

**Modelado de Sistemas en el Dominio Físico**

by

Gilberto Gonzalez Avalos

B.A.(University of Northern South Dakota at Hoople) 1978  
M.S. (Ed's School of Quantum Mechanics and Muffler Repair Shop) 1989

A dissertation submitted in partial satisfaction of the  
requirements for the degree of  
Doctor of Philosophy

in

Aboriginal Basketry

in the

GRADUATE DIVISION

of the

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY

Committee in charge:  
Professor Ignatius Arrogant, Chair  
Professor Ivory Insular  
Professor General Reference

2008

The dissertation of Gilberto Gonzalez Avalos is approved:

---

Chair

Date

---

Date

---

Date

University of California, Berkeley

2008

# Modelado de Sistemas en el Dominio Físico

Copyright 2008

by

Gilberto Gonzalez Avalos

## Resumen

Modelado de Sistemas en el Dominio Físico

by

Gilberto Gonzalez Avalos

Doctor of Philosophy in Aboriginal Basketry

University of California, Berkeley

Professor Ignatius Arrogant, Chair

Theses have elements. Isn't that nice?

---

Professor Ignatius Arrogant  
Dissertation Committee Chair

# Índice general

<b>1. Centrales Termoeléctricas Complejas y Condensadores</b>	<b>1</b>
1.1. Planta Termoeléctrica Convencional . . . . .	1
1.1.1. Ciclo Rankine Básico . . . . .	2
1.1.2. Ciclo de Recalentamiento . . . . .	5
1.1.3. Ciclo Regenerativo . . . . .	8
1.2. Planta Termoeléctrica de Ciclo Combinado . . . . .	8
1.3. Planta Termoeléctrica de Ciclo Binario . . . . .	14
1.4. Condensadores . . . . .	18
1.4.1. Tipos de Condensadores . . . . .	21
1.4.2. Agua de Enfriamiento para Condensadores . . . . .	22
1.4.3. Calor Rechazado por el Ciclo . . . . .	24
1.4.4. Torres de Enfriamiento . . . . .	24
1.4.5. Circuitos Abiertos de Enfriamiento . . . . .	28
1.4.6. Estanques de Enfriamiento . . . . .	28
<b>2. Centrales Nucleoeléctricas</b>	<b>29</b>
2.1. Definición . . . . .	29
2.2. Bosquejo Histórico . . . . .	29
2.3. Constitución Atómica de la Materia . . . . .	32
2.4. Número Atómico y Número Másico . . . . .	34
2.5. Isótopos . . . . .	35
2.6. Reacciones Químicas y Nucleares . . . . .	37
2.7. Tipos de Reacciones Nucleares . . . . .	40
2.8. Reacción en Cadena . . . . .	48
2.9. Constitución de una Pila Atómica . . . . .	49
2.10. Materiales Empleados en los Reactores Nucleares . . . . .	50
2.11. Tipos de Reactores Nucleares . . . . .	52
2.11.1. Reactor de Agua en Ebullición . . . . .	54
2.11.2. Reactor de Agua a Presión . . . . .	55
2.11.3. Reactor Refrigerado por Gas . . . . .	57
2.11.4. Reactor Refrigerado por Aire . . . . .	58
2.11.5. Reactor de Agua Pesada . . . . .	59

2.11.6. Reactor de Sodio-Gráfico . . . . .	61
2.11.7. Reactor Reprodutor Rápido . . . . .	62
2.11.8. Reactor Homogéneo. . . . .	64
2.12. Unidades de la Radiación y Medición . . . . .	65
2.13. Ciclo del Combustible Nuclear . . . . .	68
<b>3. Otras Fuentes de Energía</b>	<b>73</b>
3.1. Energía Solar . . . . .	73
3.1.1. Características de la Radiación Solar . . . . .	74
3.1.2. Tipos de Radiación . . . . .	75
3.1.3. Aprovechamiento de la Energía Solar . . . . .	76
3.1.4. Sistemas Pasivos . . . . .	77
3.1.5. Sistemas Activos . . . . .	78
3.1.6. Tipos de Colectores . . . . .	78
3.1.7. Conversión Eléctrica: Sistemas Fotovoltaicos . . . . .	84
3.1.8. Sistema Solar Fotovoltaico (Ssfv) . . . . .	85
3.2. Energía Eólica . . . . .	86
3.2.1. La eoloelectricidad en el mundo . . . . .	87
3.2.2. La energá eólica en México . . . . .	87
3.2.3. Central de La Venta, Oaxaca . . . . .	88
3.3. Energía Maremotriz . . . . .	90
3.3.1. Fenómeno de la marea . . . . .	92
3.3.2. Tipos de mareas . . . . .	94
3.3.3. Funcionamiento de una central maremotriz . . . . .	95
3.3.4. Ciclos de funcionamiento de la una central maremotriz . . . . .	96
3.4. Energía de las olas . . . . .	99
3.4.1. Técnicas de utilización energética del olaje . . . . .	100
3.4.2. OWC Rectificador Russel . . . . .	102
3.4.3. OWC péndulo . . . . .	103
3.4.4. OWC duck o Pato Salter . . . . .	104
3.4.5. OWC Cilindro Bristol . . . . .	106
3.4.6. OWC Raft o Balsa Cockerell . . . . .	107
3.4.7. OWC Rompeolas Sumergido . . . . .	108
3.4.8. OWC Columna Oscilante . . . . .	109
3.4.9. OWC Shoreline o Convertidor Belfast . . . . .	110
3.5. Biomasa . . . . .	110
3.5.1. Fuentes de biomasa . . . . .	113
3.5.2. Aplicaciones de la Biomasa . . . . .	117
3.5.3. Conversión de la biomasa en energía . . . . .	118
3.5.4. ¿Cómo es una central de biomasa? . . . . .	119
<b>4. Algunos Dispositivos Comunes de las Centrales Eléctricas</b>	<b>121</b>
4.1. Excitatrices . . . . .	121
4.1.1. Principales sistemas de excitación . . . . .	122
4.1.2. Importancia de asegurar una excitación continua . . . . .	123

4.1.3. Características eléctricas de las excitatrices . . . . .	124
4.2. Reguladores de Velocidad . . . . .	127
4.2.1. Problemática de la Regulación de las Turbinas de Vapor . . . . .	128
4.3. Reguladores de Voltaje . . . . .	130
4.4. Otros Dispositivos Auxiliares . . . . .	133
4.4.1. Protección preventiva contra las averías en los aislamientos. . . . .	133
4.4.2. Vigilancia de la ventilación . . . . .	135
4.4.3. Protección preventiva contra las averías mecánicas . . . . .	137
4.4.4. Protección contra los deterioros internos del aislamiento . . . . .	137
4.4.5. Protección contra las perturbaciones externas . . . . .	139

**Bibliografía**

# Capítulo 1

## Centrales Termoeléctricas

## Complejas y Condensadores

### 1.1. Planta Termoeléctrica Convencional

Una central de generación es una instalación completa con el objeto de producir energía eléctrica. La energía eléctrica se produce como resultado de una serie de transformaciones de energía, los cuales se realizan dentro de la central, a partir de una energía disponible, que para el caso de las termoeléctricas, es la energía química almacenada en un combustible. En la Figura 1.1 se presenta un diagrama general de una central termoeléctrica incluyendo los sistemas principales. Este diagrama es sólo representativo de una Central Termoeléctrica típica y puede tener variaciones según cada central real en particular.

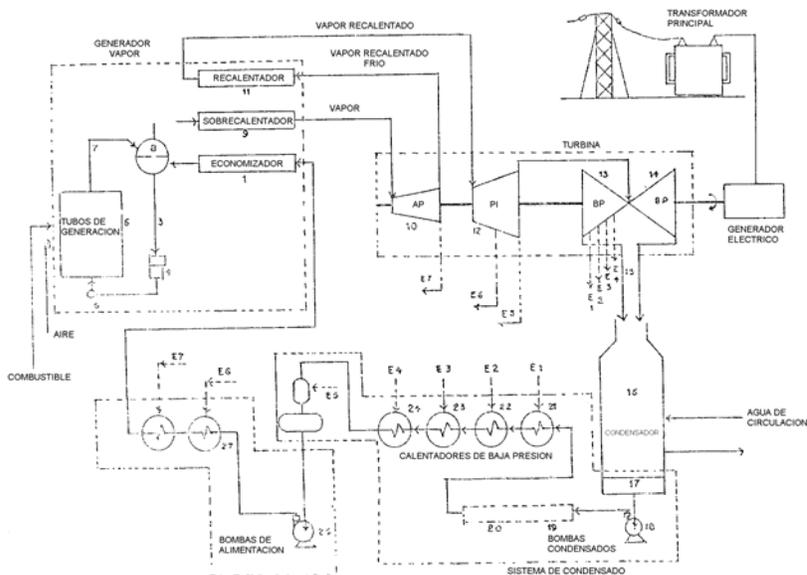


Figura 1.1. Diagrama General de una Central Termoeléctrica.

### 1.1.1. Ciclo Rankine Básico

La planta de generación de vapor ideal que aparece en la figura 1.2 se puede analizar mediante el ciclo Rankine, cuyos diagramas presión volumen y temperatura entropía aparecen en la figura 1.3.

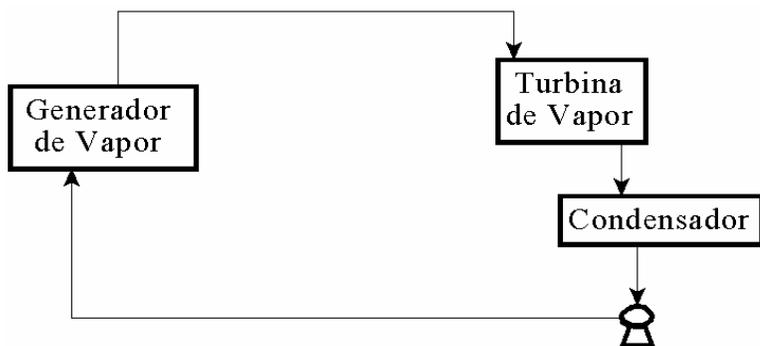


Figura 1.2. Planta de generación de vapor elemental.

El vapor saturado descargado por la caldera a una presión  $P_1$  es suministrado a la turbina, en donde se expande isoentrópicamente hasta la presión  $P_2$ . En el condensador se transforma el vapor húmedo isobárica a isotérmicamente, en líquido saturado mediante la remoción de calor. Puesto que la presión  $P_2 = P_3$  es mucho menor que la presión del vapor en la caldera  $P_4 = P_1$ , un líquido saturado mediante la remoción de calor. Se bombea isoentrópicamente hasta alcanzar la presión  $P_4$ .

El líquido comprimido es suministrado a la caldera, en donde se calienta primero hasta su temperatura de saturación correspondiente a la presión  $P_1$ , y luego se evapora hasta transformarse finalmente en vapor saturado seco para terminar el ciclo.

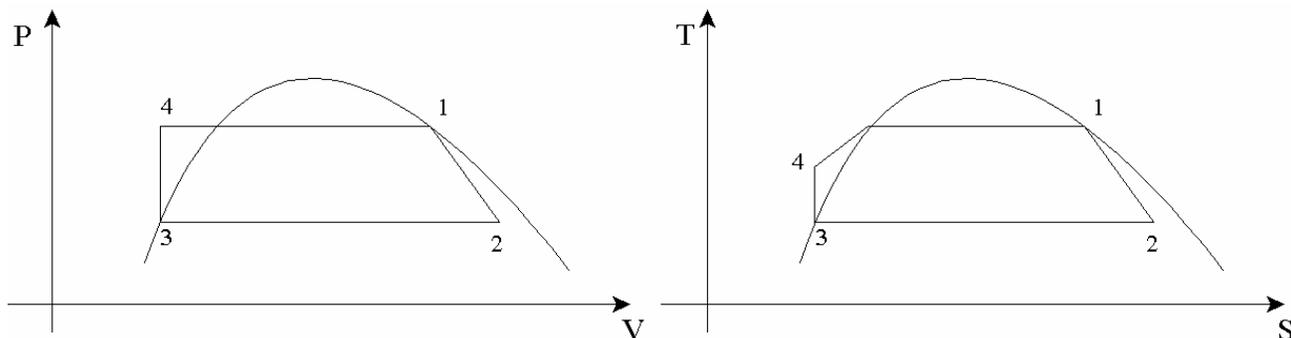


Figura 1.3 Diagramas P-V y T-S del ciclo Rankine

La eficiencia del ciclo Rankine ideal, puede obtenerse de la definición original de eficiencia.

$$e = \frac{\text{Trabajo Neto o Util}}{\text{Trabajo entregado al sistema}} \quad (1.1)$$

El trabajo desarrollado por la turbina, despreciando diferencias de energía cinética y potencial es:

$$W_c = h_1 - h_2 \quad (1.2)$$

El trabajo que requiere la bomba es:

$$W_b = h_4 - h_3 \quad (1.3)$$

El trabajo neto es:

$$W_n = W_t - W_b \quad (1.4)$$

Por otro lado, la energía por unidad de masa que toma el agua en el generador de vapor es:

$$Q = h_1 - h_4 \quad (1.5)$$

Entonces la eficiencia será

$$\begin{aligned} e &= \frac{W_n}{Q} = \frac{W_t - W_b}{Q} \\ e &= \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \end{aligned} \quad (1.6)$$

La diferencia de entalpía en el proceso isoentrópico 3-4 (bomba) puede calcularse mediante la expresión:

$$W_b = h_4 - h_3 = \int_3^4 v dp = v_3 (p_4 - p_3) \quad (1.7)$$

Esto es considerando incompresible al líquido. El trabajo requerido por la bomba es generalmente muy pequeño comparado con el trabajo desarrollado por la turbina.

$$W_t \ll W_b \quad (1.8)$$

De manera que la expresión (2.6) generalmente se simplifica así

$$e \simeq \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4} \quad (1.9)$$

La eficiencia térmica del ciclo puede aumentarse si se incrementa la entalpía del vapor suministrado a la turbina. Dicha entalpía puede incrementarse aumentando la temperatura del vapor en la caldera, este calentamiento se logra mediante un sobrecalentador, el cual permite aumentar isobéricamente la entalpía del vapor.

### 1.1.2. Ciclo de Recalentamiento

Se llama así al ciclo en el cual, el vapor después de haber pasado por parte de la turbina, se extrae de la misma para llevarse al generador de vapor y eliminar la humedad recalentándose a presión constante, el arreglo queda de la forma: que se muestra en la figura 1.4.

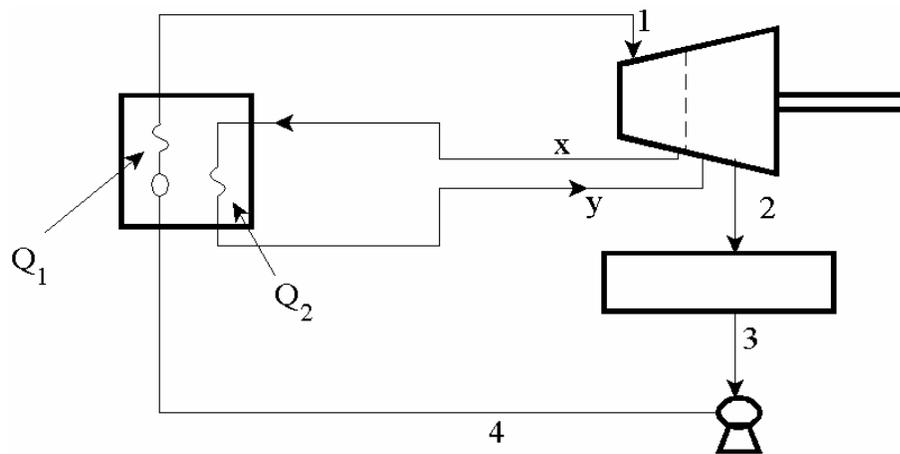


Figura 1.4. Ciclo de Recalentamiento.

La eficiencia, que es la energía que se entrega a la turbina respecto a la que recibe el ciclo, esto es:

$$e = \frac{(h_1 - h_x) + (h_y - h_2)}{Q_1 + Q_2} \quad (1.10)$$

donde  $Q_1$  es el calor que absorbe el agua en el generador de vapor y  $Q_2$  es el calor que absorbe el vapor en el recalentador.

El cálculo de  $Q_1$  y  $Q_2$  se determina por,

$$Q_1 = h_1 - h_4 \quad (1.11)$$

$$Q_2 = h_y - h_x \quad (1.12)$$

por lo tanto

$$e = \frac{(h_1 - h_x) + (h_y - h_2)}{(h_1 - h_4) + (h_y - h_x)} \quad (1.13)$$

Esta expresión determina la eficiencia termodinámica del ciclo para un paso o etapa de recalentamiento.

El diagrama T-S para este ciclo queda como la figura 1.5.

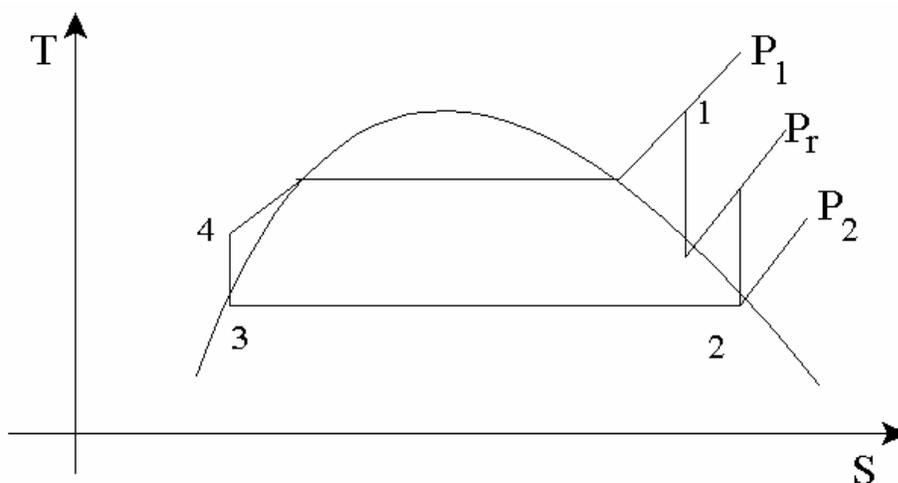


Figura 1.5. Diagrama T-S con un paso de Recalentamiento.

Para una central que tenga dos o más extracción de recalentamiento la eficiencia se define con base en el concepto ya antes dado, sea por ejemplo el arreglo mostrado en la figura 1.6.

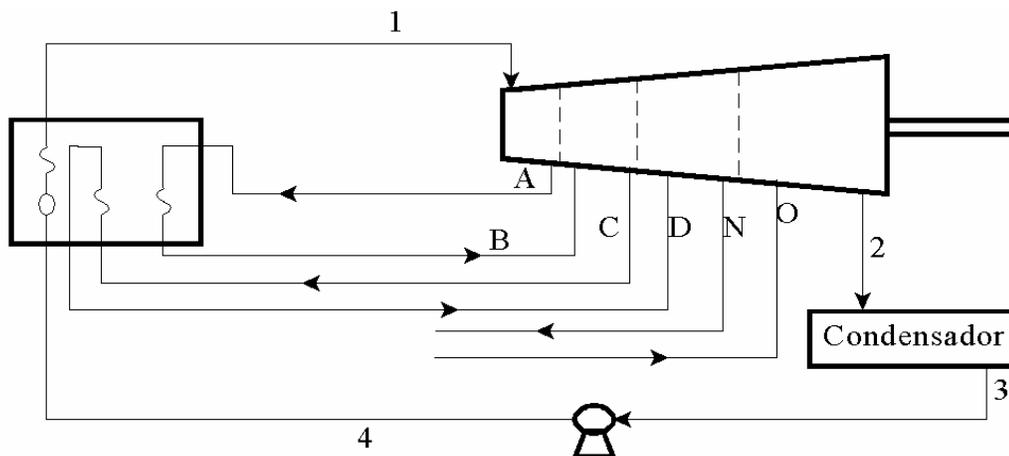


Figura 1.6. Ciclo de recalentamiento con varios pasos.

La eficiencia será entonces

$$e = \frac{(h_1 - h_A) + (h_B - h_C) + (h_D - h_N) + (h_o - h_2) + \dots}{(h_1 - h_4) + (h_B - h_A) + (h_D - h_C) + (h_o - h_N) + \dots} \quad (1.14)$$

Desde luego no es posible instalar un número muy grande de pasos de recalentamiento ya que el costo resulta prohibitivo y los incrementos en la eficiencia, a medida que se incrementa el número de pasos es cada vez más pequeño, la gráfica de la figura 1.7 nos muestra como varía la eficiencia con las etapas de recalentamiento.

