en el mundo y en nuestro país, el 60 % de las necesidades energéticas se cubren con combustibles que afectan directamente al ambiente. También es apreciable el bajo uso de opciones alternativas que individualmente apenas superan algunas un uso mayor al 0.05 %, pese a su resurgimiento hace 30 años. Toda la industria parece, en un análisis burdo, dar la espalda al medio ambiente, en términos cuantitativos generales es así, más adelante se harán evidentes las razones de estas distribuciones.

## LOS ENERGÉTICOS UTILIZADOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### 2.1.- Combustibles.

Se ha definido como combustible a aquella sustancia que es capaz de reaccionar con el oxígeno con un pequeño aporte térmico y la posterior liberación rápida de calor. En sí combustible quiere decir que arde con facilidad o que puede arder. La combustión es una reacción química que sufre dicha sustancia al entrar en contacto con el oxígeno (generalmente) y que conlleva un desprendimiento de calor y, algunas veces, de luz.

Por lo tanto en este subcapítulo se tratará aquellas sustancias de las cuales obtenemos energía mediante un proceso de combustión. La energía que se aprovecha en este caso es el calor que desprende la reacción.

Clasificar a los combustibles puede hacerse partiendo de distintos puntos de vista, la fase en la que se encuentren, el poder calorífico que posea, tipo de compuesto, etc. Se tratarán todos sin mayor clasificación para simplificar el estudio. Cabe aclarar que varias son las propiedades que deben estudiarse al elegir un combustible, como: composición química, poder calorífico, densidad, humedad, viscosidad, temperatura de ignición, tiempo de combustión, volatilidad, etc. Cada una de estas características serán mencionadas según sean relevantes para el combustible en cuestión, una omisión no representa que dicho parámetro no deba estudiarse para el combustible en particular, sólo que no es lo suficientemente relevante en este análisis. Sin embargo uno de estos conceptos es importante tratarlo antes; el poder calorífico o valor calorífico. Es un concepto que podemos asociar hoy

en día como consecuencia de la entalpía de formación de una sustancia. El concepto de entalpía de formación es teórico, y el del poder calorífico eminentemente práctico. En un combustible real existen varios componentes e impurezas que imposibilitan el hecho de conocer la entalpía de formación de los reactivos involucrados dentro de él. Para evitar este inconveniente experimentalmente se quema una masa determinada de combustible y los productos son enfriados hasta la temperatura inicial del experimento (298 K), así la cantidad de energía extraída para tal efecto, es entonces el poder calorífico del combustible. Sus unidades se expresan en energía sobre masa. Existen dos modalidades para el poder calorífico, el alto o superior y el bajo o inferior. La diferencia radica en considerar el agua que pueda formarse durante la reacción en fase líquida (para el superior) o en la zona de vapor saturado o sobrecalentado (para el inferior). Entre más alto sea el poder calorífico de un combustible, más energía será capaz de entregar por kilogramo, y esta es la razón por la que es importante para estudios energéticos<sup>14</sup>.

Los combustibles a tratar en esta sección son:

- Hidrógeno.
- Carbón.
- Petróleo y sus derivados.
- Gas Natural.
- Biomasa.

El Hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo, en su forma natural se encuentra en una molécula con dos átomos en fase gaseosa, es incoloro, inodoro e inodoro. Se le encuentra en la naturaleza asociado con el oxígeno, principalmente, ya

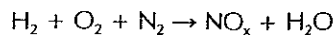
---

<sup>14</sup> También se usan unidades de energía por volumen en el caso de los combustibles gaseosos, pero en este trabajo se usarán en la medida de lo posible energía por masa, para tener congruencia en las comparaciones.



sea formando agua o en compuestos orgánicos, o bien asociado en moléculas diversas. Dada sus características especiales, la fuerza gravitacional de la Tierra no es lo suficientemente grande como para retener la molécula  $H_2$  libre, así que todo el Hidrógeno del planeta está en la corteza terrestre o asociado al vapor de agua en la atmósfera.

Como combustible presenta grandes ventajas. En presencia de oxígeno únicamente, su combustión produce agua, su poder calorífico es alto,  $PC = 113.04$  MJ/kg, y es de fácil combustión. Pero su principal desventaja tiene que ver con esta última ventaja, la facilidad de encendido y su volatilidad lo hacen peligroso de manejar, su tiempo de reacción es muy rápido también y en presencia de aire su combustión a altas temperaturas puede generar gases relacionados con el efecto invernadero al igual que los hidrocarburos.



La obtención de Hidrógeno industrial se hace principalmente al hacer reaccionar propano ( $C_3H_8$ ) y vapor de agua en presencia de un catalizador a  $900$  °C. También es posible su obtención cuando se pasa vapor de agua sobre una cama de coque a altas temperaturas, este proceso se conoce como obtención de *gas de agua*. Por último, la electrólisis del agua es un método efectivo que produce cantidades importantes de Hidrógeno molecular. Los tres procesos descritos ofrecen la ventaja de obtener el Hidrógeno a través de procesos que se pueden considerar sencillos, sin embargo el costo en los tres es alto y económicamente no representan actualmente alternativas contra los combustibles tradicionales, en los dos primeros casos se ofrece la posibilidad de obtener un combustible más limpio que con el que se comienza, Propano y Coque, sin embargo, esto no aventaja económica y temporalmente a quemar directamente los dos combustibles iniciales. La electrólisis presenta dos

inconvenientes, la primera es la inversión inicial de una planta que produzca mediante este método cantidades industriales de Hidrógeno, la segunda tiene que ver con el análisis del método mismo; para conseguir un energético primario, el Hidrógeno, se utiliza un energético secundario, la energía eléctrica, que a su vez será generada por la combustión del energético primario, este es un ciclo interdependiente que pocas veces resulta ventajoso.

El carbón es un combustible sólido, formado por carbono amorfo. Existen varias formas de aprovechar este combustible: en su forma de carbón artificial, mineral, licuado o gasificado. El carbón artificial es un producto creado por la combustión incompleta de materia orgánica, animales o vegetales, o bien, de la destilación seca del carbón mineral. Es caro y se usa como energético de bajo consumo, tiene un poder calorífico bajo. El carbón mineral se forma por la descomposición gradual de la plantas durante millones de años, existen varias formas minerales del carbón, como la antracita y el bituminoso. El carbón mineral se puede procesar para producir coque, benceno, tolueno, chapopote, gas carbono, etc.

Las ventajas principales como energético son su abundancia, su bajo costo y su poder calorífico alto. Sus principales desventajas son los productos de su combustión. Produce grandes cantidades de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, entre otros. Una gran cantidad de emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> proviene de la combustión. Los principales emisores, EE.UU. y China, contribuyen anualmente con 1 553 millones de toneladas de este contaminante. Se dice que el 90 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria eléctrica de EE.UU. provienen de la quema del carbón, y la industria eléctrica en su conjunto contribuye con un tercio de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en dicho país<sup>15</sup>. Por su parte China es el productor y usuario principal de carbón del mundo, 77 % de las

---

<sup>15</sup> SWEET, William, "Power & Energy", en *Spectrum*, EE.UU., vol. 33, Núm. 1, (Encro, 1996), p. 71.

necesidades energéticas totales del país se satisfacen con este combustible, y el 31 % de su consumo energético primario por la industria eléctrica se satisface con carbón.

La gasificación y licuefacción del carbón tiene como fin optimizar su combustión, disminuyendo la temperatura de combustión y mejorando el tiempo de reacción. También mejor a las características de los depósitos y residuos. Estos procesos se comenzaron a estudiar en la década de los cuarenta, en Alemania, ya que el suministro de combustibles convencionales resultaba cada vez más difíciles hacia mediados de la década. Los estudios casi se detuvieron al final de la segunda guerra mundial y se retomaron entusiastamente al final de la década de los setenta. El carbón gasificado, también llamado Gas Sintético o *Singas*, se consigue a partir de la reacción del carbón amorfo con vapor de agua como es el caso del gas de agua, o bien, lo más común actualmente, al reaccionar en un ambiente rico en  $H_2$  para obtener Metano ( $CH_4$ ), en ambas reacciones pueden encontrarse menores proporciones de otros elementos no deseados como los  $NO_x$ ,  $SO_x$  y combustibles como el propano, butano, metanol, etc. pero todos son considerados impurezas. La ventaja de la licuefacción sobre la gasificación es que gracias a los procesos propios de la licuefacción se logran aislar grandes cantidades de impurezas relacionadas con el azufre. Las desventajas de ambos es su alto costo actual, la necesidad de catalizadores para las reacciones, ambientes ricos en  $H_2$  (que siempre es peligroso) y que aún con todos los tratamientos, la combustión de estos energéticos aún no es tan "limpia" como la de otros Hidrocarburos.

La gran ventaja del carbón y sus productos derivados, gasificados o licuados, se encuentra en la aparente abundancia de este energético en el mundo, según algunas cifras podrían durar hasta 450 años<sup>16</sup>, a niveles mundiales. El caso concreto de China

---

<sup>16</sup> MARTINELL Benito, Julio, *Los Prometeos modernos o el esfuerzo para controlar la fusión nuclear*, México, FCE, 1993. (La ciencia desde México, 106) p. 8.

cuenta con reservas probadas de  $130 \times 10^{13}$  kg, estas son las terceras reservas más grandes del mundo precedida por Rusia y E.UU. Si el consumo permanece constante las reservas chinas se agotarán en el 2077. Sin embargo, si la producción anual de  $1.6 \times 10^{13}$  kg crece a  $2.2 \times 10^{13}$  kg para el 2010, como se espera, y dicho crecimiento se mantiene regular (2.3 % anual), las reservas chinas se agotarán poco después del 2043. En el caso concreto de México, la situación no es tan prometedora, las reservas probadas ascienden a 100 millones de toneladas y las probables a 650 millones de toneladas, aparentemente con las probadas sólo se cubre el suministro para las dos plantas carboníferas con las que cuenta México.

La escasez de energéticos ha propiciado el uso de energéticos despreciados en el pasado. Un combustible emparentado con el carbón, la "arena aceite" (oil sand) es una mezcla considerada en los setenta como curiosidad geológica y hoy en día Canadá planea su explotación y el rediseño de calderas para aprovechar este combustible<sup>17</sup>.

El petróleo es el energético más usado actualmente, más del 50 % del consumo mundial de energéticos se satisface con algún derivado del petróleo. El proceso de refinación convierte el petróleo en varios energéticos secundarios como: Gasolina, Diesel, Gas LP, Turbosiona, queroseno, petróleo diáfano y combustoleo, este último, siendo la merma del proceso de refinación, con un alto contenido de azufre y vanadio, entre otros.

Los poderes caloríficos aumentan según el proceso de refinación, siendo los más altos los de la gasolina (PC = 11 000 kcal/kg) y el Diesel (9 700 kcal/kg).

---

<sup>17</sup> VALENTI, Michael, "Oil sand kicks into high gear", en *Mechanical engineering*, vol. 120, núm. 12, (E.E.UU., diciembre 1998), p. 59.

Como con la combustión de cualquier hidrocarburo los productos de los derivados del petróleo de esta reacción son principalmente  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , junto con metales pesados que son impurezas remanentes del proceso de refinación.

El precio bajo y la disposición fácil de estos energéticos, aunado a la gran infraestructura que se ha desarrollado alrededor de la industrias petrolera, hace al petróleo el energético más solicitado a nivel mundial.

Las reservas probadas de este energético en el mundo, son tema de controversia, según algunos estas reservas alcanzarán, bajo consumo creciente y estable, hasta entrada la segunda mitad de siglo próximo, esto es 2070, 2080, otros consideran que no se alcanzará el 2030, bajo el esquema de consumo actual. Las zonas en donde se encuentran estas reservas son: el medio oriente, el mar del Norte, el occidente de Rusia, China, Venezuela y México, principalmente. En el caso de México en 1996 las reservas se estimaban en 60 900 millones de barriles de petróleo, que daría un abasto seguro hasta el 2050.

El gas natural es un hidrocarburo que promete mediar las exigencias tanto energéticas como ambientales para convertirse en el combustible con mayor demanda en los próximos 25 años y tal vez más. Se denomina gas natural dado que se extrae de pozos subterráneos. Su componente principal es el metano ( $\text{CH}_4$ ), aunque presenta otros componentes como el etano, propano, etc.

Su combustión es considerada "limpia" dado que no produce  $\text{SO}_x$ , y el porcentaje de  $\text{CO}$  y bajo ciertas condiciones  $\text{NO}_x$  son mucho menores que en los otros hidrocarburos, dada su alta eficiencia en combustión, el producto predominante en la reacción es el  $\text{CO}_2$ , aunque generalmente presenta también  $\text{CH}_4$ . Ambos afectan al ambiente en cuanto a su papel en el efecto invernadero, pero la cantidad de estos contaminantes producida por kW generado por este medio puede ser la tercera parte de lo que se produce con carbón, por ejemplo.

También en cuanto a las reservas de este energético hay discusión, la mayor parte de este recurso se encuentra asociado con petróleo crudo, aunque existen grandes mantos de "gas seco" como se le conoce al gas no asociado. En principio se cree que este energético puede satisfacer necesidades de energía hasta el 2100. El precio actual es muy bajo, lo cual lo hace un combustible atractivo. En México PEMEX Gas y Petroquímica han anunciado que a "niveles de producción actual" las reservas alcanzarán para los próximos 60 años<sup>18</sup>.

Por último en esta sección se considera a la biomasa como un combustible tanto histórico, como probable en el futuro. La biomasa son diversos compuestos orgánicos del carbono o provenientes de ellos, que se utilizan como combustibles. En esta clasificación se encuentran: la Leña, el bagazo de caña, el licor, la basura y el estiércol. La quema directa de cualquiera de estos energéticos produce los productos normales de cualquier combustión, y dado que su composición química es, esencialmente, CHON, pueden ser considerados tipos de hidrocarburos.

La leña es probablemente el energético más antiguo, tiene un bajo poder calorífico y es un recurso que viene directamente de la tala de árboles. Puede ser considerado como una posibilidad de combustible para la energía eléctrica a través de procesos de gasificación, pero su uso actual es el de proveer de calor a una gran cantidad de la población mundial, la de escasos recursos. Su uso como energético para la macrogeneración será exigua como menos y se deberá considerar el impacto ambiental que produciría la tala y siembra de árboles destinados a un uso masivo.

El bagazo de caña y otros subproductos, mermas de la actividad agrícola, han sido utilizados como combustibles por cientos de años, recientemente se les ha usado para generar energía eléctrica local en el sitio de producción de dichos desechos.

---

<sup>18</sup> *La Jornada*. Dir. Carmen Lira Saade, año 16, núm. 5616, (viernes 21 de abril de 2000), p. 16.

Más que generación la utilización de este recurso energético entraría en el rubro de la cogeneración, de las industrias agropecuarias que producen estos desechos. También puede procesar al bagazo de caña para obtener otro combustible gaseoso, el etanol.

El licor es una resina proveniente de los arboles que puede quemarse casi como un combustible sólido. Dado que su producción esta ligada a la explotación forestal tampoco representa una opción atractiva para su explotación masiva, encuentra su lugar en la generación de calor y no de electricidad.

La basura y el estiércol comparten características diferentes a los anteriores integrantes de la biomasa, dado que la producción de ambos esta asociada a los asentamientos humanos y dependiendo de éstos, esta producción puede ser alta y constante. Dado que se tiene que disponer de ellos de manera adecuada se han comenzado investigaciones diversas para lograr su reutilización o reciclaje. Una posible utilidad sería en la generación de energía eléctrica que abastecería de energía a la comunidad que genera estos desechos. Esta idea de satisfacer necesidades energéticas a partir de los desechos generados por la misma comunidad, es atractiva en dos sentidos, por un lado tener una fuente de energía "inagotable" asociada a cada comunidad, y segundo disponer de desechos no deseados sin tener que ocupar espacio. Las técnicas que se utilizan para lograr esto se concentran en la quema directa de los desechos o su almacenamiento (generalmente bajo tierra) que induce la fermentación anaerobia, la cuál produce principalmente metano. Este tipo de generación se enfrenta con tres problemas principalmente, uno es que la demanda de energía parece ser superior a la generación posible a partir de la producción de desechos, el siguiente problema se relaciona con el anterior en cuanto a la eficiencia de generación baja que se obtiene de estos procesos, provocada principalmente por el bajo poder calorífico de estos energéticos. Y la tercera, es que generan

contaminantes que atentan contra la misma comunidad que los produce. Los esfuerzos actuales se enfocan precisamente, en técnicas para disminuir los riesgos en contaminantes y elevar las eficiencias.

En este subcapítulo se han mencionado diversos productos de la combustión tratados con un enfoque perjudicial y que afectan a la elección de esos combustibles como viabilidad energéticas. Para justificar el carácter nocivo de estos productos se mencionan algunos de los efectos de estos contaminantes.

CO<sub>2</sub>.- Es un gas incoloro, inodoro e inocuo. Producto de la combustión completa del carbono con oxígeno. Indispensable para la fotosíntesis y por lo tanto para la vida en este planeta. Su peligro es su gran absorción infrarroja, al igual que el vapor de agua. En términos normales la concentración de este gas en la atmósfera no supera el 0.03 % en volumen, aumentar esta proporción aumenta también la cantidad de radiación absorbida, con esto la atmósfera retendría más radiación solar elevando así la temperatura atmosférica, a esto se le conoce como efecto invernadero. Se cree que desde principios de siglo se aumenta 1 ppm la concentración de éste gas en la atmósfera, lo que equivaldría a tener una concentración a finales de siglo del 25 % en volumen y, literalmente, toneladas de CO<sub>2</sub> extras en la atmósfera. De ser cierto (ya que hemos llegado a finales de siglo y la concentración pronosticada no se ha alcanzado) la elevación de la temperatura en el globo sería de 3 a 5 °C. Se cree que la elevación de temperatura global se esta dando, pero no en la magnitud que se había pronosticado. Otros gases del efecto invernadero son el vapor de agua, el metano, los clorofluorocarbonatos y los NO<sub>x</sub>.

CO.- Gas inodoro, insaboro, incoloro y tóxico. Es menos denso que el aire lo que hace que se disperse con rapidez hacia la parte superior de la atmósfera. Poco soluble en agua Se produce por una combustión incompleta del carbono. En proporción, hay 0.1 ppm en el aire puro. Su toxicidad radica en que sustituye al



oxígeno en la hemoglobina de la sangre, este es el encargado de repartir al oxígeno en todo el cuerpo, cuando una molécula de CO encuentra una hemoglobina libre, se adhiere y no se suelta, dado que la afinidad que tienen la molécula gaseosa y la célula sanguínea es 200 veces superior a la que tiene con el oxígeno. Si la concentración de CO es grande, varias hemoglobinas se verán afectadas y no habrá transporte para el oxígeno en el cuerpo, si la exposición es moderada (1 a 2 %, de las células de hemoglobina asociadas) se presentan dolores de cabeza, mareos y taquicardia, con 5 % de las células afectadas disminuye la agudeza visual y pricomotora, con un 10 % se presentan problemas serios cardiovasculares y si el 20 al 50 % las células de hemoglobina se combinan, el ser vivo muere por asfixia, insuficiencia de oxígeno general. La combustión puede aumentar a 5 000 ppm la presencia de este gas en el aire, lo que provocaría que en las zonas cercanas a la combustión, al menos existiesen 40 ppm, que es un alza ridículamente alta con respecto a la concentración normal.

SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>,- Proviene de la oxidación de azufre contenido en los hidrocarburos. El carbón contiene la mayor cantidad de azufre de ellos y le sigue el petróleo crudo con una concentración hasta del 10 %, aunque lo normal es de 3 a 5, y el petróleo tipo Brent tiene menos de 1 %. El bióxido de azufre es un gas incoloro, de olor irritante y que es más denso que el aire, es inestable y se transforma en SO<sub>3</sub>. Es muy corrosivo y agresivo con los metales, irrita las mucosas del aparato respiratorio, disminuye la capacidad inmunológica del cuerpo y favorece el enfisema pulmonar. Con 5 ppm hay irritación en mucosas y con 400 ppm puede provocar la muerte. El SO<sub>3</sub> es un líquido incoloro de olor amargo que combina fácilmente con el agua para formar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, componente de la lluvia ácida. Altamente corrosivo, ataca metales y también destruye la clorofila.

HC.- Siglas para denotar a los hidrocarburos no quemados durante la combustión. El petróleo es en realidad una mezcla de varios hidrocarburos y los otros combustibles también pueden contener una mayor o menor cantidad de éstos. Pueden provenir de la combustión incompleta, de la industria petroquímica, gasolineras o fugas de combustibles. Existen varios tipos de HC, los de mayor peso molecular son líquidos y los de menor peso molecular son gaseosos, los tres grupos o familias de HC tienen diversos efectos hacia la salud, los Alcanos causan asfixia, los Alquenos son tóxicos y los Parafínicos se cree, son cancerígenos.

NO<sub>2</sub>.- gas rojizo-pardo de olor desagradable, su origen proviene de la combustión incompleta, proceso de Nitración y descargas eléctricas atmosféricas. Sus efectos son irritación pulmonar, ataca el sistema cardiovascular, descompone clorofila, inhibe el crecimiento de plantas, diluye algunos compuestos de pinturas y metales, en presencia de agua forma ácido nitroso, HNO<sub>2</sub> y nítrico HNO<sub>3</sub>, componentes principales de la lluvia ácida junto con el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, también favorece la formación de PAN.

PAN.- Nitratos de Peracilo, también conocidos como "smog fotoquímico" o neblum. Son compuestos complejos y orgánicos que se crean en la atmósfera por la interacción de HC, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> y la luz solar. Estos compuestos son altamente tóxicos con el reino vegetal e irritantes al ser humano si la concentración supera los 30 ppB<sup>19</sup>.

O<sub>3</sub>.- Forma alotrópica del oxígeno, gas azul, de olor picante parecido al cloro, muy poco denso y muy oxidante. Se forma por la interacción del O<sub>2</sub> con el NO<sub>2</sub> y la luz. Irrita los ojos y las vías respiratorias a 0.3 ppm, endurece los plásticos, daña los vegetales, causa bronquitis crónica y baja la actividad de los agentes inmunológicos de los alvéolos.

---

<sup>19</sup> ppB es partes por billón.

## 2.2.- Energéticos alternativos.

Este término de energéticos alternativos es un concepto amplio y tal vez confuso. En este trabajo se manejan como aquellos energéticos que presentan la posibilidad de aprovechar fuentes naturales de energía no convencionales, y bajo el apelativo de convencionales me refiero a aquellos energéticos que entregan energía a partir de una reacción de combustión. También excluyo aquí a los energéticos nucleares dado que, aun cuando no sufren una reacción de combustión, la palabra alternativo no se asocia históricamente con ellos. En términos generales no se asocian con contaminantes como los combustibles fósiles. Aunque cada uno presenta su manera de impacto ambiental.

Se agruparan aquí a:

- La energía solar.
- La energía eólica.
- La energía hidráulica.
- La energía geotérmica.

El energético solar se refiere a la radiación solar que recibe el planeta en todo momento. Se puede dividir en dos formas básicas aprovechables, la radiación en el rango de luz visible y la radiación en el rango infrarrojo que proporciona calor. La cantidad de radiación que incide sobre la superficie terrestre no es homogénea sobre ella. El ángulo de incidencia disminuye al acercarse a los polos, aumenta y disminuye también al rotar la tierra sobre su eje y por último hay variaciones anuales debidas al movimiento terrestre de traslación. Aunado a esto debemos considerar la reflexión, absorción atmosféricas y la cantidad de nubosidad de la zona, para determinar la cantidad de energía que recibe cada lugar de la Tierra a lo largo del año. En México un promedio anual nacional de irradiación es de  $1 \text{ kW/m}^2$  considerando que las

zonas que más reciben son Sonora y Chihuahua y la que menos es Veracruz, cerca a Jalapa<sup>20</sup>. Considerando la situación geográfica y extensión del territorio nacional tomaré este dato para un pequeño cálculo.

Considerando el radio de la Tierra en 6368.56 km es posible calcular la superficie de la Tierra como si esta fuese una esfera (y considerado sólo una mitad iluminada), multiplicando ese dato por el dato de irradiación, la Tierra recibe 254.836 PW de potencia Solar; que convertida a energía solar recibida en un año (multiplicando por el número de segundos en un año) obtenemos que el Sol nos entrega por radiación  $8.03653 \times 10^6$  EJ. Es una cifra inimaginable. Comparándola con el consumo energético comercial total para 1996, que como se comentó en el capítulo anterior fue de  $E_{1996} = 3.671 \times 10^3$  EJ, se nota que la cantidad de energía que recibimos del Sol supera por mucho (más de 2 000 veces) a la que consumimos en todas sus formas. Esto hace que la opción Solar sea muy prometedora. Pero habría que considerar que 2/3 partes del globo están cubiertas por agua. Si sólo se construyen instalaciones solares en tierra firme, la energía solar aprovechable baja a la tercera parte. Como es evidente que no toda el área de tierra firme se puede adaptar con instalaciones, supongamos un 1 % de superficie terrestre total dispuesta para el aprovechamiento solar ( $1.698 \times 10^6$  km<sup>2</sup>) esto bajaría la energía solar aprovechable a  $2.678 \times 10^4$  EJ, que aún es más de siete veces el consumo mundial de energía para 1996. La potencialidad de este energético, es alentadora. En cuanto al tipo de impacto ambiental que este energético presenta, en un primer análisis aparenta no tener asociado ningún impacto, sin embargo, el mayor problema con esta tecnología es el área que ocupan, el impacto ambiental viene principalmente por daño al paisaje. En el ejemplo anterior se calculó que 1.6 millones de km<sup>2</sup> serían utilizados

---

<sup>20</sup> Dato emitido en una conferencia el 20 de X de 1997 en el *Univesrsum*, por el Dr. Rafael Almanza Salgado, investigador de la UNAM.

para generar energía, eso equivale a ocho veces el área superficial de Chihuahua, nuestro estado más grande.

La energía eólica es la que se aprovecha del movimiento del viento, así que lo que se busca aprovechar es transformar energía cinética en energía mecánica que pueda ser entonces transformada en eléctrica. Simplificando el fenómeno, el viento es provocado por cambios de presión en distintas zonas de la atmósfera, que a su vez fueron inducidos por cambios en la temperatura local debidos a la irradiación Solar no homogénea. Se dice que el 0.7 % de la radiación solar se transforma en viento. Estos cambios son bastante aleatorios pero puede pronosticarse algunos vientos preferenciales según las épocas del año y en determinados lugares. Es difícil estimar los recursos mundiales de este energético, dado que las variaciones son grandes y la geografía de las zonas influye mucho en el aprovechamiento de este recurso. En principio cualquier lugar donde se presente vientos constantes y de alta intensidad, mínimo unos 4.5 m/s, es un lugar propenso para este tipo de energía. En términos generales un lugar con mucha insolación o grandes planicies, son lugares típicos para el desarrollo de esta energía, aunque se ha comenzado a estudiar la instalación en ríos, cañones, costas y montañas. Un estudio previo a la instalación de equipo eólico toma, mínimo, dos años de prospección y análisis de la zona. En México se estima que contamos con tres zonas explotables, la Rumorosa en Mexicali, la bufa en Zacatecas y la Venta en Oaxaca, en donde ya se tiene una planta y tal vez en Veracruz, Pachuca y Quintanaro. Según un analista<sup>21</sup> México podría alcanzar hasta 5 000 MW<sub>elec.</sub> con esta opción. El impacto ambiental es similar al solar, el área que ocupa y como afectan al paisaje y a los ecosistemas donde se emplazan las centrales eólicas.

---

<sup>21</sup> Caldera E., "Potencial de energía eólica" en *Apoyo al plan Nacional de acción climática por* Sheinbaum C., Instituto de Ingeniería, 1998.

La energía hidráulica es comparable a la eólica en cuanto a que lo que se quiere aprovechar es la energía cinética de un fluido. En este caso el agua. El origen distinto de este movimiento diversifica los tipos de generación en este caso a diferencia de la eólica. Llamaré tradicionales a los tipos de generación hidráulica que aprovechan la energía cinética de un río o una caída de agua para generar electricidad; y modernas a los tipos de generación que pretenden utilizar algún otro tipo de movimiento del agua. En el caso del tipo tradicional, el flujo de agua es provocado por la acción de la gravedad terrestre; el agua depositada sobre el nivel del mar busca la forma de llegar a dicho nivel impulsada por la gravedad. Desde hace varios siglos se aprovechó el flujo de los ríos para mover ejes y moler semillas diversas. Las primeras plantas hidroeléctricas utilizaban el mismo principio dirigiendo parte del flujo de algún río hacia la turbina, posteriormente se aprovechó el salto hidráulico que presentaba el agua al estar contenida en una presa. Hoy en día este tipo de generación satisface muchas necesidades energéticas, según Naciones Unidas el 19 % de la generación mundial depende de esta fuente y la expansión del sector la sitúa en crecimiento constante y sostenido. El problema son las reservas de este energético. Hace tres décadas se pensaba que éste era un recurso inagotable, sin embargo, no lo es. El número de ríos y lugares geográficos en donde es posible construir una presa están disminuyendo en el mundo, aunado a que hoy en día se reconoce el gran impacto ambiental de construir una presa, que afecta el paisaje, el ecosistema local y probablemente mundial, están disminuyendo los lugares propensos a tener proyectos hidroeléctricos. Se calcula que en México podría generar hasta 28 mil MW gracias a este recurso, sin embargo en 1996, se aprovechaba sólo el 32.3 % de este total, y elaborar programas de expansión para el siguiente 58 % parece costoso y poco viable, el plan es, para el 2004, expandir la capacidad instalada en 2500 MW, apenas un 9 % más del total.

En lo que se refiere a energéticos hidráulicos modernos, puedo agrupar estos en energía Mareomotriz, ya que tratan de aprovechar la energía cinética que presenta el Mar. Estos tienen cuatro posibilidades, cuatro tipos distintos de movimiento marino que es provocado por diversas causas entre las que cabe mencionar, los efectos gravitacionales de la Luna y el Sol, los gradientes térmicos oceánicos y el viento. Las cuatro fuentes de energía cinética son: Las corrientes intercontinentales, las corrientes provocadas por las mareas costeras, el movimiento oscilatorio de las olas y las corrientes submarinas provocadas por los gradientes de temperatura entre la superficie y el fondo. Proyectos concretos para aprovechar alguno de estos movimientos, sólo se han realizado en cuanto al movimiento de las olas, con centrales flotantes que admiten la "cresta" de una ola, por la parte superior de la central y obligan al agua a pasar por una turbina antes de salir por el fondo de la central, y proyectos de diques costeros que retienen agua marina de la marea alta y al cambiar la marea obligan a fluir a través de turbinas de baja potencia. El país líder en esta tecnología es Francia. Nuevamente el impacto ambiental relevante para estos sistemas se refiere al impacto en el ecosistema del litoral en donde se instale la central, el cambio en el flujo normal de las corrientes puede alterar los ciclos de vida de los animales en la costa.

Por último en este subcapítulo se trata la energía geotérmica. Etimológicamente, se percibe que se trata de calor terrestre, el cuál se manifiesta y aprovecha gracias a la exhalación de vapor del interior de la corteza terrestre. Una posible causa de este fenómeno natural es el agua superficial que no fluye por un río se filtra al subsuelo, hasta encontrar un material impermeable que le impide el paso; el manto de la Tierra cuya temperatura es del orden de los miles de grados centígrados, calienta la corteza y en varias zonas el agua líquida se ve obligada a evaporarse aún sometida a presiones altas. Cuando las condiciones geofísicas lo permiten, rocas impermeables

pero frágiles, el vapor encuentra la salida a la superficie por medio de fisuras que él mismo genera. El resultado superficial es un flujo de vapor de alta presión y alta temperatura que sale del suelo, ya sea de manera continua o periódica como es el caso de los géisers.

Los países que se encuentran situados sobre fallas geológicas o ejes volcánicos tienen potencial de aprovechar esta energía. Existen varios tipos de sistemas geotérmicos posibles ya que existen diversas formas de fallas, están las continentales y las submarinas, los cuales como su nombre lo indica encuentran las emanaciones de vapor en los continentes o en los lechos marinos, los sistemas ígneos calientes, que cuentan con roca a altas temperaturas pero no hay filtración de agua, y por lo tanto se necesita la adición de este elemento transportado de un pozo cercano. En estos sistemas también se subclasifican en centros de alta o baja temperatura, con rangos hasta de 180 °C entre ellos. Existen los pozos de poca profundidad y los pozos profundos en los cuales es necesario una excavación hasta el lecho de vapor.

En cualquier caso el vapor caliente es el energético "primario" y como tal no produce grandes impactos ambientales salvo en aumento de temperatura en la zona, el problema con este vapor son los metales y minerales que arrastra al salir de la corteza. Algunos de ellos pueden ser peligrosos, pero la composición de impurezas de esta fuente energética varía de acuerdo a la zona en donde se encuentre el pozo. Lo que es frecuente encontrar es azufre asociado a los pozos, lo cual es peligroso por la formación de ácido sulfídrico o sulfúrico. En este caso, los recursos se limitan a las zonas de fallas y a la cantidad de agua disponible en la zona.

Es posible que los pozos se "sequen" después de un tiempo. La vida promedio de un pozo se calcula en 30 años. Varios países tienen este recurso, el principal explotador es EE.UU. con alrededor de 2330 MW, le sigue Filipinas con 1071 MW y después México con 753 MW en 1996. Las reservas probadas en México podrían



alcanzar para generar 4 500 MW, lo cuál significa que hace 4 años sólo se utilizaba alrededor del 16 % de este recurso. El plan de desarrollo de la CFE para este sector planea adicionar otros 800 MW para el 2004, lo que aún deja poco más del 60 % sin explotar.

### 2.3.- Energéticos nucleares.

En esta última sección se tratan dos grandes tipos de energéticos, aquellos que sirven para conseguir la fisión nuclear y aquellos que se pretende se utilicen para la fusión nuclear. Los conceptos teóricos que explican como se obtiene energía de estos energéticos utilizados para la fusión y la fisión se explican en los capítulos VI y V, respectivamente. Así que hablaremos un poco en este capítulo de las reservas de estos elementos y su impacto ambiental. El elemento básico de la fisión es el uranio. En realidad no es un elemento común en la superficie terrestre, pero debido a la gran potencialidad de generación de energía nuclear, con pocos gramos del material, se puede conseguir grandes cantidades de energía. Los elementos fisionables comunes son el Uranio, el plutonio, el torio y el Berilio. La abundancia de los minerales radioactivos fisionables puede considerarse grande. Los recursos especulativos de uranio son de 17 millones de toneladas en el mundo<sup>22</sup>, y se esperaría que su explotación durara varios años, en el peor de las perspectivas los recursos se agotarían en el 2060, pero en otras perspectivas se calculan hasta 300 años. Los países que cuentan con mayores reservas, son EE.UU., Canadá, Francia, Rusia, Sudáfrica, Namibia y Australia . En México hay varias contradicciones en cuanto a la abundancia de este recurso, por un lado en los ochenta se decía que las reservas probadas del mineral eran de 14600 toneladas de las cuales 4000 no eran económicamente explotables, esto era suficiente para abastecer a Laguna Verde durante su vida útil más un excedente de 30 %. Sin embargo, dado que, también se dice, que el 75 % del territorio nacional está sin ser inspeccionado en cuanto a reservas de uranio, otra estimación arroja cantidades enormes de 500 mil toneladas posibles.

---

<sup>22</sup> VÉLEZ Ocón, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997. p. 102.

De todas las fuentes de energía, la fisión nuclear probablemente tiene las peores relaciones públicas, y como resultado, la aceptación pública más baja<sup>23</sup>. No es una sorpresa encontrarse con estas aseveraciones incluso de los defensores de esta tecnología. Esto se debe a tres factores. El primero, ajeno a la utilización de energía nuclear para generar electricidad, es la carrera armamentista nuclear; la segunda y tercera son los accidentes nucleares y los desechos radioactivos, por último la cuarta se debe a los efectos de la radiación sobre el cuerpo humano. En concreto los peligros hacia el ser humano por efectos de la radiación son, pérdida de cabello, quemaduras radioactivas, cáncer en órganos como los pulmones, riñones, hígado, tiroides, mamas, de médula; anormalidades en órganos reproductores y en las paredes del intestino, síndromes cerebrales y alteración del código genético del individuo. El primer problema con la exposición intensa a la radiación es la aparición de quemaduras, similares a las obtenidas por la radiación proveniente de un fuego, la exposición, aunque sea no directa de 1 000 mSv<sup>24</sup> producen náusea y fatiga, 3 000 mSv intensifican estos síntomas y existe la posibilidad que el 20 % de la población expuesta muera en menos de un mes, 4 000 mSv eleva el porcentaje al 50 % de la población, y con 6 000 mSv la muerte de todo aquel expuesto es inevitable. Para poner en perspectiva estas cifras cabe aclarar que la exposición a la radiación cotidiana y normal, al año, es de 2.5 mSv<sup>25</sup>. Estos datos hacen comprensible, no justificado, cualquier rechazo no informado hacia la energía nuclear, por causa del miedo. Sin embargo, es nuestra primera responsabilidad como ingenieros, cuidar a la población, y por lo tanto, asegurar que estos efectos no se encuentren más en el futuro a causa de la generación de energía nuclear.

---

<sup>23</sup> CULP, Archie W. *Principles of energy conversion*, EE.UU., McGraw Hill, 1991, p. 249. (Traducción mía)

<sup>24</sup> Unidad del SIU para la dosis equivalente de radiación.

<sup>25</sup> CFE, *Del fuego al la energía nuclear*, México, 1997, p. 35.

La futurista opción de fusión no tiene estos problemas de radiación asociados. El elemento básico de la fusión es el hidrógeno. Es un elemento muy común en la Tierra, y el más abundante en el Universo, quizás más del 98 % de la masa total del Universo esté compuesta de H. En cuanto a las reservas del planeta, se puede calcular que en 1 cm<sup>3</sup> de agua (bajo condiciones estándar)<sup>26</sup> existan  $3.3366 \times 10^{22}$  moléculas de H<sub>2</sub>O, por lo que hay el doble de moléculas de hidrógeno. Considerando el volumen de agua que existe en nuestro planeta, que a su vez se estima en  $1\,405 \times 10^6$  km<sup>3</sup> en el planeta, de las cuales el 93 % está en los mares y océanos, 5 % en los ríos y lagos, un 2 % en los polos, y menos de 0.001 % en la atmósfera. Podemos estimar entonces que tenemos en el planeta  $9.37 \times 10^{43}$  moléculas de Hidrógeno, listas para fusionarse. Si la fusión de dos deuterios, que se encuentran en una proporción de 1/6 600 en el agua produce  $5.2 \times 10^{-13}$  J<sup>27</sup> de energía, es posible considerar que las reservas energéticas sean equivalentes a  $3.68 \times 10^{27}$  J. Que es 458 000 veces más energía que la que el Sol nos entrega anualmente.