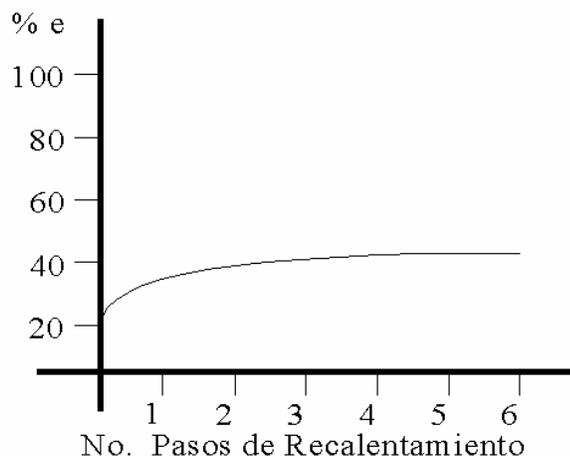


Figura 1.7. Variación de la eficiencia con las etapas de recalentamiento.

Es necesario hacer un análisis técnico-Económico para decidir el número de recalentamientos.

### 1.1.3. Ciclo Regenerativo

## 1.2. Planta Termoeléctrica de Ciclo Combinado

La idea básica de éste ciclo es extraer parte del vapor que ya ha sido usado en la turbina, pero a una presión superior a la que opera el condensador, y usarlo para calentar el agua de alimentación a la caldera, de esta forma se recupera la energía que libera el vapor extraído al condensarse, es decir, disminuye el calor rechazado en el condensador. La Figura 1.8 muestra un arreglo donde se tiene un calentador de contacto directo.

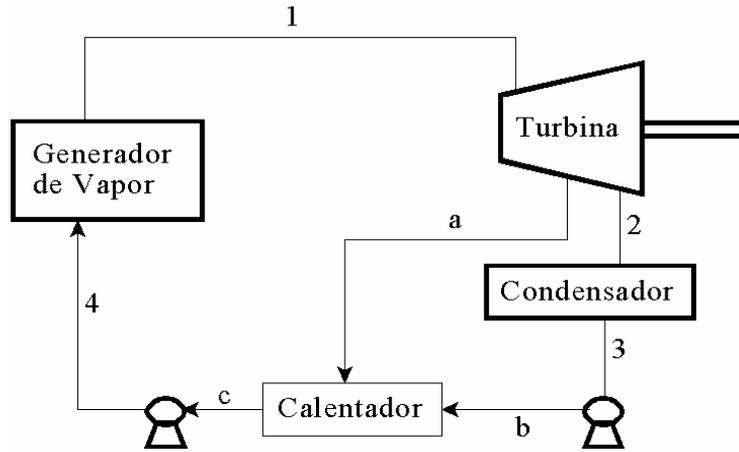


Figura 1.8. Ciclo regenerativo con calentador de contacto directo.

En este caso el vapor de extracción y el condensado se mezclan en un calentador abierto para lograr un líquido saturado. Las presiones del vapor del líquido saturado y del condensador deben ser las mismas, por lo que es necesario otra bomba para introducir el agua a la caldera. Para este caso el flujo de masa de vapor en la extracción se determina mediante un balance de masa de vapor en extracción se determina mediante un balance de masa y energía considerando las diferencias de energía cinética y potencial se tiene:

$$\dot{m}_b h_b + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_c h_c \quad (1.15)$$

$$\dot{m}_b + \dot{m}_a = \dot{m}_c \quad (1.16)$$

pero

$$\dot{m}_c = \dot{m}_1; \dot{m}_b = \dot{m}_c - \dot{m}_a \quad (1.17)$$

sustituyendo la expresión anterior

$$(\dot{m}_c - \dot{m}_a) h_b + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_1 h_c \quad (1.18)$$

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_c - h_b}{h_a - h_b} \quad (1.19)$$

per también se tiene,

$$h_b = h_3 = h_{f2} \text{ y } h_c = h_{fa} \quad (1.20)$$

entonces,

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}} \quad (1.21)$$

de esta manera la eficiencia del ciclo termodinámico es,

$$e = \frac{\dot{m}_1 (h_1 - h_a) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_a) (h_a - h_2)}{\dot{m}_1 (h_1 - h_4)} \quad (1.22)$$

$$e = \frac{(h_1 - h_a) + \left(1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1}\right) (h_a - h_2)}{(h_1 - h_4)} \quad (1.23)$$

El diagrama Temperatura-Entropía se muestra en la Figura 1.9.

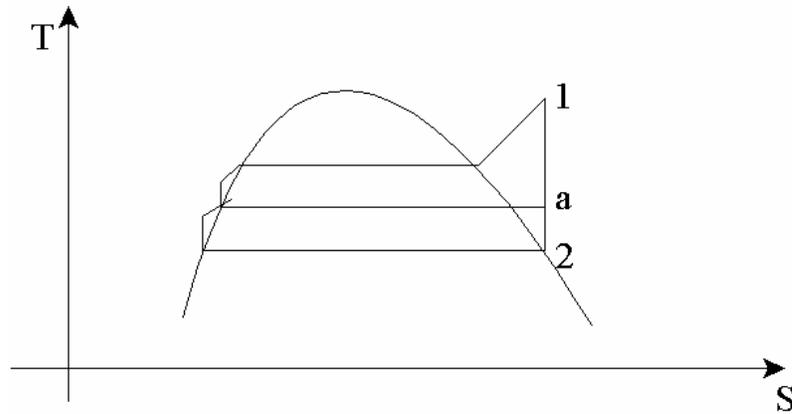


Figura 1.9. Diagrama T-S Ciclo Regenerativo

Un arreglo más común es el mismo ciclo regenerativo pero con un calentador de superficie, para una sola extracción el sistema quedaría como el mostrado en la figura 1.10.

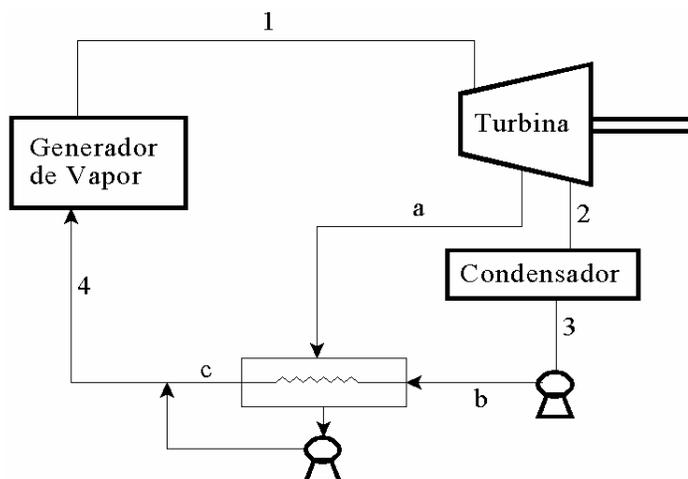


Figura 1.10. Ciclo Regenerativo con calentador de superficie.

En este caso el agua de alimentación y el vapor de extracción pueden estar a diferentes presiones en el intercambiador de calor. El condensado que rodea los tubos de agua de alimentación puede ser retornado hacia esta línea mediante una pequeña bomba o bien eliminarse mediante una trampa de vapor.

Cuando se tiene esta instalación el agua de alimentación no es posible que alcance la temperatura del condensación del vapor de extracción, si esto se deseara la superficie de calefacción del calentador tendría que ser prácticamente infinita.

Sin embargo, puede considerarse una diferencia de temperatura entre el agua caliente y vapor de un valor muy pequeño. Para los objetivos del presente material puede considerarse de un valor malo.

Como en el caso del ciclo de recalentamiento, se pueden tener arreglos con dos o más extracciones, es de esperarse que al aumentar el número de éstas se incremente la eficiencia, pero también este caso se tienen limitaciones de índole económica.

Para el caso de dos extracciones, el arreglo se muestra en la figura 1.11.

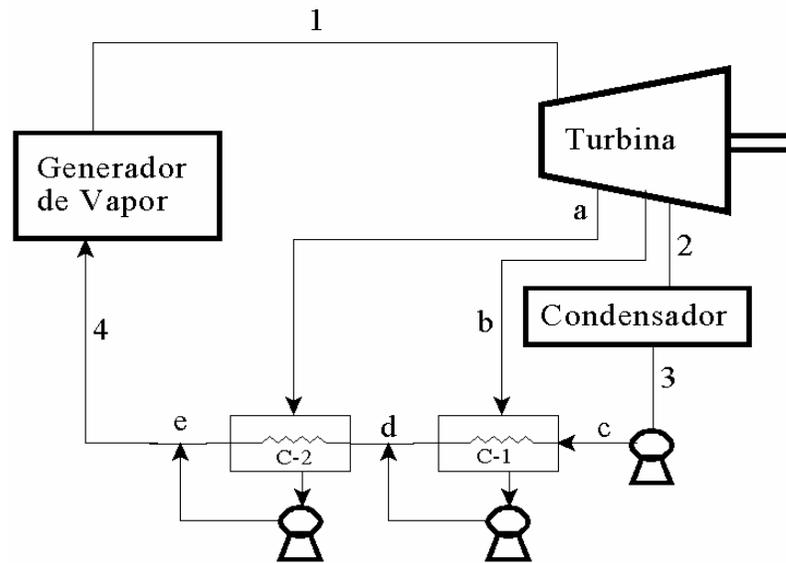


Figura 1.11. Ciclo Regenerativo con dos extracciones.

El diagrama Temperatura-Entropía es el mostrado en la figura 1.12.

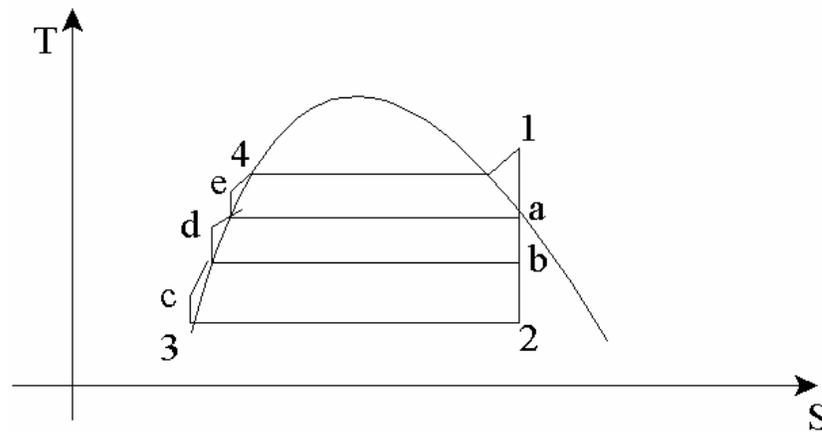


Figura 1.12. Diagrama de Mollier para el ciclo Rankine con dos calentadores.

Los flujos de extracción  $\dot{m}_a$  y  $\dot{m}_b$  pueden obtenerse mediante un balance de energía.

Para el calentador C-1 se tiene:

$$\dot{m}_b(h_b - h_{fb}) = (\dot{m}_1 - \dot{m}_a - \dot{m}_b)(h_d - h_c) \quad (1.24)$$

como

$$h_d = h_{fb}; h_c = h_3 \quad (1.25)$$

$$\dot{m}_b(h_b - h_{fb}) = (\dot{m}_1 - \dot{m}_a - \dot{m}_b)(h_{fb} - h_3) \quad (1.26)$$

En el calentador  $C - 2$

$$\dot{m}_a(h_a - h_{fa}) = (\dot{m}_1 - \dot{m}_a)(h_e - h_d) \quad (1.27)$$

también se tiene,

$$h_e = h_{fa}; h_d = h_{fd} \quad (1.28)$$

$$\dot{m}_a(h_a - h_{fa}) = (\dot{m}_1 - \dot{m}_a)(h_{fa} - h_{fb}) \quad (1.29)$$

Desarrollando y simplificando, se tiene,

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_{fa} - h_{fb}}{h_a - h_{fb}} \quad (1.30)$$

Desarrollando y simplificando (1.26) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_1} = \left(1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1}\right) \left(\frac{h_{fb} - h_3}{h_b - h_3}\right) \quad (1.31)$$

entonces la eficiencia termodinámica para este ciclo es,

$$e = \frac{(h_1 - h_a) + \left(1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1}\right)(h_a - h_b) + \left(1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} - \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_1}\right)(h_b - h_2)}{(h_1 - h_4)} \quad (1.32)$$

Comúnmente en las Centrales Termoeléctricas de mediana y alta capacidad se tienen pasos regenerativos y de recalentamiento, al aumentar el número de éstos la eficiencia del ciclo de Carnot.

### 1.3. Planta Termoeléctrica de Ciclo Binario

Antes de definir éstos, es oportuno mencionar que hasta ahora hemos considerado el agua así como único fluido de trabajo, sin embargo, no es el único fluido usado en los sistemas de generación de vapor, a continuación se mencionan las propiedades deseables de un fluido para estos fines.

- a) Alta temperatura crítica, para permitir la evaporación a elevadas temperaturas.
- b) Bajas presiones de saturación a las temperaturas máximas, con esto se reduce al mínimo la presión y consecuentemente el costo.
- c) Presión por encima de la temperatura de condensación, a fin de eliminar las fugas de aire.
- d) Las líneas de presión en el diagrama h-s deben divergir rápidamente.
- e) Un valor elevado de la entalpía de evaporación, con el objeto de reducir al mínimo el flujo de masa para una determinada potencia de salida
- f) Aspectos no degradantes, no corrosivos, no incrustantes.
- g) Rasgos no peligrosos, no tóxicos ni inflamables.
- h) Bajo costo y alta disponibilidad.

Este es un fluido ideal y no existe realmente, el agua satisface los puntos d,e, g y h, si se analizan otras sustancias se ve que tienen propiedades mejores que el agua, en algunos puntos, sin embargo, el agua sigue predominando en centrales termoeléctricas.

El estudio termodinámico de diversas sustancias como el mercurio, sodio, potasio, azufre, bioxido de carbono, refrigerantes, etc. ha dado lugar al diseño de los llamados ciclos binarios.

Un ciclo binario es el sistema en el cual existen, por definición dos fluidos de trabajo, de hecho existen dos tipos de ciclos binarios que se han desarrollado.

I. Cuando se utilizan dos fluidos de trabajo siguiendo cada fluido un ciclo Rankine, las presiones de vapor de estas sustancias son distintas, de forma que la presión de saturación del denominado fluido superior coincida, aproximadamente, con la presión de vaporización del denominado fluido inferior o sea, que el condensador del fluido superior sirve de generador de vapor para el fluido inferior. Aunque se han intentado muchos ciclos binarios, el de mayor importancia de este tipo es el que, utiliza vapor de mercurio como fluido superior y vapor de agua como fluido inferior.

La figura 1.13 muestra la instalación correspondiente donde el fluido superior (mercurio) es calentado y evaporado en el Generador de vapor  $G$  y conducido después a la turbina  $T_1$ , produciendo energía eléctrica en  $G_1$ , el vapor de escape de esta turbina se conduce a un condensador-Caldera  $C_1$ , donde el calor de condensación del fluido superior lo absorbe el fluido inferior evaporándose. El vapor condensado del fluido superior se bombea nuevamente a la caldera  $G$  y con ella se completa el ciclo o región superior del ciclo binario.

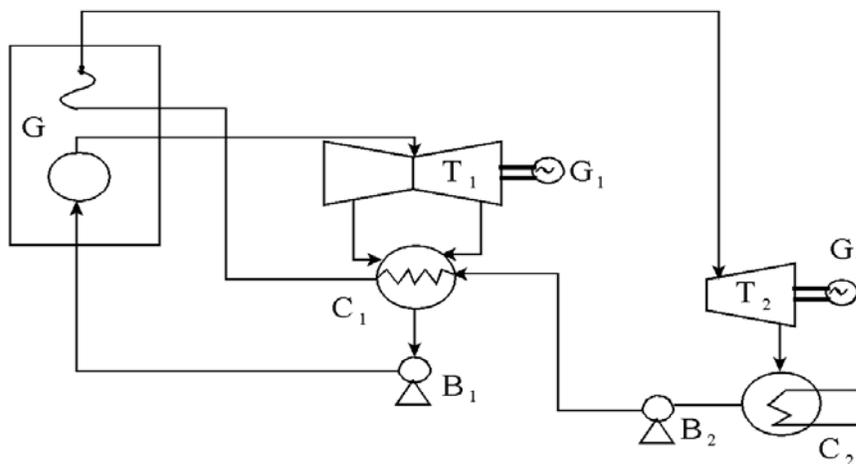


Figura 1.13. Ciclo binario vapor de agua-vapor de mercurio.

El fluido inferior refrigera el vapor del fluido superior en el condensador-caldera hasta su condensación. Al mismo tiempo este fluido al evaporarse se lleva a la generador de vapor  $G$  para su sobrecalentamiento y posteriormente va a la turbina inferior  $T_2$  donde se produce energía eléctrica en el generador  $G_2$ . El vapor de escape de esta turbina se hace pasar por un condensador  $C_2$  y se envía nuevamente al condensador-caldera  $C_1$ , completándose así el ciclo inferior y también el ciclo binario. En la figura 1.14 se muestra el diagrama temperatura entropía del ciclo binario. La parte superior correspondiente al mercurio y la parte inferior al agua.

Para este ciclo binario se pueden alcanzar eficiencias termodinámicas cercanas a 60%; sin embargo, tiene algunas limitaciones para una realización práctica masiva, entre las que se encuentran las siguientes:

- Como el calor latente de vaporización del mercurio es solamente de 70 a 75 Kcal/kg se necesitan varios kilogramos de ese metal por cada kilogramo de agua.
- El costo del mercurio es elevado.
- El vapor de mercurio, en grandes cantidades, es venenoso y hay que tener severas precauciones para impedir fugas a la atmósfera donde se encuentran los operadores de la planta.

A pesar de estos inconvenientes, la tendencia actual es hacia la puesta en marcha de estas centrales y se estudia activamente la forma de disminuir los inconvenientes citados; la mayoría de las instalaciones actuales están en los Estados Unidos.

Como fluidos superiores del ciclo binario también se han estudiado otras sustancias como: Bromuro de Aluminio, cloruro de zinc amoniacal, óxido de difenilo, potasio, etc.,

reservándose siempre el papel de fluido inferior al vapor de agua. Sin embargo, los trabajos realizados con estos fluidos no están suficientemente avanzados y por lo tanto no existen aún centrales termoeléctricas que operen con tales fluidos.

II. Se le denomina también ciclo binario cuando se tiene un sistema donde uno de los llamados fluidos de trabajo no sigue el ciclo Rankine, sino simplemente un proceso determinado comúnmente en un cambiador de calor donde se usa como fluido superior, el agua, el aire, etc. y como fluido inferior algún refrigerante. La figura 1.14 muestra un arreglo de este tipo donde un fluido caliente transfiere calor a un refrigerante el cual sigue un ciclo rankine, teniéndose entonces turbinas que operen con estas sustancias.

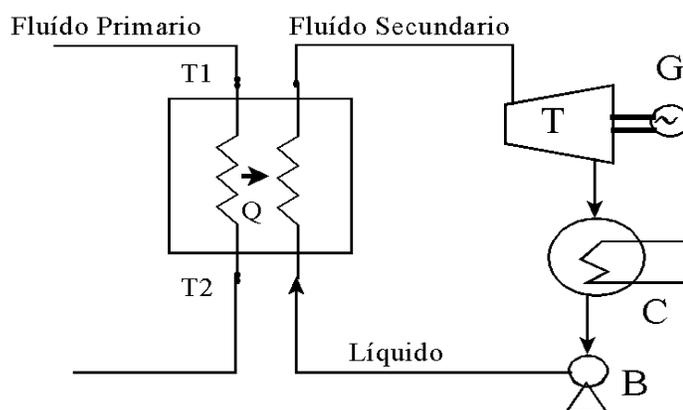


Figura 1.14. Ciclo binario del tipo II.

Se usan estos sistemas, especialmente cuando se desea energía de un fluido que podríamos llamar de desecho que ya no hay otra forma factible de restarle energía para transformarla en eléctrica. Un problema que se está experimentando en México, es aprovechar la energía de los pozos geotérmicos, cuando estos en vez de producir vapor de agua, producen líquido caliente, saturado o subenfriado o bien líquido residual de los separadores en las etapas de flasheo; también mediante un ciclo binario podría recuperarse energía, para

convertirla en electricidad, de los gases de combustión antes de descargarlos a la atmósfera en las centrales termoeléctricas del país.

Algunos de los refrigerantes más comunes se enumeran a continuación:

No. de referencia	Nombre
11	Triclorofluorometano
12	Diclorodifluorometano
21	Clorodifluorometano
22	Clorodifluorometano
32	Fluoruro de Metilo
40	Cloruro de Metilo
113	Triclorotrifluorometano
152a	Difluoroetano
290	Pentano
600	Butano
600a	Isobutano
717	Amoniaco
1270	Propileno

## 1.4. Condensadores

El vapor que sale por el escape de una turbina de vapor, dependiendo del diseño de esta última puede seguir dos caminos diferentes:

- Usarse para otros procesos (Turbina de vapor sin condensación). Se da este caso cuando la turbina descarga el vapor con una entalpía considerable, puede canalizarse hacia una turbina de baja presión o bien para un proceso industrial, este último se da en las centrales termoeléctricas que se tienen en empresas como Pemex, Fertimex, etc. y en algunas de la iniciativa privada especialmente en la industria química o Petroquímica.
- Condensarse (Turbina con condensación). Es el caso general de las termoeléctricas de la CFE, donde al condensarse el vapor, permite aprovechar más energía y recuperar el agua para alimentarse de nuevo al generador de vapor.

La condensación del vapor de escape se efectúa en el condensador, como se muestra en la figura 1.15. La condensación es un proceso inverso a la ebullición de tal manera que al llevarse a cabo se desprende calor, que como antes se mencionó tiene valor energético superior a la energía eléctrica generada en la planta correspondiente, este calor se entrega a otro fluido, comunmente agua de enfriamiento. Las principales ventajas del uso de condensadores en las centrales termoeléctricas son,

- Disminución de la presión de escape con el consiguiente aumento de la energía aprovechable.
- Recuperación del condensado para utilizarlo como agua de alimentación.

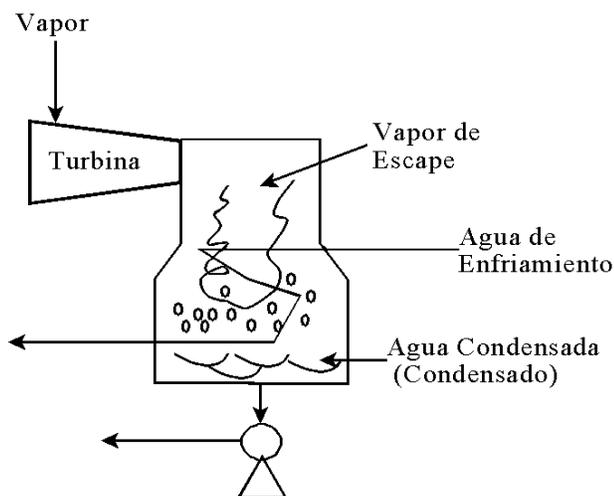


Figura 1.15. Condensador de una central termoeléctrica.

Ambos casos contribuyen al mejoramiento de la eficiencia de la planta, por ejemplo en referente al primer punto, del diagrama de Mollier se puede demostrar que la energía teóricamente disponible expansionando isoentrópicamente el vapor de agua desde la presión atmosférica y saturado seco, hasta una presión absoluta de  $0.2 \text{ Lb/plg}^2$  es de  $250 \text{ BTU/Lb}$ ,

este valor es igual prácticamente al que se obtiene con un vapor de  $175 \text{ Lb/plg}^2$  y  $750^{\circ}F$  si se expansiona isoentrópicamente hasta dejarlo en condiciones atmosféricas, o sea a  $14.7 \text{ Lb/plg}^2$  y  $212^{\circ}F$  y seco.

Para visualizar más objetivamente el efecto del condensador, se realizará un cálculo de la eficiencia termodinámica, de una planta sin condensador con los costos que se indican en el esquema de la figura 1.16.

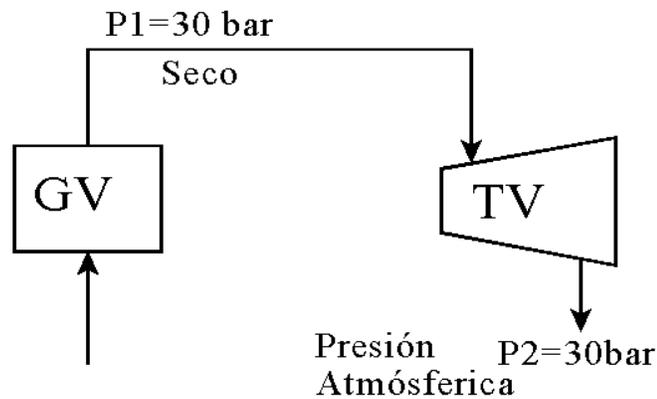


Figura 1.16. Ejemplo de planta termoeléctrica.

De las tablas de vapor

$$h_1 = 2804,2 \text{ KJ/Kg} \text{ y } S_1 = 6,1869 \text{ KJ/Kg } ^{\circ}C$$

Considerando el proceso isoentrópico en la turbina se tiene,

$$h_2 = 2237,4 \text{ KJ/Kg}, x_2 = 0,806$$

Entonces la eficiencia termodinámica es,

$$e = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{f2}} = 0,237$$

Para esta misma planta, considerando un condensador se obtiene una eficiencia de 0,33.

Otra ventaja que se tiene en algunos condensadores, es la eliminación de gases no condensables, como el aire en las centrales convencionales, el cual al no condensarse es arrastrado por el condensado y genera problemas de corrosión fundamentalmente en el generador de vapor. Estos gases se eliminan mediante un sistema de eyectores o bombas de vacío que mantienen la baja presión deseada en el condensador.

#### 1.4.1. Tipos de Condensadores

Los utilizados en las plantas termoeléctricas son,

- De contacto directo o mezcla. Estos son aquellos en los cuales el vapor y el agua refrigerante están en contacto directo, donde el vapor se condensa cediendo calor, mismo que toma el agua, aumentando la temperatura de ésta hasta la de saturación, saliendo entonces del condensador líquido saturado, como se muestra en la figura 1.17.

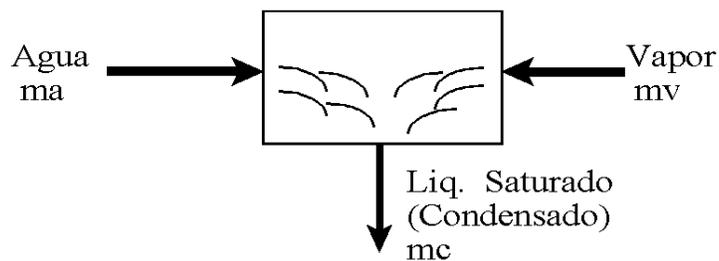


Figura 1.17. Condensador de mezcla.

Si se consideran nulas las pérdidas en el condensador (en la práctica son del orden de 2%) y se desprecian las diferencias de energía cinética y potencial, se puede escribir,

$$\dot{m}_a h_a + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_c h_c$$

además

$$\dot{m}_a + \dot{m}_v = \dot{m}_c$$

de estas expresiones se puede calcular el flujo de agua de enfriamiento.

- De superficie. Los condensadores de superficie son los más utilizados en las centrales termoeléctricas son aquellos en los cuales el agua de refrigerante y el vapor se encuentran separados por medio de una pared metálica a través de la cual se realiza la transmisión de calor. Este condensador está formado de un cilindro cerrado en sus extremos, como se muestra en la figura 1.18, y a través de su longitud se encuentran un haz de tubos de pequeño diámetro (del orden de 25 mm) y que se encuentran conectados en los extremos por dos cabezales cuyo material puede ser bronce. En los condensadores de superficie el agua de enfriamiento necesaria para condensar un  $1Kg$  de vapor es mayor de aquella que corresponde en el condensador de mezcla., ya que se requiere una diferencia de temperatura significativa entre el agua y el vapor de manera que se tenga a través de los tubos una buena transmisión de calor.

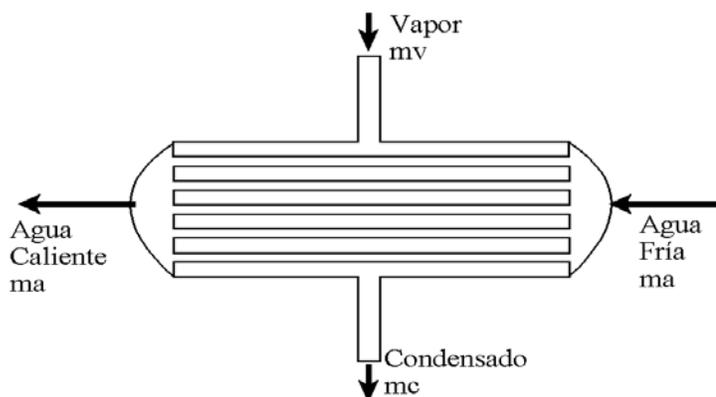


Figura 1.18. Condensador de superficie.

#### 1.4.2. Agua de Enfriamiento para Condensadores

En los condensadores de superficie el calor cedido por el vapor de escape es igual al absorbido por el agua de circulación, despreciando las pérdidas, con base en esto se puede

escribir,

$$\dot{m}_v (h_v - h_c) = \dot{m}_a (h_s - h_e)$$

donde  $\dot{m}_v$  es el flujo de vapor que entra al condensador,  $h_v$  es la entalpía del vapor,  $h_c$  es la entalpía del condensador (normalmente líquido saturado),  $h_e$  es la entalpía del agua fría,  $h_s$  es la entalpía del agua caliente y  $\dot{m}_a$  es el flujo de agua de enfriamiento.

Los flujos de agua típicos para el rechazo de calor en un condensador para una central termoeléctrica de 1000 MW son:

- Condensador de un paso, se requiere  $70m^3/seg$ , para  $5^{\circ}C$  de elevación de temperatura.
- Condensador de un paso, se requiere  $35m^3/seg$ , para  $10^{\circ}C$  de elevación de temperatura.
- Torre de enfriamiento mecánica, requiere  $26m^3/seg$ . para  $15^{\circ}C$  de elevación de temperatura.

En realidad el agua de enfriamiento necesario para una central termoeléctrica no sólo se requiere para el condensador, deben considerarse también los siguientes sistemas:

- Enfriamiento de aceite para chumaceras de la turbina de vapor.
- Enfriamiento del generador eléctrico. Este equipo debe tener un sistema de enfriamiento, a base de hidrógeno o aire que a su vez son enfriados con agua en un cambio de calor.
- Enfriamiento de equipos auxiliares como ventiladores, motores eléctricos grandes, compresores, etc.

Para el caso del condensador, además del vapor de la turbina de vapor llegan a él flujos de drenes de equipos como eyectores, calentadores, etc., por lo que la cantidad de calor que recoge el condensador, tomando en cuenta esto último es,

$$Q_c = \dot{m}_v (h_v - h_c) + \dot{m}_d (h_d - h_c)$$

donde  $\dot{m}_d$  y  $h_d$  es el flujo y entalpía de los drenes que fluyen del condensador.

### 1.4.3. Calor Rechazado por el Ciclo

El calor que el ciclo Rankine rechaza en el condensador, es eliminado al medio ambiente por alguno de los siguientes métodos,

- Torres de enfriamiento
- Circuitos abiertos en los cuales el agua de enfriamiento se toma del mar, ríos o lagos grandes y se regresa a los mismos después de absorber el calor en el condensador.
- Estanques de enfriamiento
- Condensadores enfriados por aire

### 1.4.4. Torres de Enfriamiento

Son cambiadores de calor en donde el aire atmosférico absorbe el calor que el agua de enfriamiento tomó en el condensador., tal como se muestra en la figura 1.19.

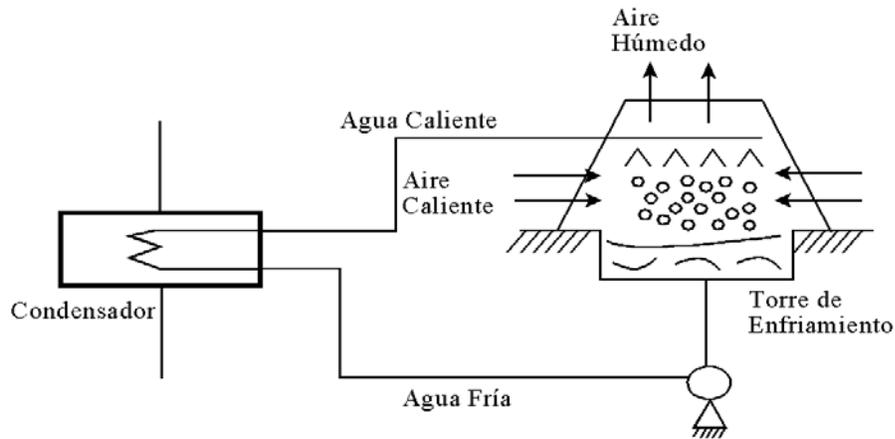


Figura 1.19. Torre de Enfriamiento.

Un balance de energía lleva a la siguiente expresión,

$$Q_{rech} = Q_{agua} = Q_{aire}$$

es decir, el calor que rechaza el ciclo en el condensador lo toma el agua y esta a su vez lo entrega al aire.

En forma más explícita,

$$\dot{m}_a (h_s - h_e) = \dot{m}_A (h_2 - h_1)$$

donde  $\dot{m}_A$  es el flujo de aire en la torre de enfriamiento,  $h_2$  es la entalpía del aire a la salida de la torre de enfriamiento y  $h_1$  es la entalpía del aire al entrar a la torre de enfriamiento.

### Clasificación

Las torres de enfriamiento se pueden clasificar de la manera siguiente,

$$\text{Torre de Enfriamiento} \left\{ \begin{array}{l} \text{Húmedas} \left\{ \begin{array}{l} \text{Tiro Natural} \\ \text{Tiro Mecánico} \end{array} \right. \\ \text{Secas} \end{array} \right.$$

Las torres húmedas, la transferencia de calor del agua al aire se lleva a cabo teniendo contacto directo estos fluidos. La refrigeración se obtiene haciendo que el agua se convierta en una fina lluvia por medio de una corriente de aire, como se muestra en la figura 1.19. Al tener contacto estos fluidos parte del agua se evapora mezclándose con el aire y el calor que absorbe al evaporarse ocasiona el enfriamiento de la masa líquida.

En las torres de enfriamiento de tiro natural el movimiento del aire es debido solamente al cambio de densidad de éste. este tipo de torres presentan las siguientes ventajas y desventajas,

#### 1. Ventajas

- a) Es una estructura estática por lo que su funcionamiento es confiable y requiere de poco mantenimiento.
- b) Son estructuras altas, por lo que al descargar el aire húmedo a una altura grande no existe el problema de recirculación.

#### 2. Desventajas

- a) Por lo general la construcción de estas torres requiere de una superficie mayor en su base que las de tiro mecánico y su inversión inicial es mayor.
- b) La temperatura del agua de enfriamiento es más elevada lo que trae como consecuencia una ligera reducción de la potencia del turbogenerador y un incremento en el consumo de combustible.

En las torres de tiro mecánico la circulación del aire se hace con el auxilio de un ventilador que puede ser de tiro forzado o bien de tiro inducido, se tienen las siguientes

ventajas y desventajas,

### 1. Ventajas

- a) Se obtiene un enfriamiento mayor con lo cual se puede obtener un incremento en la potencia de la turbina.
- b) Ofrece una mayor flexibilidad en su operación y se requiere de una inversión inicial menor.

### 2. Desventajas

- a) Requieren para su operación el uso de ventiladores ocasionando un consumo mayor de energía, requieren también de más mantenimiento y paros para revisión de las partes en movimiento.
- b) Tiene algunos problemas de recirculación con la descarga de aire húmedo a alturas cercanas al nivel de suelo.

La elección del tipo de torre de enfriamiento depende de un análisis técnico económico influyendo en buena parte las condiciones climatológicas así como la utilización anual de la central y la variación de la potencia de la turbina con la temperatura. De acuerdo con estas consideraciones en México se usa más el tipo de torres de enfriamiento con trío mecánico, muchas plantas termoeléctricas (Salamanca, Tula, etc.) tienen este tipo de torres.

En las torres de enfriamiento de tipo seco la transferencia de calor no hay contacto directo entre el agua y el aire ya que el agua fluye a través de serpentines, tienen la ventaja de no tener pérdidas de agua por evaporación, tienen todavía poco desarrollo tecnológico por lo que su costo actual es elevado.

#### 1.4.5. Circuitos Abiertos de Enfriamiento

Es posible instalar este sistema de enfriamiento cuando la planta está cerca del mar, de un lago grande o de algún río caudaloso, de esta fuente se bombea el agua a la planta retornando nuevamente a su lugar de origen como agua caliente, tal como se muestra en la figura 1.20. En este caso debe tenerse mucho cuidado para evitar la contraminación térmica, elevando, por ejemplo, la temperatura del agua de un algo afectando la flora y fauna de la región. En México existen varias plantas con estos sistemas como Manzanillo, Laguna Verde, etc.

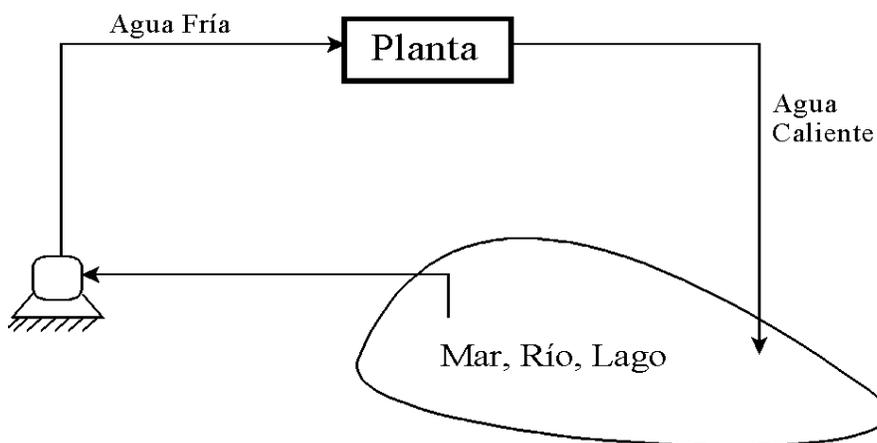


Figura 1.20. Circuito abierto de enfriamiento.

#### 1.4.6. Estanques de Enfriamiento

Es un sistema similar al anterior con la diferencia de que el estanque de agua se construye en forma artificial, se instalan mamparas para obligar al agua a seguir una cierta trayectoria para que se enfríe antes de ser succionada por el sistema de bombeo.

## Capítulo 2

# Centrales Nucleoeléctricas

### 2.1. Definición

Una planta nucleoeléctrica es aquella que aprovecha la energía producida en una reacción nuclear (generalmente fisión), para generar calor y usarlo en la producción de vapor y con este siguiendo un proceso similar al de las termoeléctricas convencionales, producir energía eléctrica.

### 2.2. Bosquejo Histórico

El concepto del átomo lo tenían ya los griegos al que consideraban indivisibles, como la parte más pequeña a que podía reducirse la materia. Esta idea duró hasta que se descubrieron las reacciones nucleares en forma natural a fines del siglo XIX y principios del presente.

En 1895 Wilhem Rontgen estudiando los rayos catódicos descubrió casualmente los

rayos X, conocidos también como rayos Rontgen, se desconocía la fuente de su procedencia hasta que en 1896 Henri Becquerel llegó a la conclusión que tales radiaciones eran de origen atómico.

Por esa misma época Rutherford descubrió que el átomo está constituido por un núcleo y partículas girando alrededor de el, viéndose con ello la falsa idea de la invisibilidad del átomo.

El matrimonio Piere y Maria Curie se dedicó al estudio de las propiedades del Uranio, descubrieron en este proceso al Polonio y posteriormente un nuevo elemento radioactivo, el radio, en 1898.

Posteriormente Max Von Lave descubrió que los rayos X son del grupo de rayos electromagéticos y que se diferencian de estos por la frecuencia elevada de sus oscilaciones.

En 1898 Max Plank estableció el concepto del fotón.

En 1900 desarrolló la Teoría Cuántica que se funda en el hecho de que toda clase de energía discontinúa, es decir que la naturaleza nos suministra, por ejemplo la luz en pequeños "paquetes".

En 1905 Eisnten concibió la transformación de la masa en energía y lo resumió en la fórmula  $E = mc^2$ .