---

<sup>26</sup> Condiciones estándar: 101.325 kPa y 298.15 K.

<sup>27</sup> Estos datos se aclararán en el capítulo VI.

## INGENIERÍA DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### 3.1.- Ciclos convencionales.

El esquema más común para diseñar una central eléctrica es el térmico. Éste se entiende como aquel que presenta la combustión de un energético para obtener calor que evaporará un flujo de agua que impulsa la rotación de una turbina en donde la energía que contiene el vapor se transforma en mecánica y gracias a un generador eléctrico acoplado a la turbina se obtiene energía eléctrica.

Este proceso de transformación puede efectuarse gracias a la ingeniería, que diseña, calcula, realiza todos lo que conforma una central eléctrica. Aunque la técnica que esta detrás de la operación y el funcionamiento de una central eléctrica tradicional tiene tiempo establecida, cambios en ella buscarán en el futuro elevar la eficiencia total de las plantas.

Una planta tradicional que sigue el esquema antes mencionado se denomina planta termoeléctrica, debido a que el origen de la energía es térmico, calor obtenido de combustión, y la energía que se busca aprovechar es la eléctrica. El elemento que hace posible esta conversión conoce como sustancia activa, y los pasos o etapas en las que se transforma la energía, se conoce como ciclo termodinámico. Para el esquema tradicional el ciclo termodinámico que se utiliza es el ciclo Rankine. Y la sustancia activa utilizada es el agua, aunque en teoría cualquier sustancia podría ser susceptible a realizar un ciclo termodinámico de este tipo.

El ciclo Rankine tiene cuatro procesos termodinámicos básicos, dos procesos isobáricos con intercambio de calor y cambio de fase, una compresión adiabática y

una expansión adiabática. Se parte de agua en estado líquido a alta presión, se evapora hasta la saturación, gracias al calor desprendido por el combustible, después se expande el vapor a una presión baja, se le condensa y por último se le eleva la presión al líquido para regresar a las condiciones iniciales. Estos procesos se llevan al cabo por cuatro elementos básicos, un generador de vapor en donde se realiza la combustión y la evaporación de la sustancia activa, una turbina en donde se expande el vapor, un condensador y una bomba, que impulsa y eleva la presión del líquido.

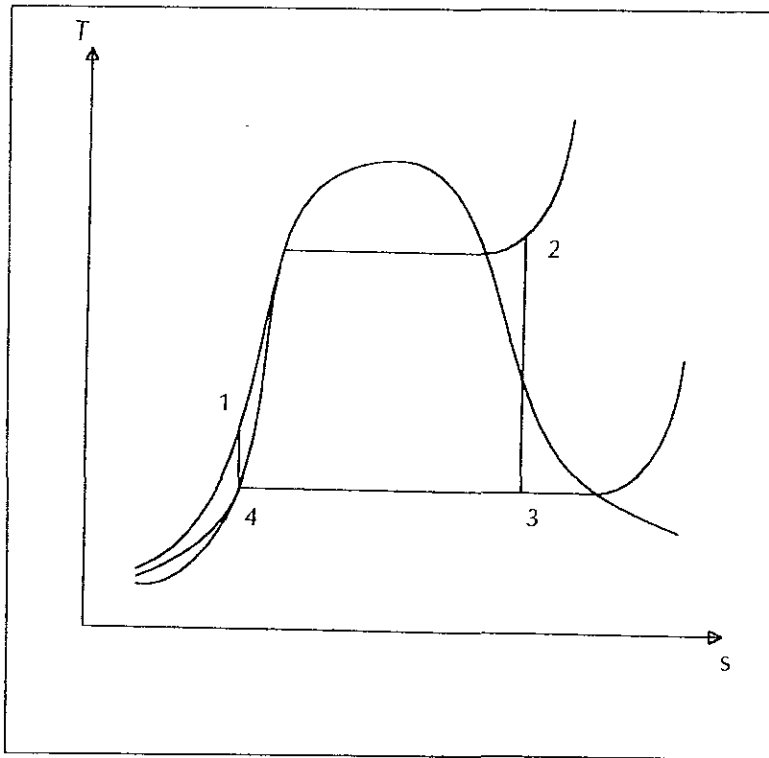


Figura 3.1.- Diagrama T-S, para agua que realiza un ciclo Rankine.

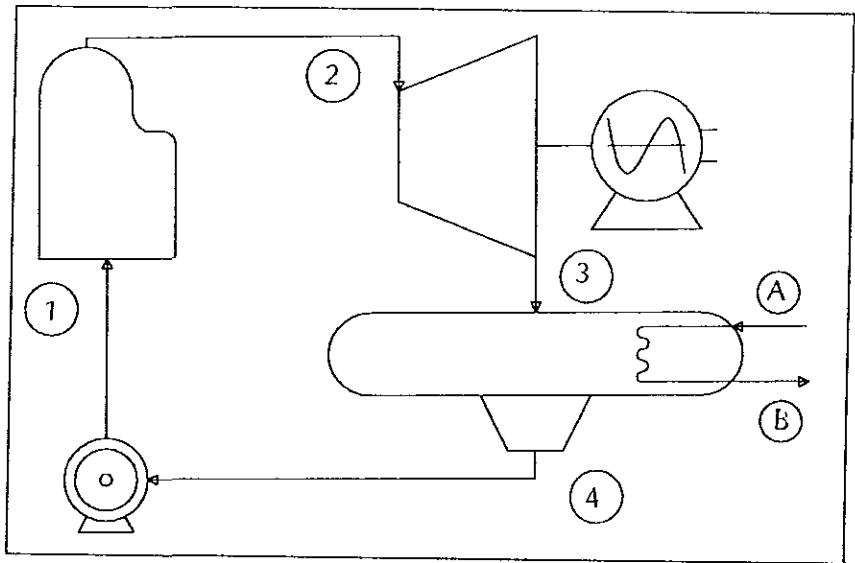


Figura 3.2.- Diagrama esquemático de los elementos básicos de un ciclo Rankine.

A lo largo de la historia de la generación de energía eléctrica se han introducido modificaciones en estos equipos básicos para mejorarlos, se han introducido nuevos elementos para mejorar el aprovechamiento de cada transformación y la energía desperdiciada, y se ha modificado el ciclo básico; todo en busca de mejorar la eficiencia. De un ciclo teórico sencillo se obtendrá una eficiencia que oscila entre el 15 % y el 25 %. Con todas las modificaciones que se han ido implementando una central termoelectrónica actual podría alcanzar hasta el 40%.

En concreto para elevar la eficiencia se pueden hacer dos tipos de cosas. Buscar modificaciones sencillas al ciclo termodinámico básico para tratar de minimizar pérdidas y, por otro lado, elevar la eficiencia individual de cada uno de los equipos con los que cuenta una central para así elevar la eficiencia global.

En el primer caso, cabe hacer notar cuatro modificaciones al ciclo básico que elevan la eficiencia.

- Calentar por encima de la saturación al vapor. Al elevar la temperatura del vapor, a presión constante, el salto entálpico de la expansión será mayor, sin embargo, a medida que la temperatura aumenta el cambio en la entalpía disminuye, por lo que existe un máximo, después del cual ya no vale la pena seguir calentado el vapor dada la poca ganancia entálpica y la gran cantidad de combustible que se requiere quemar.
- Recalentar el vapor que entró a la turbina. Esto se hace con turbinas de etapas de presión o varias turbinas. El vapor se expande en una primera etapa hasta alcanzar una presión inferior, se retira de esa etapa o turbina y se le vuelve a entregar energía para elevar nuevamente su temperatura en esa presión menor, y se introduce a la siguiente etapa o turbina en donde se expande hasta alcanzar la presión menor del condensador. Este sistema se necesita también para evitar demasiada humedad en el vapor de salida de la turbina. Todas las plantas termoeléctricas actuales cuentan con este sistema.
- Ciclo regenerativo con extracción. El vapor de la turbina en etapas de baja presión se extrae de la turbina para calentar el agua que regresa a la caldera, disminuyendo la energía que la quema del combustible debe proporcionar. Cuando la elevación de la temperatura del agua de alimentación a la caldera se realiza con los gases de salida de la misma, al sistema se le conoce como economizador y no regeneración. Cualquiera de los dos son comunes en las plantas modernas.
- Ciclo combinado. Cuando se acopla un ciclo Brayton de turbina de gas al ciclo Rankine, se obtiene el ciclo combinado. El ciclo Brayton abierto, consta Un proceso de compresión adiabática, un proceso isobárico en donde se



obtiene energía y un proceso de expansión adiabática. En cuanto a equipo una turbina de gas tiene tres elementos básicos integrados, compresor, combustor y turbina. Este equipo toma aire atmosférico, lo comprime, le da energía en el combustor y lo expande extrayendo energía mecánica en el proceso, la cual es aprovechada por un generador eléctrico. Los gases de escape de estos equipos son de muy alta temperatura y estos se aprovechan para evaporar un flujo de agua dentro del generador de vapor. El vapor se encuentra dentro de un ciclo Rankine como el descrito anteriormente.

El mayor avance actual y futuro en cuanto a los ciclos convencionales se dará en el área del mejoramiento de la eficiencia de los equipos. Los generadores de vapor, los sistema de enfriamiento y las turbinas de vapor y gas. Las áreas de investigación se centraran en estudios teóricos de transferencia de calor, nuevos materiales y nuevos procesos de diseño y manufactura que disminuyan los costos de equipos tan sofisticados. En específico se hablará de los adelantos en turbinas de gas en el capítulo IV.

En cuanto a la biomasa, mucho se está investigando en dos áreas principalmente. Por un lado el aprovechamiento en sí de los desechos<sup>28</sup>, ya sea por quema directa o con instalaciones destinadas a obtener gas combustible<sup>29</sup>, de la fermentación, y por otro diseñar equipos nuevos específicos para las necesidades de este tipo de generación. Con respecto a este último punto se diseñan turbinas especiales e incluso motores Stirling acoplados al aprovechamiento de quema de biomasa<sup>30</sup>.

---

<sup>28</sup> VALENTI, Michael, "Turning Sludge into fuel", en *Mechanical engineering news and notes*, vol. 120, núm. 5, (Mayo 1998), p. 10.

<sup>29</sup> VALENTI, Michael, "Advanced gasifier for biomass", en *Mechanical engineering news and notes*, vol. 120, núm. 9, (septiembre 1998), p. 10.

<sup>30</sup> MORRISON, Gale, "Stirling renewal", en *Mechanical engineering*, vol. 122, núm. 5, (Mayo 1999), pp. 63 y 64.

Para terminar esta sección quisiera aclarar que en términos generales los proyectos de termoeléctricas convencionales requieren una baja inversión inicial, un mantenimiento medio, el precio por kW depende en gran medida de la capacidad instalada en la planta y la vida útil de estas es de 30 años. Estas características aunadas a los bajos precios del combustible las hacen la opción preferente de desarrollo. El inconveniente mayor que presentan es el que se comentó en el capítulo anterior, el efecto de los productos de combustión sobre el ambiente.

### 3.2.- Alternativas renovables.

La Ingeniería necesaria para las opciones energéticas alternativas es probablemente la segunda área (después de la fusión nuclear) que debe impulsarse en el futuro ya que debe presentar un avance significativo para convertirse en una opción real en el macro de generación.

La energía solar cubre menos del 0.5 % de la demanda en el mundo. La capacidad instalada mundial alcanza los 100 MW, que es inferior a lo que una central convencional produce. México contaba con 670 kW fotovoltaicos en 1992, repartidos en tres aplicaciones, 300 kW repartidos en 7 000 casas para iluminación, 170 kW en teléfonos rurales y 200 kW en otras aplicaciones.

Los sistemas se dividen y subdividen en varias categorías. La primera clasificación se daría en cuanto al tipo de radiación solar que se ocupa para la generación, en este sentido existen dos clasificaciones, los equipos fotovoltaicos y los equipos térmicos. Los fotovoltaicos aprovechan radiación en el espectro de la luz visible y transforman dicha radiación directamente en una diferencia de potencial. Los equipos térmicos aprovechan la radiación infrarroja principalmente para directamente elevar la temperatura de alguna sustancia a la que posteriormente se le extraerá dicha energía.

En cuanto a los esquemas fotovoltaicos se puede mencionar que las estructuras conformadas principalmente de compuestos de silicio, no han superado su mayor problema que es la eficiencia de los paneles. Se reportan eficiencias que van desde 2% hasta 20%<sup>31</sup>, aunque lo común es una eficiencia alrededor del 10%. Otros inconvenientes son: el espacio que se ocupa para la colocación de las celdas

---

<sup>31</sup> SWEET, William, "Power & Energy" en *Spectrum*, vol. 33, núm. 1 (EE.UU. Enero 1996), p. 70.

fotovoltaicas, un módulo típico ocupa un área de  $2 \text{ m}^2$  para proporcionar aproximadamente unos 300 W de corriente directa ( $150 \text{ W/m}^2$ ), y también cabe hacer notar que el rendimiento de las celdas baja considerablemente si la radiación no es constante como cuando se presenta nubosidad o la variación en la posición del Sol.

Los sistemas térmicos solares a su vez pueden dividirse en aquellos que cumplen un ciclo llamado binario y aquellos que ocupan lo que se ha llamado como generación directa. El ciclo binario se usa para producir agua caliente o bien electricidad, se denomina así dado que cuenta con dos flujos de líquido intercambiando calor entre ellos. El primer ciclo cuenta con agua o aceite que circulan a través de una tubería asociada a unos colectores parabólicos con el ducto en el foco para así absorber toda la radiación. Este flujo no se evapora (salvo en diseños aislados), pero transfiere energía a un segundo flujo, de agua, que sí puede llegar a evaporarse. Si el segundo flujo se evapora puede aprovecharse el vapor para impulsar una turbina y de este modo el segundo flujo realizaría un ciclo Rankine convencional. Si el segundo flujo no se evapora el agua caliente generalmente se almacena en contenedores.

La generación directa se ha referido al uso de grandes instalaciones que cuentan con varios espejos móviles que dirigen la radiación que reciben hacia un solo punto, generalmente en lo alto de una torre, en donde se calientan sales por los que se hace pasar un gas que a su vez acciona una turbina de gas. La instalación típica de este tipo de generación es la central "Solar Two " en Barstow, California, con 10 MW de capacidad instalada y una torre de 10 m rodeada de 2 000 espejos.

El futuro inmediato promete poco para estos sistemas; aunque los sistemas térmicos presentan una mejor opción a corto plazo. La investigación, y aplicación técnica de sistemas híbridos puede ser un camino prospero para este energético. Un ejemplo de sistema híbrido es el proyecto "Plato Stirling" que se desarrolla al sur de

España. El sistema presenta la fusión entre un colector parabólico conformado por un disco paraboloide de 7.5 m de diámetro con espejos de 30 x 30 cm, y un motor-alternador Stirling de 15 MW situado en el foco del paraboloide. Cada "plato" tiene una eficiencia termoeléctrica del 27 % y la total se calcula en 25 %, que supera por mucho a los otros sistemas y, además, se acerca a lo que un ciclo térmico común tiene. Los primeros equipos fueron instalados en 1992, promediando hasta 1994 una generación, por plato, de 7 kW diarios. El proyecto pretende instalar hasta 200 MW con estos sistemas antes del 2025, y la intención es usar la energía en sistemas de bombeo, generación en comunidades aisladas o rurales con baja demanda.

Otro proyecto híbrido es el que el Departamento de Energía de EE.UU. trata de desarrollar con una compañía alemana, en el cual se instala un sistema de calentamiento de agua solar a un pequeño generador de vapor que alimenta una turbina de 30 kW<sup>32</sup>.

El mayor uso actual de estos sistemas solares es el fotovoltaico y se centra en sistemas particulares, se calcula que 500 000 casas en el mundo tienen celdas solares, de las cuales 10 000 son rurales<sup>33</sup>. Las perspectivas reales para la ingeniería solar en los próximos 25 años esta en el calentamiento de agua para uso casero, la refrigeración por absorción, destilación de agua, tratamientos fotoquímicos<sup>34</sup> y equipos de calentamiento y generación eléctrica auxiliares, siempre con conexión a una red. La generación masiva de energía eléctrica simplemente no resulta rentable actualmente, se deberán superar varios obstáculos y deberá concentrarse en mejorar

---

<sup>32</sup> VALENTI, Michael, "Gas turbines helps solar power", en *letters en Mechanical engineering*, vol. 118, núm. 7 ( EE.UU. Julio 1996) p. 112.

<sup>33</sup> STRONG, Steven J., "Power windows" en *IEEE, Spectrum*, Nueva York, Vol. 33, núm. 10 (Octubre, 1996), p. 44.

<sup>34</sup> CSWAMI, Yogi y Daniel M. BLAKE, "Cleaning up with sunshine", en *Mechanical engineering*, vol. 118, # 8, (EE.UU. agosto 1996) p. 56.

las eficiencias, mejorar los sistemas de almacenamiento, desarrollar mejores sistemas híbridos, disminuir el costo de fabricación y mantenimiento, estudiar mejor los efectos de la orientación, zonificación e irradiación globales, y analizar la posibilidad de una red global de generación eléctrica en la cual el lado iluminado de la Tierra abasteciera al lado oscuro, pero este sería un proyecto que supera las expectativas temporales de este trabajo.

La energía eólica en 1998 contaba con una capacidad instalada de 10 000 MW, cuando en 1996 se estimaba la mitad, el crecimiento fue desmedido. Aún así las esperanzas en este recurso no fueron alcanzadas. Estados Unidos es el mayor productor, en 1992 tenía sólo en California 15 500 turbinas produciendo 1620 MW. Varios países europeos cuentan con este tipo de generación, y países como India, China, Brasil y México, planeaban grandes proyectos con una capacidad total entre estos últimos de 2850 MW para este año. Las condiciones económicas y tecnológicas mundiales no lo permitieron pero no se puede descartar fácilmente este tipo de generación.

En términos generales los sistemas eólicos cuentan con varias torres de 30 a 60 m de alto con un aerogenerador que tiene acoplados dos o tres álabes de 5 a 30 m de largo cada uno. Los sistemas tienen varios regímenes de giro que van desde los 30 hasta los 1 500 rpm, con potencias variadas desde 75 kW hasta 1500 kW por aerogenerador. La eficiencia promedio es del 40 %, y cada central eolieléctrica tiene una vida media mínima de 25 años. El desempeño de los aerogeneradores depende, principalmente, de la velocidad del viento y la longitud de los álabes. Existen muchas centrales en el mundo con capacidades instaladas desde los 25 MW hasta los grandes proyectos futuros de 2 250 MW.

Las ventajas de esta tecnología son sus cero emisiones, su costo cada vez más competitivo<sup>35</sup>, su versatilidad dada su instalación modular y su carácter renovable. En 1980 el costo de esta tecnología era de 2.375 pesos/kWh, en quince años bajo un 80% hasta 0.475 pesos/kWh y la prospección para este año esta en 0.38 pesos/kWh<sup>36</sup>, lo cuál ya la hace competitiva. Los costos de inversión sin embargo son elevados, el proyecto en el estado de Iowa con tres aerogeneradores de la marca Zond, de 750 kW (total 2250 kW) se estimó en 26.6 millones de pesos<sup>37</sup>.

Pero su principal desventaja es la baja utilización de los equipos, esto es, factores de planta de 35 o 25 % anuales, se dice que de las grandes "granjas eólicas" de California sólo un tercio de las turbinas instaladas resultaron exitosas<sup>38</sup>. Otros problemas son: la corrosión y el desgaste, dada la exposición a los elementos, la fatiga, dada la turbulencia y las cargas extremas y la difícil prospección de una zona adecuada para la instalación de estas centrales, la cual requiere un estudio de, al menos, dos años de registros, para probar una velocidad del viento, mínima de 4 m/s.

El futuro para esta tecnología prevé adelantos en la aerodinámica, construcción de generadores más eficientes, mediante el control de la velocidad de giro y la eficiencia del generador o la velocidad de giro variable con generadores con semiconductores o generadores de corriente directa con electrónica de potencia avanzada, también nuevos materiales para las aspas y los mástiles de estos equipos, y la siempre deseable simplificación de los mecanismos de estos equipos.

---

<sup>35</sup> JAYADEV, J., "Harnessing the wind", en *Spectrum*, Vol. 33. núm. 11, (EE.UU. Noviembre 1995) p.78.

<sup>36</sup> Op.cit.p. 80.

<sup>37</sup> A precios americanos de 1997, con cambió actual.

<sup>38</sup> ASHLEY, Steven, "Turbines catch their second wind" en *Mechanical engineering*, vol. 114. Núm. 11, (EE.UU. Noviembre 1992)p. 56.

En cuanto a la aerodinámica conviene hacer algunas precisiones. El diseño aerodinámico se enfrenta con una disyuntiva básica, colocar el eje de rotación en posición vertical u horizontal. Los verticales son poco eficiente a bajas velocidades, pero en regímenes constantes de alta velocidad son muy eficientes, los horizontales son más flexibles. El diseño de estos últimos también plantea colocar los álabes "aguas arriba" lo cual reduce la turbulencia de la torre sobre el flujo, o "aguas abajo" en donde es posible la orientación automática y simple del aerogenerador lo que reduce esfuerzos en la flecha. Lo que lleva a otra característica de diseño, el control libre del giro o el forzado a través de un motor. La mayoría de los aerogeneradores tienen dos o tres álabes, que puede y debe diseñarse mejor. La perspectiva futura en mi opinión es continuar con la instalación de turbinas de alta potencia, con mástiles de 50 m o más, y con diámetros en álabes mayores de 20 m.

México cuenta con una central eoloeléctrica, "La Venta" en el estado de Oaxaca, instalada en agosto de 1994. Cuenta con siete aerogeneradores alemanes de 280 kW, que giran en un régimen de 32-42 rpm. La eficiencia de generación es del 40 % la generación anual es alrededor de 8.7 GWh. Los mástiles son de 31 m y el diámetro de los alabes de 27 m. La zona presenta buenos vientos que alcanzan en promedio 7 m/s a los 10 m de altura, aunque se registran también vientos menores de 4.5 m/s que no son aceptables.

Una opción que podría ser considerada híbrida en el terreno de la generación eólica son las torres de viento inducido. El concepto es de los setenta, sin embargo, en los laboratorios de Los Alamos, se investiga la construcción de torres cilíndricas huecas de 200 m de alto, en las cuales se rocía agua por la parte superior; la temperatura del aire baja hasta la temperatura de bulbo húmedo y esto provoca un aumento de densidad seguido de un flujo descendente por el interior de la torre. Si turbinas eólicas se colocan cerca de la base puede generarse energía eléctrica gracias



al viento artificial. La idea de los Alamos no es sólo la generación de energía eléctrica sino, principalmente, el control de contaminantes que se verían “atrapados” en el rocío cargado electrostáticamente de la parte superior de la torre<sup>39</sup>. Esta idea fue descartada en los setenta dada la gran cantidad de agua que consume, de 270 kg hasta 576 kg por kWh generado<sup>40</sup>. Lo importante de estos estudios radica principalmente en la incansable imaginación de los investigadores.

La ingeniería de la energía hidráulica es sin duda una de las más impresionantes e imponentes que se tienen en el mundo. El aprovechamiento de ríos ya sea por desviaciones o construcción de presas representa proyectos civiles grandiosos. La ingeniería detrás de estas instalaciones se recopila mejor en otros textos, así que no ahondaré en ella. En un principio no hay problemas en cuestiones de ingeniería, tienen una vida útil alta, mayor de 50 años, un mantenimiento mínimo y una altísima eficiencia, cercana en algunas plantas al 80 %. Sin embargo, la inversión inicial es muy grande, el precio por kWh lo determina más la obra civil que la potencia de la planta, el impacto a los ecosistemas es grande y la prioridad de agua cada vez más se enfoca hacia los habitantes y otros usos. Pero el principal problema que enfrenta este tipo de generación no es ninguno de estos, el principal dilema de las grandes naciones generadoras de energía hidráulica, Canadá, EE.UU., Venezuela, Brasil, Sudáfrica y China, es que el potencial económicamente aprovechable de esta energía está llegando a un límite. En todo el mundo los ríos con caudales importantes han sido aprovechados, e incluso aquellos con caudales medios. El dilema entonces se presenta en encontrar los pocos recursos hidráulicos no aprovechados, y en asumir

---

<sup>39</sup> VALENTI, Michael, “Tower power to fight pollution”, en *Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 6 (EE.UU. Enero 1997) p. 10.

<sup>40</sup> SHALLENBERG, William H., “Tower Power”, en *Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 3, (EE.UU. Marzo 1997) p. 4.

que lo que una vez se consideró como un recurso natural inagotable, tiene un tope máximo de capacidad posible a instalar.

Los grandes proyectos de ingeniería en este aspecto se encuentran en Brasil y en China. Brasil cuenta con 88 plantas hidroeléctricas, su proyecto más grande es la planta de Itaipu la cual comparte con Paraguay, con una capacidad total de 12 600 MW. China emprendió el proyecto "tres cañones" (Three Gorge) que será el más imponente hasta la fecha con 18 000 MW instalados.

La energía geotérmica se aprovecha gracias a la conjunción de dos técnicas de la ingeniería, el aprovechamiento de yacimientos subterráneos a través de pozos y la ingeniería tradicional de generación de energía eléctrica.

El esquema básico es el siguiente: se perfora un pozo hasta el yacimiento de fluido, que varía en profundidad pero alrededor de los 2 500 m, se extrae el vapor, se coloca un separador de vapor y condensados para dirigir vapor seco hasta la entrada de una turbina de vapor. Después de pasar por el condensador el fluido es inyectado nuevamente a través de otro pozo de vuelta al yacimiento. Este sistema es relativamente sencillo y por lo tanto el esquema de generación geotérmica resulta atractivo. La fuente térmica subterránea tardará millones de años en "enfriarse", pero cada pozo se calcula con una vida media de 30 años, lo cual es cercano a las plantas convencionales. Los problemas a los que se enfrenta esta tecnología son principalmente dos. El primero es que no es una tecnología libre de emisiones, dado que el vapor subterráneo arrastra una infinidad de elementos y compuestos, dependiendo del yacimiento, es de esperarse que el control de dichos elementos sea complicado, así las emisiones de bióxido de carbono, ácido sulfídrico, óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre, lodos con metales pesados, agua separada con diversas sales, entre otros, aunque bajas, existen. El segundo problema es uno similar al de la energía hidráulica. Aunque el globo terráqueo flota sobre el magma del manto no son

tantos los lugares en donde se puede hacer uso de esta energía y la capacidad instalada en la actualidad es todavía baja, sin embargo su crecimiento comenzará a descender y en algún momento se llegará al tope, técnica y económicamente explotable para esta tecnología. En México contamos con tres plantas activas, Los azufres en Michoacán con 98 MW instalados, Cerro Prieto en Baja California con 620 MW, Los Humeros en Puebla con 35 MW<sup>41</sup>.

En términos generales las opciones de generación alternativas por sus características intrínsecas no representan una opción real para la generación masiva, hoy por hoy, y por lo tanto han quedado relegadas a solucionar generación regional o local, en zonas con características especiales en las cuales se convierten en alternativas atractivas, como la micro generación rural.

---

<sup>41</sup> Los datos expuestos son de 1995 y no concuerdan con el total de geotermia expuesto en el capítulo I con datos de CFE de 1996.

### 3.3.- Opciones nucleares.

Tanto para la fisión como para la fusión el esquema tecnológico planteado es seguir con el esquema de generación a partir del ciclo Rankine modificado para aumentar su eficiencia. La generación inicial de energía térmica proviene de la reacción de fisión o fusión nucleares y los aparatos encargados de suministrar dicha energía se denominan en términos generales reactores. La ingeniería necesaria para estas opciones se analizarán con detalle en capítulos posteriores.

## CICLO COMBINADO, UNA ALTERNATIVA EMERGENTE

### 4.1.- Conceptos básicos.

En el centro de la propuesta del ciclo combinado como una opción real para el futuro se encuentran dos ventajas incuestionables de esta opción, la alta eficiencia y el menor impacto ambiental que produce. Además, el bajo costo del combustible alienta el desarrollo de este esquema.

En cuanto a la eficiencia, sólo en el marco teórico es posible demostrar que una planta de 300 MW eléctricos con un diseño de ciclo Rankine sencillo tiene una eficiencia inferior a la que tendría si se usa un ciclo Combinado. Como ejercicio conceptual, solamente, presento los balances térmicos de estas dos propuestas y una tabla comparativa entre ambos. El ejercicio se plantea de manera que ambas plantas ideales sean lo más sencillas y generen 300 MW<sub>e</sub>. Con este dato y la determinación de la presión y temperaturas del agua de enfriamiento se calcula el ciclo. Para ambos ciclos los procesos de compresión y expansión son adiabáticos reversibles. Para ambas opciones el combustible será gas natural, para no aunar a la comparación el factor ambiental.

Propiedades	Ciclo Rankine sencillo	Ciclo Combinado
Potencia eléctrica (MW <sub>e</sub> )	300	300
$\eta_{\text{Total}}$ (%)	17.7	20.33
$m_{\text{comb}}$ (m <sup>3</sup> /s)	34.83	32.03
$m_{\text{vapor}}$ (kg/s)	525.937	472.83
$m_{\text{agua enfriamiento}}$ (kg/s)	102 519.15	92 167.08
$P_{\text{turbina vapor}}$ (MPa)	5	2
$T_{\text{turbina vapor}}$ (K)	673	623

Tabla 4.1.- Comparación entre el ciclo Rankine sencillo y un ciclo combinado, para una potencia eléctrica de salida de 300 MW.

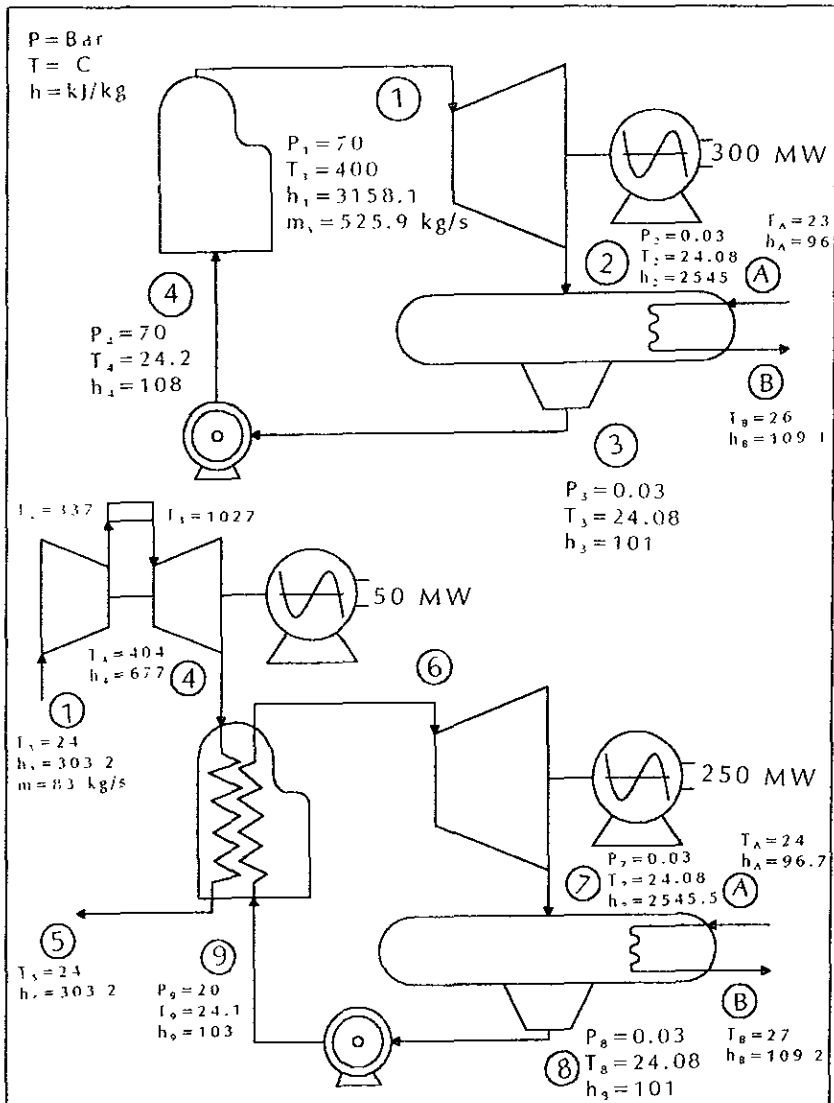


Figura 4.1.- Balances térmicos de dos centrales eléctricas ideales. El superior corresponde a una central con ciclo Rankine y la inferior a una con ciclo combinado.

En este ejemplo, la diferencia en la eficiencia total del ciclo es de apenas 2.63%, sin embargo, en la realidad, la eficiencia total normal de un ciclo Rankine con sistemas de recalentamiento, regeneración, economizador y recuperadores de calor es del orden del 35 %, mientras que un ciclo combinado con los mismos sistemas, puede alcanzar eficiencias superiores al 50 % y cercanas al 60 %<sup>42</sup>, actualmente. La tabla muestra un descenso e todos los parámetros de comparación a favor del ciclo combinado. En cuanto al consumo de combustible hay un ahorro del 8 % nada despreciable y si la comparación hubiese sido con combustibles comunes a un ciclo Rankine el ahorro másico hubiese sido mayor. Los parámetros del ciclo Rankine, gasto de vapor, presión y temperatura de la entrada a la turbina, son menores para el ciclo combinado lo cual ayuda a disminuir el precio de los equipos. El último parámetro importante es la cantidad de agua de enfriamiento, el ahorro es del 10 % y es muy bueno por si solo y por que disminuye el impacto térmico al medio.

Las ventaja en el marco teórico se impulsan además con adelantos en la ingeniería avanzada. Principalmente en el desarrollo de turbinas de gas en general, pero en especial de aquellas que trabajarán con gas natural o sintético como combustible. Por mencionar algunos de los casos más importantes, los fabricantes más renombrados en el mundo de turbinas: General Electric (GE), ABB, Siemens, EGT, Mitsubishi y ASE, todas tienen nuevos modelos de turbinas de gas, diseñadas pensando en la utilización de gases como combustibles y su inclusión en un ciclo combinado.

En el caso de GE cabe aclarar que casi el 70 % de las turbinas de gas que operan en el mundo pertenecen a esta compañía. Los modelos F y H<sup>43</sup> de esta compañía ofrecen potencia de salida y eficiencia altas, junto con emisiones bajas.

---

<sup>42</sup> VÉLEZ Ocoón, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997, p.100.

<sup>43</sup> Los modelos específicos de los que se habla son el GEMS6001FA y el GEMS6001H.

Con un rango de potencia entre 110 y 480 MW pueden considerarse como equipos únicos, dentro de un ciclo Bryton simple o como elementos iniciales en un ciclo combinado. Las eficiencias en ambos casos son altas. Para estos tipos de turbinas GE ofrece de 34 a 40 % de eficiencia total en un ciclo sencillo hasta un rango de 53 a 60 % en ciclo combinado. Esto da versatilidad a los diseñadores de plantas y permite ampliar el uso de estos equipos. La superioridad del modelo H sobre el F se logró gracias a un nuevo sistema cerrado de enfriamiento para la primera etapa de la turbina, lo que eleva su eficiencia sin elevar las temperaturas de operación hacia un rango en el que las emisiones de  $\text{NO}_x$  sean peligrosas. Las empresas ABB, Siemens, EGT y ASE también tienen turbinas nuevas diseñadas para trabajar con gas natural o sintético con potencias variadas desde los 43 MW hasta los 60 MW. Las mejoras técnicas de todas las turbinas de gas de nueva generación se centran en sistemas de emisiones bajas, alabes del estator con posición variable, lo que permite al operador adaptarse a las condiciones ambientales y optimización de la eficiencia de la turbina; mejorar la seguridad de operación de las turbinas, evitando explosiones o variaciones en la velocidad que alteran la frecuencia de los generadores eléctricos asociados; y por último, la versatilidad de los equipos para quemar tanto gas natural como carbón gasificado o incluso en algunos casos licuado. Y cada vez más se está introduciendo el uso de paquetes especializados de computadora para controlar los gobernadores de la turbina, con el fin de elevar lo más posible la eficiencia del equipo<sup>44</sup>. También se han realizado estudios para colocar convertidores catalíticos electrónicos en las entradas de las turbinas para reducir las emisiones<sup>45</sup>.

---

<sup>44</sup> REINHART, Eugene, R., "Managing turbine-generator outgases by computer" en *Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 12(EE.UU., Diciembre 1997) p.8.

<sup>45</sup> VALENTI, Michael, "Making gas turbines safer" en *News & notes de Mechanical engineering*, vol. 120, núm. 9 (Septiembre, 1998) p. 10.



El futuro es muy promisorio, sin embargo no libre de problemas, el primero es el abato de equipo. Las compañías actuales ya tienen una demanda que supera su producción. Los tiempos de espera es del orden de años. El futuro verá crecimiento amplio de estas empresas y el surgimiento de otras para poder cubrir la demanda.

## 4.2.- Combustibles y recursos.

El esquema de ciclo combinado permite la inclusión no sólo nueva tecnología en los equipos sino en los combustibles también. Los combustibles tradicionales para las plantas termoeléctricas son el combustóleo y el carbón. Pero con la creciente preocupación por la emanación de gases que favorecen el efecto invernadero, el mundo entero busca disminuir estas emisiones, en dos líneas principalmente. La primera es buscar combustibles cuya combustión resulte menos perjudicial al medio ambiente y la segunda es desarrollar quemadores que mejoren la eficiencia en combustión y así tener más control en los productos.