En 1938 Otto Hahn y Fritz Strassmann intentaron producir los llamados transuránicos al someter al uranio a los efectos de radiación con neutrones lentos.

A finales de 1938 Lise Meitner quien era miembro de este grupo de investigadores contribuyó en gran manera a interpretar los resultados de estas investigaciones. Los experimentos realizados en Berlín aportaron finalmente la prueba de la desintegración nuclear.

Enrico Fermi demostró en 1942 en una pila atómica construída en Chicago una reacción de fisión en cadena controlada. Por las circunstancias de la segunda guerra mundial, los conocimientos y técnicas obtenidas se orientaron hacia la construcción, de la bomba atómica, la cual se usó por primera vez en las ciudades de Hiroshima y Ngasaki en 1945. Así, se le dieron las primeras aplicaciones prácticas a la enorme energía que se obtiene al desintegrar el átomo. Sin embargo, al finalizar la guerra, la humanidad buscó dominar esta energía y aplicarla para fines útiles, como su medicina, en genética, en la generación de energía eléctrica, etc.

La primera planta nucleoelectrica a escala comercial fué la Çalder Hall.<sup>en</sup> Inglaterra en 1956. A partir de entonces se han instalado en el mundo en los países más desarrollados una cantidad considerable de plantas nucleares, en Francia, por ejemplo, el 20% aproximadamente, de la energía eléctrica generada es de este tipo.

Dada la inminente terminación de los combustibles fósibles (petróleo, carbón) en futuro relativamente cercano todo parece indicar que la energía nuclear los vendrá a sustituir.

En el periodo 1953-1954 se desarrollaron las primeras investigaciones sobre la fusión nuclear controlada la cual se podrán construir reactores nucleares "limpios.<sup>es</sup> decir, libres de radiaciones.

México ya ha iniciado el aprovechamiento de la energía nuclear para producir electricidad. Se construyó la planta nucleoelectrica de Laguna Verde, 77 Km al norte de la ciudad de la ciudad de Veracruz, dicha planta consta de dos unidades de 650 Mw cada una, la primera de las cuales entró en operación en el año 1989.

### 2.3. Constitución Atómica de la Materia

Todas las cosas, todos los cuerpos que podemos conocer están constituídos por moléculas, éstas a su vez por átomos los cuales constarán, de un núcleo central donde se encuentran unas partículas llamadas protones de carga eléctrica positiva, además de los protones también se encuentran otras, partículas llamadas neutrones. Alrededor del núcleo se mueven otras partículas llamadas electrones de carga eléctrica negativa y de igual magnitud que la de los protones, los electrones siguen órbitas elípticas y espaciales entorno al núcleo.

El elemento más sencillo que existe es el hidrógeno. Un átomo de hidrógeno consta de un núcleo sencillo constituído por un protón, y de un electrón orbital, como se muestra en la Figura 2.1.

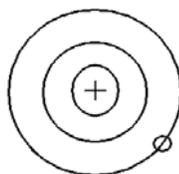


Figura 2.1. Atomo de hidrógeno.

El elemento más simple luego del hidrógeno es el Helio, cuyo átomo se muestra en la Figura 2.2, consta de dos protones y dos neutrones en el núcleo, además de dos electrones orbitales.

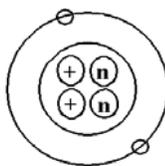


Figura 2.2. Atomo de helio.

El átomo de Litio consta de un núcleo con cuatro neutrones y tres protones y de tres electrones que giran alrededor del núcleo, como se ve en la Figura 2.3.

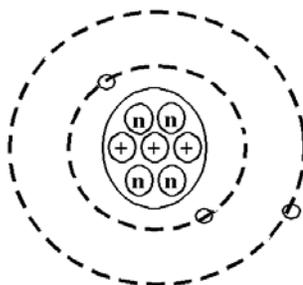


Figura 2.3. Atomo de litio.

Todos los elementos en condiciones normales son neutros eléctricamente, o sea que las cargas eléctricas positivas y negativas están equilibradas, esto lleva a inferir que el número de protones en el núcleo es igual al número de electrones. Solamente cuando se rompe este equilibrio (por ejemplo por pérdidas de un electrón exterior), el cuerpo se vuelve buen conductor de electricidad positiva, o negativa en el caso de capture electrones.

Por tanto, las fuerzas electrostáticas producidas por las cargas eléctricas positivas y negativas, mantienen al átomo unido. En cuanto a la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidas las partículas del núcleo (venciendo la repulsión de los protones entre si) es muy compleja, pero si se sabe que éstas fuerzas son mucho más intensas que las fuerzas electrostáticas, por lo tanto si se llega a romper esta cohesión nuclear la energía desarrollada es fabulosa.

En el caso de átomo de Uranio, tiene un núcleo con 92 protones y 146 neutrones, además de 92 electrones orbitales como se muestra en la Figura 2.4.

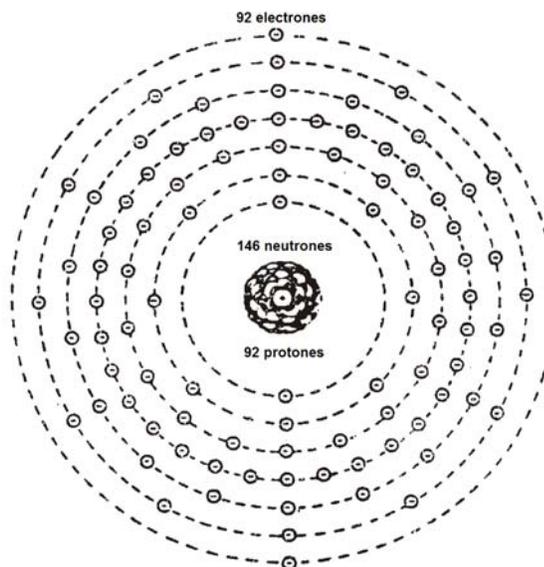


Figura 2.4. Atomo de uranio.

Cada protón o cada neutrón tienen una masa 1840 veces mayor que la masa de un electrón. El protón, por otra parte, tiene la misma masa que el neutrón, es decir, prácticamente, toda la masa del átomo puede suponerse concentrada en el núcleo.

## 2.4. Número Atómico y Número Másico

Número Atómico  $Z$ , es el número de protones que hay en el núcleo de un átomo que es el igual al número de electrones en condiciones normales. Este número de protones es lo que diferencia a un elemento de los demás, por ejemplo, para el oxígeno el número atómico, es 8, si de alguna manera se varía, el número de protones del núcleo del átomo del oxígeno, se tendrán otros elementos diferentes.

Número Másico  $A$ , éste expresa el número total de partículas contenidas en el núcleo atómico. Por ejemplo, el número másico del Uranio 238, es el número másico del hidrógeno es uno, etc.

En las reacciones nucleares es común, indicar tanto el número másico como el número atómico, de acuerdo a la siguiente convención.

$${}^A_Z E$$

donde  $E$  denota el elemento,  $A$  es el número másico y  $Z$  es el número atómico. Por ejemplo para el Uranio se tiene,

$${}^{238}_{92}U$$

En la Tabla 2.1 se exponen los número másicos y atómicos de algunos elementos.

Elemento	$A$	$Z$	Símbolo Atómico
Hidrógeno	1	1	${}^1_1H$
Helio	4	2	${}^4_2He$
Litio	7	3	${}^7_3Li$
Boro	11	5	${}^{11}_5B$
Carbono	12	6	${}^{12}_6C$
Oxígeno	16	8	${}^{16}_8O$
Sodio	23	11	${}^{23}_{11}Na$
Uranio	238	92	${}^{238}_{92}U$

## 2.5. Isótopos

Muchas veces sucede que dos átomos tienen el mismo número de protones y de electrones pero difieren, en el número de neutrones en el núcleo.

Estos átomos pertenecen al mismo elemento, por lo tanto tienen las mismas propiedades químicas pero generalmente diferentes propiedades atómicas. A estos elementos se les llama Isótopos, tienen el mismo número atómico pero, difieren en el número másico, a continuación se explican algunos ejemplos.

El hidrógeno tiene en su núcleo un protón y alrededor de él gira un electrón, pero existen otros dos isótopos del hidrógeno. El hidrógeno 2 o deuterio cuyo núcleo consta de

un protón y un neutrón, tal como se muestra en la figura 2.5 y con el símbolo atómico  ${}^2_1H$ .

Por otro lado existe el hidrógeno 3 o tritio cuyo núcleo consta de un protón y dos neutrones.

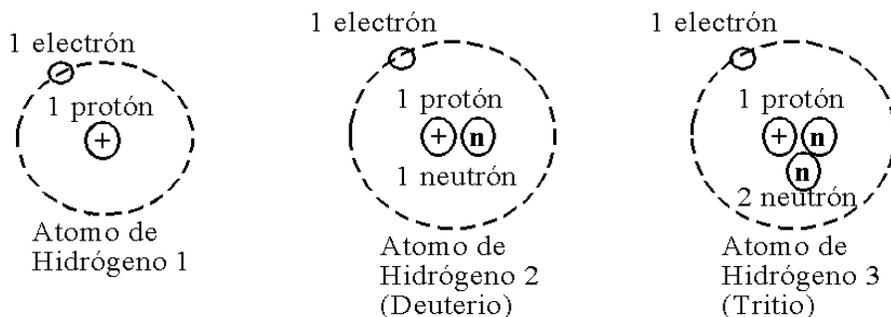


Figura 2.5. Isótopos del hidrógeno.

El más abundante en la naturaleza es el hidrógeno 1, la proporción de hidrógeno 2 es de una parte por cada 6700 partes de hidrógeno 1 y la proporción de hidrógeno 3 es todavía más pequeña.

En realidad lo que se llama hidrógeno es una mezcla de estos 3 isótopos con fuerte preponderancia del hidrógeno 1, por lo tanto se puede considerar que las propiedades de esta mezcla coinciden con las del hidrógeno 1, sin embargo, si el Deuterio se separa de la mezcla, tiene propiedades muy diferentes a las del hidrógeno 1. Lo mismo se puede decir de todos los elementos químicos, todos ellos son mezclas en cada caso de las propiedades del isótopo más abundante.

El Uranio es el material más importante empleado en las centrales nucleares, tiene varios isótopos siendo el más abundante el Uranio 238 (número másico). Los isótopos de este elemento son dados en la Tabla 2.2.

Uranio	233	${}^{233}_{92}U$
Uranio	235	${}^{235}_{92}U$
Uranio	236	${}^{236}_{92}U$
Uranio	238	${}^{238}_{92}U$
Uranio	239	${}^{239}_{92}U$

## 2.6. Reacciones Químicas y Nucleares

Veamos lo que sucede en el interior de un átomo cuando se produce una reacción química; tomemos para ello el ejemplo de la combustión del carbono, durante la combustión cada átomo de carbono se combina con dos átomos de oxígeno, sin embargo, el núcleo de cada átomo de la molécula no sufre variación con los electrones exteriores que giran alrededor de estos núcleos, como se muestra en la figura 2.6, los que sufren variación, ya que ahora, en lugar de girar en torno a su propio núcleo, describen una complicadísima trayectoria alrededor de los tres núcleos de la molécula, es decir, al iniciar esta reacción química, se partió de los núcleos de carbono y oxígeno y al terminar la reacción química se tienen también, núcleos de carbono y núcleos de oxígeno pero unidos entre el por la acción de los electrones, la sustancia resultante, ( $CO_2$ ).

Tiene diferentes propiedades que el oxígeno y el carbono considerados individualmente pero, sin embargo, están constituidos por átomos de carbono y átomos de oxígeno.

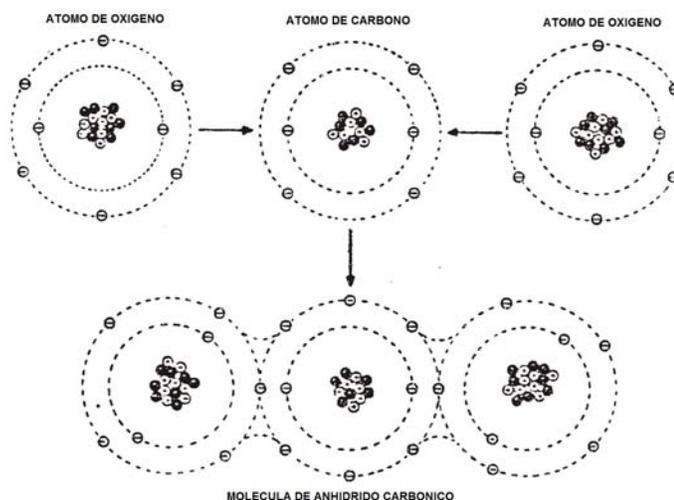


Figura 2.6. Ejemplo de reacción química.

Por otro lado, en la combustión se produce calor, De donde procede esta energía?.

Cada átomo contiene cierta energía, parte de esta energía es debida a las cargas eléctricas del átomo, otra parte se debe al movimiento de los electrones alrededor del núcleo. De igual manera, la molécula obtenida por reacción química de varios átomos tiene también cierta cantidad de energía. Si se hacen cálculos precisos se obtiene que la cantidad de energía existente en la molécula, después de la reacción, es menor, que la suma de las cantidades de energía que hay en cada átomo individual, la diferencia de esta energía que parece faltar se ha convertido en calor.

Otro ejemplo de reacción química es la formación de una molécula a partir de átomos del mismo elemento una molécula de hidrógeno por ejemplo, a partir de dos átomos de deuterio se forma una molécula de deuterio, tal como se muestra en la figura 2.7.

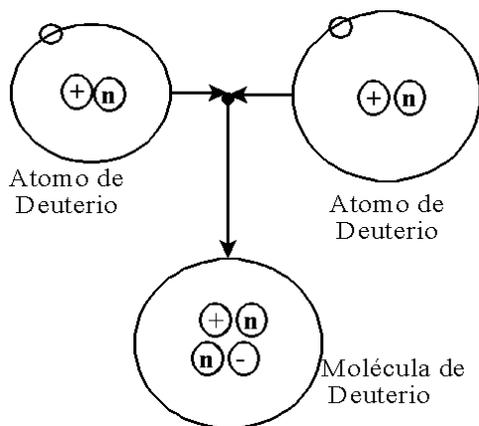


Figura 2.7. Formación de una molécula de deuterio.

En este último caso, también ocurre que cada uno de los núcleos constituyentes de la molécula de deuterio permanecen individuales e inalterables, y también en este caso, se libera energía calorífica al producirse la reacción química. De hecho en todas las reacciones químicas se produce calor pero en algunas como en la combustión, la generación de calor es muy intensa.

Supóngase ahora, que se puede conseguir el choque de dos átomos de deuterio impulsados a gran velocidad que se muestra en la figura 2.8.

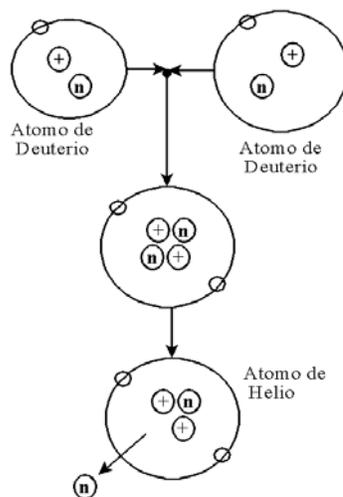
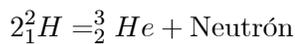
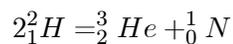


Figura 2.8. Reacción de fusión nuclear.

En este caso, los dos núcleos se juntarán instantáneamente haciendo que reboten las partículas, protones y neutrones, que constituyen en los átomos en circunstancias especiales, se puede conseguir que un neutrón salga despedido, mientras que el neutrón restante quede retenido en el nuevo núcleo formado junto con los dos protones originales; en este caso, se ha producido una reacción nuclear, el nuevo núcleo formado resulta de la fusión de dos núcleos individuales de deuterio menos el neutrón perdido, por otro lado, como existen dos protones en el núcleo, se conservan los dos electrones de las órbitas equilibrándose así las cargas eléctricas. La reacción nuclear se puede expresar mediante la ecuación,



Como el neutrón es una partícula sin carga, se puede expresar así la ecuación,



Entonces una característica de una reacción nuclear es que a partir de unos elementos químicos, se obtienen otros, en el ejemplo ilustrado se obtiene helio a partir de hidrógeno pesado o deuterio, también se pueden obtener isótopos de los elementos primarios en la reacción, en resumen, en una reacción nuclear se modifica el núcleo. Otra consecuencia, común a muchas reacciones nucleares es que se desprende una cantidad elevadísima de calor, de donde se desprende que, con las reacciones nucleares se puede obtener, con la misma cantidad de materia una cantidad de energía millones de veces superior a la que se obtendría con una reacción química.

## 2.7. Tipos de Reacciones Nucleares

Las principales reacciones nucleares son:

- Fusión
- Fisión
- Captura
- Cambio radiactivo

El ejemplo de reacción nuclear dado en el párrafo anterior, es una reacción de fusión y se caracteriza por que al finalizar la reacción existen menos átomos que cuando se inició. En la práctica resulta muy difícil provocar esta reacción pues para conseguirla es necesario que los átomos choquen a velocidades muy elevadas para lograr esto es necesario elevar la temperatura del orden de millones de grados, por tal motivo las dificultades técnicas son difíciles de superar. Sin embargo, como existe mucho hidrógeno en la naturaleza, se ha

pensado en la fusión para el funcionamiento de las futuras centrales nucleares, por tal motivo se están realizando, en varios países, trabajos de investigación para lograr un resultado práctico.

Se espera que a principios del próximo siglo se logren resultados satisfactorios. Más importante, actualmente, es el proceso inverso al anterior y que se conoce como fisión nuclear.

Como antes se vió, Eisnten propusó la fórmula,

$$E = mc^2$$

donde  $E$  denota energía,  $m$  es la mass y  $c$  es la velocidad de la luz.

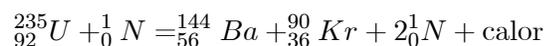
Esta expresión indica la equivalencia entre masa y energía, de esta manera como un ejemplo que se puede obtener que 1 gramo de cualquier sustancia es equivalente a  $25 \times 10^6$  Kwh.

Por otro lado, de los experimentos realizados se ha concluído que si se pesan por separado a las partículas de un núcleo, la masa obtenida es ligeramente superior a la del núcleo ya integrado, a esta diferencia de masa se le conoce como defecto de masa y representa la energía de ligadura que es la que mantiene unidas a las partículas del núcleo, y debe entonces agregarse al núcleo para que este deje en libertad sus componentes.

Lo anterior significa que la materia durante su trabaformación produce o consume energía o pierde o gana masa en la manera correspondiente. En las reacciones químicas este cambio de masa nunca se ha podido constatar ya que sólo los electrones externos participan en la reacción. Donde sí se tienen pérdidas significativas, de masa es en las transformaciones del núcleo atómico, en la medida que se libera, según la fórmula de Einstein, entonces el

defecto de masa que se presenta es equivalente a una cierta cantidad de energía llamada unión. Este defecto de masa no es el mismo para todos los núcleos, en los elementos ligeros como el hidrógeno, helio, etc. es pequeño, para núcleos que están fuertemente ligados y que corresponden a los de masa mediana, como el hierro, el defecto de masa es ,máximo y se vuelve a reducir nuevamente para núcleos considerados como pesados como es el caso del uranio.

La fisión es la ruptura del núcleo, de tal manera que al finalizar la reacción existen más átomos que al principio. Imagínese un neutrón que se mueva a gran velocidad y que choca con el núcleo de un átomo de uranio 235, como se muestra en la figura 2.9; si la velocidad del neutrón es la apropiada por efecto de la colisión, se obtendrá un átomo de bario 144, otro átomo de Kriptón, 90 y dos neutrones sueltos que se desprenden del núcleo además en esta reacción se obtiene también calor, y podríamos expresarla así,



En estas ecuaciones es importante hacer notar que el número de partículas de la izquierda es igual al número de partículas (protones, neutrones), de la derecha. A partir del uranio, se están obteniendo otros elementos químicos además de generar energía calorífica.

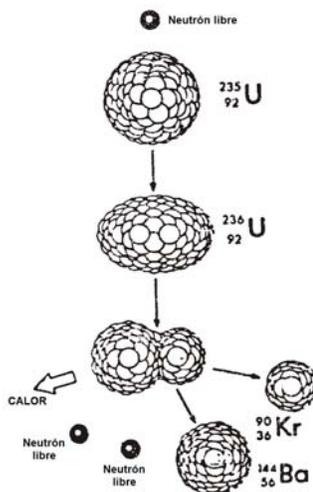


Figura 2.9. Reacción de fisión.

Un ejemplo de la reacción de captura se da si se bombardea mediante un neutrón a un átomo del uranio 235; la energía cinética que lleva el neutrón es diferente que en el caso de la fisión, no se produce ésta, sino que el neutrón queda absorbido en el núcleo, es decir, que es capturado por el átomo de uranio 235, como se muestra en la figura 2.10.

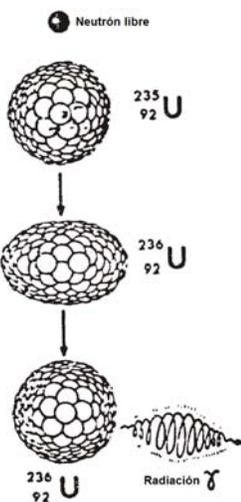


Figura 2.10. Reacción de captura.

Se obtiene así un nuevo isótopo de uranio, se ha obtenido el uranio 236. En todas las reacciones de captura hay emisión de radiaciones gama ( $\gamma$ ) que son ondas electromagnéticas de pequeñísima longitud de onda y son muy penetrantes y su emisión puede perjudicar la salud de los seres vivos. Como todos los reactores nucleares se producen radiaciones ( $\gamma$ ), deben protegerse con diversos materiales que absorban estas radiaciones.

Las reacciones de captura tienen importancia en la técnica de los reactores nucleares por que, a partir de ellas, un material no fisionable puede transformarse en otro material fisionable y así poder usarse como combustible, en los reactores. Por ejemplo a partir de la reacción de captura.



El material estable uranio 238, se convierte en el material inestable uranio 239 que, a su vez, se transformará posteriormente en plutonio 239 que ya es material fisionable.

Finalmente, véase lo que se entiende por cambio radiactivo, muchos de los elementos con un alto número másico, son inestables, es decir, tienden a descomponer por sí mismos en elementos más sencillos.

Al descomponerse estos cuerpos emiten partículas a grandes velocidades y acompañadas muchas veces de radiaciones ( $\gamma$ ), a esta propiedad que tienen algunos elementos se denomina radiactividad y los materiales que se descomponen se llaman cuerpos radiactivos. En general los átomos que tienen muchas partículas en el núcleo son más radiactivos que los que tienen pocas, o sea, cuanto más complicada es la estructura nuclear más radiactivo es un elemento. La sustitución de un cuerpo o elemento por otro cuya estructura es más sencilla se denomina cambio radiactivo, como se muestra en la figura 2.11.

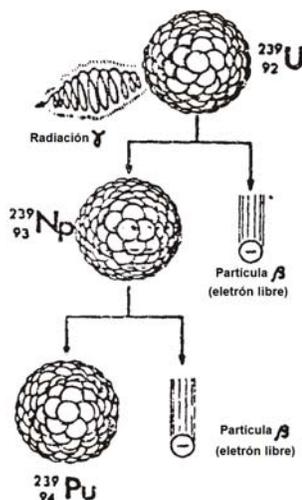


Figura 2.11. Cambio radiactivo.

Durante el cambio radiactivo se produce la emisión de las siguientes partículas.

Partículas ( $\alpha$ ) constituidas por dos protones y dos neutrones, debido a la presencia de los protones, estas partículas son positivas y se pueden expresar así,

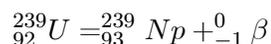


Partículas ( $\beta$ ), constituidas por un electrón, análogo a cualquiera de los electrones periféricos del núcleo, estas partículas tienen carga negativa y no tienen masa y se pueden representar así,

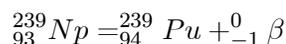


Lo más sorprendente de estas partículas es que, no proceden de los electrones orbitales sino del mismo núcleo donde un neutrón se subdivide en un protón y un electrón, este último lo emite el núcleo mientras que el protón permanece en él. Naturalmente el efecto es aumentar en una carga positiva la estructura nuclear del elemento correspondiente lo que da por resultado que este elemento se convierta en otro distinto, por ejemplo, el

uranio 239 es inestable y se convierte rápidamente en neptunio 239, como se muestra en la figura 11, la reacción producida puede expresarse así,



y, asu vez el neotunio 239 también es inestable, se transforma en plutonio 239, así,



La emisión de estas partículas ( $\alpha$  y  $\beta$ ) es peligrosa para el personal que maneja las instalaciones por lo que ha de preverse las protecciones apropiadas.

A las reacciones nucleares también se les conoce como transmutaciones.

Volviendo a la reacción de fisión, si se desea bombardear el núcleo, con electrones, estos rechazados por los electrones periféricos, y si por casualidad llegan hasta el núcleo central, considerando que se masa es insignificante respecto a la del núcleo el efecto es prácticamente nulo. Si se usan protones para fisionar el núcleo, estos son repelidos por los protones nucleares sin llegar a chocar. Solamente los neutrones libres, por no tener carga eléctrica, pueden chocar con el núcleo si ser repelidos por las cargas positivas de los mismos y, además el choque puede tener consecuencias puesto que la masa del neutrón ya es una fracción respetable de la masa nuclear, así pues, la fisión sólo es posible por la intervención de los neutrones.

Por otra parte, debido a que los átomos tienen mucho espacio vacío, estos pueden ser atravesados por un gran número de neutrones que pasan sin encontrar un núcleo. Este riesgo se disminuye entre mayor es la cantidad de material fisionable; de manera que en cada caso se puede determinar la cantidad crítica, conocida como masa crítica que es la

cantidad mínima de sustancia fisionable a fin de que se inicie una reacción en cadena; por ejemplo la masa crítica para el uranio 235 es de 15 Kg.

Además, los neutrones libres deberán desplazarse a una velocidad determinada para que se realice la fisión de los núcleos, neutrones demasiado lentos o demasiado rápidos, no rompen los núcleos atómicos.

A la velocidad adecuada para la fisión que deben tener los neutrones se le llama velocidad de resonancia, y, a los neutrones con esta característica se les conoce neutrones térmicos.

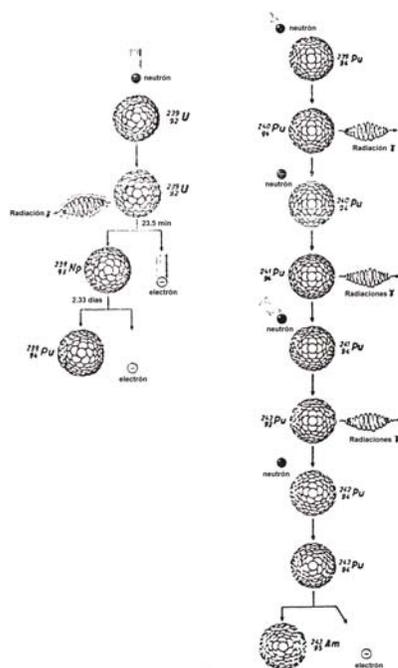


Figura 2.12. Cambio radiactivo del uranio 239, reacción de captura en el plutonio 239 y cambios radiactivos.

## 2.8. Reacción en Cadena

Después de la primera fisión de un núcleo atómico que dan libre, según los casos, uno, dos o más neutrones que pueden emplearse a su vez para provocar nuevas fisiones. El efecto es multiplicativo como se observa en la figura 2.13, de tal manera que con un sólo neutrón inicial, puede fisionarse una cantidad elevada de material fisionable, en muy poco tiempo. De esta forma se obtiene una reacción en cadena; de esta manera en menos de un segundo se puede provocar la descomposición de varios kilogramos de uranio y liberar una cantidad enorme de energía calorífica además de las radiaciones inherentes.

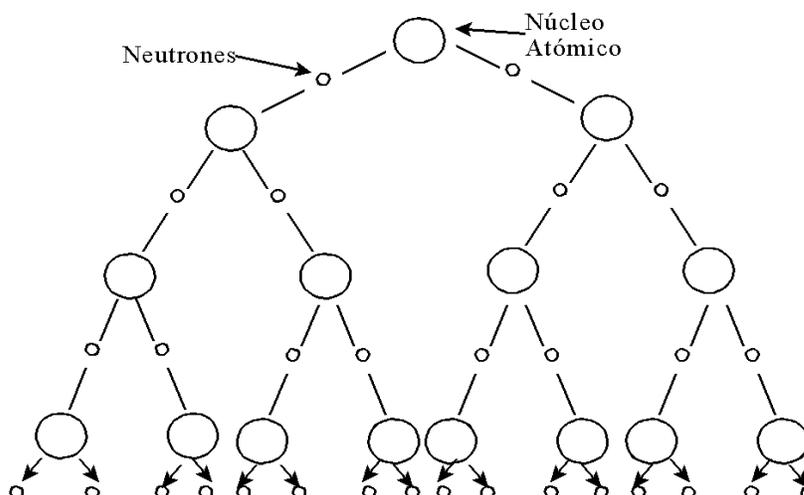


Figura 2.13. Reacción en cadena.

Ahora bien, los neutrones libres procedentes de las fisiones nucleares están animados de velocidades muy superiores a las de resonancia, unos 2000 Km/seg, y, por lo tanto, no son aptos para provocar nuevas fisiones nucleares, para resolver este problema se utilizan ciertas sustancias llamadas moderadores. Cuando un neutrón choca contra las moléculas del moderador no provoca la ruptura de las mismas, por tratarse siempre de sustancias cuyos núcleos poseen muy pocas partículas y, por tanto muy difíciles de romper, pero en el choque,

las moléculas del moderador absorben parte de la energía cinética, del neutrón y este sale rebotado pero a velocidad inferior a la que tenía, a los neutrones que, llevan alta velocidad se llaman neutrones rápidos, los que llevan una velocidad menor son los neutrones lentos o térmicos (unos 2500 m/seg.). Como moderadores se utilizan el grafito, el berilio, el agua pesada y el helio.

En realidad para llevarse a cabo la fisión es necesario una masa superior a la crítica llamada masa supercrítica por otro lado se ha visto la necesidad de moderar la velocidad de los neutrones para que la reacción continúe; además se ha visto que la reacción en cadena produce grandes cantidades de energía en muy poco tiempo, esto provocaría una explosión con efectos de una bomba atómica.

Para poder aprovechar esta energía calorífica es necesario hacer más lenta la reacción en cadena. Para ello se utilizan ciertas sustancias que tienen fuerte avidez por los neutrones, los capturen, a estas sustancias se les llama reguladores o absorbentes, entre ellas se encuentran el cadmio y el boro.

## **2.9. Constitución de una Pila Atómica**

Con las ideas antes expuestas se puede esbozar la contribución de un reactor nuclear llamado también pila atómica, el cual consta de barras de combustible, por ejemplo uranio 235, introducidas en una masa de grafito o de agua pesada, que sirve como moderador, unas barras de cadmio o de boro se introducen en una longitud conveniente entre las de uranio de forma que pueda regularse la reacción, en cadena, estas barras de control pueden deslizarse más o menos entre las de uranio, según se requiera.

Entre los productos de desecho de la fisión se obtienen materiales más ligeros que el uranio, sustancias radiactivas, partículas ( $\alpha$ ), partículas ( $\beta$ ), neutrones, radiaciones ( $\gamma$ ), etc., muchas de ellas son muy perjudiciales para la salud humana, por lo que debe protegerse el personal de servicio del reactor, para ellos se recubre el reactor con materiales como cemento, plomo, etc., tal como se muestra en la figura 2.14.

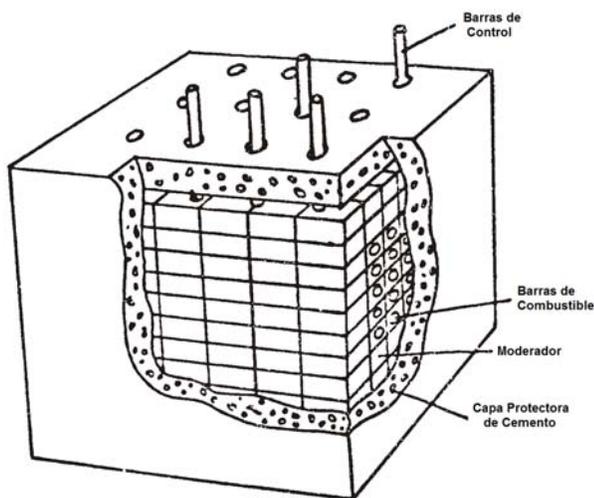


Figura 2.14. Reactor nuclear elemental.

## 2.10. Materiales Empleados en los Reactores Nucleares

Los materiales que se usan en un reactor nuclear se pueden resumir en los siguientes grupos:

- **Materiales Fisionables.** Realizan la misma función que los combustibles en las centrales térmicas convencionales, son la materia prima que al ser fisionable produce la energía calorífica necesaria. Los materiales fisionables empleados en las centrales nucleares son: uranio 233, uranio 235 y el plutonio 239.

- **Materiales Reproductores o de Recría.** Se trata de materiales no directamente fisionables, en los que, por procedimientos adecuados se convierten en materiales fisionables. Los más importantes son el uranio 238 y el torio 232.
- **Materiales Moderadores.** Como se vió antes, para frenar la velocidad de los neutrones procedentes de la fisión, de los núcleos atómicos, hasta llevarlos a la velocidad de resonancia, se usan los llamados moderadores. Los más importantes son: el grafito y el agua pesada.
- **Materiales Absorbentes o Reguladores o de Control.** Sirven para restringir las reacciones nucleares en cadena hasta límites donde sea posible el aprovechamiento industrial de la energía generada. Los más importantes son el boro y el cadmio.
- **Materiales Protectores o de Apantallamiento.** Destinados a proteger al personal de las radiaciones, los más usados son: el plomo y hormigones especiales.
- **Materiales Reflectores.** Se utilizan en algunos tipos de reactores para reflejar los neutrones con tendencia a escapar y que chocan con ellos, obligándoles a volver hacia el núcleo del combustible, el más importante es el circonio.
- **Materiales Refrigerantes.** Son los encargados de transportar la energía calorífica producida en la fisión hasta los cambiadores de calor o turbinas y a la vez evitar el sobrecalentamiento excesivo en el núcleo del reactor, enfriándolo. Los más empleados son: el agua, agua pesada, el sodio, el anhídrido carbónico, el helio, etc.
- **Materiales de Construcción.** Son los más utilizados en la construcción exterior del núcleo o del reactor en los cambiadores de calor, en las cubiertas protectoras de las

varillas de combustible, etc.

Estos materiales son muy variados y van desde las aleaciones ligeras a base de aluminio y de magnesio hasta los materiales especiales para resistir altas temperaturas como: aceros al titanio, aleaciones de níquel, de berilio, etc.

- **Productos de la Fisión.** Son escorias o cenizas", resultantes de la ruptura de los materiales fisionables. Parte de estos subproductos puede regenerarse y convertirse nuevamente en materiales fisionables, otra parte debe retirarse periódicamente del reactor, son materiales radiactivos algunos de los cuales duran varios miles de años en el proceso de decaimiento hasta convertirse en elemento estables, por tal motivo es peligroso su manejo y almacenamiento ya que la radiactividad no puede eliminarse por procesos físicos o químicos. Algunos de estos productos se utilizan en medicina u otras aplicaciones muy particulares, entre los subproductos atómicos están el Lantano 140, el Xenón 144, el Cesio 137, el Estroncio 90, el carbono 14, etc.

## 2.11. Tipos de Reactores Nucleares

Los reactores se pueden clasificar siguiendo diversos criterios como el material combustible usado, el tipo de refrigerante, el moderador usado, etc. los criterios a seguir se expresan en la siguiente tabla.

Combustible	Uranio 233, Uranio 235, Plutonio 239
Materia Fertil	Torio 232, Uranio 238
Refrigerante	Anhídrido Carbónico, Helio, Agua pesada, Mercurio, Sodio, Potasio, Aleación sodio, Bencina difenilo, Potasio, Aleación plomo-bismuto, Bencina Trifenilo, Potasio, Aleación plomo-bismuto, Litio, Galio
Moderador	Agua, Agua pesada, Gráfico, Berilio
Naturaleza del combustible	Lentos, Rápidos
Finalidad	Simples, Convertidores, Reproductores

Si a partir de la table anterior se intenta una clasificación se observará que el

número teórico de reactores que puede existir es,

$$Nr = 3 \times 2 \times 13 \times 4 \times 2 \times 2 \times 3 = 3744$$

En la realidad por diversas causas, técnicas, económicas, etc., muchos de estos tipos de reactores son irrealizables, de tal manera que los reactores más característicos que se han logrado construir son,

- Reactor de agua en ebullición
- Reactor de agua a presión
- Reactor refrigerante por gas
- Reactor refrigerante por aire
- Reactor de agua pesada
- Reactor de sodio gráfico
- Reactor reproductor
- Reactor homogéneo

### 2.11.1. Reactor de Agua en Ebullición

El tipo de reactor nuclear más sencillo de concepción y de realización es el reactor de agua en ebullición, representando en la Figura 2.15. El agua natural debidamente purificada se utiliza como moderador y como refrigerante; el combustible ha de ser uranio 238 enriquecido con uranio 235, pues con el uranio no puede producirse la reacción en cadena, tal como se ha dicho anteriormente. El agua hierve en el mismo reactor, y el vapor producido se introduce directamente en una turbina de vapor, que acciona un generador eléctrico. El vapor de salida de la turbina, pasa por un condensador, donde se transforma nuevamente en agua líquida, y se reinyecta después en el reactor nuclear, por medio de una bomba centrífuga.

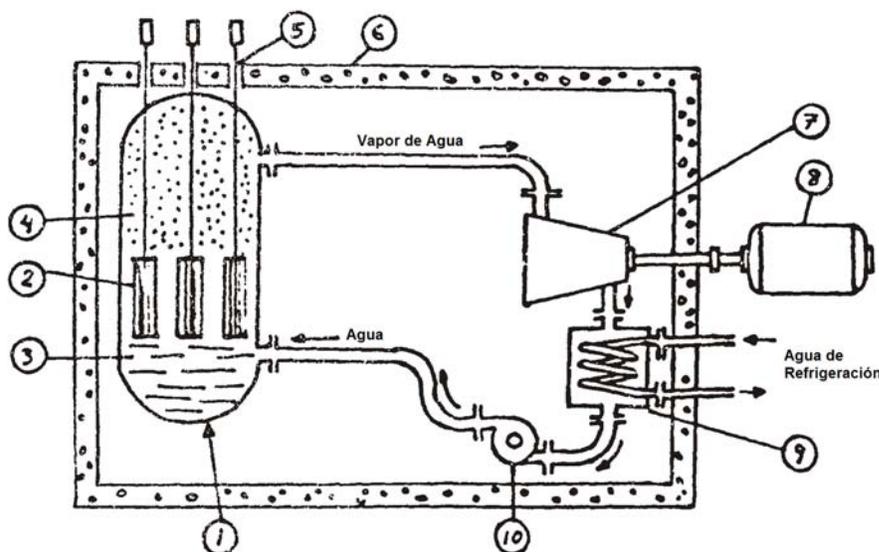


Figura 2.15. Reactor de agua hirviente: 1-Cuerpo del reactor. 2-Combustible (uranio enriquecido). 3-Moderador (agua natural). 4-Refrigerante (agua natural). 5-Varillas de regulación. 6-Protección biológica. 7-Turbina de vapor. 8-Generador eléctrico. 9-Condensador. 10-Bomba centrífuga de recirculación del agua de la turbina.

El vapor producido directamente en el reactor, es radiactivo, por lo tanto la protección biológica a base de hormigones especiales y plomo, necesaria en todos los reactores nucleares, debe extenderse aquí a todo el circuito de agua, que comprende la turbina de vapor, el condensador, la bomba centrífuga y las tuberías correspondientes. Este es el mayor inconveniente de este reactor pues se hace difícil la revisión y reparación del circuito de agua.

Este tipo de reactor es el que se utiliza en la planta de Laguna Verde que se encuentra en operación.

El reactor de agua hirviente es, hasta cierto límite, autorregulador: cualquier aumento accidental de temperatura provoca una disminución de la energía producida, entre otras razones, por la formación de burbujas de vapor. Esta es una ventaja de este tipo de reactores, que hay que tener en cuenta.

En España, la central nuclear de Santa María de Garoña, de 460 MVA utiliza este tipo de reactor. Las más importantes centrales nucleares con reactores de agua hirviente, son las de Dresden en Illinois de una potencia de 180 MVA que utiliza uranio enriquecido al 1.5 % como combustible, la de Villigen en Suiza, de una potencia de 20 MVA y la Oulianovsk en la antigua URSS, cuya potencia es de 50MVA.