La tendencia básica de mejorar la eficiencia durante la combustión misma de los energéticos, es mejorar el diseño de los quemadores y las calderas que se encargan de realizar esta tarea. Diversos estudios a nivel mundial se encaminan a mejorar los diseños en estos dos elementos para elevar la temperatura de combustión por encima de los 1 000 °C sin propiciar con esto la generación de óxidos de nitrógeno o azufre<sup>46</sup>. Controlar las proporciones estequiométricas que intervienen en la combustión es una tarea que cada vez más depende de las computadoras y gobernadores automáticos de los quemadores que de los operadores de planta.

En cuanto al uso de otros combustibles es clara la introducción del gas natural como opción y la búsqueda de técnicas que permitan hacer menos perjudicial a otros combustibles como es el caso del carbón. Esta última opción es la más exitosa en países con grandes reservas de éste combustible, quizás, el segundo energético más abundante del planeta (después del hidrógeno).

---

<sup>46</sup> VALENTI, Michael, "U-turn for NO<sub>x</sub>", en *Mechanical engineering*, , vol. 121, núm. 10 (EE.UU., Octubre, 1999), p. 61.

Cabe hacer mención de dos programas que impulsan la búsqueda de estas nuevas formas de combustión asociadas siempre a un ciclo combinado, el APAS y el Joule.

El (Activité de Promotion d' Acompagnement et de Suivi, APAS), es un programa de la Comunidad Europea con una duración de dos años y con el propósito de evaluar los procesos de gasificación usando biomasa y desperdicios combustibles para utilizarlos como complemento a la quema de combustibles tradicionales como el carbón. Se usa un proceso de gasificación, e incluso se prueba con la gasificación de desechos plásticos. El programa tiene un doble objetivo, deshacerse de los desechos sin perjudicar significativamente al ambiente y la obtención de combustibles baratos para la generación de energía eléctrica. En la mayoría de los programas el uso de biomasa no representa más del 25 % del total de combustible, y aún así el poder calorífico de la mezcla no se ve beneficiada en más de 2%<sup>47</sup>.

El proyecto Joule es un proyecto en el que intervienen compañías de Finlandia, Alemania, Suecia, Holanda, España, Inglaterra e Italia. Unos estudian la cogasificación de carbón y biomasa, como en el programa anterior y otros la influencia de distintos tipos de gasificación del carbón según la técnica empleada, principalmente la gasificación en camas fluidizadas y la gasificación con aire.

Las expectativas generales de todos los proyectos es encontrar las técnicas que permitan conjuntar distintos combustibles, como la biomasa y el carbón o distintos tipos de carbón, elevar las eficiencias por encima del 50 %; esto se logra con temperaturas de combustión del orden de los 1200 °C sin que estas temperaturas propicien la formación de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>.

---

<sup>47</sup> MINCHENER, A.J., "Syngas Europa", en *Mechanical engineering*, vol. 121, No. 5,(mayo, 1999) p. 50.

Como resultados se puede mencionar la instalación de la planta de Puertollano en España, que es una central de ciclo combinado con gasificación integrada, con una potencia nominal eléctrica de 300 MWe que gasifica carbón con oxígeno, con etapas de sustracción de azufre, la cual entró en operación en diciembre de 1997. En marzo de 1998 se hicieron modificaciones que le permitieron operar sin problemas a partir de octubre de 1998.

Pese a toda esta investigación mundial para aprovechar los recursos carboníferos de una manera menos perjudicial, el candidato que se convertirá en el futuro cercano en el combustible de mayor crecimiento es el gas natural. Las razones son, principalmente, tres. La abundancia de este recurso, la baja emisión de contaminantes en relación con otros combustibles y su precio.

En cuanto a la abundancia se estima que entre el gas asociado a la extracción de petróleo y los mantos secos existentes, este recurso perdure, al menos, unos 100 años<sup>48</sup>, no es la abundancia que representan otros energéticos pero al menos asegura un uso limpio constante por el tiempo suficiente para desarrollar otros métodos. Aunque hay que aclarar que las reservas probadas de este recurso todavía son algo inciertas. Para el caso mexicano en 1996<sup>49</sup> las reservas probadas de gas natural seco era de 1 809.8 miles de millones de metros cúbicos, si se considera que la producción diaria en ese mismo año era de 118.7 millones de metros cúbicos, de los cuales sólo el 17 % de esa producción provenía de pozos de gas seco, se puede estimar que las reservas de gas natural se incrementen al menos un 60 %, lo cual, sin

---

<sup>48</sup> MORRISON, Gale, "Stirling renewal", en *Mechanical engineering power*, vol. 121, núm. 7 (EE.UU. Julio 1999) p.26.

<sup>49</sup> Al 31 de diciembre de 1996. Fuente: PEMEX, *Informe anual 1996*, México, SHCP.

aumentar la tasa de consumo diaria, nos daría una expectativa de este recurso de 66 años. Esta cita fue ratificada por PEMEX en abril de este año<sup>50</sup>.

En cuanto a la baja emisión de contaminantes, resulta prometedor la quema de gas natural, no por que elimine la emisión de contaminantes, sino por que en comparación con otros combustibles resulta ser ecológicamente amigable. De hecho comparado con el peor combustible en términos ambientales, si se quema carbón se inyectan a la atmósfera un 80 % más CO<sub>2</sub> que si se quema gas natural<sup>51</sup>.

La tercera razón se analiza en el siguiente apartado.

---

<sup>50</sup> *La jornada*, año 16, núm. 5616, (México D.F. Viernes 21 de abril de 2000) p 16.

<sup>51</sup> SWEET, William, "Power and energy", en *Spectrum*, vol. 33, núm. 1 (EE.UU., Enero 1996), p. 70.

#### 4.3.- Costos e impacto ambiental.

El costo de cualquier proyecto juega un papel cada vez más preponderante en el desarrollo de una nueva tecnología, y en el caso del ciclo combinado asociado a la quema de gas natural o carbón gasificado, es innegable que ha sido uno de sus principales promotores.

Las razones de este costo accesible son por una parte el bajo precio del combustible, los nuevos avances tecnológicos y su versatilidad.

En cuanto al precio del combustible cabe mencionar que la opción de gasificación de carbón resulta hoy por hoy cara en comparación con el gas natural. Según un estudio estratégico del Centro de Investigación Energética de Ulster (Ulster Energy Research Center), las plantas modernas que usen alguna forma derivada del carbón serán "incapaces" de competir contra las de gas natural, sencillas o de ciclo combinado<sup>52</sup>. Cabe hacer notar que aunque los precios de gas natural son bajos fluctúan. Sólo como un ejemplo puedo mencionar que el precio promedio del gas natural del sur de Texas en el primer trimestre de 1995 era de 12.825 pesos por millón de BTU, en el mismo período en el año 1996, se elevó a 19 pesos, y para el tercer trimestre de ese mismo año el precio era de 28.5 pesos<sup>53</sup>. Esto representa aumentos de más del treinta por ciento en períodos de un año o menos.

Aún con estas fluctuaciones el esquema de ciclo Combinado con gas natural ofrece otras ventajas a los inversionistas. El diseño de un sistema completo de ciclo combinado es prácticamente el mismo que el empleado en el diseño de una planta convencional, la construcción es relativamente baja y se calcula de 22 a 18 meses,

---

<sup>52</sup> MINCHENER, A.J., "Syngas Europa", en *Mechanical engineering*, vol. 121, No. 7, (julio, 1999) p. 51.

<sup>53</sup> PEMEX, *Informe anual 1996*, México, SHCP.

con una inversión que varía entre 3325-3800 pesos por kW, que resulta ser bajo<sup>54</sup>. Otra razón de primordial importancia es el bajo impacto que esta opción marca con respecto a los otros hidrocarburos. Los esquemas de diseño la hacen una opción "modular" con gran flexibilidad y versatilidad, bajo costo de inversión, y construcción rápida. Su operación es de bajo costo y con poco personal de base.

En cuanto al impacto ambiental, el sólo hecho de disminuir la emisión de CO<sub>2</sub> al ambiente genera atracción a este esquema. Actualmente sólo en EE.UU., el mayor generador de electricidad mundial, sector eléctrico aportaba con un tercio de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Tanto el uso de la gasificación de carbón como la de gas natural reducen la cantidad de este contaminante y disminuye también la formación de otros contaminantes asociados a la mala combustión o a las impurezas en los combustibles. Sin embargo, no está exenta de problemas. En la misma caldera de estos equipos el poco azufre que se arrastra (sobre todo con la gasificación del carbón) provoca corrosión en los tubos y puede escaparse al ambiente.

En términos genéricos la tabla que se muestra a continuación resume los impactos ambientales que el esquema de ciclo combinado con gas natural o gas sintético podría generar.

---

<sup>54</sup> ROE, K. Keith, "The Global Generation", *Mechanical engineering power*, (EE.UU., Julio, 1999), p. 26.

IMPACTO AMBIENTAL EN LA GENERACIÓN CON CICLO COMBINADO		
Indicadores de impacto	Indicador	Calificación por indicador
	Muy Alto = MA	10
	Alto = A	8
	Medio = M	6
	Bajo = B	4
	Muy Bajo = MB	2
	Nulo = N	0
Medio o tipo de contaminante	Contaminante	Indicador
AIRE	CO <sub>2</sub>	A
	O <sub>3</sub>	B
	NO <sub>x</sub>	B
	SO <sub>x</sub>	M
	HC	B
	Pb	MB
	H <sub>2</sub> S	M
	Compuestos cancerígenos	B
	PAN <sup>1</sup>	B
Otros <sup>2</sup>	B	
Agua	Sólidos disueltos	B
	Sólidos suspendidos	B
	Químicos	MB
	Metales	MB
	Aceites y Grasas	B
	Agentes biológicos	N
	Temperatura	M
	Otros	N
Desechos sólidos	Desechos comunes	M
	Desechos peligrosos	B
	Ruido	B
Radiación	Aire	N
	Agua	N
	Suelo	N
Otros	Paisaje	M
	Uso del suelo	B
	Eutroficación acelerada	N
	Hundimientos	B
	Inducción de actividad sísmica	N
<b>Total</b>		<b>96</b>

1 PAN se refiere a Nitratos de Peracilo, "smog fotoquímico".

2 En el caso específico de este tipo de planta se refiere a: La temperatura de los gases de escape.



## LA FISIÓN EN PERSPECTIVA FUTURA

### 5.1.- Teoría de fisión.

La energía nuclear de fisión ha tenido un papel importante en la generación eléctrica en décadas pasadas, pero también ha sido motivo de gran controversia y rechazo. Razones diversas apoyan ideas de un resurgimiento de este tipo de generación, tanto de índole ambiental, como económico y tecnológico.

En este capítulo se expone el surgimiento, la caída y las razones de su, casi obligado, regreso en el marco de la generación eléctrica mundial.

Fisión quiere decir hendimiento de átomos o núcleos, separación de uno en dos. La fisión atómica se refiere al rompimiento de un átomo de gran masa atómica en dos más pequeños y con esto la liberación de energía. La energía que se busca aprovechar se encuentra contenida en la *energía de enlace* de los núcleos que se quiere dividir, cuya definición es la energía necesaria para romper un núcleo en sus nucleones<sup>35</sup>, es una medida cuantitativa de la estabilidad del núcleo.

En cualquier átomo la suma de las masas de los nucleones siempre será mayor que la masa total del núcleo. La diferencia entre estos valores se conoce como *defecto de masa*. Gracias a la teoría de Einstein<sup>36</sup> (1905) se sabe que existe una relación directa entre masa y energía,  $E = m c^2$ , por lo que se comprende que el defecto de masa se desprende como energía durante la formación del núcleo, luego entonces, si se quiere descomponer un núcleo atómico se necesita proporcionar

---

<sup>35</sup> Se les denomina nucleón a aquellas partículas que conforman el núcleo atómico, para este trabajo: protones y neutrones.

<sup>36</sup> Albert Einstein (1879-1955) Físico y matemático alemán. Estableció la teoría de la relatividad con la que cambió el panorama de la física moderna. Premio Nobel en 1921.

dicha cantidad de energía. En general entre mayor sea el defecto de masa, mayor será la energía de enlace nuclear, esto también explica la estabilidad nuclear.

Una propiedad que nos permite comparar esta estabilidad nuclear más que la energía de enlace es la *energía de enlace nuclear por nucleón*, que se define como la energía de enlace nuclear del elemento entre el número de nucleones que posee.

Este valor nos permite analizar el comportamiento de la energía de enlace nuclear a medida que el núcleo atómico crece en tamaño y masa. El comportamiento para los átomos con pocos nucleones es, que a mayor número de nucleones, mayor es la energía de enlace nuclear, sin embargo, este comportamiento tiene un máximo en el hierro con 56 nucleones y aproximadamente  $1.5 \times 10^{-12}$  J ( $9.3 \times 10^6$  eV), a partir del cuál el comportamiento es inverso, pero casi constante. Esto se debe a que el tamaño del núcleo comienza restar influencia a las fuerzas de atracción nuclear y las fuerzas coulombicas comienzan a ejercer efecto. Las fuerzas eléctricas de Coulomb entre los protones es del tipo repulsivo y a distancias nucleares grandes prevalece sobre las de atracción nuclear.

Así pues, para la fisión nuclear se toma un elemento pesado, y al dividirse en dos menos pesados la energía de enlace aumenta en estos últimos y este aumento neto de energía es el que se aprovecha en los reactores de fisión. La reacción de fisión es altamente exotérmica.

Para dividir un núcleo pesado<sup>57</sup> sólo basta agregarle un neutrón lento<sup>58</sup>, para desestabilizarlo, y así lograr la fisión. Esto no es tan complejo debido a que los neutrones no tienen carga eléctrica y por lo tanto no se ven afectados por las fuerzas eléctricas de repulsión de carga a los que se ven sujetos los protones.

---

<sup>57</sup> Los núcleos pesados son aquellos con una masa atómica mayor de 200 uma.

<sup>58</sup> Se dice neutrón lento a aquellos cuya velocidad es comparable a la de las moléculas de aire a temperatura ambiente. Aproximadamente 2 m/s.

En la naturaleza elementos muy pesados comúnmente se desintegran en elementos menos pesados emitiendo partículas y energía. A este fenómeno se le conoce como radiactividad natural y fue descubierta por Becquerel<sup>59</sup> y los Curie<sup>60</sup> a principios del siglo, en lo que llamaron transmutación de un átomo en otro. Los materiales radioactivos como se les conoce hoy, emiten energía y partículas en todo momento. Sin embargo, cuando se bombardea a un núcleo con partículas y se le obliga a fisionarse se denomina radioactividad artificial y ese es el caso que ocupa a este trabajo. Pero no fue sino hasta 1938 que se intentó bombardear el núcleo de un elemento pesado con un neutrón para comprobar que las teorías de Einstein sobre la materia eran correctas y se podía obtener energía, los científicos que lo intentaron fueron Otto Hahn, Fritz Strassman y Lies Meitner. Esto les resultaba atractivo debido a que si podía sostener una reacción de fisión de manera prolongada, se podría obtener un combustible que daría grandes cantidades de energía. La idea es utilizar los neutrones que se desprenden de la desintegración de un núcleo para bombardear otros, y así conseguir una "reacción en cadena" en donde se la desintegración de núcleos sea autosostenida y controlada. Quien puso a prueba este concepto fue el italiano Enrico Fermi<sup>61</sup> en 1942, creando la primera pila atómica del mundo, que usaba uranio mineral como combustible y grafito como moderador.

Pero esta reacción en cadena, formando un reactor, no sólo ocurre en los laboratorios también se puede dar en forma natural, como ocurrió en la mina de Oklo, en la actual república de Gabón, hace 2 000 millones de años. Esto se

---

<sup>59</sup> Antoine-Henri Becquerel (1852-1908) Físico Francés, junto con los esposos Curie dio pie a los estudios de la radioactividad. Premio Nobel en 1903 junto con los esposos Curie.

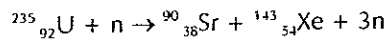
<sup>60</sup> Pierre y Marie Skłodowska Curie (1867-1934).- Físico Francés y Física y química de origen polaco, descubrieron el radio y obtuvieron el premio Nobel en 1903 junto con Becquerel.

<sup>61</sup> Enrico Fermi (1901-1954) Físico Italiano descubridor del neutrino y de las técnicas que permiten la fisión controlada de elementos radioactivos, dirigió la construcción de la primera bomba atómica. Premio Nobel de Física en 1938.

comprobó cuando en 1972 se encontró que el mineral de uranio que provenía de dicho lugar contenía menos Uranio 235 del que debía, esto se explicaba si dicho elemento se había fisionado de manera natural, gastándose así el combustible.

De manera artificial Fermi logró la reacción en cadena controlada con los elementos básicos que hoy se siguen utilizando. La reacción común en los reactores nucleares es la del Uranio 235 bombardeado con neutrones. El resultado son dos elementos más ligeros, energía libre y tres neutrones que están libre para fomentar la fisión de otro núcleo de Uranio. La Energía liberada por esta reacción es del orden de  $3 \times 10^{11}$  J ( $200 \times 10^5$  eV ). Que parece no ser mucho pero para 1 kg de Uranio se obtendría  $8.5 \times 10^{13}$  J contra  $8.3 \times 10^4$  J con la combustión de 1 kg carbono amorfo, esta ya es una cifra muy atractiva.

En el caso concreto de los reactores nucleares el combustible es uranio 238 con un 7 % de U 235, generalmente enriquecido con un 2 a 4 % adicional de U 235. Para una reacción de uranio 235 bombardeado con neutrones lentos los productos de la fisión pueden ser muy variados, desde elementos con masa atómica cercana a la de 80 hasta la de 160, pero generalmente se obtienen como resultado de la fisión el estroncio 90 y el Xenón 143 más tres neutrones libres<sup>62</sup> que continuaran con la fisión de otros núcleos de uranio. La reacción es la siguiente:



Las energías de enlace para estos tres elementos son: Uranio:  $2.82 \times 10^{-10}$  J (1760 MeV), estroncio:  $1.23 \times 10^{-10}$  J (767 MeV) y Xenón:  $1.92 \times 10^{-10}$  J (1198 MeV). La diferencia es de  $0.33 \times 10^{-10}$  J (205 MeV) a favor de los productos. Una primera revisión podría suponer que es necesario entregar energía a la reacción para llevarla al cabo, sin embargo, la explicación a esta aparente incongruencia se tiene si

<sup>62</sup> En realidad el promedio de producción de neutrones en una reacción de este tipo es de 2.5, pero se considerara de tres para efectos de la explicación.

revisamos la definición de la energía de enlace junto con la del defecto de masa de reactivos y productos. El defecto de masa neto es mayor para los reactivos, lo cual por sí sólo explicaría la liberación de energía. Hoy en día la forma en la que se utiliza el combustible, generalmente, es en pastillas cerámicas cilíndricas, de Zircaloy elemento cerámico artificial que sirve de aglutinante, con óxido de Uranio enriquecido. El mineral uranio se encuentra en su forma  $U_3O_8$ , que en forma natural el U-238 contiene de 0.7 hasta 7% del Isótopo U-235, que es una concentración baja para sostener una reacción en cadena por lo que suele “enriquecerse” al combustible con 3 a 5% más de dicho Isótopo. El combustible es remplazado cada seis meses o cada años dependiendo del tipo de reactor, las barras utilizadas, ya no son aptas para la generación de energía pero contienen bastantes elementos radioactivos e incluso algunos fisionables. Algunos rectores utilizarán otros elementos fisionables en el futuro. Se puede mencionar que el Uranio 233 y el plutonio 239, también son elementos fisionables. En términos generales el esquema de funcionamiento básico de un reactor nuclear es el siguiente. Si existe una cantidad suficiente de U 235 basta que algún átomo decaiga naturalmente liberando en el proceso un neutrón, el cuál encontrará y colisionara con otro núcleo de U 235 y lo obligará a fisionar, liberando a su vez tres neutrones más que buscan el núcleo de otros átomos de U 235 generándose así la reacción en cadena, que libera energía con cada fisión. En Teoría, si la abundancia de núcleos fisionables es muy grande, la reacción continuará indefinidamente y la liberación de energía no tiene límite. Para controlar la reacción se usan moderadores y para absorber la energía liberada se usan refrigerantes. El uso práctico y seguro de esta teoría es el reto de la Ingeniería nuclear y ha generado una amplia gama de técnicas y tecnología, en la siguiente sección se hace un análisis general de los avances en la ingeniería que han hecho posible hacer una realidad practica esta teoría.

## 5.2.- Ingeniería avanzada necesaria para esta tecnología.

La tecnología que este tipo de generación emplea no ha tenido grandes modificaciones desde que inició a principios de los cincuenta, aunque su mayor avance se presentó a finales los sesenta. Sin embargo, como ya se mencionó en los setenta, ochenta y noventa se detuvo el desarrollo y no es sino hasta hace muy poco que las investigaciones retoman el enfoque de desarrollar adelantos en vez de supervisar y asesorar las plantas existentes.

El ciclo termodinámico es el mismo de una planta convencional, un ciclo Rankine, con elementos comunes como turbina, condensador y bomba; algunos sistemas cuentan con generador de vapor adicional y se ha pensado adecuar algunos tipos de reactores a un ciclo combinado, pero esto es algo que se menciona más adelante. La diferencia especial y esencial de este tipo de generación de energía es la fuente de calor para generar el vapor, el reactor nuclear.

Podemos decir que hay tres tipos de reactores básicos.

- Reactores de agua (Water Reactors, WR).
- Reactores enfriados por gas (Gas cooled Reactors, GR)
- Reactores de cría rápida de metal líquido (Liquid Metal Fast Breeder Reactors, LMFBR)

En mi opinión el avance de estas tecnologías y su estado actual no me permite descartar ningún tipo de reactor en los próximos veinticinco años, sin embargo, cabe aclarar que muchos de los reactores que entraron en servicio en los sesenta deben de ser reemplazados, aunque esto no implica, necesariamente, un nuevo tipo de reactor.

Las diferencias en estos tipos de reactor se derivan esencialmente de los elementos que usen como refrigerante y como moderador. El refrigerante en un

reactor nuclear es aquel elemento que se encarga de absorber el calor que se genera en el núcleo del reactor y de transportar dicha energía hacia los elementos normales del ciclo Rankine. Los refrigerantes que se usan son bióxido de carbono, helio, agua pesada, agua y sodio fundido. En cualquier tipo de reactor el control del flujo de refrigerante es crucial para su buen funcionamiento. El moderador es el elemento cuyos átomos frenan, por medio de choques, parte de los neutrones rápidos liberados por la reacción de fisión y de ese modo se puede controlar o moderar la reacción en cadena de fisión. Esto se debe a que los neutrones rápidos son menos eficientes para la reacción de fisión con  $U\ 235$  y el moderador se encarga de disminuir su energía cinética, ya sea para convertir a los neutrones rápidos en lentos, a este proceso se denomina "termalización de los neutrones". Un neutrón rápido puede viajar hasta 20 000 km/s y un neutrón lento apenas unos 2 km/s. Como moderadores se usa agua, agua pesada o grafito.

Existe otro elemento común a casi todos los reactores que se denomina barras de control. Estos elementos se encargan de absorber a los neutrones rápidos para detener por completo la reacción en el núcleo. El cadmio o el carburo de boro son elementos que se usan dentro de las barras de control.

Existen otras diferencias, más específicas, pero estas se aclararán haciendo un análisis particular de cada tipo de reactor.

### 5.2.1.- REACTORES DE AGUA.

Este tipo de reactor se denomina reactor de agua ya que usa agua tanto como refrigerante como moderador. Básicamente existen tres tipos de reactores de agua, los Reactores de Agua Presurizada, los Reactores de Agua Hirviendo y los Reactores de Agua Pesada Presurizada.

La diferencia entre el agua ligera y el agua pesada es que el agua pesada sustituye los átomos de hidrógeno en una molécula de agua por átomos de deuterio. Existe un tipo de reactor especialmente diseñado para manejar agua pesada, Canadá es el país líder en la utilización de agua pesada en sus reactores. Las modificaciones técnicas no son grandes entre los tipos de reactores, el sistema que eligieron los Canadienses es el de presurizar el agua pesada de manera similar al sistema presurizado que se explicará más adelante con el agua ligera. Este tipo de reactores se denominan Reactores de Agua Pesada Presurizada (Pressurised Heavy Water Reactor, PHWR, o CANDU, por sus siglas en francés). La ventaja de este tipo de reactores sobre los de agua ligera es en el tipo de combustible ya que los primeros utilizan uranio natural y no uranio enriquecido como en el caso del agua ligera, esto se debe a que el agua natural absorbe más neutrones rápidos que el agua pesada. El ahorro en el precio del combustible enriquecido alienta su desarrollo, pero la obtención del agua pesada parece restringir el mismo ya que esta tecnología es la que menos desarrollo ha tenido a nivel mundial. Los reactores de agua ligera son en cambio la tecnología más difundida en el planeta actualmente.

Estados Unidos, encabeza la lista de productores, dado que más del 95 % de los reactores que posee son de este tipo y los siguen Rusia, Inglaterra, Francia y Canadá, que también es quien más ha experimentado con agua pesada.

El arreglo básico de un reactor de agua ligera es un núcleo rectangular con barras cilíndricas de combustible, enriquecidas de un 2 a 3%.

Existen dos clases distintas de este tipo genérico de reactor y la clasificación se debe a la fase en que utilizan el agua del refrigerante, lo cual afecta su construcción y operación. Las dos clases son:

- Reactores de agua presurizada (Pressurised water reactor, PWR).
- Reactores de agua hirviente (Boiling water reactor, BWR).



#### 5.2.1.1.- Reactores de agua presurizada.

Los reactores de agua presurizada (PWR, por sus siglas en inglés o VVER por su denominación en ruso) trabajan a grandes presiones, del orden de 15 MPa, lo cual mantiene el agua dentro del núcleo del reactor por debajo de la ebullición. Esta agua caliente a presión pasa a un intercambiador de calor cerrado (generador de vapor) que maneja agua a baja presión que es evaporada. El agua presurizada regresa al reactor gracias a una bomba (la bomba de enfriamiento) para calentarse de nuevo. El vapor generado en el intercambiador se conduce, generalmente, a un recalentador para asegurar las condiciones requeridas del vapor antes de entrar en una turbina para generar potencia mecánica. Para mantener constante la presión en el circuito primario de agua se coloca un presurizador antes del generador de vapor. Este presurizador es un contenedor con agua caliente y vapor proveniente del reactor, en este contenedor se regulan las variaciones de presión calentado el vapor ahí contenido o enfriándolo al rociar, por la parte superior, agua fría previamente presurizada.

El número de estos elementos varía según el fabricante del equipo; por lo general se cuenta con un presurizador conectado a dos o más circuitos de enfriamiento cada uno con un generador de vapor y de una a dos bombas de enfriamiento.

Los generadores de vapor son intercambiadores de calor de tubos en U y coraza, de flujo cruzado, con un paso generalmente.

En el sistema secundario se maneja vapor saturado, aunque un fabricante<sup>63</sup>, maneja vapor ligeramente sobrecalentado. Evidentemente el sistema sobrecalentado mejora la eficiencia un poco.

El núcleo del reactor en un sistema a presión se encuentra contenido en un gran recipiente metálico (12 m de largo y 6 m de diámetro, con espesores de 25 cm y recubrimiento de acero inoxidable en la parte interior de 80 mm de espesor) que mantiene contenidos junto con él al refrigerante y a las barras de control del moderador.

Las barras de control entran por la parte superior del recipiente por dos razones, la primera, mantener un recipiente cerrado herméticamente en el fondo para que en caso de un accidente el refrigerante no se pierda y segundo para que las barras puedan entrar al reactor solo por gravedad. Esto último es necesario tanto en un accidente como para evitar complicaciones con los actuadores magnéticos que controlan la inserción de las barras que pueden ser desconectados simplemente y las barras caerán solas, a esta operación se le conoce como "scrammed".

El agua de enfriamiento también es introducida por la parte superior y se conduce anularmente por la parte exterior del núcleo entre éste y el recipiente contenedor y al llegar al fondo se dirige nuevamente hacia arriba pasando entre los elementos combustibles del núcleo, por los cuales recoge la energía térmica que las barras despiden por el proceso de fisión. Las barras de control son, actualmente, numerosas y de forma cilíndrica, aunque en los primeros modelos de estos reactores se trataba de una sola barra de control en forma de cruz.

---

<sup>63</sup> Los fabricantes son: Westinghouse (vapor saturado), Combustión engineering (vapor saturado) y Babcock and Wilcox (vapor sobrecalentado).

Además del uso en reactores de plantas generadores de energía eléctrica la Marina de los EE.UU. y Rusia utilizan este tipo de reactores en sus buques, portaaviones y submarinos nucleares.

Los siguientes esquemas muestran el diagrama básico de los distintos elementos asociados al ciclo primario y secundario de agua en el reactor PWR y los detalles de un reactor PWR.

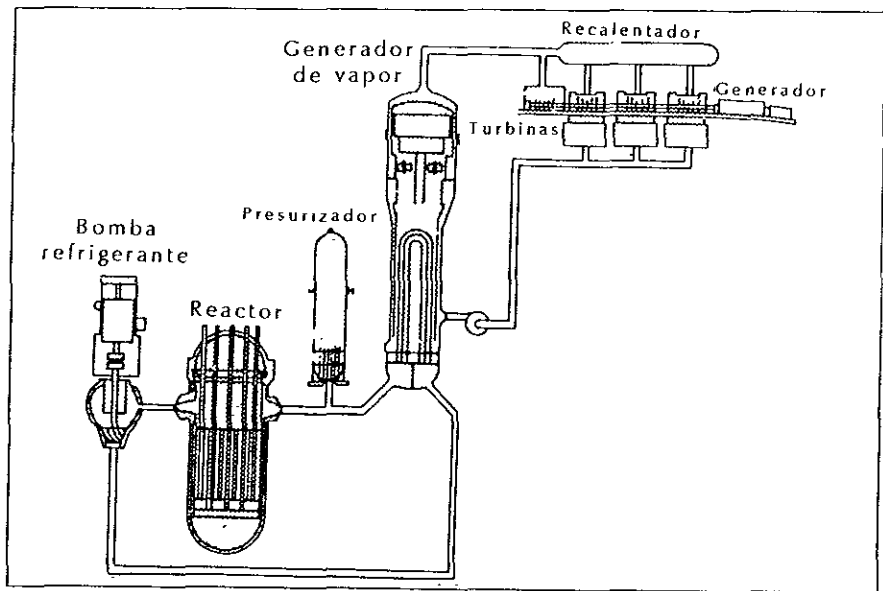


Figura 5.1.- Sistemas de refrigeración primaria y secundaria para un reactor PWR.

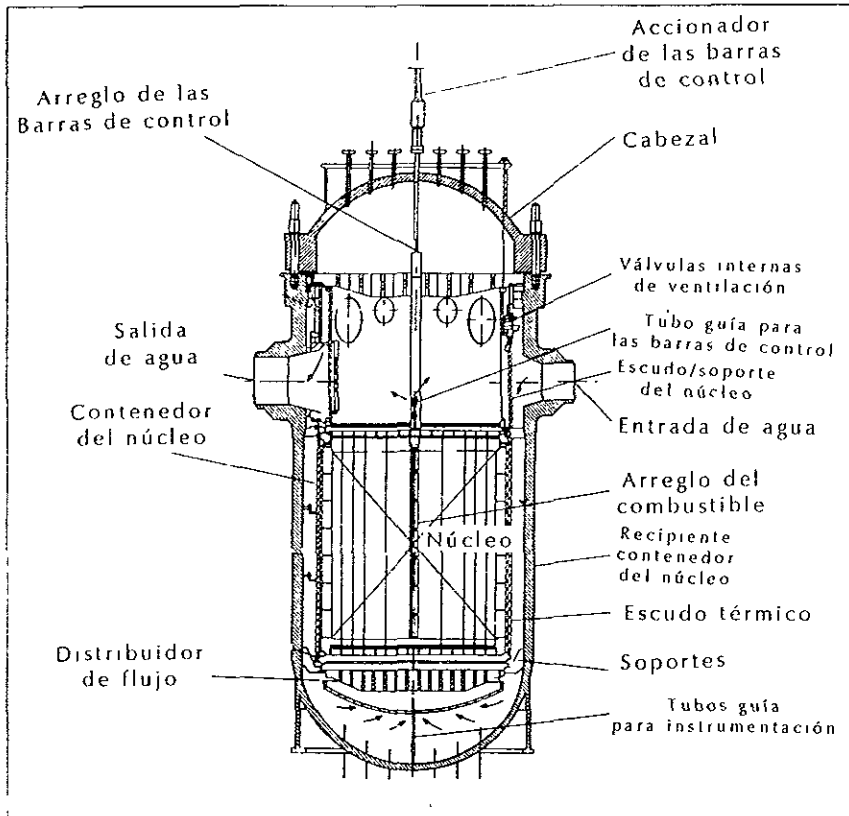


Figura 5.2 - Detalle del núcleo de un reactor PWR.

La planta nuclear en operación con el diseño más reciente y la del diseño más prometedor, en reactores son precisamente reactores de agua presurizada.

La operación de los reactores N4 en Francia y el prediseño del proyecto conjunto Francia-Alemania para construir el Reactor Europeo Presurizado (European Pressurised Reactor, EPR ) marcan la vanguardia en esta tecnología. Tan sólo Francia cuenta con 54 reactores PWR, con capacidad para proveer de 71 800 MW al pueblo

francés, lo que lo hace líder mundial en esta tecnología. Alemania cuenta con 19 plantas nucleares en total, que cubren el 30 % de la demanda del país.

Electricite de France diseñó y construyó el reactor N4, que es un reactor de agua presurizado con un futuro promisorio, para el cuál el primero, de dos, reactores de la última planta construida, entró en operación el 30 de agosto de 1997 y ambos reactores están conectados a la red francesa desde el año pasado, 1999.

El N4 es el primer diseño cien por ciento francés y ha probado que es posible superar los valores de desempeño, potencia y seguridad de todas las plantas anteriores<sup>64</sup>.

Se puede considerar que la puesta en operación de esta planta representa, para los franceses y para el mundo, el comienzo de una nueva era nuclear<sup>65</sup>.

Entre las ventajas de esta planta esta un revolucionario modo de operación llamado, modelo X, el cual regula la potencia de salida del reactor para compensar las fluctuaciones de demanda. Esto permite a la planta funcionar fuera del esquema de las plantas de demanda base en el que operan todas las plantas nucleares.

La variación de potencia va desde un 30 a un 95 % de la potencia total, y consigue este cambio drástico en sólo 30 minutos. Esto se logró con la introducción de nuevas barras de control, a las que llaman "barras grises" (gray rods), estas absorben menos neutrones libres que las barras de control convencionales a las que llaman "barras negras".

---

<sup>64</sup> VALENTI, Michael, "A next-generation reactor", en *Mechanical engineering, power*, vol. 120, núm. 8 (EE.UU., Agosto, 1998), p. 69.

<sup>65</sup> *Op cit.* p. 68. (traducción mía).

La potencia eléctrica del N4 es de 1450 MW. El reactor cuenta con 205 barras de combustible envueltos en un contenedor a presión de 13.65 m de alto y 4.65 m de diámetro de acero inoxidable, forjado de lingotes huecos. Los generadores de vapor son intercambiadores de tubos en U, con un arreglo triangular que permite obtener vapor con un mínimo de humedad. El vapor llega a una turbina de 1500 MW diseñada por General Electric Company Alstom en París. Los 50 MW de diferencia entre la potencia de la turbina y la potencia eléctrica de salida se usan en los sistemas auxiliares al reactor. El vapor entra a la turbina con 10 Bar y 15 % de humedad. De los adelantos más importantes de este reactor, quizás de los que se deban resaltar más son los nuevos sistemas de seguridad de la planta. En términos generales todos los reactores y las plantas termoeléctricas cuentan con sistemas que reportan problemas una vez que han ocurrido, el N4 cuenta con un "sistema orientado a estado"<sup>66</sup> el cuál hace un diagnóstico previo tomando en cuenta parámetros operacionales recabados en tiempo real. El sistema, totalmente computarizado cuenta con programación especial que previene errores humanos en el manejo de los equipos. En caso de un problema, el sistema toma control de los equipos en los primeros minutos, los cuales suelen ser cruciales. Además el sistema elimina el método de alarmas múltiples con indicadores individuales que se mostraban en la consola de control de los reactores normales, con un diagrama esquemático de toda la planta que además tiene un panel de control auxiliar integrado que sirve de respaldo si el principal tiene algún problema.

La siguiente página muestra una perspectiva artística de un reactor N4.

---

<sup>66</sup> *Op. cit.*, p. 70

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

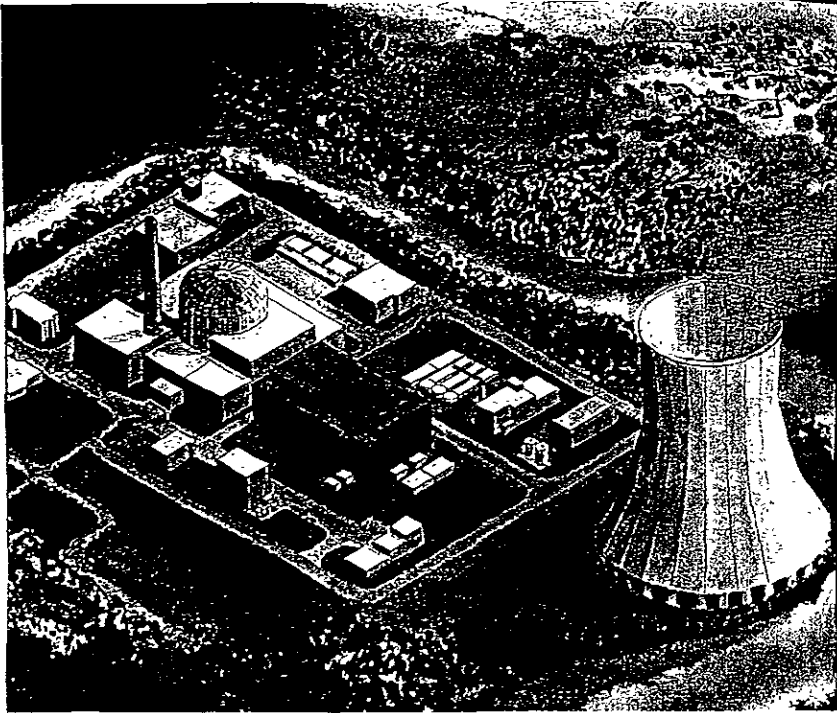


Figura 5.3.- Ilustración de la vista aérea de un reactor N4.