### **2.11.2. Reactor de Agua a Presión**

El mayor inconveniente del reactor de agua hirviente, es decir, la radiactividad del circuito de agua, queda solucionado en el reactor de agua a presión, como se muestra en la figura 2.16. El refrigerante es agua a presión, por ejemplo 40 atmósferas o más, y el moderador puede ser esta misma agua, o grafito; el combustible es uranio 238 enriquecido con uranio 235.

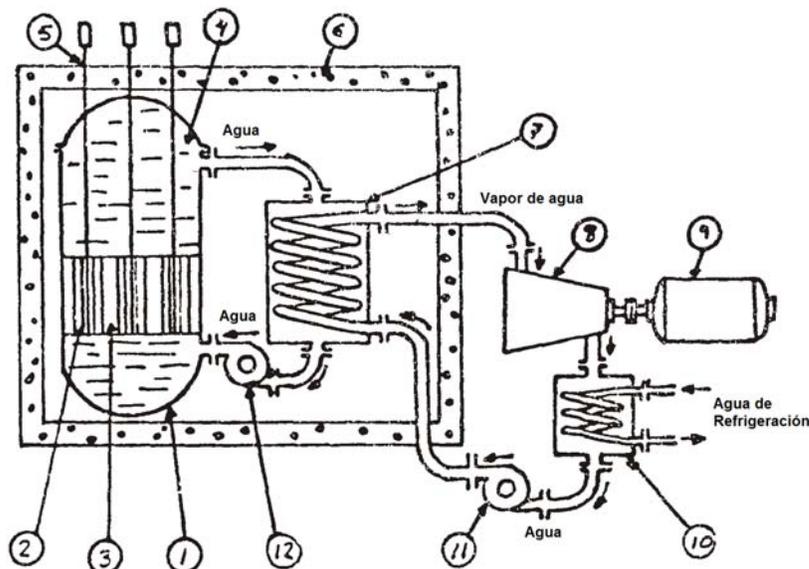


Figura 2.16. Reactor de agua a presión: 1-Cuerpo del reactor, 2-Combustible (uranio enriquecido), 3-Moderador (gráfico), 4-Refrigerante (agua a 42 atmósferas), 5-Varillas de regulación, 6-Protección biológica, 7-Cambiador de calor, 8-Turbina de vapor, 9-Generador, 10-Condensador, 11-Bomba centrífuga de recirculación de agua de la turbina, 12-Bomba centrífuga de recirculación del refrigerante.

Ya sabemos que el agua sometida a grandes presiones puede llegar a evaporarse sin ebullición y a temperaturas mayores de  $100^{\circ}\text{C}$ . En el reactor que estamos describiendo, se provecha esta circunstancia; el vapor producido a unos  $600^{\circ}\text{C}$ , pasa por un cambiador de calor para volver, después de enfriado y condensado al reactor nuclear. En el circuito secundario del cambiador de calor, se produce vapor de agua que se inyecta en una turbina que a su vez acciona un generador eléctrico.

Como los de circuitos de agua son independientes, solamente el cambiador de calor ha de protegerse; la turbina de vapor que da libre de radiactividad y, por lo tanto, no es necesaria la protección biológica más que en circuito del reactor.

Como ejemplos de centrales nucleares con reactores de agua a presión, podemos citar la de Shippingport en Pensilvania, de 90 MVA, la de Vallegrande en Italia de 160 MVA, la de Troitsk en la antigua URSS, de 600 MVA y en España la central de Zorita de 153 MVA.

### 2.11.3. Reactor Refrigerado por Gas

Los reactores estudiados hasta ahora, de agua hirviente y de agua a presión, tienen limitada su temperatura de funcionamiento y, por lo tanto, su rendimiento técnico. Se puede conseguir más elevadas temperaturas y, por consiguiente, mejor rendimiento con el reactor refrigerado por gas, el cual se muestra en la figura 2.17.

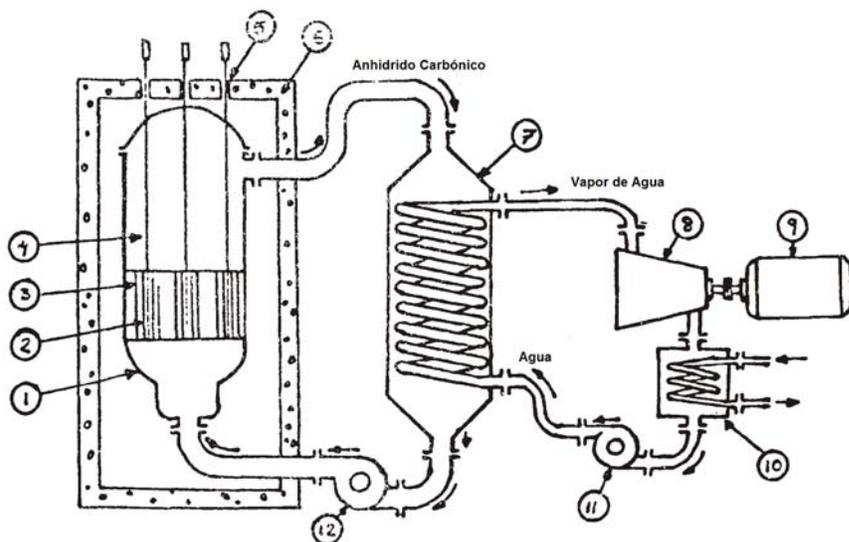


Figura 2.17. Reactor refrigerado por gas: 1-Cuerpo del reactor, 2-Combustible (uranio natural), 3-Moderador (gráfico), 4-Refrigerante (anhídrido carbónico a 7 atmósferas), 5-Varillas de regulación, 6-Protección biológica, 7-Cambiador de calor, 8-Turbina de vapor, 9-Generador eléctrico, 10-Condensador, 11-Bomba centrífuga de recirculación del agua de la turbina, 12-Impulsor centrífugo de gas refrigerante.

Como moderador se utiliza, generalmente, el grafito puro, y como refrigerante, el anhídrido carbónico o el helio, aunque casi todas las centrales nucleares actuales emplean el primero de estos cuerpos. Como combustible, puede emplearse el uranio natural, o el uranio enriquecido.

El gas contenido en el interior del reactor, a la presión de unas 7 atmósferas, se calienta hasta  $400^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y se hace pasar por el circuito primario de un cambiador de calor, para reinyectarse después en el reactor; por el circuito secundario del cambiador da calor circula el agua que ha de accionar, en forma de vapor, la turbina correspondiente. Debido a la poca radiactividad del anhídrido carbónico (o del helio, en su caso), el cambiador de calor puede instalarse sin protección biológica.

Casi todos los programas europeos de construcción de centrales nucleares, están basadas en el reactor refrigerado por gas. El ejemplo más característico es la ya famosa central nuclear de Caldel Hall, en Inglaterra, con 152 MVA de potencia, la central nuclear en Hunterston, de 300 MVA, también tiene los reactores de este tipo y podríamos citar además las centrales de Chapelcross de 152 MVA, Berkeley de 275 MVA, Bradwell de 300 MVA y Hinkley Pont de 500 MVA en Inglaterra, las centrales G-2 y G-3 de Marcoule de 30 MVA en Francia, la central Latina de 200 MVA en Italia y la central de Tokaimura de 150 MVA en Japón.

#### **2.11.4. Reactor Refrigerado por Aire**

La central G-1 de Marcoule en Francia está refrigerada por aire, como se muestra en la figura 2.18 en circuito abierto, sin recirculación. El aire previamente filtrado se introduce en el reactor, de construcción horizontal y tras de pasar por el cambiador de calor, se

escapa a la atmósfera por una chimenea alta, después de atravesar varios filtros donde quedan retenidos los materiales radiactivos; el inconveniente de esta disposición es que hay que vigilar constantemente el índice de radiactividad de la atmósfera en los alrededores de la central.

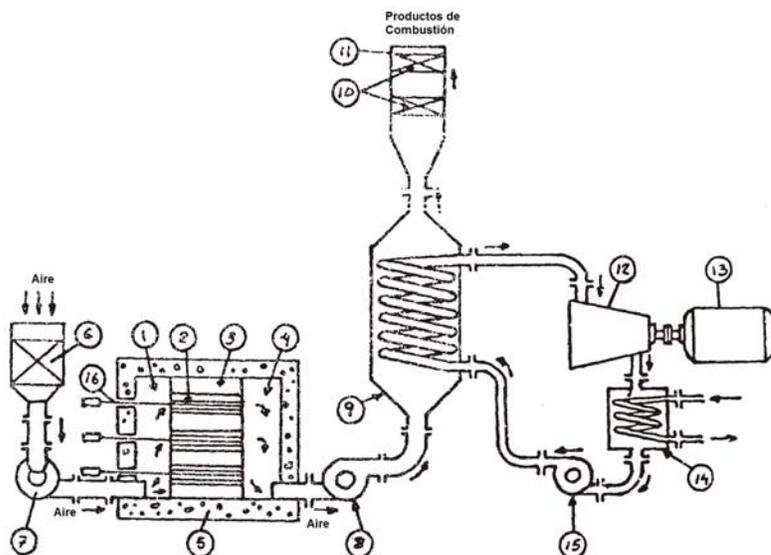


Figura 2.18. Reactor refrigerado por aire: 1-Cuerpo del reactor, 2-Combustible (uranio natural), 3-Moderador, 4-Refrigerante (aire a presión), 5-Protección biológica, 6-Filtro de entrada de aire, 7-Impulsor de entrada de aire, 8-Impulsor centrífugo de salida de aire, 9-Cambiador de calor, 10-Filtros de salida, 11-Chimenea, 12-Turbina de vapor, 13-Generador eléctrico, 14-Condensador, 15-Bomba centrífuga de recirculación de agua de la turbina, 16-Varillas de regulación.

### 2.11.5. Reactor de Agua Pesada

Así como el programa nuclear en Europa está basado en el reactor refrigerante por gas y moderado con gráfico, el programa de construcción de centrales nucleares en Canadá se basa, esencialmente en el reactor de agua pesada, como se muestra en la figura 2.19, que

vamos a descubrir a continuación.

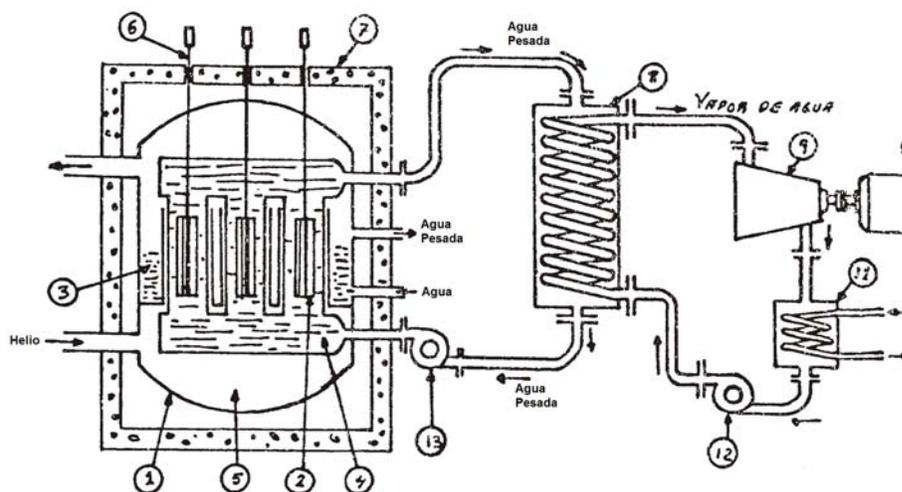


Figura 2.19. Reactor de agua pesada:1 -Cuerpo del reactor, 2-Combustible (uranio natural), 3-Moderador (agua pesada), 4-Refrigerante (agua pesada), 5- Atmósfera de helio, 6-Varilla de regulación, 7-Protección biológica, 8-Cambiador de calor, 9-Turbinade vapor, 10-Generador eléctrico, 11-Condensador, 12-Bomba centrífuga de recirculación de agua de la turbina, 13-Bomba centrífuga de recirculación del refrigerante.

Como moderador se utiliza siempre agua pesada; como refrigerante puede utilizarse también agua pesada o gas. Como combustible se emplea siempre el uranio natural. En el reactor representado en la figura 2.19 se utiliza agua pesada en atmósfera de helio como moderador de neutrones; tanto el helio como moderador se hacen recircular, refrigerándolos convenientemente (estos circuitos de recirculación no están representados en la figura). El agua pesada que actúa como refrigerante, se hace pasar por un cambiador de calor cuyo circuito secundario es atravesado por el agua, que se inyectará en la turbina en forma de vapor.

Como ejemplo de centrales nucleares con reactores de agua pesada, podemos citar la central canadiense de Des Joachims, Ontario del Sur de 20 MVA, la central norteamericana de Florida de 50 MVA y la central checa de Bohurce en Eslovaquia de 50 MVA.

### 2.11.6. Reactor de Sodio-Gráfico

Ya hemos dicho anteriormente de las propiedades refrigerantes del sodio. El reactor de sodio-gráfico que se muestra en la figura 2.20, utiliza este metal líquido como refrigerante y el gráfico como moderador como combustible, se ha de emplear el uranio enriquecido. Este reactor tiene mejor rendimiento que los explicados hasta ahora.

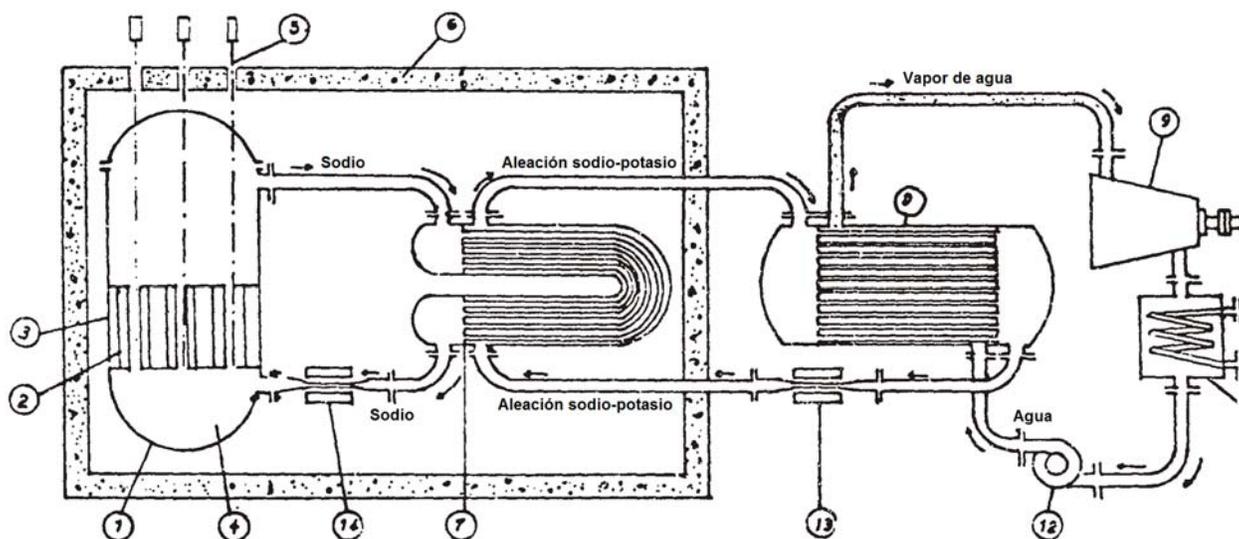


Figura 2.20. Reactor de sodio-gráfico: 1-Cuerpo del reactor, 2-Combustible (uranio enriquecido), 3-Moderador (gráfico), 4-Refrigerante, 5-Varillas de regulación, 6-Protección biológica, 7-Cambiador de calor intermedio, 8-Cambiador de calor final, 9-Turbina de vapor, 10-Generador eléctrico, 11-Condensador, 12-Bomba centrífuga, 13-Bomba electromagnética para aleación del agua de la turbina, 14-Bomba electromagnética para refrigerante (sodio).

El sodio es muy radiactivo y debe evitarse el contacto con el agua de la turbina de vapor; para ello, el sodio se hace pasar por un cambiador de calor intermedio, por cuyo circuito secundario pasa una aleación líquida de sodio y potasio, que actúa como agente transmisor de calor en el cambiador final de calor, cuyo circuito secundario es atravesado por el agua de la turbina.

El sodio y la aleación de sodio-potasio no son líquidos fáciles de manejar. Para conseguir una circulación continua de los mismos, se emplean bombas electromagnéticas, cuyo fundamento es parecido al de los motores de inducción: solamente de aquí, se consigue un movimiento longitudinal del sodio líquido (o de la aleación sodio-potasio) mediante la acción combinada de campos magnéticos intensos y corrientes inducidas.

Los reactores de sodio-potasio están en un periodo avanzado de estudio; aunque ya se han construido varios reactores de experimentación, hasta la fecha, solamente existen 3 reactores industriales en todo el mundo: uno de 75 MVA en Hallam en Nebraska, otro de 90 MVA en Lagoon Beach, Michigan y otro, de 50 MVA en Oulianovsk en la antigua URSS.

### **2.11.7. Reactor Reprodutor Rápido**

Ya hemos dicho en anteriores ocasiones que el reactor reproductor está destinado a transformar, el material fértil en material combustible, considerándose secundaria la producción de calor para su posterior transformación de energía eléctrica; estos reactores producen mayor cantidad de combustible de la que consumen.

De acuerdo a la figura 2.21 constan de un núcleo combustible de uranio 235, rodeado de varias capas de materia fértil, constituido por uranio 238, en el material fértil

se va produciendo plutonio 239 que, posteriormente, se empleará en el núcleo para producir aún más plutonio. Otras veces, el material fértil es torio 232 y entonces se produce, como material combustible, el uranio 239 y uranio 233 se emplearán después en centrales nucleares para la producción de energía eléctrica.

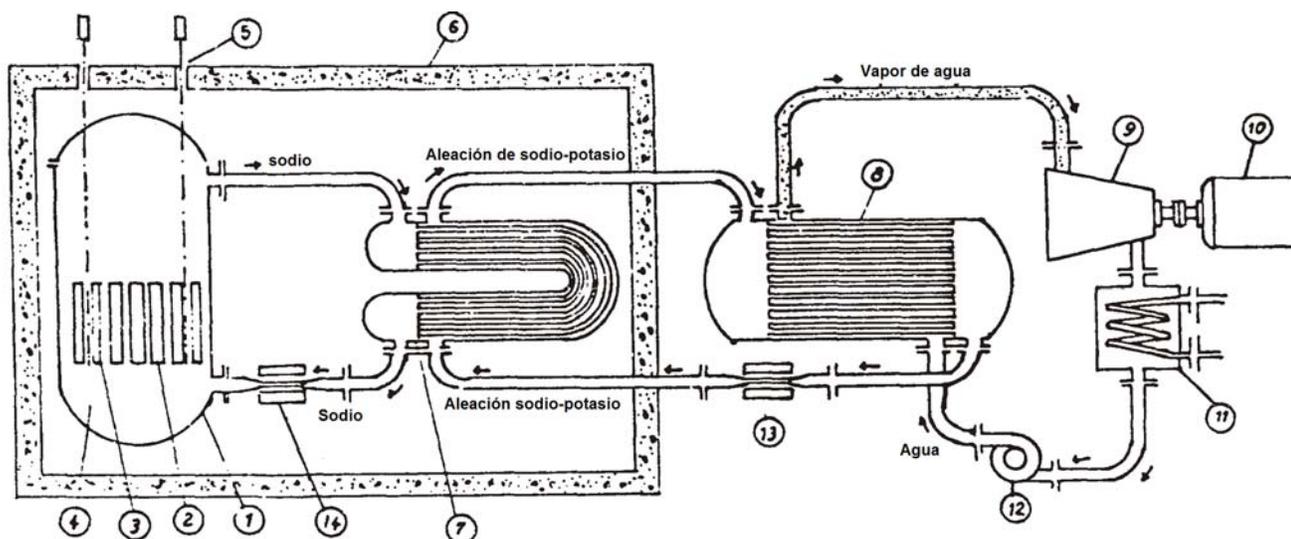


Figura 2.21. Reactor reproductor rápido: 1-Cuerpo del reactor, 2-Núcleo de combustible de uranio 235, 3-Capas exteriores de combustible de uranio 238, 4-Refrigerante (sodio), 5-Varillas de regulación, 6-Protección biológica, 7-Cambiador de calor intermedio, 8-Cambiador de calor final, 9-Turbina de vapor, 10-Generador eléctrico, 11-Condensador, 12-Bomba centrífuga de recirculación del agua de la turbina, 13-Bomba electromagnética para aleación sodio-potasio, 14-Bomba electromagnética para refrigerante (sodio).