En cuanto al diseño más reciente en cuanto a reactores es necesario mencionar el diseño del Reactor Europeo Presurizado, éste es un proyecto Francés y Alemán que involucra a cuatro compañías importantes como: Framtome en París, Siemens/KWU en Munich, Electricité de France y Nuclear Power International. La etapa de diseño detallado comenzó en 1997 y se espera completar dicho diseño en este año. El encendido de la primera unidad está programado para el 2005. El EPR es sucesor del N4 y del reactor Konovi alemán de 1350 MW, ambos en operación actualmente.

La potencia nominal eléctrica del EPR será de 1450 MW pero estará capacitado para proporcionar hasta 1525 MW. La potencia térmica del reactor será de 4250

MW lo que le dará una eficiencia de 34.11 %. El costo aproximado se estima en 1254 millones de pesos (132 millones de dólares), con un costo operacional de 3.3 pesos/ kW (3.5 centavos de dólar por kW).

Algunas modificaciones técnicas comprenden mejoras en el economizador axial que aumentan la presión secundaria en 3 bar con respecto a los modelos del N4, lo cual mejora la eficiencia del ciclo. El reactor contiene 241 barras de combustible en un arreglo que se aproxima a una configuración cuadrada de 17 x 17, sin embargo el núcleo está más redondeado que en el N4. El núcleo en general es más denso lo cual permite disminuir el porcentaje de enriquecimiento, además acepta óxidos mixtos así como combustibles convencionales, esto permitirá que se incorporen porcentajes de plutonio al combustible para reciclar este producto de otros reactores. Sólo estas características le dan gran flexibilidad al reactor. Tan sólo en la elección del tipo de combustible que se elija se podría ahorrar hasta un 20 % en el costo del combustible. El tiempo de sustitución del combustible se disminuye de 35 a 25 días lo cual en promedio es bajo.

Todos los sistemas del EPR se están diseñando con espacio libre a su alrededor, para su reemplazo fácil en procesos de mantenimiento ágil y para la rapidez de respuesta en caso de un accidente.

Pero lo que es más importante resaltar del EPR son sus sistemas de seguridad. Cuenta con al menos, seis mejoras de seguridad con respecto al N4.

Existe un mayor espacio entre los elementos del núcleo y de ellos con las paredes de contenedor. El volumen libre entre los elementos reduce el tiempo de transporte de calor y esto permite responder con mayor tiempo a un problema de sobrecalentamiento, además en caso de la pérdida del agua de recirculación, el mayor volumen de agua dentro del reactor permite unos segundos más de reacción al sistema de emergencia.



En caso de un posible "meltdown" se cuenta con sistemas de inyección de agua de seguridad, agua de enfriamiento de emergencia para el generador de vapor y enfriamiento directo de componentes, estos sistemas que pueden ser considerados estándar en otras plantas están distribuidos en extremos opuestos del edificio para minimizar desastres en caso de una falla localizada por zonas dentro del edificio del reactor. Las reservas de agua de refrigeración se almacenarán en el mismo edificio del reactor. El diseño del reactor también comprende un hueco refractario que rodea al núcleo y que recobraría metal líquido, lo conduciría a una zona más baja para esparcido y enfriarlo.

El edificio del reactor esta construido de manera en que las estructuras internas asociadas al reactor y sus componentes principales no están acopladas a las estructuras externas para minimizar las vibraciones inducidas. Cuenta con dos paredes concéntricas, la pared exterior está diseñada para soportar choques de avión, la zona anular está diseñada para recobrar fugas de ambas paredes. Las paredes del reactor son de concreto pre-estresado con una resistencia de 6.5 bar absolutos y con un escurrimiento diario menor al 1 % del agua a presión que contiene.

El hidrogeno generado por la descomposición del agua en el interior del reactor, se recombina con el oxígeno gracias a un recubrimiento metálico de las barras de combustible, (Zircalo, aleación anticorrosiva del Zirconium), para evitar el riesgo de un explosión.

La sobre presión en el contenedor se regula con nuevas válvulas de seguridad.

El mayor espacio en el interior del reactor, repleto de agua y el espesor de las paredes del contenedor dan una mayor protección contra bombardeo externo de neutrones. Por último, la vida útil del contenedor a presión del núcleo se diseñó para 60 años, contra los 20 años comunes. Este es un parámetro que también limita la vida útil del reactor en su conjunto.

### 5.2.1.2.- Reactores de agua hirviente.

Los reactores de agua hirviente (Boiling Water Reactor, BWR, o RBMK, por sus siglas en ruso), a diferencia del reactor presurizado, genera vapor saturado directamente en el núcleo del reactor, y no cuenta con un sistema secundario de agua, en cambio el vapor que se produce en el núcleo se dirige directamente a la turbina de potencia, previa separación del agua líquida que pueda contener en ese momento (operación de secado).

La presión de operación es poco más de la mitad que en el reactor presurizado y eso es lo que permite la evaporación en el núcleo. Aunque la mayoría del vapor de la turbina se genera en el núcleo los primeros reactores de este tipo contaban con un generador de vapor adicional al núcleo, los modelos actuales o bien no lo tienen o tienen uno pequeño para usarlo como control de las condiciones del vapor a la entrada de la turbina, este sistema se conoce como “sistema de flujo ciclo dual”.

Es importante el control de estos reactores ya que sigue una lógica especial. Si se quiere aumentar la potencia de salida de la turbina y para esto se abre una válvula de estrangulamiento en la tubería primaria, del vapor proveniente del núcleo, el flujo de vapor aumenta, sin embargo la presión de éste baja y la producción de vapor en el núcleo aumenta, pero el vapor absorbe menos calor que el agua líquida por lo que el resultado final es en realidad es la disminución de la potencia, además que la temperatura de las barras de combustible en el núcleo aumenta por la menor transferencia de calor, lo cual puede llevar a un accidente.

El sistema dual resuelve esto colocando una válvula de estrangulamiento en la entrada de vapor de la turbina del generador secundario; al abrirla la presión del vapor secundario baja, con él su temperatura, indirectamente se aumenta el flujo de calor del vapor secundario y esto a su vez disminuye la temperatura del refrigerante

primario lo cual aumenta la transferencia de calor en el núcleo, y esto sí aumenta la potencia.

En los sistemas que no tienen ciclo dual, ciclo sencillo, se controla la potencia mediante el accionamiento de varias bombas de recirculación en la base del reactor, que aumentan el flujo que entra al reactor, el mayor flujo provoca que la generación de burbujas se concentre sólo en la parte superior del núcleo, lo que aumenta la potencia de salida. Estas bombas jet se colocan en la periferia de la base del reactor para evitar que existan partes móviles dentro del contenedor del núcleo.

En este tipo de reactores la formación de burbujas es determinante para el buen funcionamiento del núcleo, ya que regula la transferencia de calor entre el núcleo y el refrigerante. En teoría este tipo de reactores no tiene un límite al flujo de calor, ni a la temperatura máxima que puede alcanzar el núcleo; sin embargo, el refrigerante líquido controla dicha transferencia, la formación excesiva de burbujas perjudica directamente el control de la temperatura. En funcionamiento normal, la generación del vapor se da en la parte superior del núcleo, en el extremo superior de las barras. Si el flujo de refrigerante baja o la diferencia de temperaturas a la entrada del reactor esta muy cercana a la temperatura de saturación del refrigerante la generación de burbujas se puede dar muy abajo en las barras, o bien sucede en toda la superficie de la barra de combustible. A este fenómeno se le conoce como "ebullición de la capa" (film boiling) y dado que el vapor tiene un menor coeficiente convectivo que el líquido, el flujo de calor disminuye; el exceso de energía que no se retira en el refrigerante eleva la temperatura de las barras de combustible y eventualmente puede provocar la fusión de la superficie de las barras. El punto en donde sucede la evaporación a lo largo de la barra de combustible se conoce como valor del *desprendimiento de la evaporación en el núcleo* (Departure from nucleate boiling) . Todo reactor debe operar por debajo de este valor, sin embargo la operación de un

BWR esta más cerca de este valor que los otros tipos de reactores. La siguiente figura muestra una curva típica que relaciona la diferencia de temperatura de la superficie de las barras de combustible y la temperatura de saturación del refrigerante con el flujo de calor.

A continuación se muestra un diagrama de los componentes básicos de este tipo de reactor y un corte del cilindro del núcleo.

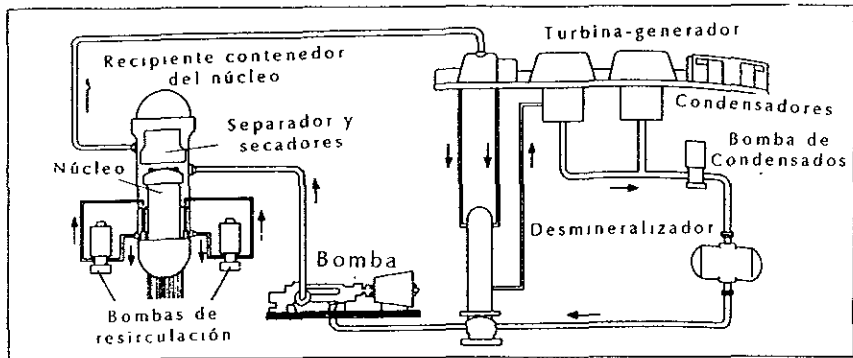


Figura 5.4.- Diagrama de un sistema BWR de ciclo sencillo.

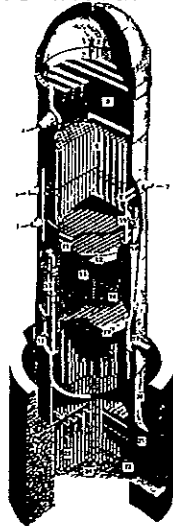


Figura 5.5.- Corte del cilindro de presión de un reactor BWR.

Otra característica física de este tipo de reactores que debe resaltarse es el hecho que las barras de control se inserten por debajo del cilindro a presión, debido a que en la parte superior se encuentra el equipo de secado de vapor. En una inserción de emergencia cada barra cuenta con un actuador hidráulico individual, el cual no puede ser apoyado por la gravedad como en los reactores de agua presurizada. Los problemas que se han presentado al operar este tipo de reactores son vibraciones en el núcleo y desprendimiento y arrastre de material radioactivo en el vapor. Las vibraciones generan problemas de instrumentación y control, y de cuarteaduras en las tuberías de recirculación del agua en el núcleo. La compañía estadounidense General Electric está diseñando una nueva versión de este tipo de reactor tratando de eliminar sistemas elaborados y complicados para que el diagnóstico de problemas y su solución se den de manera más natural y simple. El nombre de este nuevo dispositivo es Reactor Simplificado de Agua Hirviente (RSAH) (Simplified Boiling Water Reactor, SBWR).

En el futuro se podría investigar y probar el comportamiento de arreglos de distinta geometría para las barras de combustible, con el fin de buscar el arreglo óptimo para la disminución de vibraciones, mejor control en la zona en donde se generan las burbujas de vapor y probablemente una nueva forma de insertar las barras de control en forma diagonal desde la parte superior, respetando así el secador de vapor y aprovechando la gravedad para la inserción en caso de un accidente, o bien, conseguir un arreglo anular para el secador que permita la inserción de las barras de control en el centro, hacia el núcleo.

Cabe mencionar que dos reactores importantes para la historia mundial y para la mexicana son del tipo BWR, las cuatro unidades de Chernobil y las dos unidades de Laguna Verde.

### 5.2.2.- Reactores enfriados por gas.

La principal diferencia de los reactores enfriados por gas (Gas cooled Reactors, GR) es que el refrigerante se encuentra en fase gaseosa. Los primeros de estos equipos se instalaron en los cincuenta y en la actualidad operan más de treinta reactores de este tipo en el mundo. El país impulsor de esta tecnología es Inglaterra, aunque Alemania, EE.UU. y Japón se interesaron en este tipo de reactores y los desarrollan.

El gas que se usó en los primeros reactores fue el bióxido de carbono, y en la actualidad se utiliza helio.

Existen dos tipos principales de estos reactores:

- Reactores de Gas Avanzados (Advanced Gas cooled Reactors, AGR)
- Los Reactores de Gas de Alta Temperatura (High Temperature Gas Reactor, HTGR).

Los primeros se denominaron avanzados por el simple hecho de usar Helio en vez de bióxido de carbono. Esto fue posible por que Inglaterra descubrió depósitos subterráneos de helio, lo cual bajó el precio de este gas noble que antes tenía que obtenerse industrialmente por métodos complicados y de poca producción.

Los segundos tienen la particularidad de tener el núcleo hecho completamente de grafito con el combustible incorporado en su estructura. Esto ofrece dos ventajas principales, dada la alta temperatura de fusión del grafito (2 000 °C) se pueden operar temperaturas superiores a otros tipos de reactor, y la alta capacidad calorífica del grafito aunado a su capacidad natural de absorber los productos de fisión, le permite controlar la reacción de fisión de modo que no hay peligro de una fusión del núcleo (melt down). Los mismos elementos de combustible, elementos cerámicos esféricos de mineral de Uranio enriquecido y torio 232, son capaces de soportar, sin

llegar a fundirse, temperaturas superiores a los 1 000 °C , lo cual les permitiría soportar un accidente grave como la pérdida total del refrigerante.

Otros elementos del sistema son: las barras de control, los generadores de vapor (que se colocan en forma radial alrededor del núcleo), recalentadores de vapor, y las bombas, turbinas y condensadores usuales al ciclo Rankine.

Todo el núcleo se encuentra contenido dentro de un recipiente fabricado de concreto previamente estresado dentro del cual se colocan también los sistemas de recirculación del Helio, el intercambiador de calor que actúa como generador de vapor y unos recalentadores de vapor, todo envuelto en el Helio como refrigerante. Este gas inerte entra a una temperatura poco mayor a los 300 °C y sale a casi a 750 °C, mientras que el vapor generado es del orden de los 500 °C. Algunos sistemas de HTGR trabajan con temperaturas de Helio hasta de 900 °C.

Este tipo de reactor comparte con el de agua hirviendo el problema de las vibraciones, pero no tener los secadores en la parte superior es posible introducir las barras de control desde arriba.

Este tipo de reactor es el candidato más probable para modificaciones drásticas en el futuro, dado que hay planes para adaptar este ciclo a una turbina de gas, y al ciclo Brayton, junto con el cual se crea el ciclo combinado que ha tenido tanto éxito en elevar las eficiencias de las plantas convencionales.

El estudio con ayuda de modelos computacionales de un sistema complejo como el ciclo combinado deberá ser prioritario en el futuro cercano para analizar la viabilidad de esta conjunción.

Actualmente no se ha emprendido un proyecto en este sentido pero las experiencias acumuladas esta década con el ciclo combinado podrán hacer atractiva la posibilidad de la creación de una nueva generación de reactores.

A continuación se presenta el diagrama básico del HTGR y un corte de su núcleo.

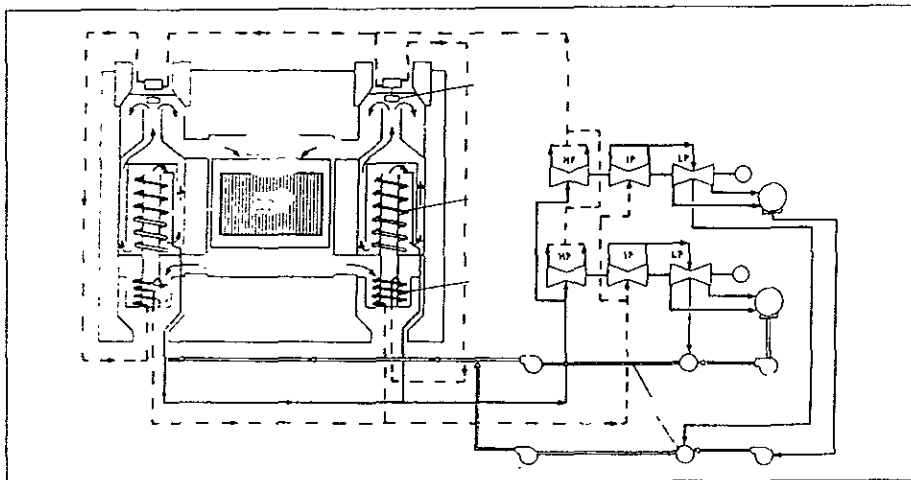


Figura 5.6.- Diagrama de los sistemas de un reactor HTGR.

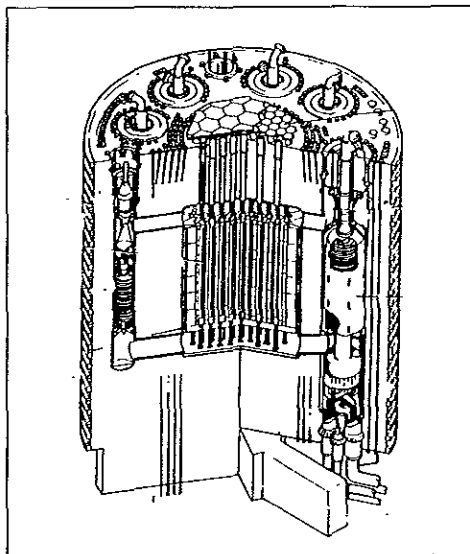


Figura 5.7.- Corte del núcleo en un reactor HTGR.



### 5.2.3.- Reactores de cría rápida de metal líquido.

Dos características básicas distinguen a los reactores de cría rápida de metal líquido (Liquid Metal, Fast Breeder reactor, LMFBR), la primera es el refrigerante mismo que aunque se encuentra en fase líquida su particularidad es la de ser un metal, el sodio. La segunda es que este reactor no necesita uranio enriquecido y dadas las reacciones que ocurren dentro de él, el combustible de uranio provoca la generación de nuevo combustible radioactivo, incluso genera más material fisionable que el que consume. Esto ocurre por que cuando comienza la reacción de fisión con el uranio 235 (fisionable) que se encuentra en el material, en porcentajes normales, se desprenden neutrones rápidos que al golpear átomos de uranio 238 (no fisionable) los convierte primero en un U 239 el cuál decae en menos de 25 minutos en Neptunio 239 y en partículas  $\beta$  y que a su vez decae, en poco más de dos días, en Plutonio 239 (fisionable) y otra partícula  $\beta$ . De esta manera la cría de nuevo combustible de fisión se lleva al cabo dentro del núcleo del reactor, mientras se produce la energía. Por cada núcleo de uranio 235 o Plutonio 239 que fisiona más de un neutrón es capturado por el U 238 y así se genera un átomo de plutonio 239. En realidad la reserva de material fisionable puede aumentar mientras se consume el combustible nuclear inicial. Para estos reactores se tiene un *Tiempo de duplicación*, que es el tiempo que tarda el reactor en producir una cantidad de plutonio igual a la de uranio que se tenía en un principio, en general este tiempo oscila entre los 7 a 10 años.

Además de la producción de plutonio si el reactor es enriquecido con torio 232, este al captura neutrones lentos, se convierte en torio 233 que decae en 22 minutos en Protactinio 233 que a su vez decae en uranio 233 en menos de treinta días, este último también es un elemento fisionable, pero lo suficientemente estable como para almacenarse sin problema.

Otras denominaciones para este tipo de reactor lo consideran reactor rápido por el hecho de utilizar neutrones libres “rápidos” que se generan en la reacción de fisión para la producción del plutonio.

En cuanto al refrigerante, la ventaja de usar un metal líquido sobre el agua, o el gas es principalmente su alto coeficiente convectivo, lo que le permite transferir calor con menor caudal que en los otros reactores. Otra ventaja es la alta temperatura de evaporación del sodio 900 °C (a una atmósfera), que aunada a su baja temperatura de fusión, 96 °C, le permite a este reactor trabajar con un alto rango en temperaturas.

Otra característica que lo distingue de los otros reactores es que no tiene moderador, ya que necesita 400 veces más neutrones rápidos que lentos, en comparación con los otros reactores, y por lo tanto, no se utiliza ningún elemento que absorba neutrones o los frene.

Existen dos tipos de reactores distintos para esta tecnología; el reactor de circuito cerrado (Loop reactor) y el de alberca (Pool reactor).

Para el primer tipo el sodio líquido es bombeado directamente a través del núcleo del reactor y es conducido a un intercambiador de calor en el cual el la energía generada en él es cedida a un flujo de agua que convierte en vapor el agua que será conducida a una turbina. Cada reactor tiene varios de estos circuitos en los cuales circula el sodio sin evaporarse.

En el reactor de alberca el núcleo y el intercambiador de calor se encuentran sumergidos en una alberca de sodio líquido el cual es bombeado por debajo y a través del centro del núcleo para salir por la parte superior hacia el intercambiador. La ventaja de este sistema sobre el de ciclos estiba en que el sodio radioactivo nunca deja la alberca y en caso de un accidente la gran cantidad de este líquido que contiene provee de un sumidero de calor que absorbería los productos fisionables y no escalaría mucho el problema. Las ventajas del sistema de ciclo es principalmente

su tamaño reducido en comparación al de alberca, lo cual trae como consecuencia protecciones y corazas de menor tamaño.

Varios países persiguen esta configuración, Inglaterra, Rusia, Alemania, Japón y el líder mundial en esta tecnología, Francia. Estados Unidos de Norte América el congreso canceló a mediados de la década de los setenta la investigación en este tipo de reactores después del desastre de Three Mile Island.

Las desventajas de este tipo de reactores son dos principalmente, el elevado costo y que la tecnología que emplean es superior a los otros tipos. Sin embargo, este último punto podría ser también una de sus ventajas, dado que la tecnología de punta nos facilita cada vez más el control y operación de equipos de todo tipo y el promocionar estos reactores como los tecnológicamente aptos para la renovación del sector nuclear puede ser benéfico para estos reactores. El costo elevado no sólo es en cuestiones de construcción, sino en costo por kW, que fácilmente puede ser el doble que en una planta nucleoelectrónica convencional.

La capacidad de este tipo de reactores de fisiónar distintos elementos le permite la flexibilidad de explotar yacimientos de baja calidad, o las grandes cantidades de desechos que se han acumulado como resultado de la operación de los actuales reactores y de los programas militares de las superpotencias. Esta perspectiva solamente entusiasma a varios autores en referencia al futuro de esta tecnología y al desarrollo nuclear en general, incluso hasta comentar que la nucleoeenergética se convierta en el próximo siglo en una fuente de energía prácticamente independiente del problema de las reservas hasta más allá de los horizontes de nuestro tiempo<sup>67</sup>.

---

<sup>67</sup> CASTRO Díaz-Balart, Fidel, *Energía nuclear y desarrollo*, Cuba, Ciencias Sociales, 1990. P. 149.

Varios países cuentan con este tipo de reactor: Francia, Inglaterra, EE.UU., Rusia, India, Alemania y Japón, sin embargo el alto costo de estos proyectos ha detenido los programas en varios de estos países y otros problemas políticos como en el caso de EE.UU. tras desastres nucleares, han paralizado casi en su totalidad el desarrollo de este tipo de reactores. Un gran proyecto como el SUPERPHINIX de 1242 MWe de Francia o el BN-600 de 600 MWe de Rusia, no se han dado con frecuencia en este tipo de reactores. Son pocos los reactores de este tipo y por lo general la potencia eléctrica de salida es centenas de MWe, el Superphinix es el primer gran reactor de este tipo. Trabaja con combustible que es 15 % Oxido de Plutonio y 85 % Oxido de Uranio 238. La temperatura en el núcleo es de 500 °C, y produce una potencia térmica de 3 000 MW. Los Rusos tenían programas de desarrollo de reactores de 4 200 MW térmicos, capaces de generar 1600 MWe. Si se sigue aumentando la capacidad térmica y se alienta la investigación tecnológica de los equipos asociados a este tipo de unidades es posible conseguir que esta tecnología sea económicamente competitiva en el futuro cercano.

La siguiente tabla presenta un resumen de las características generales más importantes de los distintos tipos de generación.

Tipo de reactor	Combustible	Moderador	Refrigerante (temp. salida °C)	Potencia promedio MW Térmicos	Eficiencia	Otras características
PWR	Uranio enriquecido	Agua	Agua (330)	3816	34	Pr = 15.5 MPa Psec = 7.5 MPa Qr = 198 kg/s Ttur = sat.
BWR	Uranio enriquecido	Agua	Agua (286)	3833	33	P = 7 MPa Qr = 0.07 kg/s
HTGR	Uranio enriquecido y Torio	Grafito	He (741)	3800	38.2	Pr = 5 MPa Psec = 16.5 MPa Prec = 4 MPa Tvap = 510 °C
LMFBR	Uranio mineral	No tiene	Na (545)	3000	41.3	Psec = 18 MPa Qr = 16 400 kg/s Ttur = 490 °C

Tabla 6.1 Cuadro comparativo de los distintos tipos de reactores.

### 5.3.- Problemas e impacto ambiental.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la tecnología de fisión es el abastecimiento de minerales fisionables. Aunque la cantidad de energía que es posible aprovechar de un kg de combustible nuclear supera por mucho a la cantidad de energía proveniente de otros combustibles no se puede pensar que es un recurso inagotable. La abundancia de los minerales radioactivos fisionables es grande, los recursos especulativos de uranio son de 17 millones de toneladas en el mundo<sup>68</sup>, y se esperaría que su explotación durara varios años, si acaso la tendencia de crecimiento de la industria se revirtiera y al hacerlo la potencia instalada creciera en un 700 %, para el 2060 se agotarían los recursos; sin embargo, este crecimiento sería imposible de obtener para dicha fecha, así que, ante el actual consumo, es probable que los recursos duren 300 años. Esto es si la opción de reactores de cría no se alienta.

En México se ha dicho incluso que es "el recurso energético más abundante en nuestro territorio"<sup>69</sup>. Principalmente en nuestro territorio encontramos grandes bancos en Nuevo León, Tamaulipas, Chihuahua, y contamos con zona promisorias en Sonora, Baja California, Coahuila, Durango, Zacatecas, Puebla y Oaxaca. En Chihuahua se habían encontrado a finales de la década de los setenta poco más de 5 000 toneladas de óxido de uranio en algunas zonas como "Peña Blanca", "Las Margaritas", "El Nopal" y "La Domitila". La importancia de nuevo León y Tamaulipas estiba en que los depósitos se encuentran a baja profundidad (entre 20 y 80 m) lo cual hace atractivos los proyectos para minas abiertas, que abaratan mucho los costos de explotación. En la década de los setenta se pensaba que los recursos uraníferos

---

<sup>68</sup> VÉLEZ Ocón, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997. p. 102.

<sup>69</sup> VIZCAÍNO Murray, Francisco, *México ante la energía nuclear*, México, Unidad de difusión institucional del INEN, 1977, p.21.

mexicanos podrían sobrepasar las 500 mil toneladas. Hasta antes de 1983 la compañía URAMEX realizó varios estudios en la República Mexicana, incluyendo prospecciones aéreas del territorio, si el programa nuclear mexicano arranca de nuevo será importante no desperdiciar la información que ellos recabaron en el curso de tanto tiempo. Se ha dicho incluso que el 75 % de nuestro territorio no ha sido explorado buscando uranio.<sup>70</sup>

La perspectiva de los reactores de cría, o las del Reactor Presurizado Europeo de incorporar combustibles distintos al uranio enriquecido amplía todavía más el rango de utilidad de esta energía. Esto elimina como un problema el suministro de combustible en los próximos 25 años, pero ya que el tipo de combustible determina en gran medida el tipo de reactor que se debe construir, el programa de desarrollo energético que requieren los distintos países debe considerar los combustibles disponibles para determinar el tipo de reactor a utilizar.

El impacto que este tipo de tecnología tiene en el medio ambiente se diversifica en varias áreas. La más evidente y común es la radiación, aunque existen otras, como la contaminación térmica y el uso del agua.

La radiación hacia el medio ambiente en una central nuclear puede provenir de dos fuentes. La primera debida a la operación normal de productos radioactivos y la segunda por medio de accidentes.

La operación normal, el mantenimiento, reparación y el desmantelamiento de las centrales nucleares genera desechos sólidos, líquidos y gaseosos, que tienen un grado de radioactividad variado según su origen. Los materiales sólidos comprenden ropa, herramientas, equipo de trabajo y los ensambles de combustibles que provienen del núcleo. Todos menos los ensambles son de baja intensidad. Los desechos líquidos provienen de drenes, desechos químicos, aceites y lubricantes de

---

<sup>70</sup> COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, *Del fuego a la energía nuclear*, México, 1997. P. 57

los equipos y agua con detergente que se generan en la planta. Los materiales gaseosos son principalmente los gases no condensables que acompañan al vapor y que se separan en el condensador, como el yodo 131.

La radiación se mide internacionalmente en Becquerel (Bq), aunque en términos de perjuicios a la salud en el Sistema Internacional se usa una unidad de: dosis equivalente de radiación que es el Sievert (SV), la dosis normal que cualquier ser humano recibe por efectos de rayos cósmicos, radiaciones de aparatos electromagnéticos construidos por el hombre, material radioactivo disperso en el ambiente de forma natural, etc. es de 2.5 mSv, la exposición paulatina superior a esta cifra puede acarrear problemas de salud, aunque siendo una exposición prolongada de bajo nivel, no se cuentan con datos suficientes. El mayor peligro de la exposición a radiaciones es durante una exposición corta y de alta intensidad, como las que ocurren en los accidentes. El peligro hacia el medio ambiente son diversas y no corresponde a este trabajo su análisis específico; en concreto los peligros hacia el ser humano por efectos de la radiación son, pérdida de cabello, quemaduras, cáncer en órganos como los pulmones, riñones, hígado, tiroides, mamas, de médula; anomalías en órganos reproductores y en las paredes del intestino, síndromes cerebrales y alteración del código genético del individuo. El análisis o la posibilidad de afectar a alguna población, produciendo en ella cualquiera de estos efectos hace entendible la preocupación y el activismo de la sociedad civil, y por lo tanto, la seguridad y el control de radiación deberá ser la prioridad máxima en cualquier proyecto nuclear en el futuro. Pero también es importante resaltar que, no es una utopía, la realidad es que es posible controlar la radiación hasta conseguir límites tan bajos, que incluso son poco naturales.

La operación normal y adecuada de la central no debe propiciar la fuga ningún tipo de radiación, ya que los elementos radioactivos deberían estar confinados al

núcleo del reactor y todos los otros elementos descritos antes se controlan cuidadosamente, sin embargo los neutrones rápidos son difíciles de contener, además todo tipo de partículas son disipadas en las inmediaciones del reactor por efecto de la colisión entre nucleones, todo tipo de radiaciones son posibles, Partículas  $\alpha$ ,  $\beta$ , radiación  $\gamma$  y emisión de positrones. El control de estas radiaciones se consigue con paredes aislantes de espesores variados, control del aire de la planta y manteniendo una presión interior menor a la del ambiente para evitar fugas. La radiación exterior a la central nuclear en operaciones normales es, hoy por hoy, despreciable como peligro ambiental. Durante procesos de mantenimiento y reparación de equipo el riesgo de fugas o radiaciones exteriores aumenta, sin embargo, con planeación y control de calidad, la radiación exterior debe mantenerse en los mismos niveles que cuando se opera normalmente.

El desmantelamiento de las plantas y el retirar combustible procesado es el tema de mayor problema para el futuro de este tipo de energía. La pregunta que más acosa a los promotores de esta tecnología es ¿qué hacer con los desechos?, los de combustible utilizado y todos los demás cuando una planta termina con su ciclo y debe ser desmantelada. En principio cualquier elemento de la planta deberá ser tratado como material radioactivo y tratado de manera similar a los desechos del núcleo mismo. El tema no es sencillo, se calcula que sólo EE.UU. posea hoy cerca de cuarenta mil toneladas de material irradiado<sup>71</sup>, y este país y cualquier otro que cuente con material radioactivo, proveniente de centrales nucleares, hospitales o industrias, debe disponer de los desechos de una manera que afecte lo menos posible al medio ambiente que los rodeará.

---

<sup>71</sup> CASTRO Díaz-Balart, Fidel, *Energía nuclear y desarrollo*, Cuba, Ciencias Sociales, 1990. P. 230.



Un proyecto típico de confinamiento es buscar una zona con características especiales: poca precipitación pluvial, baja actividad sísmica, estabilidad geológica, ausencia de mantos freáticos cercanos, lejanía de zonas urbanas, cercanía de las zonas de producción de desechos, entre otros, y construir una mina que albergará en sus túneles el material de desecho. Cabe aclarar que un lugar con todas las condiciones cubiertas al cien por ciento es imposible de encontrar, se debe elegir un lugar que cubra la mayoría de estas condiciones, dada la importancia de contar con un lugar adecuado para disponer de los desechos. Una vez elegido el lugar se reúnen los desechos radioactivos, se les procesa para extraer material reutilizable y se les integra en una mezcla vitrificada, que se coloca en contenedores de pequeño tamaño, generalmente barriles, para ser apilados dentro de un contenedor de metal más grande con un gran grosor y que es bajado a la mina y apilado nuevamente con otros contenedores similares. Cuando una sección del túnel de la mina esta repleto de estos contenedores se les rodea con concreto para aislarlos y contenerlos permanentemente. La contención de esta manera puede asegurarse hasta por 1 000 años dada la resistencia al esfuerzo, a la fatiga y a la corrosión de los materiales del cementerio.

Los residuos de baja intensidad pueden contenerse en barriles de acero especial rellenos de asfalto o cemento, los residuos de alta intensidad se almacenan temporalmente en tambores de cemento y colocados en albercas repletas de agua, al cual actúa como aislante. Se ha comprobado que con 18 meses de confinamiento el ensamble de combustible baja su intensidad en un 97 % y en él sólo quedan los materiales de vida media larga, por lo que se debe pensar en un almacenamiento definitivo. Pero este es precisamente el agobio de los ambientalistas ya que la vida media del U 238 es de 4 510 millones de años y del U 235 de 700 millones de años. Ningún proyecto de ingeniería puede programarse para esas escalas. Otro problema

con los cementerios es como dejar una advertencia en el lugar que dure lo suficiente y transmita a los arqueólogos del futuro que esta construcción especial es en realidad peligrosa, que no se excave o que no se urbanice esa zona.

Pero la investigación actual sobre desechos no se centra en el diseño de cementerios nucleares solamente, existen centros de reprocesamiento de combustible, destinados a reutilizar la mayor cantidad posible del combustible gastado de una planta nuclear como los centros de reprocesamiento de combustibles nucleares en Francia, el centro "The Cogema" en "La Hague" y en los EE.UU. los Laboratorios Argonne (Argonne National Laboratorys) Estados Unidos donde se demostró que ciertos tratamiento electrometajurgicos pueden remover uranio remanente de barras de combustible usadas. El procedimiento toma desecho de combustible enriquecido y comienza un proceso de disolución en un contenedor de acero con sales derretidas de cloruro de litio y cloruro de potasio, posteriormente se aplica una corriente al combustible usándolo como ánodo, y el uranio remanente se acumula en el cátodo para luego ser retirado, los residuos restantes en el contenedor contienen otros productos radioactivos como plutonio, cesio y estroncio. Es posible retirar el plutonio para ser reutilizado al igual que el uranio, y de esta manera los residuos restantes disminuyen su radioactividad y no pueden usarse para fabricar armas. Lo más importante es que el volumen total de los desechos se reduce en, al menos, un tercio del inicial, lo cual colabora enormemente en el almacenamiento de desechos.

El rechazo hacia los cementerios nucleares por parte de la opinión pública tiene dos grandes contradicciones, primero, si no se dispone adecuadamente de los desechos radioactivos estos se convierten en una amenaza más grande para la sociedad por que se pierde control sobre ellos, así por ejemplo, actualmente los hospitales que disponen adecuadamente el material radioactivo de baja actividad

que generan son poco, la gran mayoría desechan este material peligroso como cualquier otro desperdicio mezclándose en los tiraderos comunes o en zonas poco pobladas y poco transitadas con otros desechos. Esto hace que el riesgo de contaminación a los acuíferos hoy por hoy, sea mucho mayor, que si existiese un cementerio nuclear controlado que registrara el origen y las características de cualquier desecho. Ejemplos de este tipo de tratamiento de desechos se tienen en México. En 1963 el robo de una fuente de cobalto ocasionó la muerte de una familia completa, y el 1983 cuando se vendió una unidad de Teleterapia como "chatarra" se fabricaron varillas corrugadas radioactivas que se distribuyeron en la zona norte del territorio nacional y en los EE.UU. donde fue detectado el desecho, a esto siguió el tratamiento por exposición a radiación de, por lo menos, diez personas.

Por otra parte, también parece evidente que aquellos que rechazan estos depósitos olvidan que el material radioactivo se encontraba en el subsuelo, y que de no ser explotada, sería un depósito natural de material radioactivo que esta integrado a cierta zona y que las medidas preventivas para la contaminación de mantos freáticos o regularización para la construcción en las cercanías serían virtualmente imposibles. Incluso el volumen total de material radioactivo disminuye cuando es procesado.

La forma de contaminación más seria que enfrentaría una planta nuclear sería la que surgiera a partir de un accidente en la planta, a lo largo de la historia nuclear han ocurrido poco más de seis accidentes<sup>72</sup> de importancia media y, dos considerados graves, Three Mile Island y Chernobil. Todos ellos, hay que aclararlo, relacionados con errores humanos.

---

<sup>72</sup> RUBBIA, Carlo y Nino CRISCENTI, *El dilema nuclear*, México, CONACULTA/Grijalbo, (Los noventa, 54) pp. 56-70.

Pueden existir varios tipos de accidentes en donde se pueden escapar radiaciones al ambiente, pero sin duda el más grave sería la pérdida de control y contención del núcleo del reactor. Cuando se pierde control sobre la reacción de fisión en el núcleo, éste eleva su temperatura sin tener un límite teórico, en la realidad el límite se presenta cuando se alcanza la temperatura de fusión de los elementos sólidos que conforman las barras del combustible nuclear, cuando esto ocurre se denomina “fusión del núcleo” o “melt down” en inglés. Al ocurrir esto la temperatura es tan alta que el núcleo se fusiona y con él el material del recipiente que lo rodea y se pierde contención. Entonces los sistemas que normalmente aíslan la radiación fallan y grandes cantidades de radiación escapan al ambiente. Las causas de un melt down pueden ser varias pero principalmente son la pérdida de refrigerante o el mal funcionamiento de las barras de control.

En el futuro para minimizar los problemas de un accidente se han comenzado a analizar diversas opciones según el tipo de reactor, entre estas acciones están: medios para controlar la presión del aire interno de la central para evitar dispersión de partículas hacia el exterior y sistemas de filtraje para atrapar éstas, control de los niveles de  $H_2$ , ya sea por combinación con elementos internos al reactor o su combustión, y la construcción de trampas cerámicas altamente resistentes que conducirían el material fusionado en caso de que el núcleo ataviese por un melt down.

Pero, el impacto ambiental de este tipo de plantas no sólo está en la radiación, como se decía al principio de esta sección, el consumo de agua es un tema importante. El requerimiento de agua de una central nuclear es muy superior al de las plantas convencionales, tres o cuatro veces más.

Si hablamos de reactores de agua ligera al sistema de vapor de la turbina y al circuito de agua del condensador de la misma hay que agregar uno o dos circuitos

más de agua desmineralizada que se utilizan como refrigerante del reactor y como vehículo de la energía hacia el circuito de vapor de la turbina. Esos dos sistemas extras demandan mayor cantidad de agua, pero incluso si analizamos el requerimiento de agua del sistema para condensar el vapor de la turbina y enviarla de nuevo al generador de vapor, se verá que es mayor que el de las plantas convencionales. Dada esta insaciable demanda las plantas nucleoelectricas se encuentran en las proximidades de un acuífero natural: un río, un lago o el mar. La mayor demanda de agua afecta en dos formas al ambiente, la primera es que se altera el ciclo y la distribución del agua en la zona, y la segunda es que el agua que regresa al ecosistema lo hace con temperatura mayor al común para dicho ambiente. Esto relaciona este problema con el de la contaminación térmica, que es el siguiente punto.

Cada ecosistema tiene un equilibrio y una armonía entre todos los factores que se involucran en él. La temperatura es uno de estos. Los cambios bruscos de temperatura pueden ocasionar perturbaciones irreparables en un ecosistema, si estos además son rápidos, aun con el daño es posible que la armonía se restablezca y el impacto no será permanente. Cuando los cambios de temperatura son moderados y rápidos, su efecto es casi nulo, pero cuando se presenta un cambio sostenido en todas las estaciones, el efecto puede ser tan devastador como un cambio drástico. Este último caso es el que atañe a las plantas nucleares y es un problema relacionado con el suministro de agua, ya que, entre menos agua se tome del acuífero, mayor será la contaminación térmica hacia el ecosistema. La cantidad de energía que se debe retirar de la planta es para efectos de este análisis, constante, se puede retirar con poco caudal pero a expensas de un rango de temperatura alto entre la entrada y la salida del agua, o bien, se baja el rango aumentando enormemente el caudal de enfriamiento. Se recomienda una elevación de temperatura no mayor de cuatro

grados centígrados, pero pueden existir elementos de la biosfera del ecosistema en cuestión susceptibles a cambios aún menores en la temperatura.

Estos problemas y otros, que analizaremos en la siguiente sección de este capítulo, mantienen el desarrollo del sector en un alto total, incluso en el sector investigación, que debe aportar soluciones a estos y a los próximos problemas a los que se enfrentará este modelo de generación.

Como un alivio y una reanimación de las investigaciones los modelos computacionales serán de vital importancia en el futuro cercano. Desde un modelo de los sistemas que integran una planta nuclear y que hoy en día se diseñan con ayuda de una computadora, para facilitar el diseño, para analizar su resistencia y comportamiento bajo situaciones especiales, gracias al análisis del elemento finito asistido por computadora, hasta modelos completos de las plantas nucleares en los que se pueda modificar ciertas condiciones en los equipos y verificar el efecto sobre el conjunto, sin necesidad de realizar pruebas en las plantas reales.

Este tipo de modelos ya ha tenido una primera introducción al campo de la energía nuclear enfocado al manejo de las armas nucleares. Dadas las restricciones en las pruebas nucleares superficiales y subterráneas a partir del 24 de septiembre de 1994, a EE.UU. le interesó desarrollar programas computacionales que modelaran el comportamiento de una explosión y el comportamiento de las ojivas nucleares con el paso del tiempo. Los misiles nucleares del arsenal estadounidense tenían una expectativa de vida de veinte años, el cual ha expirado en términos generales.

Desde 1997 tres laboratorios se han dado a la tarea de crear los modelos que le permitan simular el comportamiento de dichos dispositivos con el paso del tiempo: Los Alamos, Sandia National Laboratory y Lawrence Livermore Laboratory. Los Alamos por ejemplo, se encargó de desarrollar un modelo de explosión que despliega la información del modelo, en tiempo real, en un novedoso sistema de proyección

en “Realidad Virtual” sobre algo parecido a un resitirador con despliegue tridimensional, interactivo y que acepta modificaciones con uno guantes virtuales que le permite al operador manipular elementos como si trabajara sobre una mesa de laboratorio. La respuesta de estos modelos y su confiabilidad generan confianza en sus desarrolladores para que en verdad sustituyan la necesidad de realizar pruebas reales con estos dispositivos.

También se han hecho modelos computacionales de diversos componentes de planta nucleares con el fin de probar su comportamiento ante distintas circunstancias o posibles eventualidades, como por ejemplo los análisis realizados sobre el tanque de almacenamiento de agua de enfriamiento de emergencia bajo ataques de tornados<sup>73</sup>.

El modelo por computadora eliminó la necesidad de construir modelos a escala e intentar recrear las condiciones de un tornado a escala para analizar el comportamiento del equipo. El modelo computacional se probó , previo a los experimentos, contra los resultados de un estudio hecho años atrás con un modelo y contra el comportamiento del tanque real, comprobándose que dichos modelos si pueden utilizarse efectivamente en el sector nuclear.

La siguiente tabla muestra los factores de impacto ambiental que deben considerarse para este tipo de generación.

---

<sup>73</sup> VARIOS, “Adjusting to mother nature”, en *Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 7 (EE.UU., Julio, 1999), pp 54-56.

<b>IMPACTO AMBIENTAL EN LA GENERACIÓN POR FISIÓN</b>		
Indicadores de impacto	Indicador	Calificación por indicador
	Muy Alto = MA	10
	Alto = A	8
	Medio = M	6
	Bajo = B	4
	Muy Bajo = MB	2
Nulo = N	0	
Medio o tipo de contaminante	Contaminante	Indicador
AIRE	CO <sub>2</sub>	N
	O <sub>3</sub>	N
	NO <sub>x</sub>	N
	SO <sub>x</sub>	N
	HC	N
	Pb	N
	H <sub>2</sub> S	N
	Compuestos cancerígenos	N (se consideran en radiación)
	PAN <sup>1</sup>	N
Otros <sup>2</sup>	B	
Agua	Sólidos disueltos	MB
	Sólidos suspendidos	B
	Químicos	B
	Metales	B
	Aceites y Grasas	MB
	Agentes biológicos	N
	Temperatura	M
Otros	N	
Desechos sólidos	Desechos comunes	B
	Desechos peligrosos	N (se consideran en radiación)
Ruido		MB
Radiación	Aire	A
	Agua	A
	Suelo	MA
Otros	Paisaje	M
	Uso del suelo	A
	Eutroficación acelerada	N
	Hundimientos	MB
	Inducción de actividad sísmica	N
<b>Total</b>		<b>74</b>

<sup>1</sup> PAN se refiere a Nitratos de Peracilo, "smog fotoquímico".

<sup>2</sup> En el caso específico de este tipo de generación se refiere a Vapor de agua y su efecto es elevación de la temperatura



#### 5.4.- Política nuclear mundial.

Al principio de este capítulo se menciona como fue que los Curi, Bequerel, Einstein, Hahn, Strassman y Meitner, lograron los primeros pasos en el entendimiento del fenómeno radioactivo, su explicación y su posible aplicación. Pero en realidad la era nuclear comienza con Enrico Fermi un físico italiano, nacionalizado estadounidense, que construye la primera pila atómica, y logró producir la primera reacción en cadena controlada el 2 de diciembre de 1942. El lugar fue la universidad de Illinois, la pila tenía 5.8 m de alto y 7.5 m de largo y usó 40 toneladas de óxido de uranio y ladrillos de grafito puro como moderadores, el control de la reacción se hizo gracias a barras de cadmio. Esta pila era demostrativa y no estaba planeada para producir energía sino para demostrar que la reacción de fisión era plausible y controlable.

Este evento estaba envuelto en política ya que el desarrollo de esta pila no era casual, el origen del reactor nuclear está íntimamente ligado al desarrollo de la tecnología hermana que tantas malas concepciones le ha generado a la energía nuclear: el armamento nuclear. En 1940, en el comienzo del conflicto mundial que acosó a la humanidad a mediados de siglo, Winston Churchill<sup>74</sup> recibió un informe que contenía la fórmula y la manufactura de una bomba basada en la fisión del uranio 235. El científico que ideó este artefacto era paradójicamente un Alemán exiliado a Inglaterra, Rudolf Peiers. Churchill participó a sus aliados del informe y entonces nació en "los Alamos" Nuevo México el Proyecto Manhattan, que contempló la creación de una ciudad-laboratorio con cientos de científicos destinados a crear la bomba atómica, entre estos científicos estaban Fermi, Peiers, Feynman e incluso Bohr. En 1945 se encendió el primer reactor de cría rápida del

---

<sup>74</sup> Winston Churchill (1874-1965) Político, periodista, soldado, inglés. Primer ministro de Inglaterra de 1940 a 1945.

mundo en "lo Alamos", su función no era la de producir energía eléctrica o calor, sino producir el plutonio que se utilizaría para fabricar las primeras bombas atómicas. La primera prueba nuclear del mundo se hizo en el desierto de Nuevo México el 16 de julio de 1945. El proyecto Manhattan planeaba dos bombas, una para Alemania y una para Japón, pero para julio de 1945 los rusos ya habían capturado Berlín, así que ambas armas serían transportadas al pacífico. El 6 de agosto de ese mismo año una bomba fue lanzada sobre la ciudad de Hiroshima y el 9 del mismo mes sobre Nagasaki.

Antes del desarrollo de la energía nuclear pacífica había nacido su primer enemigo y el causante de la mala publicidad que actualmente tiene la energía nuclear es el uso bélico de este tipo de energía. Tras el bombardeo de las ciudades japonesas y después de cada prueba nuclear, la opinión pública se aleja del uso pacífico de este tipo de energía. El desarrollo posterior de la bomba de neutrones, también llamada la "bomba capitalista" ya que destruye todos los organismos vivos dejando intactas las estructuras materiales que hacen la infraestructura de una nación, empeoró el rechazo de la sociedad civil a cualquier tecnología con el apellido nuclear.

Al poco tiempo de los bombardeos y del fin de la guerra, varios científicos, entre ellos Einstein, alzaron la voz en contra del uso militar de la energía del átomo, pero el peso político no fue suficiente en este grupo. Al año siguiente de las detonaciones, las Naciones Unidas organizan una conferencia internacional que tenía como tema el uso pacífico del átomo, participaron 1260 delegados y 72 oradores.

En 1949, el 12 de agosto, tras una carrera de espionaje sin precedentes, los rusos realizan su primera prueba atómica. Demostraron al mundo que ellos tenían la capacidad atómica al igual que su nueva contra parte los EE.UU. Nace la guerra fría y con ella las dificultades políticas para el uso pacífico de la energía nuclear.

El primer reactor que produjo electricidad fue un pequeño reactor de cría de los EE.UU. que tampoco estaba diseñado para ese fin, se produjo electricidad sólo para comprobar que era posible. El Reactor de Cría Experimental (Experimental Breeder Reactor, EBR-1) generó en 1951 100 kW de energía eléctrica. El 27 de Junio de 1954 en Obnisk, Rusia, se puso en marcha la primera central electronuclear del mundo, era un reactor tipo VVER (agua presurizada) con uranio enriquecido al 5 %. La potencia eléctrica generada fue de 5 MW, de los cuales 1 MW eran consumidos por la propia planta.

La carrera nuclear pacífica había comenzado, en medio de la carrera armamentista y posteriormente una carrera espacial, que relegaron a un segundo plano el desarrollo pacífico de la energía nuclear. Otros países no tardaron en instalarse en dicha carrera, en 1956 los franceses ponen en marcha el primer reactor de gas del mundo. Un año más tarde EE.UU. ponen en marcha su primer reactor PWR con 60 MW de potencia eléctrica, en Shippingport. En 1962 Canadá instala la primera estación de agua pesada.

Individualmente, todos los países, empujados por los científicos, comienzan a crear organismos internos destinados específicamente al estudio de las posibilidades atómicas. En 1955 en nuestro país se crea la Comisión Nacional de Energía Atómica, en 1956 Naciones Unidas aprueba el establecimiento de un centro internacional de energía atómica, para promover el uso de la energía atómica.

Comenzaron a crearse los organismos internacionales dedicados a la regulación del uso de la energía atómica, el 25 de mayo de 1957 se creó la Comunidad Europea de la Energía Atómica, conocida con el nombre de Euratom, que planeaba la proliferación de este tipo de energía en todo Europa. Poco tiempo después nace la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), la cual tiene una visión reguladora global.

Tras un sin número de pruebas nucleares de las potencias mundiales en 1963 se prohíben internacionalmente las pruebas nucleares de superficie o atmosféricas. Lo cuál parece ser un paso adelante para la aceptación del uso pacífico de esta energía.

El mundo entero entró en la década de los sesenta pensando que la energía pacífica del átomo era la solución al problema energético del futuro. Los países Latinoamericanos no tardaron en comenzar sus convenios. El 29 de abril 1963 México, Bolivia, Brasil, Chile y Ecuador emiten una declaración de No proliferación de armas nucleares, Se unen más países y se firma el Tratado de no Proliferación de Armas Nucleares el 14 de febrero de 1967, que entró en vigor en agosto de 1969, revisada y ratificada cada cinco años, y a la cual se han unido casi todos lo países del continente. El tratado demanda la Asistencia en caso de accidente nuclear y/o emergencias radiológicas, la pronta notificación de accidentes y el no desarrollo de armas nucleares; "no fabricar, recibir, almacenar, ni ensayar armas nucleares o artefactos de lanzamiento nuclear".

No fue sino hasta 1966 que se comenzó a considerar la idea de una central nuclear en México, que debería comenzara operaciones en 1975. Se realizó un estudio de las opciones y se recomendó una planta con un reactor de entre 750 y 1000 MWe . La Comisión Federal de Electricidad decidió construir un reactor de 660 MWe y lanzó la convocatoria al concurso. Diez empresas internacionales pidieron participar en un principio con diversas propuestas, sobre todo el tipo de reactor. Un estudio propuso tres posibles localidades, determinadas por sus condiciones geológicas, hidrológicas y de suministro de agua; Valle de Bravo (con agua de una presa de CFE), Apasco (con agua negra tratada y torres de enfriamiento) y Laguna Verde (agua de mar). Se eligió el tercer sitio en 1969. En 1970 se dio el último plazo para los proyectos y se comenzó la etapa de evaluación, se decidió una

vida útil de 30 años y un periodo de construcción de cinco años. El proyecto no fue ratificado por el ejecutivo nacional ya que el Presidente Díaz Ordaz no quiso tomar la decisión por estar a punto de terminar su periodo presidencial. Esto marca el inicio de una serie de retrasos sexenales, que hoy por hoy, siguen marcando la planeación y el desarrollo tecnológico en nuestro país. En 1971 CFE amplía el proyecto con la idea de agregar una segunda unidad. No fue sino hasta 1972 que se decide que General Electric es la compañía adecuada para el proyecto con un reactor BWR de 654 MW<sub>e</sub>. También en este años se crea en México la Centro de Almacenamiento de Desechos Radioactivos (CADER). El proyecto le Laguna Verde será dirigido desde EE.UU. en Nueva York.

Pero la segunda mitad de la década de los sesenta y principios de los setenta presenciaba el desarrollo de los hidrocarburos como el energético más barato y poderoso con el que contaban los países desarrollados, el consumo creció desmesuradamente y relegó, casi nulificó a cualquier otro energético.

En 1972 se realizó en Estocolmo, Suecia, la primera conferencia con el tema del medio ambiente, "Only one Earth", marca el inicio de la revolución del medio ambiente, aunque en sí esta conferencia no tuvo una gran repercusión internacional.

En 1973 la Comisión de Energía Atómica de EE.UU. (Atomic Energy Commission, predecesora de The Nuclear Regulatory Commission) estableció el máximo poder que un reactor podría producir en 3 800 MW<sub>e</sub>, más lo necesario para los equipos auxiliares. Esto restringía el desarrollo máximo en varios países ya que EE.UU. era el principal proveedor de reactores nucleares en el mundo en ese momento.

El primer país Latinoamericano de poner en marcha una central nuclear fue Argentina, en 1974 con un reactor PWR.

En 1976, un año después de la planeada puesta en marcha de la central mexicana, se comenzaron a construir los cimientos de la unidad uno de Laguna Verde. México parecía abrazar el desarrollo nuclear pacífico, en 1977 el director del Instituto Nacional de Energía Nuclear (ININ, sucesor de la Comisión Nacional de Energía Atómica) decía " [...] no está en duda que tendremos que recurrir a la energía nuclear; sólo falta delinear una política coherente y fundamentar como, con que y cuando vamos a empezar a utilizar nuestros recursos nucleares, [...]"<sup>75</sup>. El año siguiente comenzó un estudio imponente que planeaba proveer a México con 20 000 MWe provenientes de fuentes nucleares, un 20 % del consumo nacional de energía eléctrica.

El 28 de marzo 1979 ocurrió en Estados Unidos de Norte América una emergencia nuclear en la estación de Three Mile Island (TMI). Una posible explosión y una fuga radioactiva debida a una falla humana puso en peligro de contaminación a miles de personas de la localidad, sin embargo, según las autoridades Estadounidenses la fuga fue contenida dentro de las instalaciones. El personal de la planta apago el sistema de enfriamiento de emergencia del núcleo, lo cual agravó la situación posterior, cuando el núcleo presentó una ligera elevación de su temperatura, dado que este sistema hubiese podido solucionar el problema. El problema mayor fue la formación de una burbuja de hidrógeno que amenazó con explotar durante tres días. Algunos especialistas la consideraron que el desastre de TMI cataloga como uno de los pocos desastres mayores en los que no hay pérdida de vidas humanas<sup>76</sup>.

---

<sup>75</sup> VIZCAÍNO Murray, Francisco, *México ante la energía nuclear*, México, Unidad de difusión institucional del INEN, 1977, p.12.

<sup>76</sup> CULP, Archie W., *Principles of energy conversion*, E.E.U.U., McGraw Hill, 1991, p. 250.

El impacto que esto desató fue terrible, el público norteamericano se volcó contra las administraciones encargadas de la seguridad, operación y cualquier empresa relacionada con algún tipo de energía nuclear. El gobierno americano de Jimmy Carter incrementó las regulaciones nucleares y también el tiempo de construcción de plantas de siete u ocho años a doce a quince<sup>77</sup>, lo cual elevó los costos de tal forma que todos los proyectos en esta área fueron abandonados. Hoy en día el factor del tiempo es suficiente para hacer imposible un proyecto costeable en Estados Unidos. Como consecuencia de esto se suspendieron investigaciones, trabajos y la construcción de cualquier planta nuclear en dicho país, al grado que hasta 1991 no se había construido ninguna planta nuclear en este país desde 1978. Además, la presión social fue tal que algunos estados tuvieron que comprar las plantas en construcción sólo para evitar que entraran en operación, como fue el caso de el estado de Nueva York, en 1988, con la planta de Shoreham<sup>78</sup>.

En México el presidente López Portillo, hacia el final de su sexenio canceló también el programa nuclear mexicano, concediendo un indulto a la planta en construcción de Laguna Verde, pero no sin retrasos y problemas. Se creó la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, CNSNS, para vigilar cualquier proyecto que involucrara material radioactivo en nuestro país.

En el mundo las reacciones fueron similares o peores, en Suecia por ejemplo, después del accidente se hizo un referéndum para cerrar los 12 reactores nucleares que existían en es país con un total de generación de 10 000 MW, y que representaba casi el 50 % de su generación total. El referéndum estableció que para el 2010 otras las plantas deberían estar fuera de operación si la situación económica y de la red eléctrica lo permitían y no se afectaba a la estabilidad del país.

---

<sup>77</sup> *loc. cit.*

<sup>78</sup> *loc. cit.*

Comienza la década de los ochenta con una crisis mundial de hidrocarburos, la reserva mundial controlada por los Árabes se ve comprometida al mundo occidental, los precios se disparan y la exploración de nuevos yacimientos se intensifica. México, como un país productor de petróleo, parece relegar cualquier otro energético y esforzarse sólo en impulsar la industria petrolera. En los primeros meses de 1980 una empresa consultora extranjera entregó los resultados sobre un estudio hecho a treinta y nueve empresas nacionales sobre su posible incursión en el mercado y en la ingeniería nuclear en varios niveles, su conclusión fue que no sería posible, aunque estaban capacitados, dado que *“están muy ocupados satisfaciendo las necesidades [.] de la industria petrolera”*. La euforia petrolera, de hecho, comenzó alrededor de 1977 o 78 y no sin sus críticos, el Ingeniero Heberto Castillo se oponía a la adquisición de un modelo petrolizado, por que consideraba que utilizar el petróleo para quemarlo era como vender maderas preciosas como leña<sup>79</sup>, además de que según el panorama económico en ese año no era evidente el beneficio de la carrera petrolera para México.

En 1982 sobreviene una crisis en nuestro país, pese a los augurios de superación económica debida al petróleo la economía se desploma. Este factor aunado a repetidas inconsistencias y retrasos por parte de la compañía estadounidense que manejaba el proyecto de Laguna Verde, hace decidir a la Comisión Federal de Electricidad el tomar bajo su cargo la terminación de la central, que llevaba ya, siete años de retraso. Al mismo tiempo Brasil instala su primera central nuclear, lo que lo convierte en le segundo país latinoamericano con este tipo de tecnología.

---

<sup>79</sup> CASTILLO, Heberto, *necesario plan de energéticos*, México, Representaciones y servicios de Ingeniería, S.A., 1978, p. 6.



El golpe de gracia para la tecnología nuclear vino en 1986 con el desastre en la planta generadora de la Unión Soviética de Chernobyl. Una serie de fallas humanas y errores de apreciación llevaron al desastre un experimento con la turbina de la unidad tres. En la madrugada del 26 de abril la unidad tres de la central, un reactor RBMK (BWR) elevó sin control su temperatura sin que se permitiera un desahogo del vapor hacia la turbina, el sistema de enfriamiento de emergencia estaba fuera de servicio y la acumulación de presión de vapor provocó que el contenedor del reactor explotara, destruyendo una tercera parte del edificio del reactor. La contaminación ambiental fue, en este caso, un hecho innegable. El núcleo del reactor estuvo expuesto varios días expidiendo vapores venenosos que, según reportes extranjeros, llegaron tan lejos como Suecia. En este accidente sí hubo pérdidas humanas aunque son difíciles de cuantizar. Al año del accidente las autoridades Soviéticas reportaban 31 muertes directamente relacionadas con el incidente, años más tarde reportes de organizaciones ecologistas internacionales reportaban 20 000 muertos por causa del accidente<sup>60</sup>. La cifra real será difícil de obtener confiablemente, sobre todo si se considera que no se ha entendido cómo afecta la radiación contenida en la atmósfera provocada por un accidente de este tipo y tampoco los efectos a largo plazo de una radiación moderada a grandes distancias, pero manejar una cifra intermedia entre ambos datos será lo más conveniente siempre.

Estados Unidos contaba en 1978 con 200 reactores nucleares totales, considerando aquellos en operación, en construcción y los que contaban con planes autorizados; para 1988 este número disminuyó a 125.

---

<sup>60</sup> CULP, Archie W. *Principles of energy conversion*, EE.UU., McGraw Hill, 1991, p. 249.

Para 1988 el mundo contaba con 560 reactores nucleares, en operación, bajo construcción o en planes<sup>81</sup>, para 1996 el mundo contaba con 437 reactores<sup>82</sup>, esto es una disminución del 22 % en menos de 10 años.

El mismo año del accidente se tenía programada la puesta en marcha de la unidad uno de Laguna Verde, sin embargo las protestas ambientalistas la retrasaron. Pero esta no era una respuesta total, en este año poco más del 60% de la capacidad eléctrica de Francia era producida por estaciones nucleares y el desastre ruso parece que no tuvo gran impacto en su programa de desarrollo.

En 1986 los franceses ponen en marcha su reactor Superphénix y encontró viejos argumentos discriminatorios y nuevos retractoros, que opinaban "Su identificación con el plutonio lo hace sospechoso y difumina el ya sutil margen entre átomo civil y átomo militar. [...] estas máquinas deberían ser descartadas"<sup>83</sup>.

Ante los sucesos nucleares los Italianos, en 1987, votaron por detener la expansión del programa nuclear de ese país y en 1990 el parlamento italiano aprobó la desmantelación de todas las plantas nucleares del país, tres con un total de 1 263 MW, que en 1986 representaban el 4.6 % del total de generación. A la fecha este programa si se esta cumpliendo pero no en su totalidad.

Ese mismo año los Rusos detienen el programa de reactores RBMK como el de Chernobyl. El mundo contaba con 15 % de generación nuclear de la capacidad total instalada. El avance de estas tecnologías se detuvo casi por completo. El accidente fue un duro golpe político al entonces primer ministro Mijail Gorbachov, que tiene a este incidente como el primer incidente negativo ante la opinión rusa y mundial.

---

<sup>81</sup> *Op. cit.*, p. 250

<sup>82</sup> VÉLEZ Ocón, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997. p.99. (Documentos de análisis y prospectiva del Programa Universitario de Energía)

<sup>83</sup> RUBBIA, Carlo/Nino CRISCENTI, *El dilema nuclear*, México, Grjallo, 1991. (Los Noventa, 54) p.95.

1988 fue un año electoral en México, y eso desvió la atención del público lo suficiente como para que el presidente Miguel de la Madrid autorizara en noviembre la carga de combustible de la unidad uno de Laguna Verde. Para esta fecha estaba atrasada 13 años en cuanto a su puesta en marcha al inicio del proyecto, y también, en cuanto a las expectativas de aquellos que impulsaban esta tecnología en México. Para 1989 se sustituyeron piezas del reactor uno con las del reactor dos, debido a que el tiempo de espera las había dañado. No fue sino hasta abril de 1989 que la unidad uno de Laguna Verde se conectó a la red Nacional, trece años después de iniciada su construcción y dieciocho después de iniciado el proyecto.

Al inicio de la década de los noventa no parecía que la generación nuclear llegaba a un estancamiento. La política mundial comenzaba a considerar la protección al medio ambiente de manera regular y prioritaria, y a cuatro años del accidente en Chernobyl los estrategas buscaban nuevas alternativas. Aunado al hecho que la crisis petrolera de finales de los setenta se había “solucionado” con el descubrimiento de nuevos yacimientos a mediados de los ochenta. En 1992 se celebra la “Convención del Medio Ambiente” en Río de Janeiro, Brasil. Esto marcó el futuro desarrollo industrial y político del mundo, bajo el cual todos los países firmantes (entre ellos México) se comprometen a unas restricciones ambientales sin precedentes, eliminación de los fluorocarbonatos, disminución de los gases producto de la combustión, en especial CO<sub>2</sub>, creación de zonas de protección al medio ambiente, etc.

El final de la guerra fría provocó en la población civil una menor preocupación por el peligro bélico nuclear (no necesariamente pasado) o con los arsenales de misiles que envejecen y una cada vez mayor con el uso pacífico de generar energía para su propia comodidad.

Para 1990 había 420 reactores nucleares en 27 países . El 50 % de esos reactores era PWR y un 25 % BWR, la proporción se sigue manteniendo a la fecha casi sin modificación. Los nueve países que más dependían de este tipo de generación eran:

País	% de energía nuclear de su total
Francia	70
Bélgica	65
Hungría	49
Suecia	47
Corea del Sur	47
Taiwan	41
Suiza	37
España	36
Finlandia	36

Tabla 6.2.- Países con mayor dependencia nuclear en el sector eléctrico para 1990.

En 1992 México firma tratados bilaterales con Austria y por separado con Canadá, para la cooperación mutua en materias relacionadas con tecnología nuclear. Esta es un paso inusual de México en materia de política nuclear dado que en el pasado se había optado por tratados multilaterales como los que se tienen con la OIEN y con los países firmantes del tratado de Tlatelolco. Las causas y consecuencias de estas acciones no me parecen del todo claras y habrá que investigar más a fondo estos acuerdos y sus repercusiones.

En 1994 se conectó a la red la unidad dos de la central de Laguna Verde, a la cual precedía un récord de servicio excelente de la unidad uno. Este mismo año, en octubre, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) preparaba el "Estudio de

factibilidad de nuevas centrales nucleoelectricas", en el cual se recomendaban la inclusion a la red de una "central de disenio avanzado" con capacidad entre 1300 y 1350 MWe en el programa de obras del sector 1994-2000. Los problemas economicos que se presentaron en diciembre de 1994 provocaron que este proyecto se desechara.

Paradójicamente también en 1994 México ingresa a la organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y con ella a la Agencia de Energía Nuclear, con lo que se adoptan las recomendaciones de esta agencia que son más severas que las de la OIEA. No es claro en este momento si esto es un avance o un retroceso en el programa nuclear mexicano, debido a que no existe tal.

En 1995 se extendió indefinidamente el Tratado de Tlatelolco para la proscripción de armas nucleares supervisado por el OIEA. México se niega a inspecciones directas de países individuales pero cumple con aquellas que le imponen los organismos internacionales en este sentido.

En febrero de 1997, en Suecia, las decisiones de 1978 para dismantelar su programa nuclear encontraron dudas y descontentos que causaron que los reactores 1 y 2 de la central de Barsebäck, pospusiera su cierre a 1998 y tras muchas negociaciones hoy por hoy se espera que se apaguen en el 2001. Algunos políticos suecos calificaban la decisión de los setenta de cerrar todas la plantas en el 2010 de "económica y ecológicamente demente". El consumo eléctrico de los suecos per capita es de 16 500 kW, uno de los más altos en el mundo y la generación nuclear sigue estando cercana al 50 % de su total, el otro porcentaje viene de generación hidroeléctrica y un muy bajo porcentaje con hidrocarburos. El plan de dismantelación sueco sostenía el mayor uso de sus recursos hidroeléctricos, de la energía eólica y de la biomasa. El problema es que en los setenta y ochenta los suecos también promulgaron una legislación agresiva para la protección de sus

ecosistemas, lo cual ha establecido que los ríos y lagos no utilizados son virtualmente inútiles, lo que pone al tope la generación hidroeléctrica en ese país, y la opción de la biomasa está restringida también por las resoluciones tomadas por las Naciones Unidas en "Río de Janeiro 1992" que reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, al respecto William Nordhaus comentaba "si Suecia cancela su programa nuclear le será virtualmente imposible mantener sus compromisos concernientes al cambio climático"<sup>84</sup>. Además se ha calculado que el costo de dismantelar el programa nuclear le costará a los suecos quince mil millones de dólares a precios de 1995, y si deciden no ocupar la opción de biomasa para tal efecto el costo fácilmente se duplicará. El mundo entero debe observar las decisiones de los suecos en este sentido, ya que podrían dar un giro a todo el esquema de generación y planeación energética.

En 1998 Francia dependía en un 75 % de plantas nucleares, sólo con reactores PWR genera cerca de 71 800 MW. Alemania tenía el 30% de su demanda cubierta por plantas nucleares<sup>85</sup>.

Aunque las proyecciones de la Convención de Río de Janeiro no se cumplen, se dio nuevos bríos al ambientalismo con la Convención de Kyoto Japón, en 1998. Todos los países apoyan los dogmas de la protección pero los especialistas aclaran que los problemas de cumplir con las demandas ambientales y sociales de energía, no son fácilmente compatibles. En este sentido la energía nuclear se presenta como solución y como problema, unos dicen "La energía nuclear representa la certeza de un energía probada, prácticamente ilimitada, que bien manejada no representa

---

<sup>84</sup> NORDHAUS, William, *The Swedish Nuclear Dilemma. Energy and the Environment*, EE.UU., 1997.

<sup>85</sup> O'LEARY, Jay, "A new reactor for the new europe", en *Mechanical engineering, power*, vol. 119, núm. 11 (EE.UU., noviembre, 1997), p. 11

riesgos para los seres humanos o el medio ambiente<sup>86</sup> y otros dicen " [...] la energía nuclear, que ilustra mejor que cualquier otro la problemática al uso de las grandes opciones tecnológicas, considero que los riesgos son superiores a las ventajas; el desastre ocasionado por un accidente importante no está compensado por las ventajas que ofrece la energía de fisión"<sup>87</sup>.

El legado de los accidentes nucleares en las centrales mencionadas aunadas a la continuación de pruebas nucleares por diversos países hace que la opinión pública descalifique este medio de generación, sin embargo con el pasar de los años esa opinión se modera y los defensores del método comienzan a hablar nuevamente, incluso los especialistas que aclaran que el futuro inmediato no demanda la operación de plantas nucleoelectricas como solución, si demandan la sustitución de las plantas que se encuentran ahora en operación<sup>88</sup> sólo esto debe forzar a los gobiernos a tratar el tema nuclear con una nueva visión. El problema de este tipo de generación en cuestiones políticas ha sido su propensión a ser atractiva para terrorismo o bien, que los países con propósitos bélicos utilicen los residuos para fabricar bombas y la de provocar accidentes. Esta visión debe cambiar, por necesidad de manejar adecuadamente los residuos que se generaran por el desmantelamiento de las centrales existentes y por el análisis estricto que contemple aspectos tecnológicos, económicos, sociales y ambientales.

---

<sup>86</sup> VÉLEZ Ocón, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997. p. 102.

<sup>87</sup> RUBBIA, Carlo/Nino CRISCENTI, *El dilema nuclear*, México, Grjalbo, 1991. (Los Noventa, 54) p.26.

<sup>88</sup> VALENTI, Michael, "A next-generation reactor", en *Mechanical engineering, power*, vol. 120, núm. 8 (EE.UU., Agosto, 1998), p. 71

## La Fusión como el esquema de generación del futuro

### 6.1.- Teoría asociada y estado actual de la tecnología de fusión.

Etimológicamente fusión significa unión de dos o más cosas para formar una; en el contexto del proceso físico que actualmente se conoce con este nombre, se puede definir fusión nuclear como el proceso de unir dos núcleos atómicos para formar un nuevo núcleo. El atractivo de la utilización de la fusión para generar energía yace en el hecho que al unirse dos núcleos se desprenden grandes cantidades de energía. Este desprendimiento de energía se explica sencillamente con un balance de masas atómicas y con la ecuación  $E = m c^2$ . La fusión es la forma de generar energía más común del Universo, ya que todas las estrellas subsisten en el firmamento gracias a la fusión.

Un ejemplo de fusión se tiene si se toman dos átomos de deuterio<sup>69</sup>, que tienen en el núcleo un protón y un neutrón, y se unen para formar uno de Helio. Considerando un átomo de Helio tiene dos protones y dos neutrones, se puede asumir que la masa del núcleo de Helio tenga un valor igual al de sumar las masas de estos cuatro elementos; pero esto no es así, en realidad la masa del núcleo de Helio es menor a la de la suma de sus nucleones. Se está perdiendo masa al unir dos átomos de deuterio en uno de Helio. La equivalencia entre la masa perdida y la energía desprendida se tiene gracias a la ecuación expresada anteriormente. La razón es que parte de la masa perdida se utiliza como energía necesaria para unir a los dos núcleos y formar uno más grande, y la otra parte se libera como energía aprovechable. El interés principal de este método es que aún con masas muy

---

<sup>69</sup> Deuterio - Isótopo del Hidrógeno con un neutrón extra en el núcleo.



pequeñas se consigue una gran cantidad de energía, debido a la magnitud de la velocidad de la luz.

La energía que de que se esta hablando es del orden de decenas de MeV, por átomo fusionado; que si se piensa en  $1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ , tal vez no resulta muy atractivo, pero en términos energéticos comunes la fusión de un mol de deuterio podría proporcionarnos  $1 \times 10^{11} \text{ J}$  si la comparamos con la energía desprendida de una reacción química común, como la combustión de un mol de carbón es del orden de  $1 \times 10^3 \text{ J}$ , la cifra resulta muy prometedora. Para la fisión de un mol de Uranio 235 se podría hablar de la liberación de  $2 \times 10^{13} \text{ J}$ . Para terminar esta comparación cabe mencionar que la cantidad de masa de cada mol es 2 g para el deuterio, 12 g para el carbón y 235 g para el uranio. Si la comparación se hace para 1 kg de cada sustancia se tiene que se libera aproximadamente  $8.5 \times 10^{13} \text{ J}$  con la fisión del uranio,  $5 \times 10^{13} \text{ J}$  con la fusión de deuterio, y  $8.3 \times 10^4 \text{ J}$  con la combustión de carbono amorfo.

Otra forma de explicar el desprendimiento de energía que se consigue con la fusión es por medio de la energía de enlace de los núcleos que se quiere unir. La energía de enlace es la energía que mantiene a los protones y neutrones unidos en el núcleo. Como se explicó en el capítulo anterior, esta energía va en aumento mientras el número atómico crece, debido a que el número de nucleones se incrementa, para los números atómicos menores al del hierro (56). Así pues, la energía de enlace del Helio es mayor a la del Hidrógeno; sin embargo, la suma de las energías de enlace de dos Hidrógenos no es igual a la energía de enlace de un Helio, de hecho es mayor, así que el excedente de energía que se desprende de la fusión de dos átomos de Hidrogeno es precisamente la energía que se quiere recuperar en un reactor de fusión. Este es un simple balance de energía y ahora cabe explicar en que tipo de energía se transforma este excedente. Principalmente se transforma en energía

cinética de las moléculas y también algunas veces se conserva como energía interna atómica que puede ser usada para desprender un nucleón.

Una pregunta básica es cómo lograr que los núcleos de átomos diferentes se unan. La principal desventaja de este método de generación de energía es que las partículas involucradas están cargadas positivamente, por lo que la principal fuerza a vencer es la fuerza eléctrica repulsiva de Coulomb entre protones; sin embargo, a distancias cortas, como las del radio atómico, la fuerza dominante es la fuerza de unión nuclear, que da lugar a la energía de enlace. La forma en la que cada una de estas fuerzas se hace presente es variable, y por lo tanto, al conjuntar ambas se generan singularidades de comportamiento que vale la pena explicar.