Los reactores reproductores son rápidos", es decir, que carecen de moderador, los neutrones se utilizan, para posteriores, fisiones a la velocidad que llevan como consecuencia de producirse la primera fisión. Por esta razón, necesitan combustible nucleares muy ricos en material fisionable (uranio 235 o plutonio 239) ya que, a causa de la elevada velocidad de

los neutrones, las probabilidades de nuevas fisiones al chocar con otros núcleos son escasas y deben compensarse con una gran masa de material fisionable.

Como material refrigerante se utiliza, generalmente, el sodio líquido, de la misma manera que en los reactores de sodio-gráfito, por lo que no insistimos más sobre esta cuestión.

Más aún que los reactores de sodio gráfito, los reactores reproductores rápidos están todavía en periodo experimental. Además, hasta que no haya producido material combustible en suficiente cantidad ( primero uranio 235 y, posteriormente plutonio 239, no podrán construirse reactores reproductores de gran potencia. Actualmente, solamente hay tres reactores reproductores en el mundo, todos experimentales, que son, respectivamente, el NRTS en Idaho de 155 MVA, el de Dounreay en Escocia de 15 MVA y el de Oulianovsk, en la antigua URSS de 50 MVA.

#### **2.11.8. Reactor Homogéneo.**

Los reactores estudiados hasta ahora son heterogéneos. El reactor homogéneo que se muestra en la figura 2.22, utiliza una pasta fluída del sulfato de uranio o de solución de uranio al 1 % en bismut líquido. Esta pasta es a la vez, combustible, moderador y refrigerante. Solamente, puede utilizarse combustible enriquecido.

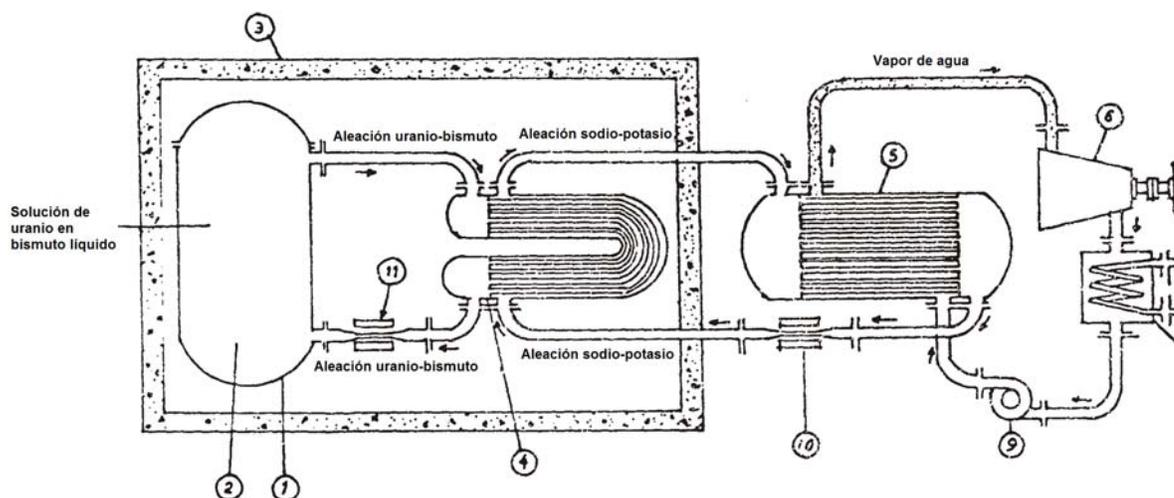


Figura 2.22. Reactor homogéneo:1-Cuerpo del reactor, 2- Solución de uranio al 1% en bismuto líquido (combustible y refrigerante), 3-Protección biológica, 4-Cambiador de calor intermedio, 5-Cambiador de calor final, 6-Turbina de vapor, 7-Generador eléctrico, 8-Condensador, 9-Bomba de recirculación del agua de la turbina, 10-Bomba electromagnética para aleación sodio-potasio, 11-Bomba electromagnética para refrigerante (aleación uranio-bismuto).

Los reactores homogéneos están actualmente en periodo de estudio; en el futuro, parece que sustituirán, a lo menos en parte, a los reactores actuales, aunque todavía pasarán algunos años antes de que puedan construirse reactores homogéneos de gran potencia.

## 2.12. Unidades de la Radiación y Medición

Al llevarse a cabo la fisión, según el tipo de combustible, se pueden producir radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ , fundamentalmente por los cambios radiactivos productos de la fisión, por ejemplo en la figura 2.23 se indica la fisión del uranio 238. En ella se muestra que se van formando cada vez nuevos elementos con desprendimiento de energía radiactiva hasta

llegar al yoduro y circonio que son elementos ya con núcleos estables, se indican también los tiempos de vida de los núcleos, como se ha mencionado antes, en ocasiones estos tiempos suelen ser muy grandes, incluso de miles de años, por lo que es importante el manejo y almacenamiento de los productos de la fisión.

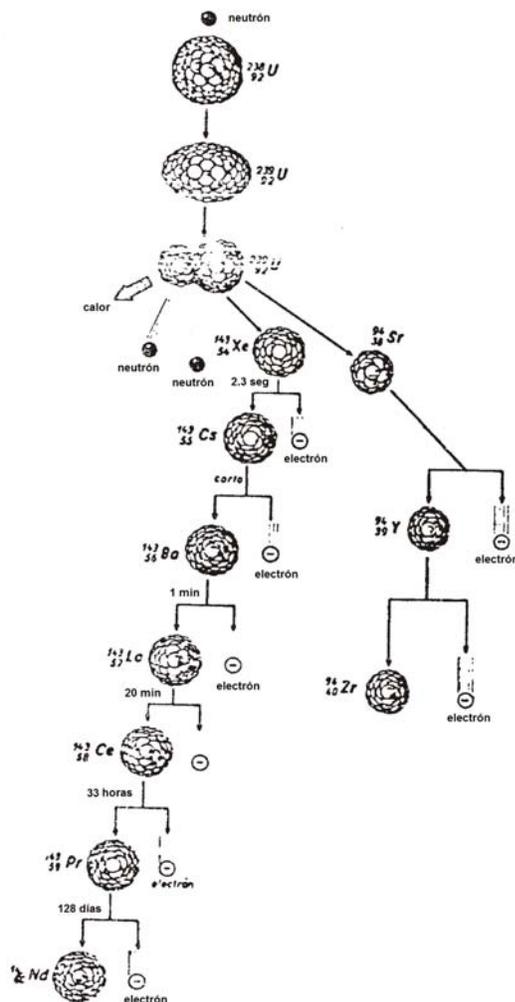


Figura 2.23 Fisión del uranio 238.

Las unidades usadas para medir las radiaciones han ido variando con el tiempo; en un principio se usó el Curie, de hecho el índice de radiactividad, un curie corresponde a  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones nucleares por segundo. La cantidad de dosis total se mide en

roentgen (r). Se define como la cantidad de radiaciones que produce por ionización, una carga de una unidad electrostática en  $1 \text{ cm}^3$  de aire seco a  $0^{\circ}\text{C}$  y presión atmosférica (760 mm de Hg).

Se han propuesto nuevas unidades de dosificación total para tener en cuenta la absorción de la energía por el tejido humano. Se empleo el rad (radiación) que corresponde a la absorción de 100 ergs de energía radiactiva por un gramo de tejido humano. Posteriormente se adoptó el rem (roentgen equivalente ma mmal) para indicar la cantidad de cualquier radiación que produce el mismo efecto biológico que un rad.

La protección de las personas en el campo de la energía atómica se basa actualmente sobre un nuevo concepto, el de la dosificación máxima permisible acumulada (dmp) que tolera un índice máximo de 5 rem/año, siendo en consecuencia la dosificación máxima total para un periodo de trabajo de por ejemplo 25 años,  $5 \times 25$ , o sea 125 rem. Debido a que esta cantidad es la maxima que puede ser tolerada en forma acumulativa, cualquier exposición imprevista superior al índice permitido debe necesariamente reducir la cantidad total "presupuestada".

Las radiaciones nucleares no pueden detectarse mediante los sentidos humanos, por lo que existe una gama amplia instrumentos para su medición algunos de ellos se anotan a continuación,

- Electroscopio
  
- Cámara de nube
  
- Película fotográfica sensibilizada

- Cámara de ionización
- Contador de Gelger Muller
- Contador de centello
- Cámara de burbuja de chispa
- Detector de estado sólido

### 2.13. Ciclo del Combustible Nuclear

Se define el ciclo del combustible nuclear a los procesos a que se somete el material, desde su extracción en la mina, hasta el destino que se da a los productos de la fisión, dado que actualmente el uranio es el elemento más usado, nos referimos a él, además, este elemento puede utilizarse como uranio natural o bien como uranio enriquecido. Veamos el ciclo en cada uno de estos casos.

**Uranio Natural.** El inicio del ciclo es la extracción que parte de la localización de los yacimientos de este elemento que resulten económicos aprovechables, aprovechando algunas propiedades como las radiaciones emitidas por el uranio, también se puede medir la presencia de gas radón que es un emisor de partículas alfa y que por ser producto del decaimiento del uranio indica la presencia de este. También se pueden utilizar métodos geoquímicos consistente en analizar químicamente muestras de mineral.

La minería para el proceso de extracción del uranio es similar a la usada para otros minerales, hay una sola variante, importante y es la protección radiológica que se debe tener especialmente cuando la extracción se hace en minas subterráneas.

Posteriormente a la extracción se realiza el proceso de concentrado a fin de eliminar minerales no deseables y dejar sólo el óxido de uranio que es como este elemento se encuentra en la naturaleza.

El concentrado obtenido recibe varios nombres como, pasta amarilla, o en inglés, "yellow cake", y esta es la materia prima a partir de la cual se siguen los ciclos para el uranio natural o para el uranio enriquecido.

Al seguir el ciclo de uranio natural, el concentrado de uranio se somete a un proceso de refinación y reducción con el fin de eliminar impurezas que hacen imposible su utilización en los reactores.

El proceso de refinamiento se hace disolviendo el concentrado en ácido nítrico y purificado por medio de solventes por extracción obteniendo  $UO$ , reduciendo este con hidrógeno para producir  $UO_2$ , que es físicamente un polvo negro con el que se fabrican los combustibles.

Con este  $UO_2$  se fabrican pastillas de forma cilíndrica de 1 cm de diámetro de 1 cm de longitud las cuales se introducen en tubos de una aleación de circonio, llamada zircalloy, formandose así barras de combustibles. Cuando el combustible han sido fisionado en el reactor se producen los llamados productos de la fisión altamente radiactivos y que para evitar que causen daños es necesario guardarlos en lugares seguros. El ciclo descrito se muestra en la figura 2.24.

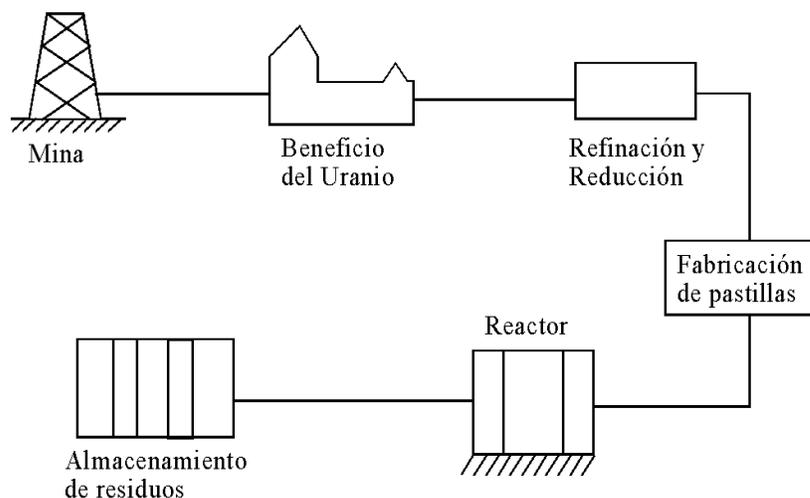


Figura 2.24. Ciclo del uranio natural.

**Uranio Enriquecido.** Como antes se comentó el ciclo del uranio enriquecido incluye en principio los mismos procesos que el uranio natural con algunas etapas adicionales, como la conversión del hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ), el enriquecimiento y la reconversión, después de quemado el combustible existen algunas variantes con relación al ciclo de uranio natural.

**Conversión a Hexafluoruro de Uranio.** Uno de los requisitos para realizar el llamado enriquecimiento es que el uranio se encuentra en forma gaseosa por lo que se hace necesario disponer de un compuesto de uranio que sea de gas a temperaturas bajas ya que el uranio en forma metálica requeriría de una temperatura de  $3820^{\circ}C$  para alcanzar su forma gaseosa.

El hexafluoruro de uranio cumple con esta función ya que pasa de sólido a gas a temperatura de  $56^{\circ}C$  y el fluor solo contiene un isótopo.

El proceso de obtención del hexafluoruro de uranio es un proceso químico en el  $UO_2$  se fluoriza y se convierte en tetrafluoruro de uranio con fluoruro de hidrógeno, para poste-

riormente con fluor pasa a  $UF_6$  y de esta forma se envía a las plantas de enriquecimiento.

**Enriquecimiento del Uranio.** Como se vio antes, el uranio se encuentra en la naturaleza en forma de varios isótopos. Debido a que el uranio 235 es el isótopo más útil por ser el más fisionable, y en particular en los reactores de uranio enriquecido se diseña el proceso para que su combustible contenga aproximadamente el 3% de este isótopo, se requiere entonces modificar la composición isotópica natural del uranio, proceso que resulta altamente complicado y costoso, solo unos cuantos países tienen esta tecnología.

Básicamente existen dos tecnologías a nivel industrial para enriquecer el uranio conocidas como: difusión gaseosa y centrifugación gaseosa, cuyo principio se basa en que la molécula de  $UF_6$  con uranio 235 es menos pesada que la de  $UF_6$  con uranio 238. El hexafluoruro de uranio ya enriquecido se envía a la planta de reconversión que normalmente forma parte de la planta de fabricación de los elementos combustibles.

**Reconversión.** En los reactores de uranio también se requiere que el uranio este como  $UO_2$  es decir que es necesario transformar el hexafluoruro en óxido de uranio.

Uno de los procesos más usados es el llamado ADU en el que el  $UF_6$  se hace reaccionar químicamente con agua y amoníaco para producir el llamado ADU que son cristales de diunurato de amonio que se filtra y posteriormente se calcina en una atmósfera de hidrógeno para obtener finalmente el  $U$ . En la figura 2.25 se muestra el proceso del uranio enriquecido.

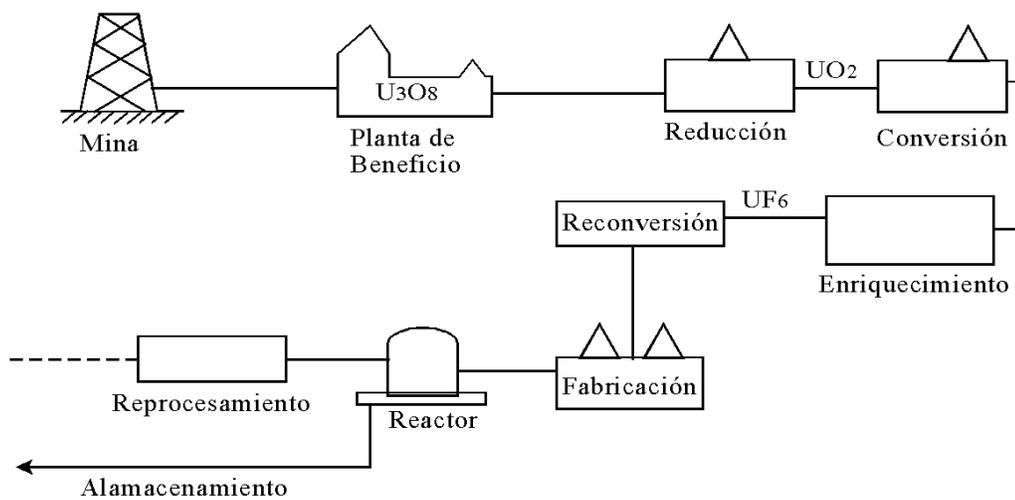


Figura 2.25. Ciclo del uranio enriquecido.

## Capítulo 3

# Otras Fuentes de Energía

### 3.1. Energía Solar

El Sol es una esfera gaseosa con un diámetro de 1 391 000 km. La Tierra da vueltas alrededor del Sol siguiendo una órbita elíptica de la cual el Sol ocupa un foco, la distancia media de la Tierra al Sol es de 150, 000,000 Km. Es mínima hacia el 15 de Enero y máxima a fines de Junio.

La radiación es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas, se produce directamente desde la fuente (el sol) hacia afuera en todas las direcciones. La radiación es un proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio. Todas las formas de radiación son producidas por cargas aceleradas. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas.

La tasa a la cual la radiación es recibida por una superficie por unidad de área se denomina irradiancia, la misma que se expresa en unidades de potencia por unidad de área,

W/m<sup>2</sup>.

La cantidad de radiación recibida por una superficie por unidad de área durante undeterminado período se denomina irradiación. Se expresa en unidades de energía por unidad de área, Wh/m<sup>2</sup>.

### 3.1.1. Características de la Radiación Solar

Por otro lado, la energía no se encuentra uniformemente distribuida en todo el espectro electromagnético Figura 3.1, este se puede agrupar en las siguientes regiones:

a.- La región llamada visible ( $0.35 \mu\text{m} < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$ ) porque es el rango que puede detectar el ojo humano y dentro del cual están los colores violeta ( $0.4 \mu\text{m}$ ), azul ( $0.45 \mu\text{m}$ ), verde ( $0.5 \mu\text{m}$ ), amarillo ( $0.55 \mu\text{m}$ ), anaranjado ( $0.6 \mu\text{m}$ ) y rojo ( $0.70 \mu\text{m}$ ).

b.- La región invisible más allá del rojo ( $\lambda > 0.75 \mu\text{m}$ ), conocida como infrarrojo lejano o región de las ondas de calor.

c.-La región invisible antes del violeta ( $\lambda < 0.35 \mu\text{m}$ ), denominada ultravioleta.

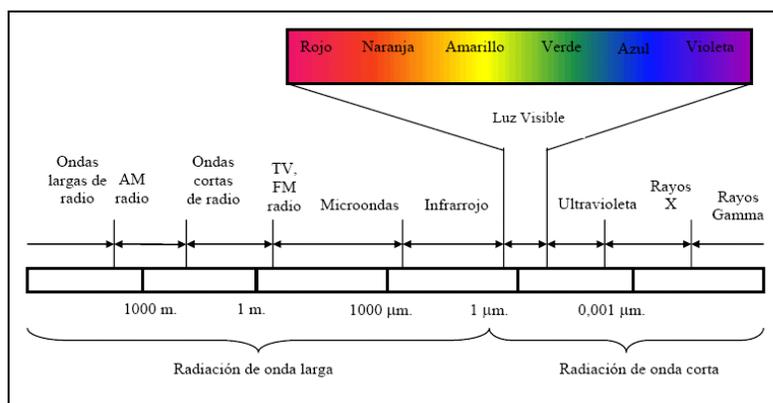


Figura 3.1. Espectro Electromagnético.

De acuerdo con lo anterior, a cada región corresponde una fracción de la constante

solar, distribuida así: 7% al ultravioleta (95.7 W/m<sup>2</sup>), 47.3% al visible (646.6 W/m<sup>2</sup>) y 45.7% al infrarrojo (624.7 W/m<sup>2</sup>).

La atmósfera en su mayoría es transparente a la radiación solar entrante. Considerando, que al tope de la atmósfera llega un 100% de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie (esto hace que un 51% de radiación llegue a la superficie terrestre). Un 19% es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30% se pierde hacia el espacio, de este valor, la atmósfera dispersa un 6%, las nubes reflejan un 20% y el suelo refleja el otro 4%.

### **3.1.2. Tipos de Radiación**

En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiación:

a.- Radiación directa: la que se recibe directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica. La radiación extraterrestre es, por tanto, radiación directa.

b.- La radiación difusa: es la que se recibe del Sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna.

c.- Radiación terrestre: la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.

d.- Radiación total: la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie.