La fuerza repulsiva y la atractiva pueden entenderse como energías de acción contraria que se suman o se restan según la distancia. Para la energía de repulsión se puede simplificar diciendo que dicha energía decrece al aumentar la distancia. La dependencia con la distancia de la energía de enlace no es sencilla, se puede sintetizar diciendo que es de signo contrario a la de Coulomb y que se debe considerar sólo en las cercanías del núcleo donde se vuelve prevaeciente. Estos dos efectos unidos generan lo que se conoce como una barrera o pozo de potencial. Cuando un protón se acerca a otro protón la repulsión de Coulomb se manifiesta primero y trata de separar ambas partículas. Si gracias a algún medio externo los protones se siguen acercando, la fuerza de Coulomb aumenta cada vez más, cuando ambas partículas están muy próximas esta fuerza genera una barrera infranqueable que impide que ambas se unan, si sólo existiese esta contribución la fuerza repulsiva tendería a infinito cuando las partículas estuvieran apunto de hacer contacto. Pero como existe la fuerza de unión molecular esto no ocurre así. Si se logra acercar lo suficiente a dos protones, la fuerza de unión comienza a actuar sobre ellos y como es contraria a la de Coulomb la modera y a cierta distancia la anula . Si la distancia

disminuye todavía más la fuerza de unión atrae violentamente a ambas partículas logrando así la fusión. Gráficamente podemos entender este fenómeno con la siguiente representación gráfica.

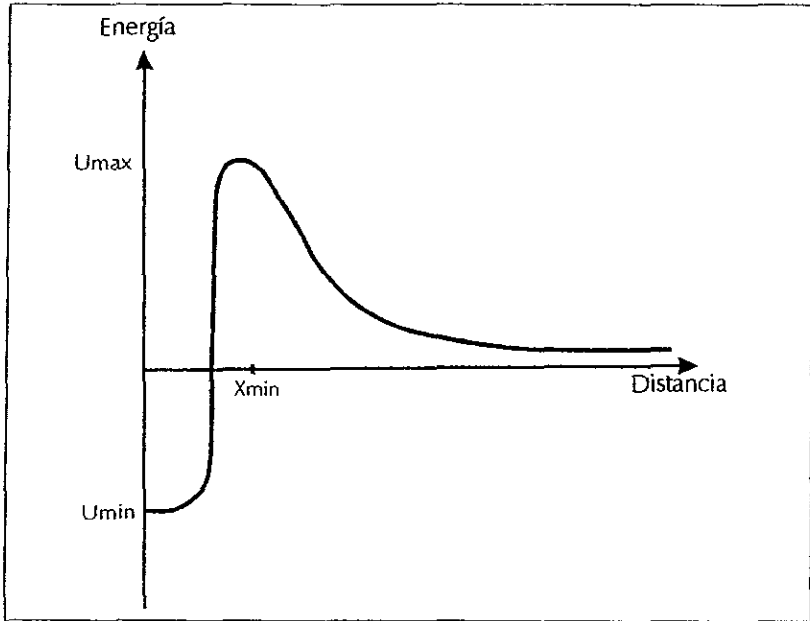


Figura 6.1.- Representación gráfica de la barrera de Coulomb.

Donde  $U_{max}$  es la energía necesaria para vencer la barrera de Coulomb y  $X_{min}$  es la distancia mínima a la que debemos acercar las moléculas para lograr la fusión.

Como es de esperarse no es trivial conseguir la unión de dos nucleones, debido a que se debe vencer esta barrera ( $U_{max}$ ) de potencial para lograr la fusión. Es lógico suponer que para superar la barrera de potencial un nucleón debe tener energía equivalente o superior al valor máximo de la barrera. El tipo energía que se aprovecha para tal fin es la energía cinética. Si un nucleón tiene una velocidad tal que le permita contener una energía cinética mayor que la barrera de potencial

logrará acercarse lo suficiente a otro nucleón para lograr su fusión. La energía cinética de una partícula atómica se incrementa al incrementar la temperatura y entonces podemos hablar en términos de una *fusión termonuclear*.

Pero también hay que aclarar que esta no es la única forma de lograr la fusión. Gracias a que las partículas atómicas no se comportan de acuerdo a las leyes de la física Newtoniana, existe un efecto singular a nivel atómico conocido como *penetración de barrera, efecto túnel o tunelización*. La mecánica cuántica, que es la que rige el comportamiento de las partículas subatómicas, tiene una dependencia fuerte con la probabilidad, y gracias a esto se puede decir que, aunque baja, existe la probabilidad de que dentro de un conjunto de partículas, una, penetre la barrera de potencial aún sin tener el nivel ( $U_{\max}$ ) de energía necesario para vencerla.

Esto amplía la posibilidad de fusión, ya que asegura que existe un conjunto de condiciones que permiten aprovechar energía desprendida de la fusión sin que se tenga que invertir una cantidad mayor de energía para lograrla.

Una de las condiciones que se deben cumplir es un nivel energético tal, para que el efecto túnel se presente en grandes cantidades. Para ello se estudia, en los aceleradores de partículas, un parámetro conocido como *sección eficaz* o *sección recta de colisión*. Este parámetro mide básicamente la probabilidad que existe de que al encontrarse dos partículas coexistiendo se produzca una fusión entre ellas. Esquemáticamente representa el área transversal de un cilindro centrado en una de las partículas, si la otra partícula se encuentra dentro de este cilindro o se mueve a lo largo de él se tendrá como resultado la fusión. La sección eficaz tiene relación con la velocidad de las partículas.

Las investigaciones experimentales con aceleradores de partículas señalan que la mayor sección eficaz la consiguen el Deuterio y el Tritio, isótopos del Hidrógeno con uno y dos neutrones respectivamente. La sección eficaz máxima de estos

nucleones se consigue en el margen de los 55 a los 120 keV, valor que tal vez no tenga nada de especial por sí sólo, pero si se considera que la altura de la barrera de Coulomb, para el caso de dichas partículas, es del orden de los 280 keV, se percibe inmediatamente las ventajas de la tunelización.

Cuando se habla de un conjunto de partículas interactuando, otro parámetro que nos indica que este método es efectivo es la probabilidad de una reacción por unidad de tiempo, la cual se consigue multiplicando la sección eficaz por la velocidad de las partículas dentro de un gas. Esta última variable se determina a partir de una *función de distribución de Maxwell* o *Maxwelliana*. El pico de la función de probabilidad para el caso de la reacción Deuterio- Tritio se alcanza en los 60 keV, pero aún es alta a los 20 keV, lo cual indica que es preferente utilizar grandes concentraciones de gas para alcanzar la fusión, ya que así es más probable que se consiga.

En teoría cualquiera dos átomos interactuando tendrán una probabilidad de fusionarse, sin embargo aquellas con mayor probabilidad de fusión y que además nos proporcionen la mayor cantidad de energía serán los candidatos para la generación de energía. Quizás la pareja más prometedora en este sentido es la ya mencionada formada por el deuterio y el tritio. La reacción cuántica que se produce entre estos dos isótopos se representa de la siguiente manera:



Los superíndices izquierdos muestran el número de nucleones con las que cuenta cada núcleo y la cifra entre paréntesis es la energía adicional que adquiere cada núcleo después de la fusión.

Existen muchas reacciones cuánticas estudiadas con secciones eficaces atractivas para la fusión como son: la fusión de dos deuterios, el deuterio y el helio tres, dos tritios, un núcleo de litio y un neutrón, y una reacción entre un protón y un

núcleo de boro. Las especificaciones de estas reacciones exceden el propósito de este trabajo, por lo que se aclarará que algunas tienen un desprendimiento de energía ligeramente superior a la D-T mencionada anteriormente y otras una mucha menor. Su interés recae en que, o bien son reacciones necesarias para la estabilización de la reacción cuántica de D-T, o bien representan atractivas ventajas para reactores de fusión de segunda o tercera generación. Con esto último me refiero a reactores que como primeros intentos representan una mayor dificultad que un reactor con combustible D-T, pero sin embargo, cuando estos últimos operen se puede estudiar y solventar los problemas que los otros acarrearían. En términos específicos aquellas reacciones que no producen neutrones como producto se les llama *combustibles avanzados* y serán los combustibles a utilizar por la segunda generación de reactores de fusión.

Algunos valores importantes para estas reacciones<sup>90</sup> son:

REACCIÓN	Ignición	
	Energía, keV	Temperatura, K
${}^2\text{D} + {}^3\text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{n} + 17.6 \text{ MeV}$	10	$1.2 \times 10^8$
${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^1\text{n} + 3.25 \text{ MeV}$	50	$5.8 \times 10^8$
${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^3\text{T} + {}^1\text{H} + 4.03 \text{ MeV}$	50	$5.8 \times 10^8$
${}^3\text{He} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + 18.4 \text{ MeV}$	100	$1.2 \times 10^9$
${}^6\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He} + 4.02 \text{ MeV}$	100	$2.3 \times 10^9$
${}^{11}\text{B} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} \rightarrow 3[{}^4\text{He}] + 8.68 \text{ MeV}$	200	$4.6 \times 10^9$

Tabla 6.1. Parámetros de ignición y reacciones más prometedoras para la fusión nuclear.

<sup>90</sup> CULP, Archie W. *Principles of energy conversion*, EE.UU., McGraw Hill, 1991, p. 90.

La ignición se considera cuando la reacción de fusión comienza y se sostiene. Se puede apreciar que la reacción más atractiva es la de deuterio-tritio por su baja energía y temperaturas de ignición y su alta producción de energía.

Otro problema de la generación de energía por fusión es que para lograr obtener más energía de la que se invierte se deben tener una gran cantidad de átomos fusionando al mismo tiempo, para lo que se requiere encerrar gran cantidad de núcleos del gas energético por un tiempo prolongado. Se incrementan dos variables al problema, la densidad de partículas contenidas y el tiempo medio de fusión para lograr una producción de energía eficiente. El producto de las dos variables se relaciona con un término útil para el rendimiento de los reactores de fusión, una función que depende de la temperatura del gas,  $T$ , y de la eficiencia entre la conversión de energía de fusión a energía útil,  $\epsilon$ , esta relación es:

$$n \cdot t_e > f(T, \epsilon)$$

Para una reacción D-T el valor mínimo de la función citada ocurre, para una eficiencia de  $\epsilon = 0.4$ , a  $T = 3 \times 10^8$  K.

Estos trae consigo una serie de problemas de confinamiento que la tecnología deberá solventar.

La relativa dificultad con la que se consigue el inicio de la reacción de fusión es su principal desventaja sobre los otros medios de generación, además que no sólo es difícil su ignición, sino también la mantención de dicha reacción.

La investigación de los parámetros involucrados en la fusión es extensa, y se centra en los aceleradores de partículas y en pequeños Tokamak. Sin embargo, la generación de energía por medio de núcleos acelerados no es adecuada por razones prácticas. Los cálculos teóricos que se pueden formular para un acelerador eficiente nos proporcionan dimensiones de 3 000 km o 20 000 km, que son en realidad irrealizables en la actualidad, aunque tal vez dentro del contexto de la conquista del

espacio, y la colonización planetaria puedan dejar la teoría y formar parte de algún proyecto ambicioso.

En la actualidad el enfoque no es acelerar un haz de partículas y provocar su fusión, a través de una colisión, sino contener un gas con gran número de partículas en un espacio definido y bajo condiciones tales que provoquen que algunas partículas superen la barrera de potencial generando así una reacción de fusión que pueda ser contenida y controlada durante el suficiente tiempo para obtener el excedente energético deseado. Existe una clasificación de acuerdo al tipo de confinamiento del gas que se utiliza para tal fin. Se dice pues el enfoque *frío* y el *caliente*. Cabe mencionar que la diferencia es debida a la gran diferencia de temperaturas de operación que existe entre ambos métodos; el enfoque frío utiliza gases a temperatura ambiente mientras que el enfoque caliente alcanza temperaturas de millones de grados, lo cual conlleva a manejar gases en estado de ionización o *plasmas*. El estudio de un plasma puede emprenderse desde varios puntos de vista, si bien se puede considerar como un conjunto de partículas cargadas y por consiguiente estudiar el comportamiento individual de cada partícula, también se considera que el plasma es en realidad un fluido en el cual lo que nos interesa es el comportamiento macroscópico de las partículas.

Entre ambos enfoques de fusión existe una diferencia de avance de investigación considerable, siendo el enfoque caliente el más avanzado ya que parece ser que es el que tiene más posibilidades de implementarse con la tecnología existente, ya que ha sido el más estudiado en las últimas tres décadas, en particular en el desarrollo de los Tokamaks.

El enfoque frío se centra en dos de muchas reacciones. Una se denomina fusión de Muones. Un muon es una partícula elemental, también conocida como mesones  $\mu$  ( $\mu$ ) negativos, con una masa 200 veces mayor a la del electrón. Usando una



molécula de Deuterio-Tritio con un muon sustituyendo a un electrón, la masa tan grande del muon actúa como catalizador de fusión, ya que provoca que los núcleos atómicos se aproximen tanto unos a otros que a veces se produce la fusión. El problema es que la vida media de un muon es muy corta, alrededor de dos millonésimas de segundo, lo cual dificulta que se catalicen las suficientes reacciones obteniendo más energía de la fusión de la que se emplea para generar los muones. Otro inconveniente es que la energía desprendida por fusión en frío es básicamente energía electromagnética, y a menos que se genere en grandes cantidades de rayos, es difícil de absorber, además de que probablemente presentaría peligros de radiación hacia los seres vivos. La segunda es la fusión en electrodos de palladium. Este último enfoque causó revuelo en 1989 cuando investigadores de la Universidad de Utah anunciaron que se había logrado la fusión con un electrodo de palladium y agua pesada, cuando el elemento del electrodo absorbió hidrógeno para formar metal hidruro, que contenía moléculas de deuterio en los latices de una gran macromolécula asociada al electrodo. Se suponía que al hacer pasar una corriente eléctrica por el electrodo los deuterios se veían obligados a fusionarse entre sí y dejaban escapar hasta 24 meV en forma electromagnética. En papel parece que todo funciona bien pero desde entonces no se ha podido duplicar el experimento.

El enfoque caliente involucra varios aspectos teóricos y tecnológicos que deberán resolverse antes de aspirar a construir una planta rentable, tanto económica como energéticamente. La cuestión económica deberá ser parte de un estudio posterior, cuando se tenga una idea mucho más sólida de la tecnología necesaria para implementar esta fuente energética.

En el aspecto energético, todavía las controversias están en el terreno de la teoría, y principalmente se circunscriben al balance de energía proporcionada contra energía recibida. Aunque la potencia generada por la fusión de un plasma es

proporcional a la energía liberada en la reacción de fusión y al número promedio de reacciones en la unidad de tiempo (lo cual involucra tanto a la densidad de partículas como a la probabilidad de reacción) debe considerarse otro parámetro, el tiempo de confinamiento del plasma, el cual está regulado por la temperatura del plasma. Uniendo dos parámetros importantes, la densidad de partículas y el tiempo de confinamiento, se obtiene una nueva clasificación del enfoque caliente. El confinamiento inercial y el confinamiento magnético. El primero requiere de tiempos cortos de confinamiento (picosegundos) pero una densidad de partículas elevada, del orden de  $10^{31}$  partículas/m<sup>3</sup> (la densidad promedio del aire es  $10^{25}$  part./m<sup>3</sup>), con lo cual la masa propia del plasma mantiene unido al plasma. El segundo requiere de tiempos largos (1 segundo) y densidades pequeñas ( $10^{21}$  part./cm<sup>3</sup>), lo cual provoca que el plasma no sea autocontenido y por lo tanto, se necesite de un campo magnético externo para que, al interactuar con las partículas cargadas del plasma, mantenga al plasma en un volumen predeterminado. La magnitud del campo magnético que se necesita es de 2 a 5 Teslas lo cual dificulta ampliamente este tipo de confinamiento.

Para este segundo enfoque, la teoría dictaba construir grandes cilindros por los cuales se generaría un campo magnético con líneas de campo rectas y perpendicular a las bases del cilindro y gracias al cual las partículas del plasma se moverían formando hélices alrededor de una línea de campo magnético. El radio de giro varía con la intensidad del campo, pero se puede decir que es del orden de un décimo de milímetro, para un electrón y hasta un centímetro para un ion de hidrógeno, si se tiene un campo de 1 Tesla. La longitud de un cilindro recto que contenga a una partícula de plasma por un segundo debe de tener alrededor de 1 000 km de longitud, además de que el problema con este arreglo es que las partículas del plasma viajan hacia los extremos del cilindro siguiendo la hélice y al llegar a estos se

perderían. Para evitar esto se penso en colocar espejos magnéticos que reflejarían las partículas en una hélice idéntica a la cual viajaban, pero en sentido contrario, de este modo se confinaría totalmente a las partículas del plasma.

Sin embargo el arreglo de espejos magnéticos no son una solución satisfactoria debido a que afectan la estabilidad del plasma debido a dos problemas, uno es que obliga a la interacción de partículas que viajan en direcciones contrarias, lo cual genera colisiones entre ellas, suceso que no se plantea la teoría del campo magnético recto, si además consideramos que un plasma es casi por definición un medio turbulento los espejos magnéticos resultan inaceptables, hay que encontrar la manera de cerrar el cilindro de otra manera, además el arreglo de espejos provoca que la fuerza centrífuga de las partículas del plasma empujen las líneas magnéticas hacia afuera en el centro del cilindro, y eso provoca eventualmente que se pierda contención en el centro. Para solucionar esto hay que encontrar la forma de forzar las líneas magnéticas hacia una curva que contrarreste el efecto de la fuerza centrífuga.

Se ha probado con varias configuraciones de confinamiento, generando campos magnéticos con formas diversas, como la configuración de *pelota de béisbol*, o la configuración *ying-yang*. Empero la solución que mejor resuelve el problema de la pérdida de partículas en los extremos del cilindro es eliminar dichos extremos, cerrando el cilindro sobre sí mismo y creando un *Toroide*. En esta configuración las líneas de campo se convierten en circunferencias, la dirección del mismo circunda el centro de toroide y se denomina así toroidal. Ya no se tiene fuga en los extremos del cilindro pero se tiene fuga si una partícula se mueve de manera perpendicular a las líneas de campo. Dicho movimiento se denomina deriva, movimiento teóricamente imposible si sólo se toma en cuenta la *fuerza de Lorentz* que se dirige al centro del toroide en todo momento y obliga a una partícula cargada a completar una circunferencia en presencia de un campo toroidal, sin embargo, de existir una fuerza

extra en el plano del campo se considera que sobre la partícula cargada actúan dos efectos un efecto que la obligará a cerrar la circunferencia y otra que pretende alejar la partícula de su trayectoria de modo que no se completara un circuito cerrado y eventualmente dicha partícula tenderá a escapar del confinamiento. Dichas fuerzas pueden ser la fuerza centrífuga, los efectos de un campo magnético no homogéneo y la fuerza eléctrica provocada por la creación de un campo eléctrico que se genera al separarse los electrones de los iones y moverse en direcciones opuestas, cada uno tratando de escapar al confinamiento.

Para evitar estos efectos se busca curvar las líneas de campo en la dirección toroidal de manera que se formen hélices en vez de circunferencias, que rodearán el centro del toroide y se cerrarán donde empezaron. Esto se consigue agregando un campo magnético denominado *poloidal* al toroidal ya existente. Se define un parámetro  $q = B_T / B_p$  que relaciona la magnitud del campo toroidal con la del campo poloidal y esto da una idea de que tan grandes son curvaturas de las hélices en relación con el radio del toroide. Si, por ejemplo,  $q$  es grande las líneas de enroscan muy poco a lo largo del trayecto.

Para generar el campo poloidal se requiere de una corriente eléctrica que puede ser externa o interna al plasma. Se pueden precisar más estos conceptos y decir que para los primeros se ha desarrollado una configuración posible llamada *Stellarator* en la que a la cámara toroidal que contiene al plasma se le rodea con conductores helicoidales por los cuales pasa una elevada corriente. En el caso de corrientes internas se puede subdividir el problema en corrientes auto-contenidas por el plasma y corrientes que circulen por agentes externos a él. La segunda opción, cuyo ejemplo es la configuración multipolos, es perjudicial por los efectos de contaminación del plasma que se mencionaron con anterioridad. La opción de corriente autocontenida por el plasma tiene su mayor exponente en la configuración

conocida como Tokamak. Esta configuración genera un campo toroidal con bobinas externas al plasma de la misma longitud para reducir el escape del plasma y un campo poloidal generado por una corriente toroidal en el interior del plasma.

Para darnos una idea del tamaño que estos equipos pueden tener se hará el siguiente análisis. Si se necesita una planta de 500 MW, con una eficiencia del ciclo térmico del orden del 30 %, se necesita generar 1666.66 MW de energía térmica en el reactor, si se considera actualmente que la potencia de operación de un reactor de fusión con confinamiento magnético es del orden de  $100 \text{ MW/m}^3$ , se necesita un volumen de  $16.66 \text{ m}^3$ , los cuales se consiguen con un cilindro de 1 m de radio y 5.3 m de longitud, que si se considera que dicho cilindro se deformará en un toroide, dicho toroide no debe tener más de metro y medio de radio exterior. Los diseños actuales se encaminan a conseguir volúmenes mucho mayores que produzcan una planta de 1 GW o 1.5 GW.

El principal problema con estos dispositivos es el del confinamiento del plasma. Un campo magnético debe crear una fuerza tal que contrarreste la generada por la presión interna del plasma. La investigación actual presenta varias configuraciones magnéticas, las cuales se presentan la unión de varios campos magnéticos, tanto en orientación como magnitud, para contrarrestar no solo la fuerza de escape sino las inestabilidades que se pueden presentar dentro del movimiento de las partículas plasmáticas.

Cabe aclarar que el campo magnético que sirve para confinar al plasma también puede servir para calentar el plasma, bajo un efecto de autocompresión. Las configuraciones que se basan en este principio de compresión en la dirección de la columna de plasma se denominan compresores z o compresores lineales. Esta configuración requiere de grandes corrientes para generar el campo magnético y esto acarrea una serie de inestabilidades en el plasma. Los compresores lineales no son la

configuración aceptable hoy en día, pero gracias a su estudio se ha llegado a otras configuraciones más adecuadas.

El primer paso definitorio se dará cuando se demuestre que es factible lograr la *condición de emparejamiento*, esto es que la energía producida sea igual a la energía entregada para la generación y contención del plasma. A este factor se le asocia la letra Q, y se le otorga un valor igual a la unidad al alcanzarse dicha condición. Posteriormente se buscaría la forma de sobrepasar dicha condición y conseguir  $Q > 1$ , para el cual el plasma entraría en el estado de ignición sostenida.

Los problemas que se enfrentan en este sentido es que todos los reactores experimentales que se tienen en el mundo están intentando alcanzar el emparejamiento y sólo el reactor de fusión conocido como JET (Joint European Torus) de la comunidad europea, en Inglaterra, ha estado cerca de conseguirlo.

Un reactor comercial será aquel que supere el emparejamiento. Además, dado que el Tokamak es la opción más aceptada actualmente<sup>91</sup>, se deben solucionar algunos problemas inherentes a su funcionamiento. Un Tokamak, opera con pulsos, dado que la corriente dentro del plasma se genera por inducción; un tiempo de confinamiento grande es del orden de un segundo, para una densidad de  $10^{20}$  partículas/m<sup>3</sup>, por lo cual se debe buscar un método que permita atenuar los pulsos, ya sea con un sistema de almacenamiento de energía, funcionando como un capacitor energético, que absorba los pulsos y entregue una fuente continua de energía, o bien, producir la corriente por métodos no inductivos, que parece ser la opción más aceptada por los teóricos.

---

<sup>91</sup> CULP, Archie, *Principles of energy conversion*, EE.UU., 1991, p.93 y MARTINELL, Julio, *Los prometeos modernos*, México, 1993, p. 52.

Dada esta perspectiva, se piensa que antes de alcanzar el emparejamiento o superarlo, se realicen pruebas con reactores híbridos, que combinarían la fusión y la fisión, para lograr una producción de energía estable. Los neutrones que produciría la fusión se aprovecharían en bombardear elementos no fisionables como el U-238 y el Torio 232, y así obtener elementos como el Plutonio 239 y el U-233 (esto se explica en el capítulo V)

En cuanto al confinamiento inercial, el proceso consiste en crear pequeños paquetes de combustible sólido hechos de agua pesada de tritio en fase sólida o bien, un material con características de un plástico constituido por moléculas de tritio y deuterio. Los paquetes deben ser colocados en el interior de un sistema de contención, después se les aplican varios rayos de alta energía, ya sean pulsos láser o rayos de Iones, el repentino aumento de energía en la superficie de los paquetes produce altas temperaturas y presiones lo cual ocasiona la implosión del paquete que lleva a la sustancia por encima de la ignición y se produce una fusión. Los problemas con este sistema son varios, empezando con la colocación del paquete en el lugar preciso para recibir los rayos, y que una planta con esta tecnología debería de tener varias decenas, de estos sistemas de implosión funcionando simultáneamente, se considera que para producir  $3800 \text{ MW}_{\text{térmicos}}$  se deben crear 180 paquetes por segundo, si es que cada paquete produce 21.1 MJ, el equivalente a la energía liberada en una explosión de 4.5 kg de TNT por paquete, un total de 810 kg de TNT cada segundo.

## 6.2 Impacto ambiental.

En cuanto a la abundancia de estos elementos en la naturaleza, mucho se ha mencionado de la abundancia del hidrógeno, al punto en que para algunos autores es un recurso inagotable.<sup>92</sup> El Deuterio es un isótopo que ocurre de manera natural en una relación de 1/ 6 600 en relación con átomos de Hidrógeno; como primer cálculo se puede considerar que en un centímetro cúbico de agua (como líquido saturado a 20 °C), se tienen 0.0554 mol de agua, lo que conlleva contener  $3.336 \times 10^{22}$  moléculas de agua, y  $6.673 \times 10^{22}$  moléculas de hidrógeno, y probablemente entonces,  $1.02 \times 10^{19}$  átomos de deuterio, con lo anterior se puede especular que con la cantidad de agua del planeta podría proporcionar suficiente deuterio para el suministro energético por varios miles de años. La separación del Deuterio es relativamente sencilla y poco costosa. Por el contrario el tritio es un elemento que se debe crear artificialmente o como producto de otras reacciones de fusión, como:



Que puede generar el tritio necesario a partir del neutrón desprendido de la reacción D-T, el cual golpearía un *cobertor de litio* que rodearía al plasma con la doble función de absorber neutrones y generar tritio. Así los combustibles necesarios para la primera generación de reactores de fusión son el Deuterio, el Litio y una pequeña carga de Tritio. Las reservas de Litio se consideran suficientes para no preocuparse por el abasto<sup>93</sup>. Además de esto, la última reacción de la tabla 6.1 es interesante ya que el boro es un material abundante en la corteza terrestre y el <sup>11</sup>B es un isótopo muy común y que se aísla con mayor facilidad que el tritio, además , el

<sup>92</sup> MARTINELL, J., *Los Prometeos modernos o el esfuerzo para controlar la fusión nuclear*, p. 9.

<sup>93</sup> *Op. cit.*, p. 18.



resultado de dicha reacción, el  ${}^4\text{He}$  no es un elemento radioactivo. A estas reacciones se les llama "super limpias" (super clean reaction); y serán útiles en el futuro.

La radiación que el reactor pueda emitir al exterior no podrán descartarse nunca, dada la energía que algunas partículas pueden adquirir, sin embargo, es posible contenerlas dentro de las estructuras primarias del reactor. En este tipo de tecnología se deben considerar sólo dos elementos radioactivos, el Helio 3 y los neutrones. Las radiaciones son principalmente de neutrones altamente energizados (en promedio unos 14 MeV) que pueden llegar a escapar o bien, si antes golpean la coraza protectora del reactor los neutrones libres "activan" la estructura de contención convirtiéndola en radioactiva al desestabilizar la estructura atómica del material contenedor ya sea sacando átomos de su sitio o absorbiendo estos los neutrones extras. El manejo del Tritio en si representa problemas, dada su alta radioactividad se deben tener precauciones y manejo especial a todos los elementos que hallan estado en contacto con dicho elemento. De hecho, en la actualidad esto representa tal problema que el JET es el único Tokamak que ha usado Tritio en sus experimentos.

Si se consideran catástrofes en estos tipos de reactores se tendrá que redefinir el concepto, ya que la principal desventaja de esta tecnología, la difícil obtención y manutención de la reacción de fusión, la hace su principal ventaja en este aspecto. En el caso de un problema como pérdida de control o refrigeración sería difícil que la reacción se saliera de control, el plasma se "apagaría" por si solo, antes de expulsar material radioactivo, además que el material con el que contaría una planta de este tipo sería tan pequeña que un escape mayor sería virtualmente imposible.

La siguiente tabla muestra el impacto de este tipo de generación sobre el ambiente:

IMPACTO AMBIENTAL EN LA GENERACIÓN FUSIÓN		
Indicadores de impacto	Indicador	Calificación por indicador
	Muy Alto = MA	10
	Alto = A	8
	Medio = M	6
	Bajo = B	4
	Muy Bajo = MB	2
Nulo = N	0	
Medio o tipo de contaminante	Contaminante	Indicador
AIRE	CO <sub>2</sub>	N
	O <sub>3</sub>	N
	NO <sub>x</sub>	N
	SO <sub>x</sub>	N
	HC	N
	Pb	N
	H <sub>2</sub> S	N
	Compuestos cancerígenos	N (se consideran en radiación)
	PAN	N
Otros	N	
Agua	Sólidos disueltos	N
	Sólidos suspendidos	N
	Químicos	N
	Metales	MB
	Aceites y Grasas	B
	Agentes biológicos	N
	Temperatura	B
Otros	N	
Desechos sólidos	Desechos comunes	B
	Desechos peligrosos	N (se consideran en radiación)
Ruido		B
Radiación	Aire	B
	Agua	M
	Suelo	B
Otros	Paisaje	B
	Uso del suelo	M
	Eutroficación acelerada	N
	Hundimientos	N
	Inducción de actividad sísmica	N
Total		42

### 6.3 Ingeniería avanzada necesaria para esta tecnología.

En términos generales en los próximos 25 años será difícil alcanzar un nivel tecnológico capaz de crear reactores de fusión comerciales, sin embargo la alta potencialidad de esquema nos obliga a continuar y aumentar la investigación, para que en estos 25 años se consigan los primeros pasos definitorios que permitirán desarrollar la tecnología que necesitamos.

El panorama actual sólo se cuenta con proyectos de Tokamaks experimentales, entre los cuales se encuentran el International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), el cual todavía no tiene fijo un lugar para su construcción, el Ignitor, que investigará el calentamiento óhmico, y el Next European Torus, NET, que será el sucesor del JET. Ninguno de estos tiene contemplado el acoplamiento con un ciclo de generación de energía eléctrica debido a que el problema persiste en la obtención misma de la reacción de fusión controlada. Esto deberá cambiar.

Hay tres problemas a solventar. Conseguir un tiempo de contención elevado; obtener, y contener, una alta densidad iónica; y lograr una energía cinética de las partículas alta, esto es conseguir fácilmente la ignición.

Estos tres problemas se solventarán con una interesante fusión entre la teoría y la Ingeniería avanzada. Hasta el momento el problema ha sido abordado casi exclusivamente por teóricos, pero los problemas no sólo se encuentran en la teoría de fusión sino en su concreción a lo tangible, este es el terreno de la técnica. Cuando se establezca un programa técnico, asociado al teórico, con metas específicas de desarrollos tecnológicos que fomenten la consolidación de este método de generación, se dará un gran paso hacia el futuro.

En concreto, la contención es lo más preocupante. Existe un criterio llamado el criterio de Lawsons que especifica que no se obtendrá la contención si existen menos de  $10^{21}$  part. /m<sup>3</sup> cada segundo, esto se traduce en términos macroscópicos a

temperaturas superiores a los cien millones de grados Kelvin, ningún material es capaz de soportar esta temperatura, por lo que la el enfoque caliente debe desarrollar un campo magnético del orden de varios Tesla. Los estudiosos de campos magnéticos tan elevados no tiene gran contacto con los investigadores de fusión, y estos últimos se involucran en ese tema sin desentenderse de los problemas de fusión. Campos de estudio como el de superconductores a temperaturas normales podrían ofrecer grandes avances. El estudio conjunto de estos materiales y su respuesta a las condiciones extremas que este tipo de generación debe comenzar.

En cuanto al problema de la alta energía cinética molecular, el enfoque de fusión caliente resuelve este problema teóricamente con las altas temperaturas y las formas de conseguir esas altas temperaturas, tradicionalmente, son:

- La compresión adiabática.
- La inyección de partículas energéticas.
- El calentamiento por ondas de radio.

La primera consiste en comprimir el plasma (por medio del campo magnético) rápidamente aumentado la temperatura sin que escape calor. Este es el método que se utiliza para iniciar el calentamiento, hasta unos 10 keV. La inyección de partículas energéticas se refiere a bombardear el plasma con átomos neutros acelerados previamente que al ingresar al plasma se ionizan y transmiten su energía al resto de las partículas. El último método consiste en usar ondas de radio cuyas frecuencias coincidan con las frecuencias naturales del plasma y se obligue a este último a entrar en resonancia y absorber la energía de la onda.

Dentro de los problemas de alcanzar las altas temperaturas necesaria dentro de la cámara de vacío, también hay que considerar que en el exterior de la cámara se encontrarán grandes superconductores que deberán se enfriados a unas decenas de grados Kelvin, probablemente con helio líquido. El gradiente de temperatura de las

decenas de millones de grados a las decenas generará esfuerzos en los materiales del sistema que es conveniente comenzar a analizar. Esto en el caso de utilizar superconductores tradicionales.

La corriente eléctrica necesaria para generar un campo magnético capaz de accionar una configuración del tipo compresor sería del orden de 1 MA. Estas corrientes se consiguen actualmente, por tiempos cortos, gracias a un banco de condensadores. Para la operación de una central de fusión se deberán extender los tiempos de generación de corriente, por lo que es probable que se necesiten investigaciones alternas en bancos de condensadores o alguna tecnología alternativa a los condensadores, que a la fecha, no se ha considerado.

El tercer problema planteado, los tiempos de confinamiento, son un problema más teórico tal vez, dado que los tiempos máximos que se han conseguido han sido de un segundo para una densidad de  $10^{20}$  part./m<sup>3</sup>. El elevar este tiempo significativamente tal vez no sea posible con los esquemas planteados en la actualidad, sin embargo, se debe perseguir una configuración de varios reactores sincronizados para obtener un resultado continuo, al menos en las primeras centrales. Pero esto es algo que, nuevamente, no se ha planteado teóricamente.

Un cuarto problema, que es en realidad un problema que surgirá cuando se tengan los suficientes avances en la obtención del plasma, es su monitoreo y control. Las mismas razones que nos dificultan la obtención de la reacción nos imposibilitan la inserción de sensores dentro de la cámara del plasma o el plasma mismo. Pero gracias a los elementos que controlan al plasma, son ondas electromagnéticas, y el plasma mismo emite radiaciones electromagnéticas, es posible monitorear y controlar de manera externa. La energía que se aprovecha del plasma es calor, que sale por radiación hacia el exterior, también existen la conducción, convección interna del plasma y la radiación luminosa, pero son consideradas como pérdidas. La radiación

electromagnética puede ser aprovechada para monitorear al plasma gracias a que pequeñas fluctuaciones en el campo magnético indicarían condiciones dentro del plasma. Por otro lado la espectroscopia nos permite determinar la composición y el comportamiento del plasma en todo momento, y así aprovechar lo que se considera pérdida. La convección provoca problemas de inestabilidad en el plasma y la conducción en un plasma es un fenómeno que los teóricos plantean como conducción anómala, ya que discrepa en gran medida de la conducción clásica que ocurren en un gas por efecto de colisión entre partículas. La conducción anómala es el tema de principal investigación en el campo teórico de la fusión en caliente.

Creo prioritario comenzar a pensar en lo que sería el acoplamiento de un reactor de fusión, tipo Tokamak, al sistema térmico siguiendo el esquema de una planta termoeléctrica convencional con ciclo Rankine. Bajo un esquema de ingeniería simplificado un reactor termonuclear es: el plasma en estado de Ignición en el núcleo, confinado por un campo magnético poderoso. Después unas paredes blindadas que permitan una protección hacia el exterior, un posible sostén para la capa de litio que puede incluirse en los reactores avanzados y como soporte de las bobinas magnéticas que pueden generar el campo magnético si el reactor es de confinamiento magnético. El intercambio de energía entre el núcleo y el exterior deberá llevarse al cabo con un nuevo tipo de intercambiador de calor, en el cual el mecanismo básico de transferencia sea el de la radiación y no la convección entre fluidos y la conducción de las paredes del intercambiador, y que además, pueda resistir las altas temperaturas del borde del núcleo, al mismo tiempo que transporta un fluido que transmitirá la energía. Otra opción es sumergir el núcleo, con bobinas, en el fluido refrigerante que se encargará de recibir las radiaciones, o el calor por conducción de un recipiente-contenedor del núcleo. Aquí existen otras dos opciones similares a las que se tienen en reactores de fisión del tipo PWR y BWR. La primera

sería que el refrigerante del núcleo transportara la energía a un intercambiador de calor convencional, con un flujo de agua que sería el que se convirtiera en vapor, para luego ser transportado a la turbina. La segunda opción contempla que el fluido refrigerante se evapore en contacto con el núcleo, y el gas sería transportado hacia la turbina, sin necesidad de un intercambiador convencional intermedio. De cualquier forma la energía mecánica que se extrae de la turbina se transformará en energía eléctrica al acoplarse con un generador.

Este último esquema está demasiado simplificado y trivializado. Un trabajo posterior más extenso y más específico en este punto deberá analizar las ventajas y desventajas de una u otra opción. Además de considerar que cada eslabón en la cadena que desemboca en la utilización de la fusión como parte integral de un ciclo térmico convencional representa terreno nuevo; así por ejemplo, sin importar cuanto se haya escrito en intercambiadores de calor, un intercambiador de calor acoplado a uno o varios reactores de fusión será un diseño único.

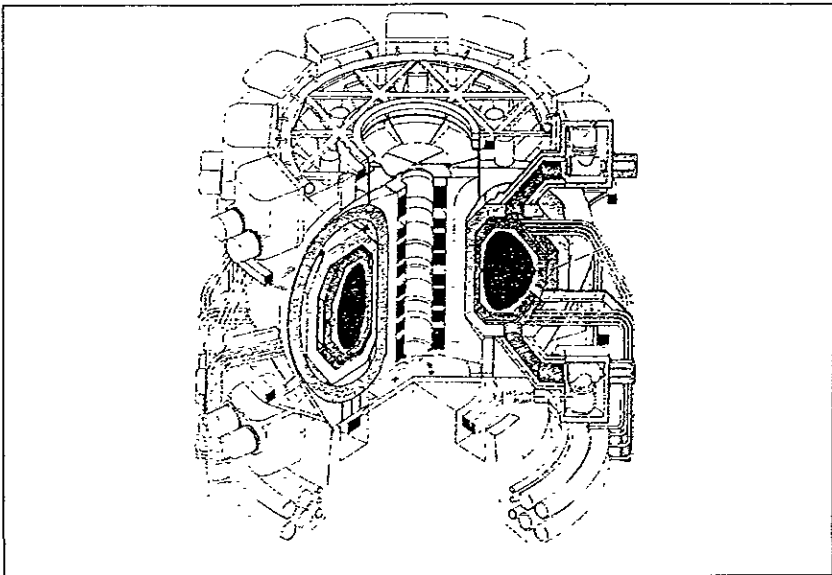


Figura 6.2.- Corte de un Tokamak.

## PROPUESTA ENERGÉTICA

Las opciones para generar energía eléctrica son varias, acreditar o desacreditar contundentemente alguna de ellas no es posible. Como elemento introductorio a esta última sección, en la cual se pretende definir un modelo de generación adecuado para los próximos años, expongo una síntesis cualitativa con las principales características de las opciones para macrogeneración expuestas anteriormente:

Opción	$\eta$	Costo	Impacto ambiental	Reservas	Desarrollo tecnológico	Expectativa de desarrollo en 25 años
Termoeléctrica convencional	35	Bajo	Alto	100 años	Elevado	Incierta
Termoeléctrica con gas natural o Singas	35.2	Medio	Medio	400 años	Elevado	Elevada
Biomasa (quema)	34	Medio	Medio	Inciertas	Limitado	Limitada
Hidroeléctrica	35.12	Medio	Medio	Cientos de años	Elevado	Elevada
Fisión Nuclear	35.16	Alto	Medio	300 años	Elevado	Incierta
Solar	15	Alto	Bajo	Cientos de años	Limitado	Limitada
Eólico	35.12	Medio	Bajo	Cientos de años	Limitado	Limitada
Geotermia	35.12	Bajo	Bajo	Cientos de años	Elevado	Incierta
Fusión	—	Alto	Bajo	Cientos de años	Limitado	Limitada

Tabla 1.- Síntesis cualitativa de la opciones de macrogeneración de energía eléctrica.

Para cuantificar estos conceptos cualitativos se asignan valores numéricos y factores de peso a los rubros análisis.



Para este caso tomaré los siguientes valores: Alto = 1, Medio = 5, Bajo = 10, Elevado = 10, Incierto = 5 y Limitado = 1. Estos valores muestran además el carácter benéfico o perjudicial que cada categoría representa para el análisis, ya que se busca obtener un número total alto para aquellas opciones que deberán impulsarse y un número bajo para aquellas que deberán ser descartadas. Para la categoría de las reservas tomé con 1 la clasificación de cientos de años, 5 para los intermedios e inciertos y 10 para los 100 años, el valor más bajo. Eliminé la columna de la eficiencia debido a que los valores reportados son estimaciones más que datos concretos y la variación de estos datos cuando se analizan plantas particulares varía demasiado como para incluirlo en el análisis subsecuente. Con cinco elementos a considerar, reservas, costo, impacto ambiental, desarrollo tecnológico actual y expectativas de desarrollo, agrego un factor de peso que podría ser 20 % para cada uno, sin embargo, considero que el impacto ambiental merece un porcentaje mayor, por lo que baje 5 % al reservas y costo y le sumé 10 % a impacto, debido a la necesidad de solucionar los problemas ambientales lo antes posible. De esta manera los porcentajes quedaron 15 % para reservas, 15 % para el costo, 30 % para el impacto ambiental, 20 % para el desarrollo tecnológico y 20 % para la expectativa.

Opción	Reservas (15 %)	Costo (15 %)	Impacto ambiental (30 %)	Desarrollo tecnológico (20 %)	Expectativa de desarrollo (20 %)	Total
Termoeléctrica c.	0.15	1.5	0.3	2	1	4.95
gas natural o Singas	0.15	0.75	1.5	2	2	7.75
Biomasa (quema)	0.75	0.75	1.5	0.2	0.2	3.4
Hidroeléctrica	1.5	0.75	1.5	2	2	7.75
Fisión Nuclear	0.75	0.15	1.5	2	1	5.4
Solar	1.5	0.15	3	0.2	0.2	5.05
Eólico	1.5	0.75	3	0.2	0.2	5.65
Geotermia	1.5	1.5	3	2	1	9
Fusión	1.5	0.15	3	0.2	0.2	5.05

Tabla 2.- Síntesis cuantitativa de la opciones de macrogeneración de energía eléctrica.

En base a esta matriz de selección se debería impulsar aquella tecnología que obtenga el valor más alto, y rechazar aquellas que alcancen los menores valores, sin embargo, sin rechazar esta lógica yo ampliaría la decisión y tomaría aquellos que conserven un total mayor a 5. Por que se debe promover la *diversificación energética*, entendiendo esto como la explotación de todos los recursos posibles, tomando en cuenta las ventajas y limitaciones de cada tipo de energético. Todos los energéticos tienen un nicho especial de generación en el cual, dadas sus características, no pueden ser superados por otros, y esto no se consideró en el análisis anterior.

Esta diversificación energética es crucial para una buena planeación. Si un país limita sus opciones energéticas es más vulnerable y su desarrollo se sujeta al desarrollo de éstas. En el caso extremo en el que un país depende exclusivamente de una fuente de energía, de presentarse una perturbación internacional con dicho energético e corre el riesgo de ser controlado, influenciado o intervenido por otras naciones. Actualmente el mundo depende de los hidrocarburos en poco más del 60 %, esto no es benéfico, ya que la influencia de éstos en los mercados no energéticos es tan grande que una escasez, real o provocada, desata fluctuaciones no deseables en todos los sectores socioeconómicos. Por principio, el quemar el petróleo, no sólo, contaminan el ambiente, sino que, es contraproducente ya que se desperdicia materia prima que tiene un gran futuro en la elaboración de productos refinados, resultaría más conveniente almacenar recursos y vender productos derivados y además. Por otro lado, la idea de que en el futuro las energías renovables resolverán los problemas de desarrollo y ambientales es simplista y poco realista ya que, por su propia naturaleza, estos energéticos están sujetos a cambios climáticos no controlables ni predecibles por el hombre; sólo esto las hace poco confiables. Por último, la opción nuclear presenta dos grandes problemas de expansión: uno es el

político-social y el otro es el de los desechos, mientras no se resuelvan ambos problemas su desarrollo está, casi, anclado.

En términos generales y obedeciendo la preselección de la tabla II, opino que es crucial para el sector eléctrico mundial disminuir su dependencia en hidrocarburos tradicionales, como el combustóleo y el carbón, y adopte el gas natural y el carbón gasificado o licuado como energéticos a desarrollar. Que crezca el sector hidroeléctrico, nucleoelectrico, geotérmico y de energías renovables, para cubrir el déficit que dejarían los hidrocarburos tradicionales.

En términos numéricos más tangibles, tomaré el crecimiento en el consumo del sector eléctrico mundial en el período entre 1990 a 1995 que fue de 8 %<sup>94</sup>, lo que implica un crecimiento anual de 1.55 %, si se sostiene constante a nivel mundial hasta el 2025, entonces el consumo mundial deberá ser de poco más de 207 PWh<sup>95</sup> (207 billones de kWh) en dicho año. Mi propuesta sería que dicha producción se cubriera, dadas las perspectiva ambientales, técnicas y económicas, con una aportación del petróleo y carbón<sup>96</sup> de no más del 24 % (49.86 PWh), el gas natural y singas otro 25 % (51.95 PWh), la nucleoelectrica y al hidroeléctrica se deberían desarrollar al 20 % (41.55 PWh) cada una, y por último impulsar la geotermia y los otros energéticos a un nivel en conjunto de 11 % mundial (22.85 PWh).

Esto representaría, anualmente, un decremento moderado del 1.1 % para el sector de hidrocarburos tradicionales, un incremento más fuerte del 4.7 % para los combustibles gaseosos "limpios", un incremento del 1.7 % para las hidroeléctricas y uno del 2.1 % para la nucleoelectrica, y por último un casi increíble 10 % para las energías renovables. Esto se ejemplifica mejor en las siguientes tabla y gráfica:

---

<sup>94</sup> 39ª Estadística anual de Energía de las Naciones Unidas (1992-1995).

<sup>95</sup> P=Peta=10<sup>15</sup>.

<sup>96</sup> Considerando que el carbón se quema en forma de Coque, sin gasificar o licuar.

Consumo anual (PWh)	1995	Crecimiento anual	Años						% en el 2025
			2000	2005	2010	2015	2020	2025	
Carbón y petróleo	69.41	-1.1	65.69	62.17	58.84	55.68	52.70	49.86	24
Gas	13.09	4.7	16.47	20.73	26.08	32.82	41.29	51.95	25
Nuclear	22.26	2.1	24.70	27.41	30.42	33.75	37.45	41.56	20
Hidroelec.	24.88	1.7	27.11	29.52	32.16	35.03	38.16	41.56	20
Otros	1.309	10	2.11	3.39	5.47	8.81	14.19	22.85	11
<b>Total</b>	<b>130.9</b>	<b>1.55</b>	<b>136.09</b>	<b>143.24</b>	<b>152.98</b>	<b>166.11</b>	<b>183.81</b>	<b>207.78</b>	<b>100</b>

Tabla 3.- Propuesta para el crecimiento del consumo anual de energía eléctrica mundial en los próximos 25 años.

### Evolución mundial

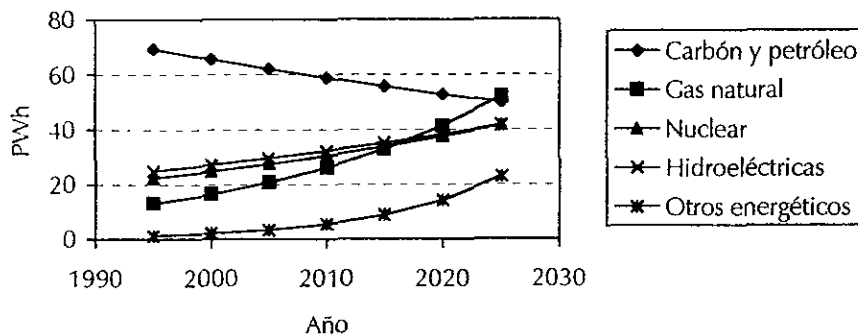


Figura 1.- Gráfica de la evolución del consumo del sector eléctrico mundial propuesta para los próximos 25 años.

Este panorama es posible si el desarrollo sustentable mundial es coherente con las regulaciones ambientales existentes. Presenta dos perspectivas bastante claras y

plausibles que son el crecimiento del gas natural y los recursos hidroeléctricos. En cuanto al desarrollo del gas natural, la ONU menciona que el crecimiento en el periodo comprendido entre 1990 y 1995 fue del 18 % para este combustible, esto se puede considerar como un crecimiento sostenido de 3.3 % anual en este período, así que un crecimiento del 4.7 % puede ser incluso, moderado, suponiendo que la demanda y oferta crecerán enormemente. La energía hidroeléctrica puede sostener un crecimiento del 1.7 %; su único obstáculo podría ser que se alcance la capacidad máxima posible de instalación por razones ambientales antes del 2025, pero no lo creo posible.

Los otros tres energéticos que aparecen en la tabla presentan comportamientos, tal vez, inesperados. El decremento del uso del carbón y petróleo sería el resultado de los países comprometidos con la convención de Kyoto e implicaría el cierre del 28 % de las plantas instaladas actualmente, en sólo 25 años, escenario poco probable según los planes de desarrollo reales en el mundo.

El aumento de la energía nuclear, dadas las políticas de generación actuales, es también poco probable<sup>97</sup> pero, de forzarse la regulación mundial ambiental, no creo que ningún otro recurso energético pueda sustituir este crecimiento del 2 % que pronostico. El decremento en la producción que presenta este sector se debe a varias razones, pero principalmente a un rechazo social, y al descenso en la tasa de crecimiento de la demanda eléctrica por las crisis del petróleo de los setenta que provocó exceso de capacidad eléctrica instalada en los países industrializados, al aumento de la seguridad y normas, y por ende al aumento del costo de los proyectos, de operación, mantenimiento y combustible.

---

<sup>97</sup> Salvo en determinados países como Francia, China e India.

Regresando a la gráfica, el crecimiento del 10 % anual para las opciones de energía restantes es en principio muy aventurado, sin embargo mi expectativa es que en el corto plazo (5 años) se desarrollen principalmente la geotermia mundial y la biomasa, y que en 15 años se consiga un adelanto sustancial en la energía eólica, solar y mareomotriz, de manera que permitan impulsar estas tecnologías para participar en el plazo de veinticinco años con un 11% del consumo mundial. Para no hacer una predicción errónea habría que analizar por qué no se dio en los noventa el impulso de la energías renovables que se pronosticaba. La razón está en las crisis económicas mundiales, la insuficiencia tecnológica y el restablecimiento del petróleo como energético principal. Esta última circunstancia debe cambiar en los próximos años si las presiones ambientales persisten, entonces las energías renovables podrán regresar al marco de la generación de energía eléctrica.

Sin embargo, en el esquema de la macro generación, las energías renovables no tendrán comparación con de las otras opciones como la del gas natural con ciclo combinado o la nuclear en el futuro cercano. Incluso los defensores de las tecnologías solares lo reconocen. Cada recurso energético debe ocupar un nicho especial de acuerdo a sus características intrínsecas. La energía solar se usará para calentar agua, purificar sustancias, y generar electricidad en baja escala, esto se extiende a las energías renovables , energía eólica, biomasa y mareomotriz, para la generación rural y microgeneración. La generación rural tiene futuro si se considera que el Banco Mundial estima que el 40 % de la población mundial vive en comunidades rurales<sup>98</sup>. Dado que dicha población no consume el 40 % de la energía mundial, es real la perspectiva de 10 % del consumo mundial en 25 años por este sector.

---

<sup>98</sup> JAYADEV, Jay, "Harnessing the wind", en *Spectrum*, vol. 32, núm. 11 (EE.UU. noviembre 1995) p.80.

Otra expectativa esperanzadora sería que del futuro cercano a la fecha citada (2025) se desarrolle la fusión nuclear, con lo que los porcentajes se verían seriamente afectados y los decrementos anuales serían la norma como con el caso del combustóleo. Desde principios de la era nuclear la tecnología de fusión ha sido investigada extensivamente, sin embargo, los problemas técnicos no han sido resueltos. Es lamentable que en las pasadas tres décadas, a pesar de la intensa investigación los problemas tecnológicos, no hayan podido ser resueltos en el marco de la generación controlada de fusión. El doctor Julio Martinell mencionaba que una broma común entre los especialistas en el tema es poner un plazo de 20 años como lapso para alcanzar la fusión, debido a que desde los años cincuenta se usa dicha cifra año con año. Yo quisiera plantear 20 años como un límite en nuestra participación real en esta disciplina. Al ser una disciplina que todavía lucha por dar los primeros pasos, México esta muy a tiempo para impulsar su estudio y el desarrollo tecnológico necesarios para que en 25 años no se analice el pasado concluyendo que se desperdició una oportunidad. Este será sin duda el esquema de generación de energía prevaleciente en el próximo milenio, con aplicaciones no solo en la generación de energía eléctrica sino en otros muchos campos, incluso el de la exploración espacial. Estamos a tiempo de convertir este esquema en uno propio y no tener que importar más tecnología. Se debe plantear como proyecto a corto plazo el análisis, inclusive virtual, de una planta que conjunte el reactor y el sistema térmico convencional de ciclo Rankine para ver el comportamiento del sistema y, probablemente, sentar las bases para la puesta en marcha de una planta piloto.

Los alicientes son varios, pero se puede mencionar que las ventajas de la fusión sobre la fisión son:

- Hay mayor cantidad de reservas de isótopos fusionables que de fisionables.
- En cuanto a la radioactividad, sólo hay que cuidar el He-3, los neutrones y probablemente la activación de las paredes de contención del reactor de fusión, por efecto de los neutrones libres que se producen hasta cinco veces más que en una reacción de fisión, pero los desechos radioactivos son considerablemente menores que en fisión.
- Seguridad, dado que hay poco combustible y al ser difícil la manutención de la reacción es virtualmente imposible que una reacción de fusión se salga de control, esto hace que su desventaja más grande, sea su mayor ventaja.

El análisis anterior se centra en un contexto global, en el caso nacional, la perspectiva se aleja un poco de al mundial, dado la expectativa de desarrollo existentes, las necesidades y los recursos con los que contamos. En México la capacidad instalada entre 1995 y el 2000 creció un 12.7 % mientras que la cantidad de usuarios creció un 19.8 %<sup>99</sup>; esto indica un sector con grandes perspectivas de crecimiento. Por otro lado, en 1997 la CFE reportó que con una tasa de crecimiento anual del 5%, en el 2010 la producción anual eléctrica debería ser de 297 TWh, consideró que si se dejaba de consumir petróleo como en la actualidad y sólo se consideró su consumo constante en los niveles de 1996, las reservas probadas sólo alcanzarían hasta el 2002<sup>100</sup>. Ahora bien, dicha expectativa contradice el crecimiento que indican los datos anteriores. Si se considera otro dato de crecimiento anual, 1.2<sup>101</sup> entre 1998 y 1999, es posible que los hidrocarburos duren un poco más, tal vez hasta el 2010, y aún así no es una cifra muy prometedora.

---

<sup>99</sup> Datos obtenidos del "Plan Nacional de Desarrollo, Informe de Ejecución 1999", emitido por el Poder Ejecutivo Federal.

<sup>100</sup> CFE, del fuego a la energía nuclear. p.56.

<sup>101</sup> Informe de Ejecución 1999, Plan Nacional de desarrollo, p. 307.



Plantear el crecimiento del sector mexicano para los próximos 25 años, considerando los datos de 1995, y aventurar en un porcentaje de participación de las opciones energéticas planteadas no es sencillo, debido principalmente a la dependencia tan grande que tenemos del petróleo y a la falta de perspectiva de cambio real en las tendencias de desarrollo del país; esto aunado a la diversidad, a veces contradictoria, de los datos oficiales. Aun así, como un ejercicio de reflexión, consideraré que en un cuarto de siglo la participación de los hidrocarburos tradicionales será menor al 40 %, la Hidroeléctrica será de 25 %, la tecnología de ciclo combinado con gas natural participará con poco más del 25 %, la nuclear crecerá hasta el 5 %, y la geotermia y las energías renovables ocuparán el resto. Si la capacidad instalada en 1995 era de 32 166 MW y considerando un crecimiento del 1.2 % anual (para continuar con la cifra oficial más reciente que poseo), se necesitará, para el 2025, una capacidad instalada de 46 005 MW, de los cuales se debe depender en un 38.75 % de los hidrocarburos tradicionales (17 826 MW), que sería no aumentar ni disminuir la capacidad instalada<sup>102</sup>, del Gas un 27.5 % (12 651 MW), lo cuál implica un crecimiento del 4.6 % anual, de la Hidroeléctrica un 25% (11 501 MW), que implica un crecimiento, casi nulo, del 0.8 % anual, si la energía nuclear creciera un 1.8 % anual llegaría en el 2025 al 5% del total instalado (2 300 MW); la Geotermia crecería con un 2 % anual hasta alcanzar un 3 % del total (1 380 MW), y de los otros recursos energético, que deberían comprender energía eólica, solar y maeromotriz, un 0.75 % del total (345 MW), pero esto significaría un crecimiento anual de 18.73 % para estos energéticos. Estos comportamientos se muestran en las siguientes tabla y gráfica:

---

<sup>102</sup> Para 1995.

Capacidad instalada (MW)	1995	Crecimiento anual	Años						% en el 2025
			2000	2005	2010	2015	2020	2025	
Carbón y petróleo	17826	0	17826	17826	17826	17826	17826	17826	38.75
Gas	3198	4.6	4022	5057.7	6360.6	7999.1	10059	12651	27.5
Nuclear	1309	1.8	1437.9	1579.5	1735	1906	2093.7	2300	5
Hidroelec.	9056	0.8	9424	9807	10205	10620	11052	11501	25
Geotermia	753	2	833	921.5	1019.4	1127.6	1247	1380	3
Otros	2	18.73	4.7	11.1	26.26	62	146.23	345.03	0.75
<b>Total</b>	<b>32166</b>	<b>1.2</b>	<b>33547</b>	<b>35203</b>	<b>37172</b>	<b>39541</b>	<b>42424</b>	<b>46005</b>	<b>100</b>

Tabla 4.- de crecimiento del consumo anual de energía eléctrica Nacional en los próximos 25 años.

### Evolución Nacional

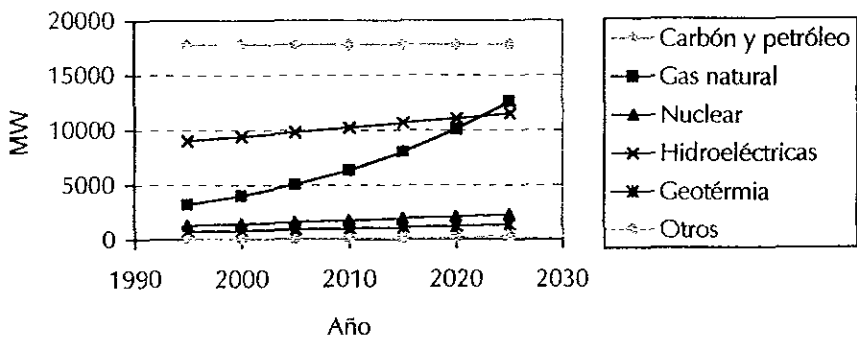


Figura 2.- Gráfica de la evolución del consumo del sector eléctrico Nacional propuesta para los próximos 25 años.

Este esquema propuesto presenta varios retos. El primero es el detener el crecimiento de las centrales termoeléctricas convencionales y no construir más, cosa que no se ha cumplido en el primer período del análisis (1995-2000). El segundo reto es el enorme crecimiento de las plantas de ciclo combinado con gas natural, el Singas no es una opción real para nuestro país dado que el carbón con el que contamos no es suficiente para emprender una línea de desarrollo en ese sentido; incluso, es apenas suficiente para las plantas carboeléctricas existentes.

Los opositores al desarrollo del sector petrolero para la subsistencia del sector eléctrico no son pocos y no han surgido a últimas fechas, han sido varios quienes rechazan esta postura y lo han hecho desde la década de los setenta, al menos. Como ejemplos cito a Alonso Dalmau, que decía en un encuentro energético: *mal haríamos en disponer del principal recurso que poseemos, producto de la voluntad nacional, sin dejar garantizadas para el futuro la autosuficiencia y la soberanía del país.* Y Francisco Vizcaíno también apuntaba: *El uso que le damos actualmente a nuestros hidrocarburos es altamente costoso, los desperdiciamos quemándolos para la producción de energía eléctrica; es preciso substituirlos en este caso por el uranio para, en esta forma, optimizar la utilización de nuestros aún vastos recursos petrolíferos en el desarrollo de la petroquímica.* Para terminar con la perspectiva de los hidrocarburos, el futuro de la biomasa está en el control de los desperdicios en la generación rural, microgeneración y la cogeneración.

Volviendo a la gráfica, el crecimiento del sector nuclear es engañoso, pues en términos reales lo que se propone es duplicar la capacidad instalada en treinta años. Pero, dado que México sólo cuenta con una planta nuclear, lo que se está proponiendo es construir una planta adicional al sistema para lograr este fin, por lo que en realidad el avance de este sector es escalonado, no continuo. El reactor que debería instalarse sería un reactor de ingeniería avanzada tipo PWR, como el reactor

N4 Francés, o bien un reactor tipo LMFBR, como el Superphoenix. También habrá que analizar la posibilidad de poner fuera de operación a los reactores de Laguna Verde en el lapso en el que se plantea expandir el sector, dado que en dicho tiempo se cumplirían 36 años de operación de la unidad uno. Entonces, otra posibilidad es que el plan contemple dos centrales: una que sustituya a Laguna Verde y otra que permita el crecimiento esperado. El problema es que el debate en este tema parece estar totalmente cerrado y mientras no exista un debate abierto en el sector eléctrico en donde se expongan pros y contras de cualquier tipo de generación, una planeación no podrá ser imparcial, siempre estará condicionada por cuestiones ajenas al sector. Quisiera hacer hincapié en el hecho de que los grandes accidentes nucleares mundiales, Three Mile Island y Chernobil, ante cualquier análisis, son agravados irreparablemente o atribuidos a errores humanos; por lo cual se deben desarrollar sistemas que eviten estos problemas para asegurar a la opinión pública que se ha aprendido de esas experiencias y que no se repetirán.

El ámbito nuclear mexicano necesitará principalmente tres cosas que lleven a la reactivación del programa nuclear: la primera, y más importante, la conscientización del dilema energético que enfrentamos, la segunda es la formación de personal, especializado, técnico y de apoyo para el estudio y práctica de esta energía, y la tercera la exploración y explotación de los recursos naturales buscando un bajo impacto ambiental. Esta es sin duda un área de vanguardia, ya que aunque hace más de cuarenta años que se utiliza este tipo de energía en el mundo, las exigencias ambientales la convierten nuevamente en un área de investigación novedosa y con la mayoría de los retos por delante.

Cabe mencionar que la energía nuclear no sólo se debe desarrollar para la generación de energía eléctrica, en muchos campos del quehacer humano se usan distintas formas de energía nuclear: para generar calor, en la medicina, en la

agricultura con fertilizantes, en la absorción de elementos, en la nutrición, en la biología, en la industria pesada de metales, para estudios en resistencia de materiales, para el flujo de petróleo en oleoductos, radiografías de fundición, etc. Todos estos campos no pueden dejarse de lado, por lo cual la energía nuclear nos seguirá acompañando en el próximo milenio.

Volviendo a la tabla del desarrollo nacional, el crecimiento de la hidroeléctrica se plantea en 0.8 % anual, un aumento real de 2 400 MW en treinta años. Según los planes de expansión vigente se planea expandir la capacidad instalada en 2 500 MW para el año 2005, sin embargo, esta expansión puede significar el máximo desarrollo de este recurso energético dadas las restricciones ambientales que pueden imponerse a este tipo de generación. Debo recordar que en el capítulo II (pag. 28) menciono que los recursos hidráulicos totales de México se estiman en 28 mil MW, pero no se especifica cuáles son ambientalmente adecuados para la explotación. Sin duda un estudio más conciso sobre el tema puede aclarar exactamente cuáles son las reservas realmente aprovechables.

El desarrollo de la potencia instalada de la geotermia sigue un esquema similar al anterior, mucho se ha discutido acerca de cuáles son las reservas en este sector y creo que sí es posible alcanzar una capacidad instalada que supere los mil MW, dado que en 1996 se calculaba los recursos totales de este energético en 4 500 MW.

En cuanto a las energías renovables, se espera que en 25 años alcancen, en su conjunto, la capacidad equivalente a una planta mediana de generación de 345 MW. En términos absolutos es poco, pero significa un crecimiento anual muy alto. El nicho de generación de estas tecnologías está en la microgeneración, la generación rural, particular en zonas urbanas, para el bombeo, el autoconsumo, y creo que en estas áreas las energías renovables sí tienen posibilidad de crecer y alcanzar la capacidad que propongo. Habría que investigar y construir una planta piloto que aprovecharse la

energía maeromotriz, dada la gran extensión de litorales con los que cuenta nuestro país; si se logran avances en este tipo de tecnología la República Mexicana se vería enormemente beneficiada.

Además de la distribución en porcentajes de los distintos recursos, propongo que dicho desarrollo se lleve al cabo con la construcción de plantas de mediana capacidad, alrededor de 400 o 350 MW, por varias razones. Una planta grande (1000 MW) provoca una dependencia elevada de ella, además las inversiones necesarias son mayores. En el futuro se debe buscar diseños sencillos, versátiles y de fácil control. Dicho control de los sistemas que el sector necesita en el futuro está ligado al desarrollo de programas de computadora accesibles, generales y "comerciales" que permitan controlar las plantas, los sistemas de transmisión y distribución y que faciliten el modelado de los sistemas para realizar con confianza y seguridad experimentos que en el pasado se realizaban con la operación de los equipos mismos.

Aunada a estas estrategias deberá perdurar una propuesta que no es nueva pero que no está de más resaltarla: el ahorro de energía. Sin embargo, el ahorro de energía no sólo se hace en los niveles más bajos de consumo, con equipos más eficientes y consumidores preocupados y responsables. Esto deberá seguirse impulsando, sin duda alguna, pero el ahorro energético debe también enfocarse en los niveles de planeación con una administración y manejo de la demanda que impida una generación desmesurada de energía, o bien prever adecuadamente las tendencias de demanda para que se tengan, oportunamente, las opciones de generación para cubrir la demanda de modo que se impacte menos a la economía y al medio ambiente, esto es lograr relegar el uso de los hidrocarburos tradicionales de una manera que permita el desarrollo sustentable, a esto también llamo yo ahorro de energía.

Todos estos esquemas planteados necesitan para su concreción de un elemento crucial actualmente: el financiamiento eficaz. En términos generales, las tendencias actuales son reducir tiempos de construcción, reducir costos de inversión, de construcción y de operación, mejorar calidad y la eficiencia, y eso, en mi opinión, se logra sólo con tecnología avanzada, ingeniería avanzada y esquemas de financiamiento modernos. Sin embargo, la relación entre ambos campos no es sencilla, de hecho, en palabras de un especialista americano, Keith Roe: “la industria eléctrica en los últimos veinte años provee de un intrigante ejemplo de cómo la tecnología global puede cambiar los mercados y como los mercados pueden impulsar la tecnología”. En realidad el motor de los cambios es más el mercado que la tecnología, las razones de esto son complicadas pero dos de ellas son: la globalización y la desregularización y/o privatización de la industrias eléctricas; por lo cual el buen uso de los recursos, y el aprovechamiento energético, no entran en la ecuación motora. En menor grado intervienen el medio ambiente, el abasto de combustible y la demanda del mercado. Un caso muy claro de esto es el impulso que ha tenido el desarrollo de la industria de fabricación de turbinas de gas, la cual ha encontrado en las desregulaciones mundiales un mercado agresivo que demanda equipos cada vez más eficientes y menos costosos.

Sea cual sea el entorno o el esquema financiero, cualquier proyecto de generación de energía representa una inversión fuerte en términos de construcción y operación, además de un tiempo largo de puesta en marcha que varía enormemente según el tipo de proyecto. Para darnos una idea, la planta Monterrey III, con una capacidad de 735 MW, tendrá un costo de construcción de 4 275 millones de pesos (450 millones de dólares) sólo en la instalación que durará seis años. El sector energético mexicano tiene contemplado recibir hasta el 2006, 84 mil 737 millones de pesos según datos de la Secretaría de Energía. Dadas estas cantidades exorbitantes

de dinero, es imperante que la plantas del futuro sean eficientes y busquen aprovechar todos los recursos al máximo para que dichas inversiones se justifiquen, pero, el principal actor en el desarrollo futuro del sector eléctrico mundial y mexicano parece que será el esquema de financiamiento que se utilice para adquirir estos recursos.

En un contexto global, el empuje financiero sobre el sector comenzó hacia principios de la década de los ochenta. En el mundo se han dado, como solución al escaso financiamiento, la privatización del sector eléctrico y el establecimiento de un mercado libre a todos los niveles. En términos más cercanos, en América Latina esta tendencia mundial comenzó en Chile en 1982, siguió en Argentina en 1992, en Perú en 1993, en Bolivia y Colombia en 1994 y en Brasil y Venezuela en 1996. En México se planteó el esquema en febrero de 1999 y a la fecha no se ha resuelto nada sobre el esquema del futuro. En todos los países latinoamericanos en donde se ha implantado las reformas, se ha atraído grandes inversiones, principalmente de EE.UU. sin reportar grandes avances. En algunos países el precio de la energía ha bajado y en otros ha subido; se necesita un estudio más general para establecer criterios de selección o reprobación del esquema financiero latinoamericano. En general la desregulación y privatización tienden a terminar con la protección a la empresa pública que provee el servicio eléctrico con costos determinados, por parte de los gobiernos, y la hacer competencia entre empresas privadas que ofrezcan servicio y precios bajos, un mercado de libre competencia. El mayor problema de las naciones que en el mundo han adoptado este método es establecer el papel del estado en este esquema. Algunos asuntos comunes en las desregulaciones latinoamericanas son<sup>103</sup>:

---

<sup>103</sup> RUDNIC, Hugh. "Pioneering electricity reform in South America", en *Spectrum*, vol. 33, núm. 8, (Agosto 1996) p. 39.



- Separación en tres sectores: generación, transmisión y distribución.
- Competencia en el nivel de generación, pero con todas las compañías en acuerdo con un operador central (gubernamental) que organice su entrega.
- Operación de la transmisión y distribución bajo licencia central.
- No licitación de termoeléctricas o nucleoeeléctricas pero sí de las hidroeléctricas y recursos renovables.
- Uso abierto de la red de transmisión.
- Los distribuidores tienen el derecho y la obligación de entregar energía localmente.
- Sistemas de precios que contemplen que la generación y la transmisión obtengan una expansión marginal u operacional.
- Multas por no entregar la energía en algún punto.

Como primera lectura el planteamiento parece tener sus aciertos y sus desaciertos, en el caso mexicano la propuesta de reforma del sector eléctrico está basada en la estructura y mecanismo de la reforma inglesa de 1990, pero las industrias mexicanas e inglesas, en general, ha cambiado en diez años. El principal problema es que el esquema del mercado mayorista de los ingleses (Pool market) falló, y en este país se está reemplazando. También se dice que *“los objetivos de las reformas británicas eran complejos y, en general, no estaban relacionados a problemas específicos de la industria eléctrica”*<sup>104</sup> en México no se tomó en cuenta eso; por lo que la financiación (el objetivo primordial de la reforma) no es segura. Tal vez otro esquema podría ser adoptar las concesiones; pero este esquema ya falló en México con el programa carretero a principios de los noventa. El problema no es sencillo ya que el usuario último del servicio no tiene la costumbre, ni la conveniencia, de poder cambiar de compañía como lo haría con un producto en una tienda departamental;

---

<sup>104</sup> THOMAS, Steve, “Comentarios a la ‘propuesta de reforma estructural de la industria eléctrica mexicana’”, en Problemas del desarrollo, UNAM-IEC, vol. 30, núm. 118 (México, Julio/Septiembre 1999), p. 85.

en general los servicios son preferidos por estos usuarios si presentan estructuras estables y con poca fluctuación, así que es probable que un mercado económico-eléctrico demasiado agresivo y en donde la competencia entre empresas determine el mercado, no sea un esquema operante para este servicio.

Dos posibles soluciones a este problema en concreto son: crear empresas de "servicios totales", agua, gas, luz (distribución), y además tener la generación concesionada, apertura agresiva en la microgeneración y cogeneración hacia empresas y particulares. De alguna manera integrar, aunque no directamente, la generación y el suministro para que sea rentable a ambos extremos o bien separar del todo estos extremos creando compañías grandes que integren la disposición y entrega de combustible y la generación de electricidad, que operen conjuntamente en una misma zona geográfica, y desvincular de esta empresa a la compañía de distribución. Cualquiera de estas propuestas es complicada. Por otro lado la desregulación del sector dificulta el desarrollo de la industria nucleoelectrica, dado que de ser privatizada no vería los recursos que requiere dados los altos costos de instalación y operación. Si el gobierno asume la responsabilidad de estas plantas es factible que no las desarrolle porque el mercado eléctrico estaría cubierto por el sector privado.

Un problema grave es la forma de plantear los objetivos para el desarrollo del sector eléctrico, tanto en el terreno financiero como en el técnico. Se deben considerar primero los recursos, segundo el medio ambiente, tercero la tecnología disponible y cuarto la economía local y mundial. No al revés. No abrir el sector hasta no resolver problemas de tipo de estructura económica, esquemas de funcionamiento de las empresas, y regulación estricta en todos los aspectos, la participación de las compañías extranjeras en el sector, los esquemas de empresas que se pueden crear y su participación en las tres áreas del sector (generación, transmisión y distribución), entre otros. Caemos en los tiempos sexenales que

impiden el desarrollo del sector, por lo que ahora la propuesta está detenida en cuanto a la desregulación — para bien o mal— mientras tanto no se podrán adoptar políticas de ninguna clase en México y esto sí es perjudicial. Tal vez para cuando se establezca claramente cuáles van a ser las reglas del juego, la inversión necesaria habrá llegado demasiado tarde al sector y los rezagos se harán evidentes en diez años.

Pero el esquema financiero no es el único problema económico al que se enfrenta el sector eléctrico, otro muy grave es la determinación de precios de combustibles, que sin duda está ligado a la planeación energética. Hoy por hoy resulta importante analizar el caso del precio del gas natural, ya que dicho precio podría elevarse mucho en los próximos años, así como lo hizo el uranio, cuando en la década de los setenta, se miraba como una opción alentadora. Se dice que el precio de este último energético se elevó 500% entre 1973 y 1977, lo mismo pasó con el petróleo en la misma década ante la crisis causada por los países Árabes. Antes de impulsar un desarrollo nacional de 4.6 % anual para el gas natural, habrá que analizar bien los posibles comportamientos mundiales del precio de este energético ya que, de elevarse a precios demasiado altos, el desarrollo se detendría súbitamente y los energéticos que seguramente cubrirían el rezago energético dejado por el desarrollo de este último, serían los hidrocarburos tradicionales, petróleo y carbón. Incluso en el caso de un alza desmedida de precios para el gas natural se podría pensar en importar carbón y gasificarlo, pero sería una opción ridícula dados los amplios recursos energéticos con los que cuenta nuestro país.

Los problemas económico-financieros se presentan en este momento por dos razones principales: la primera es la tendencia de globalización que sigue el mundo, y la segunda es la gran expectativa de demanda eléctrica que se espera exista debido al aumento en la población mundial para el próximo siglo.

La población mundial va creciendo — sobrepasamos los seis mil millones de seres humanos — y con él, el consumo energético. Sólo entre China e India, con cerca de dos mil millones de personas (30 % de la población mundial), se consume un décimo de la energía que consume EE.UU. con 4 % de la población. Según economistas, para el año 2020 el consumo energético de un indio se incrementará en un 145 % y el de un chino en 85 %. Escenarios similares en el resto del mundo generan preocupación dado el gran problema de generación y de recursos que representa. El mayor problema en los próximos 25 años estará en los países en desarrollo, donde la demanda crece más rápido que la capacidad de generación y eso “recarga el sistema”.

Hace cuarenta años, el crecimiento de la demanda alentaba el desarrollo de la industria e impulsaba a los generadores hacia proyectos cada vez más ambiciosos, pero hoy en día este crecimiento también provoca preocupación, dado que no cualquier proyecto cumplirá con la demanda y con las nuevas medidas de protección ambiental.

El ex primer ministro ruso Mijail Gorbachov declaró para la revista *Time* y la cadena televisiva CBS de EE.UU. que el s. XXI sería el siglo del medio ambiente; concuerdo con él, y para esto el desarrollo sustentable tendrá que pulirse de manera que permita el creciente desarrollo sin atentar, en definitiva, contra nosotros mismos. Además será un siglo, — para bien o para mal —, globalizado, lo que implica que la visión del pasado en el que los desechos son propios de cada país y su problema, cada vez es menos cierta. En primer lugar el mundo se preocupa por los desechos

que provocan el efecto invernadero, CO<sub>2</sub>, metano, NO<sub>x</sub>, CFC y SO<sub>x</sub> principalmente, ya que los cinco registros de temperatura máxima en el siglo se han presentado en las dos últimas décadas. Esto es preocupante aunque por otro lado, se estima que la elevación de la temperatura promedio ha sido de 0.5 °C en el último siglo, que no parece tan radical. Sin embargo, las emisiones aumentan; se cree que para el año 2050 serán el doble de las que tuvieron lugar en 1990. Por otro lado, según UNIEA (United Nations International Energy Agency), para el 2010 los países en vías de desarrollo generarán la mitad de dichas emisiones de CO<sub>2</sub>.

En años recientes se ha hecho notar el peso que las exigencias ambientales tienen sobre el sector eléctrico, de hecho fueron éstas las que principalmente detuvieron la proliferación del esquema de fisión nuclear que a principios de los años setenta parecía ser la opción del futuro.

Como todo ciclo, la presión ambientalista deberá disminuir para permitir el desarrollo de nuevas tecnologías de generación en los próximos 25 años. En mi opinión, se debe convencer al público nuevamente de que la opción nuclear puede y debe formar parte esencial de los proyectos de generación eléctrica mundiales y nacionales. Aun si no se desarrolla la energía nuclear como suministro de energía eléctrica, es prioritario construir cementerios nucleares que alberguen los desechos que las plantas actuales producirán, así como la industria y los hospitales. En nuestro país existió el Centro de Almacenamiento de Desechos Radioactivos (CADER), creado en 1972 en el estado de México a 50 km del zócalo del D.F., pero la CFE y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, decidieron que no era un buen sitio, y en efecto no es adecuado para el almacenamiento definitivo, por la hidrología del lugar y la cercanía a la capital. Por esto, se necesita buscar otro sitio en donde se almacene material nuclear, no sólo de plantas nucleares, sino de aplicaciones industriales, médicas y científicas. Actualmente en Laguna Verde

almacenan sus desechos en la misma instalación, en una alberca y, en palabras de Miguel Medina (director de Laguna Verde), *"tenemos incluso capacidad para seguirlo haciendo cinco años más"*<sup>105</sup>. Esto implica que necesitamos un almacenamiento definitivo en México y se debe terminar de construir en menos de cinco años; Laguna Verde no puede convertirse en dicho cementerio por su cercanía al mar y sus condiciones geográficas. Hay que encontrar una zona geográfica adecuada y comenzar la construcción de dicho cementerio aun si el Programa Energético Nacional no contempla crear nuevas centrales nucleares.

Una propuesta nacional es que el desarrollo de la tecnología avanzada necesaria debe ser mexicana. Cuando México planeaba, en 1979, colocar 20 000 MW eléctricos se leía: *en el proyecto se hizo mucho énfasis en la transferencia de tecnología y en la participación de la industria nacional así como en los requerimientos que tendrían los sistemas de educación superior y de investigación y desarrollo como consecuencia del programa nuclear*<sup>106</sup>, hay que continuar con esta tendencia. Dentro del mismo contexto de la energía nuclear, Alonso Dalmau decía: *"no es concebible la utilización a gran escala de la energía nuclear mediante la importación completa de centrales nucleoelectricas, dejando tan sólo a empresas nacionales parte del montaje y la obra civil y que la participación de nuestros técnicos se vea restringida únicamente a la operación de plantas"*, sin embargo, esto no sólo se aplica a la tecnología de fisión, sino a cualquier tecnología futura, pero lo que sí es específico es que el sector energético es un sector vital para el desarrollo del país, al margen de la controversia de la privatización o no del sector, el solo hecho de importar y no desarrollar tecnología en este ramo nos compromete completamente como nación.

---

<sup>105</sup> la Jornada, año 16, # 5609, (México, D.F. viernes 14 de abril de 2000), p. 23.

<sup>106</sup> VÉLEZ, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997. p. 59.

La tecnología que necesita mayor avance es la de Fusión nuclear. En el marco teórico, México no ha dejado de aportar, sin embargo, debemos comenzar a preocuparnos por aportar también en el marco tecnológico de estas nuevas corrientes de generación para no rezagarnos. La preparación del país debe ser ampliada a este terreno para que en unos años, cuando la tecnología de fusión sea una realidad, México tenga la capacidad para interactuar de manera seria y formal en lo tecnológico.

La misma planeación energética debe ser revolucionada. Debe construirse como una planeación continua y diversificada, no sexenal. Incluso los 25 años, que es el lapso planteado por este trabajo, no es un lapso adecuado, ni en el largo, ni en el corto plazo. Se debe buscar una "planeación estratificada descendente"; la primera etapa de largo plazo, de 50 años o más según las reservas del energético más abundante, con un alcance mundial de gran escala; la segunda, una de mediano plazo, de 25 años con alcance nacional, regional o local, cíclica, determinada por la vida útil de las tecnologías de punta al inicio de la planeación y por las perspectivas de aumento en la población y demanda. Por último una planeación de corto, alcance con apenas 5 o 10 años, para hacer cambios de acuerdo a los desarrollos tecnológicos y a las tendencias económico-sociales del momento regidas por el mercado y las necesidades inmediatas de la población.

En el pasado las proyecciones energéticas de largo plazo de los especialistas se han topado con problemas que las han invalidado. En los setenta se auguraba un aumento en el uso de los hidrocarburos como combustible económico y el uso de la energía nuclear como solución a la creciente demanda. Esto cambió con la crisis del petróleo al final de los setenta y con los desastres nucleares. En los ochenta se pronosticaba el uso desmesurado de energías alternativas y esto se vio truncado por la incapacidad tecnológica. Estos giros inesperados agravados por la transición del

sector eléctrico hacia el modelo de mercado financiero, necesariamente de corto plazo, *descuida o abandona la planeación a mediano y largo plazo*<sup>107</sup>, lo que ocasiona que no estemos preparados para satisfacer la demanda por que los proyectos son de mediano y largo plazo intrínsecamente, y esto provoca, energéticamente, estar vulnerables.

Para finalizar me gustaría cuestionar algo básico que no se ha planteado en este trabajo. La sociedad moderna vive rodeada de un crecimiento desmedido, la aceleración de la vida cotidiana es una consecuencia simbiótica del desarrollo que envuelve a la humanidad en este momento. El desarrollo abstracto de la sociedad requiere, demanda un crecimiento del sector energético, que es el motor y sustento de dicho desarrollo en cualquier nivel. Pero, ¿podemos como especie justificar este desarrollo abstracto?, ¿el desarrollo es una secuela natural para el ser humano?, ¿hacia qué, o dónde nos lleva este desarrollo? Es difícil discernir estas cuestiones. La realidad nos enfrenta al desarrollo, un desarrollo globalizado y que cada vez más nos entrelaza en un tejido global interdependiente.

En mi opinión el desarrollo sí es una tendencia natural de nuestra especie. Nuestra naturaleza intrínseca nos obliga a inquirir, explorar, descubrir y desarrollar, por lo que el desarrollo del sector energético no es sólo una demanda social, sino un requerimiento obligado de nuestra especie. Y puede ser considerado no sólo a nivel de especie, sino como Carl Sagan decía, *nosotros hablamos en nombre de la Tierra. Debemos nuestra obligación de sobrevivir no sólo a nosotros sino también a este Cosmos, antiguo, vasto, del cual procedemos.*

Frank D. Drake de la Universidad de Cornell dilucidaba sobre el número de civilizaciones en el Universo y llegó a elaborar una ecuación que predecía probabilísticamente dicho número. La ecuación tiene siete factores y el que me

---

<sup>107</sup> VÉLEZ, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997. p. 101.



interesa comentar es el último, que es la fracción de *civilizaciones técnicas avanzadas* que logran superar lo que él llama *adolescencia tecnológica*, esto es, cuando una civilización logra alcanzar un nivel tecnológico tal que le permite autodestruirse y corre el riesgo de hacerlo. La especie humana atraviesa por un grave caso de adolescencia tecnológica. En varias ramas de la ciencia se ha alcanzado la capacidad de aniquilar a la especie humana como la conocemos. La industria bélica posee armas capaces de eliminar a toda la población del planeta en segundos u horas, como son las armas nucleares, las armas químicas y las armas biológicas. Creo que otra muestra de nuestra adolescencia está en el uso de nuestros recursos. Como un joven impetuoso, nos abalanzamos sobre aquello que nos satisface de momento, sin pensar en las consecuencias que nos afectan a nosotros, o en aquellas que se presentarán en un futuro.

Debemos demostrar nuestra madurez como civilización, como especie no sólo sobreviviendo a la autodestrucción, sino logrando un desarrollo coherente, racional, consciente, no sólo de nosotros mismos, logrando un equilibrio social digno, sino del planeta, del medio ambiente, junto con los otros seres con los que compartimos esta isla planetaria.

La planeación energética puede ser considerada meramente en un ámbito nacional y global, pero para una planeación adecuada hay que tener una visión amplia y una capacidad de concreción al mismo tiempo.

Parece que la actitud de los gobiernos y de la población en general acerca del futuro es más bien apática, por lo que es tarea de los ingenieros encargados del desarrollo, hacerlo con la Ingeniería Avanzada, con un sentido económico, social y ambiental que permita resolver los problemas energéticos cercanos y establecer los cimientos que permitan el desarrollo de las futuras generaciones.

## ANEXO: TABLA DE IMPACTO AMBIENTAL

Las tabla de impacto ambiental que aparecen en las páginas 65, 105 y 139, pretenden establecer un elemento de comparación ambiental entre los distintos tipos de generación de energía eléctrica.

Sólo se analizaron con esta tabla los tres tipos de generación que se estudiaron más a detalle. El método de elaboración de la tabla es valuando cada contaminante para cada tipo de generación y la suma total de dicha valuación nos permite estimar el impacto ambiental.

La tabla cuenta con 29 contaminantes, algunos de ellos fueron abordados en el capítulo II, y considero importante explicar los siguientes.

Sólidos disueltos.- estos son partículas muy pequeñas que se integran en solución al agua que las transporta.

Sólidos suspendidos.- partículas algo mayores a las disueltas que se retiran con distintos procesos de filtraje, decantación, sedimentación, etc.

Paisaje.- Este apartado indica el efecto que tiene la central eléctrica sobre la zona en la que se establece, en referencia al cambio visual y material con respecto a la zona antes de la instalación de dicha planta.

Uso de suelo.- se refiere a las distintas posibilidades de uso que tendrá el terreno de la central y el cercano a él una vez que la planta se desmantele.

Eutroficación acelerada.- Naturalmente un lago pasa por una serie de etapas de evolución, la última es la Eutroficación, en la cual el lago se seca. El depósito de diversas sustancias, entre ellas el  $N_2$  y el P, aceleran este proceso.

La asignación del valor individual de cada contaminante se determinó por apreciación general, dado que no se estudia en este trabajo ninguna central en particular, pero se siguió el siguiente criterio numérico:

Indicadores de impacto	Indicador	Calificación por indicador
	Muy Alto = MA	10
	Alto = A	8
	Medio = M	6
	Bajo = B	4
	Muy Bajo = MB	2
	Nulo = N	0

Así si se considera que el impacto de determinado contaminante es "muy alto" se le asignará un valor numérico de 10 y si el impacto es nulo, 0. Cabe aclarar que la asignación fue subjetiva y en un análisis particular los valores pueden cambiar.

El valor máximo posible de obtener en esta tabla es de 290 puntos. Los valores obtenidos en este trabajo fueron:

- Ciclo combinado: 96 (33 % del total)
- Generación por fisión nuclear: 74 (25 % del total)
- Generación por fusión nuclear: 42 (14 % del total)

Esto muestra en términos ambientales cual de las tres opciones de generación eléctrica es más adecuada para desarrollar.

## Glosario

**Aceite:** sustancia de origen animal, vegetal o mineral formada por ésteres de ácidos grasos o por hidrocarburos derivados del petróleo, líquida, insoluble al agua, soluble al éter, combustible y generalmente menos densa que el agua.

**Alotropía:** fenómeno en el cual las propiedades físicas y químicas que presenta un elemento varían por causa de la distinta agrupación de sus átomos que constituyen su molécula.

**Bagazo de caña:** Residuo de obtener el zumo de la caña.

**Basura:** Desechos, residuos de comida, papeles, trapos, cosas rotas y otros desperdicios.

**Becquerel (Bq) :** La unidad Internacional de actividad. Un Bq equivale a una desintegración por segundo.

**Biomasa:** Conjunto de productos de origen orgánico, generalmente vegetal, que son susceptibles a ser transformados en combustibles.

**Brea :** Sustancia resinosa extraída de plantas coníferas.

**Campo:** Región espacial en la cual se presentan fuerzas a distancia

**Campo poloidal:** campo magnético en dirección perpendicular a la sección menor del toroide.

**Campo toroidal:** campo magnético que circunda el centro del toroide.

**Carbón:** combustible sólido, formado por carbono amorfo.

**Carbón vegetal:** Sustancia sólida, ligera, negra, que resulta de la combustión incompleta de la leña o de la destilación de otros cuerpos orgánicos.

**Carbón mineral:** Sustancia fósil, dura, bituminosa, de color obscuro o negro formada en épocas geológicas por la descomposición parcial de materia vegetal fuera del acceso al aire y sometido a gran presión y temperatura

**Central eléctrica:** Instalación industrial para la producción de energía eléctrica a partir de otra forma de energía.

**Ciclo termodinámico:** Conjunto de procesos termodinámicos por los cuales pasa una sustancia, en los cuales se inicia y finaliza en el mismo estado termodinámico.

**Combustible:** sustancia que es capaz de reaccionar con el oxígeno con un pequeño aporte térmico y la posterior liberación rápida de calor.

**Combustibles avanzados:** Son aquellos elementos que al fusionarse entre ellos no producen neutrones como resultado de la reacción cuántica. Podemos mencionar las reacciones Deuterio- Helio y protón-Boro.

**Confinamiento.** Término que se refiere a la retención de material radioactivo.

Curie: Unidad de actividad establecida como la actividad de un gramo de radio, equivale a  $3.7 \times 10^{10}$  Bq o desintegraciones por segundo.

Deuterio: Isótopo del hidrógeno con un protón y un neutrón en el núcleo.

Energía: Característica básica e indefinible intrínseca de nuestro Universo.

Energía de enlace: Se define a la energía de enlace como la energía mínima necesaria para separar un nucleón del núcleo atómico.

Energético: Sustancia a la que se le extrae algún tipo de energía mediante alguna transformación.

Entalpía de formación: Para una sustancia se define como el cambio de entalpía que ocurre cuando un compuesto químico se forma a partir de sus elementos estables a presión constante.

1 electrón volt (1 eV): Medida de energía que equivale a la energía que adquiere un electrón al colocarlo en un potencial de un volt. Su equivalencia en el Sistema Internacional es  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

Estiércol: Excremento de cualquier animal.

Excitador: Elemento acoplado a un generador eléctrico que lo impulsa inicialmente.

Fisión: ruptura de un núcleo pesado en dos, con la liberación de neutrones y energía.

Fuerza de Lorentz: Fuerza que experimenta una carga eléctrica móvil en presencia de un campo electromagnético.

Fusión: Unión de dos núcleos ligeros para la creación de otro, con la consecuente liberación de energía.

Fusión fría: Esquema de fusión que se obtiene a temperaturas cercanas a la ambiental.

Fusión caliente: Esquema de fusión nuclear que ocurre a miles de grados kelvin.

Función de distribución de Maxwell o Maxwelliana: Es la función que obedece cualquier sistema que ha llegado a evolucionar libremente hasta alcanzar un estado de equilibrio.

Gas de agua: Antiguo combustible gaseoso formado por  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$ . Su obtención se realizaba a partir de Coque y vapor de agua.

Gray: Unidad de dosis de radiación absorbida. Es la energía depositada por unidad de masa.  $\text{Gray} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} / 1 \text{ kg}$ .

Isótopos: Elementos con el mismo número atómico pero con masas atómicas diferentes.

Leña: Madera utilizada para quemar.

Licor: resina proveniente de los arboles que puede quemarse casi como un combustible sólido.

Medio ambiente: Conjunto de circunstancias físicas que rodean a los seres vivos.

Moderador: en un reactor nuclear, elemento encargado de controlar la reacción en cadena de fusión mediante la absorción de neutrones libres. Generalmente se usa grafito, aunque puede usarse agua.

Nucleón: componentes del núcleo atómico, protones y neutrones.

Petróleo: Líquido oleoso más ligero que el agua de olor fuerte y color oscuro. Es una mezcla de hidrocarburos que se encuentra en los estratos superiores de la corteza terrestre.

Planta eléctrica: central productora de energía, central eléctrica.

Plasma: Gas cuyas moléculas o átomos han perdido uno o más de sus electrones, esto es un gas ionizado. El gas ionizado cambia sus propiedades y comportamiento notablemente, se pueden tener ondas de distinta clase, como son de presión, de oscilación de temperatura, campos eléctricos y campos magnéticos. El requisito para la generación de plasma es proporcionar al gas suficiente energía para que los electrones ligados a los átomos o moléculas puedan ser desprendidos, lo cual se logra produciendo una descarga eléctrica a través del gas, calentando el gas a temperaturas muy elevadas o mediante la incidencia de radiación electromagnética de alta energía a través del gas. Los ejemplos más cercanos de plasma son: en los tubos de neón, la ionosfera, el gas en el Sol y el fuego, siendo este último un ejemplo de un plasma fuera de equilibrio termodinámico en el que continuamente hay ionizaciones y recombinaciones, estas últimas producen la luz.

Poder Calorífico: Valor calorífico, entalpía de reacción o entalpía de combustión, es la energía liberada por el proceso de combustión y su valor, siempre es positivo.

Potencia: Propiedad termodinámica que se obtiene del cociente entre energía y tiempo.

Rad: Unidad tradicional de dosis de radiación absorbida. Es la centésima parte de un Gy.  
 $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$ .

Radiación: Energía o partículas materiales que se propagan a través del espacio. Forma de propagarse la energía o las partículas.

Refrigerante: En un reactor nuclear, elemento encargado de absorber el calor generado por el núcleo y transportar la energía hacia un intercambiador de calor acoplado al ciclo Rankine convencional. Se usa agua generalmente, pero también bióxido de carbono, Helio, y sodio líquido.

Rem: Unidad tradicional de dosis equivalente de radiación. Es la centésima parte de un Sv.  
 $1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv}$ .

Scrammed: Acción de introducir rápidamente las barras de control en un reactor nuclear.

Sievert: Unidad del Sistema Internacional de Unidades para la dosis equivalente de radiación, es igual a la dosis absorbida, Gy, por un factor de calidad, Q.

Singas: Nombre común para el carbón gasificado.

- Stellator:** Configuración magnética plausible para el confinamiento de plasma que resulta de crear un campo poloidal con una corriente eléctrica fuera del plasma y crea además un campo helicoidal.
- Sustancia activa:** Nombre que se le da a la sustancia que sufre los cambios y las transformaciones de energía que se presentan en un ciclo termodinámico.
- Tiempo de confinamiento de energía:** Tiempo que transcurre durante la ignición del plasma.
- Tiempo de duplicación:** Tiempo en el que un reactor de cría rápida duplica el material fisiónable con el que comenzó su operación.
- Tokamak:** es un sistema que contempla, principalmente, un plasma contenido en un campo magnético dentro de una cavidad de vacío toroidal. El campo magnético está torcido en hélices para que cada línea magnética sea aproximadamente de la misma longitud para reducir el escape del plasma. La parte externa del Tokamak es rodeado con mangotes superconductores.
- Toroide:** nombre que se utiliza en las publicaciones sobre fusión para designar al Toro, sólido de revolución formado por la rotación de un círculo alrededor de un eje no conexo.
- Tritio:** Isótopo del hidrógeno el cual consta de un protón y dos neutrones.
- Tunelización:** Efecto cuántico que se presenta entre dos nucleones que aún sin tener un potencial energético adecuado para vencer la barrera de potencial, se produce la fusión.
- Valor del desprendimiento de la evaporación del núcleo:** Temperatura que el núcleo de un reactor nuclear alcanza cuando la evaporación del refrigerante se presenta en toda la superficie de las barras de combustible.
- Vida media:** Es el tiempo que tarda un material radioactivo en perder la mitad de su actividad, o bien en llegar a la mitad de su concentración inicial por efectos del decaimiento.

## Factores de conversión

### Longitud

$$1 \text{ micrómetro} = 1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$$

### Volumen

$$1 \text{ Barril de petróleo} = 1 \text{ Bbl} = 0.15898 \text{ m}^3 = 158.98 \text{ lt}$$

### Masa

$$1 \text{ uma (unidad de masa atómica)} = 1.6604 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931 \text{ MeV}$$

### Energía

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 859.845 \text{ kcal} = 5.454 \times 10^4 \text{ BEP}$$

$$1 \text{ BEP} = \text{Un Barril Equivalente de Petróleo} = 6.4 \times 10^9 \text{ J} = 1833.33 \text{ kWh}$$

$$1 \text{ TEP} = \text{Una Tonelada Equivalente de Petróleo} = 42.2 \times 10^9 \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 1 \text{ electrónvolt (eV)} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.07 \times 10^{-9} \text{ uma}$$

### Potencia

$$1 \text{ W (Watt)} = 1 \text{ J/s} = 3.41316 \text{ Btu/hr} = 1.3405 \times 10^{-3} \text{ hp} = 0.85986 \text{ kcal/hr} = 1.359 \times 10^{-3} \text{ cv}$$

$$1 \text{ hp (horsepower, caballo inglés)} = 745.699 \text{ W} = 550 \text{ ft lb/s} = 1.014 \text{ cv} = 2544.5 \text{ Btu/h}$$

$$1 \text{ cv (cheval-vapeur, caballo)} = 735.3 \text{ W} = 75 \text{ kgf.m/s}$$

### Temperatura

$$\text{Temperatura asociada con } 1 \text{ eV} = 1 \text{ eV}/k = 11 \text{ 605 K}; (k = \text{cte. de Boltzman})$$

### Precios

$$1 \text{ USD} = 9.5 \text{ pesos}$$



## Bibliografía

1. AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA, *Balance de Energía OCDE*, 1990.
2. ASHLEY, Steven, "Turbines catch their second wind", en *Mechanical engineering*, vol. 114, núm. 11 (EE.UU., Noviembre, 1992), pp. 56-59.
3. ASHLEY, Steven, "Fuel-saving warship drives", en *Mechanical engineering, power*, vol. 120, núm. 8 (EE.UU., Agosto, 1998), pp. 65-67.
4. AZUELA, Luz Fernanda y José Luis TALANCIÓN, *Contra corriente, Historia de la energía nuclear en México*, México, IIS/Plaza y Valdés, 1999, 471 pp.
5. BHATTACHARYA, Tapan Kumar, "Homemade Watts for rural India", en *Spectrum*, vol. 31, núm. 10 (EE.UU., Octubre, 1994), pp. 44-46.
6. BRUCE, Mark A., "Solar versus nuclear is not so simple", en *letters de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 6 (EE.UU., junio, 1997), p. 6.
7. BULDULIAN, Silvia, *La radiactividad*, México, FCE, 1987. 121 pp. (La ciencia desde México, 42)
8. CASTILLO, Heberto, *Necesario plan de energéticos*, México, Representaciones y servicios de Ingeniería, S.A., 1978, 26 pp.
9. CASTRO Díaz-Balart, Fidel, *Energía nuclear y desarrollo*, Cuba, Ciencias Sociales, 1990. 391 pp.
10. CHANG, Raymond, *Química*, 4ª ed., México, McGraw-Hill, 1993. 117 pp.
11. CHERNOOSENKO, V.M., *Chernobyl, insight from the inside*, Alemania, Springer-Verlag Berlín, 1991. 357 pp.
12. CLARK, David, "Warming to the issue", en *letters de Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 5, (EE.UU., Mayo, 1999), p. 6
13. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, *Del fuego a la energía nuclear*, México, 1997. 61 pp.
14. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, *Evolución del sector eléctrico en México*, México, CFE, 1977. 154 pp.
15. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, *Catálogo de servicios 1995, división internacional*, México, CFE, 1995. 24 pp.

16. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, *Balance nacional de energía 1995*, México, CFE, 1996. 74 pp.
17. CULP, Archie W., *Principles of energy conversion*, EE.UU., Mc Graw-Hill, 1991. 551 pp.
18. DALMAU Costa, Alonso, *Programa Nuclear Nacional*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 1980, 8 pp. (serie Documentos, #4)
19. DAVIDSON, Jane and Byard WOOD, "Solar hot water for the home", en *Mechanical engineering*, vol. 118, núm. 8, (EE.UU., Agosto, 1996), pp. 60-62.
20. DE LA HERRÁN, José, "Y se hizo la luz... eléctrica", en *¿Cómo vez?*, Revista de divulgación de la ciencia de la Universidad Nacional Autónoma de México, Año 1, núm. 3, (México, Febrero, 1999), pp. 12-13
21. DEITZ, Dan, "Simulations keep oil plants clean", en *Mechanical engineering, power*, (primera edición de este suplemento), vol. 119, núm. 11, (EE.UU., Noviembre, 1997), pp. 9-10
22. ENRÍQUEZ Harper, Gilberto, *Elementos de centrales eléctricas (tomo I)*, México, Limusa, 1995. 738 pp.
23. *El financiero*, dir. Rogelio Cárdenas, año XIX, núm. 5459, (México D.F., martes 18 de Abril de 2000)
24. FLORES Valdés, Jorge y Arturo MENCHACA Rocha, *La gran ilusión IV: La fusión fría*, México, FCE, 1992, 90 pp. (La ciencia desde México, 110)
25. GARCÍA-COLÍN S., Leopoldo, *De la máquina de vapor al cero absoluto (Calor y entropía)*, México, FCE, 1997. 147 pp. (La ciencia para todos, 5)
26. HERMAN, David, "Power-plant innovation is a global goal", en *News and Notes de Mechanical engineering, power*, vol. 119, núm. 11, primera edición de este suplemento (EE.UU., Noviembre, 1997), p. 2.
27. HERMAN, Robin, *Fusión, la búsqueda de la energía eterna*, España, Mc Graw-Hill, 1993. 278 pp.
28. HILL, Richard C., "Solar no match for nuclear", en *letters de Mechanical engineering*, vol. 118, núm. 11 (EE.UU., Noviembre, 1996), p. 8
29. HINRICHS, Roger, *Energy*, EE.UU., Saunders College Publishing, 1991. 540 pp.
30. HUGHES, Jennifer, "As the antiworld turns", en *Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 4 (EE.UU., Abril, 1999), pp. 50-53

31. JAYADEV, Jay, "Harnessing the wind", en *Spectrum*, vol. 32, núm. 11 (EE.UU., Noviembre, 1995), pp. 78-83.
32. *La Jornada*, dir. Carmen Lira Saade, año 16, núm. 5609, (México D.F. viernes 14 de Abril de 2000)
33. *La Jornada*, dir. Carmen Lira Saade, año 16, núm. 5616, (México D.F. viernes 21 de Abril de 2000)
34. JUNGK, Robert, *El estado nuclear*, Barcelona, Crítica, 1979. 195 pp.
35. LYSEN, Erik H., "Photovoltaics for Villages", en *Spectrum*, vol. 31, núm. 10 (EE.UU., Octubre, 1994), pp. 34-39.
36. MAKUKATIN, Serge, "Water from the African Sun", en *Spectrum*, vol. 31, núm. 10 (EE.UU., Octubre, 1994), pp. 40-43.
37. MARTINELL Benito, Julio, *Los Prometeos modernos o el esfuerzo para controlar la fusión nuclear*, México, FCE, 1993. 121 pp. (La ciencia desde México, 106)
38. MEDVEDEV, Zhores, *El legado de Chernobil*, Barcelona, Pomares-Corredor, 1991. 397 pp.
39. MINCHENER, A.J., "Syngas Europa", en *Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 5, (EE.UU., Mayo, 1999), pp. 50-52
40. MORRISON, Gale, "Stirling renewal", en *Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 7, (EE.UU., Julio, 1999), pp. 62-65
41. NACIONES UNIDAS, 39ª estadística anual de energía (1992-1996), 1997. Número EN/241.STAT/437
42. O'CONNOR, Leo., "Gas turbine to power German Railroads", en *Mechanical engineering*, vol. 115, núm. 3, (EE.UU., Marzo, 1993), pp. 30
43. O'LEARY, Jay, "A new reactor for the new Europe", en *Mechanical engineering, power*, (primera edición de este suplemento), vol. 119, núm. 11, (EE.UU., Noviembre, 1997), pp. 11-13
44. PAI, David H., "Coal and the environment in China", en *Mechanical engineering, power*, (primera edición de este suplemento), vol. 119, núm. 11, (EE.UU., Noviembre, 1997), pp. 17-18
45. PACE UNIVERSITY CENTRE FOR ENVIRONMENTAL LEGAL STUDIES, *Environmental costs of electricity*, EE.UU., Oceana publications, 1991. 769 pp.

46. PERKINS, Michelle, "Minding the nuclear store", en *Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 3 (EE UU., Marzo, 1999), pp. 68-69.
47. PETRÓLEOS MEXICANOS, *Informe anual*, 1996, México, 1996.
48. PODER EJECUTIVO FEDERAL, *Informe de ejecución, Plan Nacional de Desarrollo 1999*, México, SHCP, unidad de Contabilidad Gubernamental e Informes sobre la gestión pública, marzo 2000, 391 pp.
49. REINHART, Eugene R., "Managing turbine-generator outages by computer", en *letters de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 12 (EE.UU., Diciembre, 1997), p. 8.
50. RICKARDS Campbell, Jorge y Ricardo CAMERAS Ross, *Las radiaciones II. El manejo de las radiaciones nucleares*, México, FCE, 1991. 103 pp. (La ciencia desde México, 94)
51. ROE, K Keith, "The Global Generation", *Mechanical engineering, power*, (EE.UU., Julio, 1999), pp. 24-27.
52. ROO, Herman E., "Benefits of and concerns about Dams", EE.UU., en *ICOLD report of Beijing 2000*, 2000, 36 pp.
53. RUBBIA, Carlo y Nino CRISCENTI, *El dilema nuclear*, México, Grijalbo, 1991. 206 pp. (Los Noventa, 54)
54. SHALLENBERG, William H., "Tower power", en *letters de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 3 (EE.UU., Marzo, 1997), p. 4.
55. SECRETARÍA DE ENERGÍA, *Balance Nacional, energía 1995*, México, SE, 1996, 47 pp.
56. SWEET, William, "Power & Energy", en *Spectrum*, vol. 33, núm. 1 (EE.UU., Enero, 1996), pp. 70-75.
57. SOCIEDAD ESTATAL PARA LA EXPOSICIÓN UNIVERSAL SEVILLA 92, *Energía*, España, 1992. 88 pp.
58. STRONG, Steven J., "Power windows", en *Spectrum*, vol. 33, núm. 10 (EE.UU., Octubre, 1996), pp. 49-55.
59. STEWART, Walter R., "Solar power is not all it seems", en *letters de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 12 (EE.UU., Diciembre, 1997), p. 8.
60. TONDA, Juan, *El oro solar y otras fuentes de energía*, México, FCE, 1993.150 pp. (La ciencia desde México, 119)
61. THOMAS, Steve, "Comentarios a la 'propuesta de reforma estructural de la industria eléctrica mexicana' ", en *Problemas del desarrollo*, UNAM-IIEc, vol. 30, núm. 118 (México, Julio/Septiembre 1999), pp. 85-140.

62. TORPEY, et. al., "The fate of R&D in the competitive era", en *Mechanical engineering, power*, vol. 119, núm. 11, primera edición de este suplemento (EE.UU., Noviembre, 1997), pp. 14-16
63. VALENTI, Michael, "Gas turbines helps solar power", en *letters de Mechanical engineering*, vol. 118, núm. 7 (EE.UU., Julio, 1996), p. 12.
64. VALENTI, Michael, "Turbine's first Asian installation", en *Mechanical engineering*, vol. 118, núm. 12 (EE.UU., Diciembre, 1996), p. 10.
65. VALENTI, Michael, "Tower power to fight pollution", en *News and notes de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 1 (EE.UU., Enero, 1997), p. 10.
66. VALENTI, Michael, "Cleaning up after high-sulfur coal", *Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 2 (EE.UU., Febrero, 1997), p. 66-70.
67. VALENTI, Michael, "Wind-turbine technology advances in Europe", en *News and notes de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 6 (EE.UU., Junio, 1997), p. 10.
68. VALENTI, Michael, "New gas turbine designs push the envelope", en *Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 8, (EE.UU., Agosto, 1997), pp. 58-61.
69. VALENTI, Michael, "More efficient wind power", en *News and notes de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 9 (EE.UU., Septiembre, 1997), p. 9.
70. VALENTI, Michael, "Minimizing spent nuclear fuel", en *News and notes de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 11 (EE.UU., Noviembre, 1997), p. 10.
71. VALENTI, Michael, "Farming the heartland wind", en *News and Notes de Mechanical engineering, power*, (primera edición de este suplemento), vol. 119, núm. 11, (EE.UU., Noviembre, 1997), p. 2.
72. VALENTI, Michael, "The high price of nuclear phaseout", en *Mechanical engineering, power*, (primera edición de este suplemento), vol. 119, núm. 11, (EE.UU., Noviembre, 1997), pp. 6-8.
73. VALENTI, Michael, "More than 1 million hours", en *News and Notes de Mechanical engineering*, vol. 119, núm. 12, (EE.UU., Diciembre, 1997), p. 10.
74. VALENTI, Michael, "Turning sludge into fule", en *News and Notes de Mechanical engineering*, vol. 120, núm. 5, (EE.UU., Mayo, 1998), p. 10-11.
75. VALENTI, Michael, "A next-generation reactor", en *Mechanical engineering, power*, vol. 120, núm. 8 (EE.UU., Agosto, 1998), pp. 68-71.
76. VALENTI, Michael, "Turbines for synthesis gas", en *Mechanical engineering, power*, vol. 120, núm. 8 (EE.UU., Agosto, 1998), pp. 72-73.

77. VALENTI, Michael, "Partners in power", en *Mechanical engineering, power*, vol. 120, núm. 8 (EE.UU., Agosto, 1998), pp. 74-78.
78. VALENTI, Michael, "Proving wind power in New England", en *Mechanical engineering, power*, vol. 120, núm. 8 (EE UU., Agosto, 1998), pp. 79-80.
79. VALENTI, Michael, "Making gas turbines safer", en *News and notes de Mechanical engineering*, vol. 120, núm. 9 (EE.UU., Septiembre, 1998), pp. 8.
80. VALENTI, Michael, "Advanced gasifire for biomass", en *News and notes de Mechanical engineering*, vol. 120, núm. 9 (EE.UU., Septiembre, 1998), pp. 10.
81. VALENTI, Michael, "Oil sand kicks into high gear", en *Mechanical engineering*, vol. 120, núm. 12, (EE.UU., Diciembre, 1998), p. 59.
82. VALENTI, Michael, "A vote for nuclear power", en *News and notes de Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 5, (EE.UU., Mayo, 1999), p. 14.
83. VALENTI, Michael, "Nowhere to hide", en *Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 7, (EE.UU., Julio, 1999), pp. 57-59.
84. VALENTI, Michael, "U-turn for NO<sub>x</sub>", en *Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 10 (EE.UU., Octubre, 1999), pp. 60-62.
85. Varios, "Solar energy dwellings in the Netherlands", en *IEEE power engineering*, vol. 16, núm. 9 (EE.UU., Septiembre, 1996), pp. 3-4.
86. Varios, "Adjusting to mother nature", en *Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 7, (EE.UU., julio, 1999), pp. 54-56.
87. VÉLEZ Ocón, Carlos, *Cincuenta años de energía nuclear en México*, México, UNAM-PUE, 1997 106 pp. (Documentos de análisis y prospectiva del Programa Universitario de Energía)
88. VIZCAÍNO Murray, Francisco, *México ante la energía nuclear*, México, Instituto Nacional de Energía Nuclear, 1977, 21 pp.
89. WARK, Kenneth, *Termodinámica*, 5ª ed., México, McGraw-Hill, 1991. 923 pp.
90. WHITAKER, Michael, "A vote for nuclear power", en *letters de Mechanical engineering*, vol. 121, núm. 5, (EE.UU., Mayo, 1999), p. 8.
91. GSWAMI, Yogi y Daniel M. BLAKE, "Cleaning up with sunshine", en *Mechanical engineering*, vol. 118, núm. 8, (EE.UU., Agosto, 1996), p. 56-59.
92. ZORPETTE, Glenn , "Power & Energy", en *Spectrum*, vol. 32, núm. 1 (EE.UU., Enero, 1995), pp. 56-59.