Por ejemplo, sobre una pared o una ventana, incide la radiación directa del Sol, la difundida por las nubes y por el cielo y, además, puede entrar la luz reflejada por algún otro objeto frente a la pared o ventana. Un caso particular, pero de mucho interés práctico en el estudio de la energía solar, es el medir la radiación total sobre una superficie horizontal "viendo" hacia arriba. En este caso puede considerarse que no existe radiación terrestre y se conoce también como radiación global. Por tanto, la radiación global es la suma de la directa más la difusa.

La atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe del Sol. Por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. La radiación difusa, es la que proviene del cielo azul. En cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable. Las nubes densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, una gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior. Además, la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa.

### **3.1.3. Aprovechamiento de la Energía Solar**

La radiación solar se puede aprovechar de tres distintas maneras:

a.- Directa. Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.

b.- Térmica. Se denomina "térmica" la energía solar cuyo aprovechamiento se logra

por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

c.- Fotovoltáica. Se llama "fotovoltáica" la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.

### 3.1.4. Sistemas Pasivos

La energía solar térmica pasiva nos permite producir energía sin necesidad de utilizar ningún medio mecánico. El proceso térmico pasivo es un proceso totalmente natural en el que el sol se emplea para el calentamiento del agua circulante por conductos o placas que posteriormente es utilizada para la climatización de ambientes o el agua caliente sanitaria, tanto a nivel doméstico como industrial. El agua caliente se aprovecha directamente o se almacena en un depósito para su posterior uso. En la Figura 3.2 se presenta un ejemplo de implementación de un sistema pasivo.

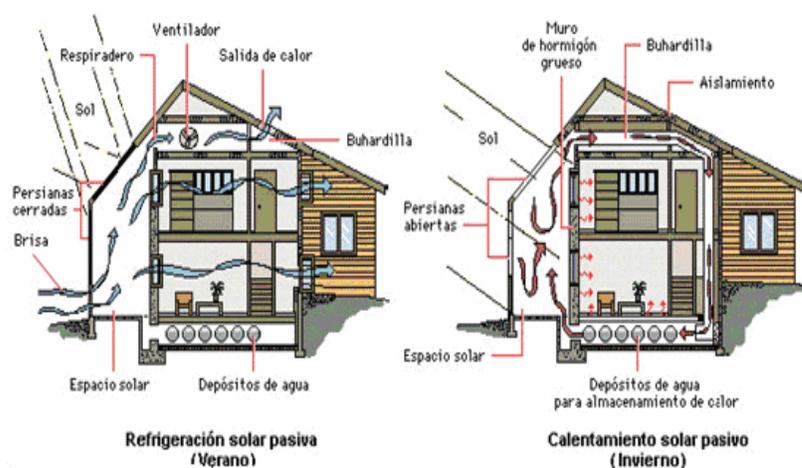


Figura 3.2. Sistema Pasivo.

### 3.1.5. Sistemas Activos

La energía solar térmica activa obtiene electricidad a partir de una serie de tecnologías que permiten la transformación del calor obtenido por la radiación solar. La radiación solar directa se concentra por diversos métodos en las centrales solares obteniéndose calor a media o alta temperatura.

El funcionamiento consiste en concentrar la luz solar mediante espejos (heliostatos), cilindros o discos parabólicos para alcanzar altas temperaturas que se utilizan para generar vapor y activar una turbina que produce electricidad por medio de un generador. En este proceso no se producen las emisiones contaminantes de las centrales térmicas convencionales.

### 3.1.6. Tipos de Colectores

A continuación se presentan los tipos de colectores existentes para la captación de energía solar. Los colectores solares pueden ser de dos tipos principales: los de placa plana y los de concentración.

- **Colectores de Placa Plana.** Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los colectores solares planos, Figura 3.3, son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los 100 °C. Las ventajas que podemos obtener de este tipo de colectores con respecto a los colectores de enfoque, que concentran la radiación solar; es que éstos utilizan la energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo

para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de fruta y granos. Los colectores planos están compuestos generalmente por los siguientes elementos:

- Superficie captadora de la radiación solar
- Circuito por donde circula el fluido que transfiere el calor captado
- Cubierta transparente
- Aislamiento térmico
- Caja protectora que acopla el conjunto al resto de la instalación

La placa captadora es el elemento principal que recoge la radiación solar y transmite el calor que ésta transporta. Está construida de material metálico negro, o plástico cuando la temperatura es inferior a 50 °C. Se orienta hacia el Sur con una inclinación igual a la latitud geográfica del lugar. Esta placa debe absorber la máxima radiación posible para convertirla en energía térmica con el mayor rendimiento y transferir la mayor cantidad posible de calor al fluido portador. Para mejorar estas placas se emplean los llamados recubrimientos selectivos", productos de máxima absorción de radiación y mínima emisión.

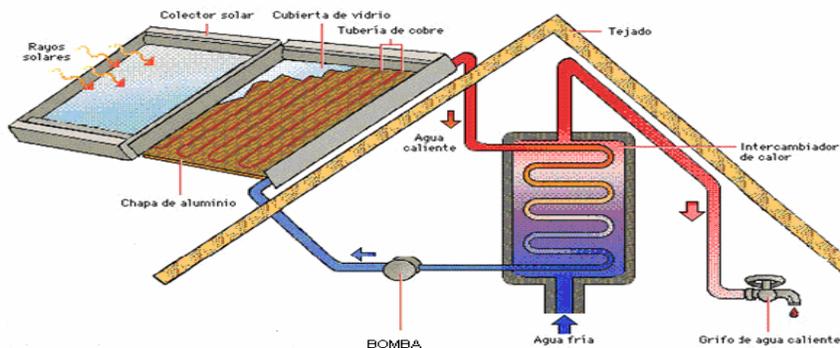


Figura 3.3. Colector de placa plana.

- Colectores Concentradores.** Existen muchas aplicaciones, sobre todo a nivel industrial, donde se necesita que la energía sea liberada a altas temperaturas. Como se mencionó antes, esto no se puede lograr con los colectores solares planos debido a las características propias de este tipo de colectores ya que la radiación solar es una energía de baja intensidad. En consecuencia, para obtener temperaturas altas (arriba de los  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), se hace necesario incrementar la intensidad de la energía solar. Esto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie absorbidora, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico. Esta es precisamente la función que desempeñan los colectores concentradores. De esta manera, en el absorbedor, podemos tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico.

Con los colectores concentradores de energía solar, se pueden obtener temperaturas

entre 100 y 500 °C si se usan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500 °C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500 °C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

Aunque con este tipo de colectores se pueden obtener altas temperaturas de operación, estos presentan varios problemás técnicos desde el punto de vista Ingenieril comparados con los colectores solares planos. Deben orientarse continuamente al sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado debido a que este tipo de colectores utilizan únicamente la energía solar directa.

#### ■ **Colectores Concentradores para la Conversión Térmica a Temperaturas**

**Medias.** Para obtener temperaturas superiores a los 100 °C se debe concentrar la radiación solar, para lo que se pueden utilizar lentes o espejos. Canalizando la radiación hacia un punto o una superficie llamado "foco", éste eleva su temperatura muy por encima de la alcanzada en los colectores planos.

Aunque la superficie que recibe los rayos concentrados puede tener cualquier forma dependiendo de la técnica usada, en la actualidad la solución más favorable para una concentración de tipo medio (temperaturas menores de 400°C) es el colector cilindro-parabólico", consiste en un espejo cilindro-parabólico, Figura 3.4, que refleja la radiación recibida sobre un tubo de vidrio dispuesto en la línea focal. Dentro del tubo se vidrio están el absorbedor y el fluído portador del calor.

Para que se puedan concentrar los rayos solares, estos colectores se montan igual que los planos, es decir, mirando al Sur y con una inclinación igual a la latitud del lugar.

Además necesitan un dispositivo que vaya haciendo girar los espejos a lo largo del día,

sincronizado con el movimiento aparente del Sol.

- Los colectores cilindro-parabólicos, aparte de poder operar a temperaturas superiores a las de los planos, tienen la ventaja de requerir depósitos de acumulación más pequeños y de tener menores superficies de absorción y menores pérdidas de calor. No obstante, son más caros.

Aunque los colectores cilindro-parabólicos son aplicables en la misma gama de necesidades que los paneles planos, al poder desarrollar temperaturas considerablemente superiores tienen interesantes posibilidades de utilización industrial. Así, se están usando asociaciones de un cierto número de estos colectores en las llamadas "granjas solares", pudiendo ser utilizados para la producción de calor o electricidad. La energía así obtenida se aplica a procesos térmicos industriales, desalinización de agua de mar, refrigeración y climatización.



Figura 3.4. Colector cilíndrico parabólicos.

- **Colectores Concentradores para la Conversión Térmica a Altas Temperaturas.** Para conversiones térmicas superiores a los 400 °C, encaminadas a la producción

de energía eléctrica a gran escala, es necesario concentrar la radiación solar mediante grandes paraboloides o un gran número de espejos enfocados hacia un mismo punto. El sistema más extendido es de receptor central, formado por un campo de espejos orientables, llamados "heliostatos", Figura 3.5, que concentran la radiación solar sobre una caldera situada en lo alto de una torre.

El calor captado en el absorbedor es cedido a un fluido portador circulando en circuito cerrado y que, debido a las altas temperaturas que ha de soportar (superiores a 500 °C) suele ser sodio fundido o vapor de agua a presión. Este fluido primario caliente se hace pasar a un sistema de almacenamiento, para luego ser utilizado en un sistema de generación de vapor, que se alimenta a una turbina. Esta actúa sobre un alternador, que permite obtener energía eléctrica.

La tecnología de las centrales solares se encuentra actualmente en fase de pleno desarrollo. Las instalaciones existentes se pueden considerar sólo como plantas de experimentación que permiten obtener, de momento, una rentabilidad en forma de innovación tecnológica. Por lo tanto, estas centrales están aún muy lejos de resolver el problema energético, aunque se pueden considerar válidas como un modesto complemento de las centrales térmicas convencionales.



Figura 3.5. Helióstatos

### 3.1.7. Conversión Eléctrica: Sistemas Fotovoltaicos

La celda solar es un dispositivo semiconductor capaz de convertir los fotones procedentes del Sol (luz solar), en electricidad de una forma directa e inmediata. Esta conversión se conoce con el nombre de efecto fotovoltaico. Una forma más general de celda solar, afectada tanto por los fotones del Sol como los de otras fuentes artificiales, como una bombilla, se denomina celda fotovoltaica.

Está compuesta por silicio (arena refinada), y con el agregado de otros elementos, obtiene propiedades Fotovoltaicas, teniendo un razonable rendimiento energético. Son de 3 tipos: silicio amorfo, multicristalino y monocristalino, siendo su Rendimiento variable entre el 8, 12, 15% de la luminosidad recibida. Su durabilidad está entre los 20 y 30 años. Hay celdas con otros compuestos y con mayor rendimiento en potencia con costos aún altos. Una celda tiene un tamaño aproximado de 10 cm.x 10cm. 100 cm<sup>2</sup> y genera una potencia de entre 1.5 a 2 W.

Para producir mayor cantidad de energía, las celdas se agrupan e interconecta configurando así los Paneles Fotovoltaicos, Figura 3.6. Constructivamente constan de un marco perimetral, un vidrio resistente que deja pasar los rayos protegiendo las celdas. La Potencia generada por un panel esta en relación directa a su superficie. Generalmente se les construye de acuerdo a su potencia: 5 a 220 W. Tensión operativa; 12 V, 24 V, 36 V y 48 V pudiendo ser conectados en serie ó paralelo.

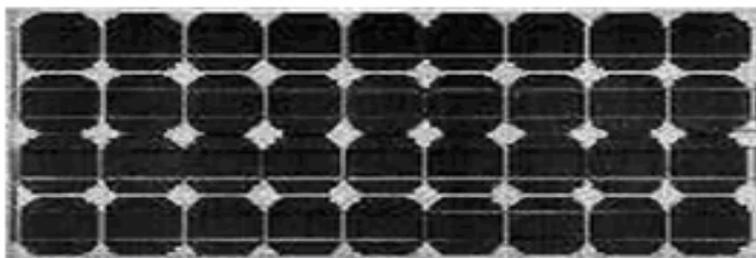


Figura 2.11 Panel Fotovoltaico

Figura 3.6. Panel Fotovoltaico.

### 3.1.8. Sistema Solar Fotovoltaico (Ssfv)

Está compuesto por: Paneles, Controlador de Carga, Inversor y Baterías de almacenado (como se muestra en la Figura 3.7).

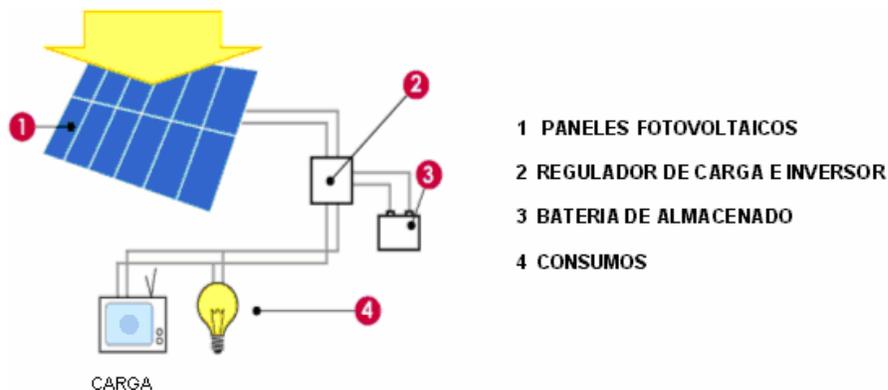


Figura 3.7. Sistema Fotovoltaico

### 3.2. Energía Eólica

La energía eólica o energía del viento es generada por las corrientes en la capa de aire de la atmósfera, las cuales se forman por el calentamiento no homogéneo del sol que provoca diferencias de temperatura y de presión en el aire.

Esa energía cinética del viento puede transformarse en energía útil, mecánica o eléctrica. Transformada en energía mecánica, la energía eólica se ha aprovechado desde tiempos remotos para mover embarcaciones o las aspas de molinos de viento. Su uso para generar energía eléctrica es más reciente, empleándose actualmente aerogeneradores montados en torres de 30 metros de altura, ya que la velocidad del viento aumenta a mayor distancia del suelo.

La capa límite que se forma en la intercara suelo-aire hace que la velocidad del viento aumente con la altura. Este incremento es proporcional a la altura elevada a la potencia  $1/7$ . Así, mientras más alto se instale un aerogenerador, mayor será la potencia que genere.

#### **Beneficios**

- El combustible, que es el viento es gratuito y renovable.
- Las plantas eolieléctricas no arrojan ningún tipo de emisiones ni de desechos, por lo que no contaminan.
- Ocupan una mínima parte del terreno, conservándose el uso original del suelo sin perturbar las actividades de las comunidades.
- Su crecimiento es modular.

- Tienen bajo costo de mantenimiento.

### **3.2.1. La eoloelectricidad en el mundo**

Además de pequeños aerogeneradores aislados, no integrados a la red de distribución eléctrica, alrededor de 20 países en el mundo tienen plantas eololéctricas integradas con una capacidad instalada conjunta de más de 3000 MW, lo que equivale al 12% de la capacidad eléctrica total de México.

Entre esos países destacan con una capacidad instalada de:

- Estados Unidos, 170MW
- Dinamarca, 520 MW
- Alemania 330MW
- Inglaterra, 145 MW
- Holanda, 132 MW

### **3.2.2. La energía eólica en México**

A pesar de no contarse con estudios sistemáticos en todo el territorio nacional, México posee un importante potencial eolol ctrico, que puede estimarse en unos 2000MW. Por lo menos la mitad de tal potencial se concentra en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, encontrándose el resto en regiones como La virgen, Zacatecas, Pachuca, Hidalgo, Veracruz y otros.

La comisión Federal de Electricidad realiza actualmente el monitoreo de diversas estaciones anemom tricas, que miden la velocidad, dirección y frecuencia del viento, en

varias de las regiones con mayor potencial eólico. Contar con datos suficientes para tener una estadística confiable, es indispensable para el diseño de proyectos futuros en alguna o algunas de tales regiones.

### **3.2.3. Central de La Venta, Oaxaca**

La primera central eoloelectrica integrada a la red en América Latina ha sido construída por la CFE a través de la unidad de nuevas fuentes de energía de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Se localiza en el sitio denominado La Venta, ubicado a unos 30 Km al noreste de la ciudad de Juchitán, Oaxaca. La Venta está en una llanura con una pequeña pendiente del 1 %, con vientos cuya velocidad media anual es de 7 m/seg a 10m de altura.

La central consta de 7 aerogeneradores de 225 KW de potencia cada uno, montados en torres tubulares de 30m de altura separadas entre si 60m.

La capacidad total de la central es de 1575 KW, es decir, poco más de 1.5 MW, la cual resulta pequeña para los estandares de la CFE; sin embargo, se trata de una central piloto cuyo objetivo es demostrar en la práctica la factibilidad técnica y económica de la eoloelectricidad en México, para construir despues centrales mayores en este mismo sitio de La Venta se estima un potencial total de 100 MW, en una superficie de 15 Km<sup>2</sup>.

La cimentación de las torres resultó ser una de las etapas críticas, ya que los vientos fuertes provocan complejos fenómenos de vibración en las mismas; entre tales fenómenos está el conocido como estela de Von Karman en el que un viento fuerte produce una excitación sobre la torre cilíndrica debido al desprendimiento alternado de vórtices. Otra fuente de excitación se produce al pasar un aspa frente a la torre y hacerle "sombra" momentáneamente

a la estructurada.

Las torres tubulares fueron transportadas en secciones y armadas en el sitio mediante gruas, colocandolas encima el aerogenerador y por último la hélice con tres aspas con un diámetro máximo de 28m.

Los aerogeneradores fabricados por la compañía danesa Vestas, empiezan a funcionar cuando el viento alcanzan una velocidad de unos 5 m/seg, llegando a su potencia nominal de 225 KW cuando la velocidad es de 15 m/seg. A esta velocidad el viento hace girar las aspas a unas 43 rpm, transmitiéndose este giro al generador y aumentándolo mediante engranes a 1800 rpm.

Los generadores son de corriente alterna, asíncronos y del tipo de inducción, controlando la velocidad de giro gracias a la frecuencia de la propia red a la que están conectados. Operan a 480 V y la energía generada por ellos baja a la base de la torre; de aquí, mediante cables suterráneos, se unen dos o tres de ellos hasta un transformador que eleva la energía a 13.8 KV y se conecta a la red. En la figura 3.8, se muestran algunas ilustraciones de parques eólicos.



Figura 3.8. Parques eólicos.

En la figura 3.9 se muestra la conexión de un generador eléctrico basado en energía eólica con un sistema eléctrico de potencia.

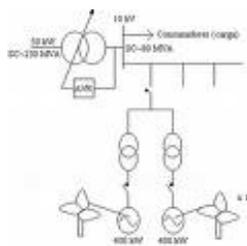


Figura 3.9. Conexión de un generador eólico a un sistema eléctrico de potencia

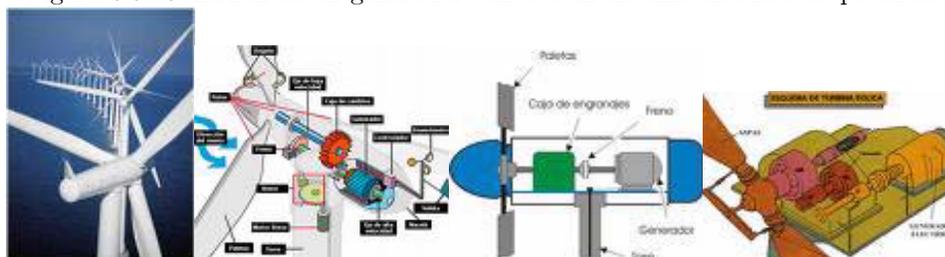


Figura 3.10. Aerogeneradores.

Finalmente, en la figura 3.10 se muestran la composición de un aerogenerador y en la figura 3.11 como se puede utilizar desde un punto de vista arquitectónico la instalación de un aerogenerador en un gran puente vehicular.



Figura 3.11. Puente con un aerogenerador.

### 3.3. Energía Maremotriz

Las mareas de los océanos constituyen una fuente gratuita, limpia e inagotable de energía. Los océanos, con una superficie de 361 millones de  $\text{km}^2$  y un volumen de  $1370 \text{ km}^3$ , actúan como sistemas colectores y de almacenamiento, lo cual se manifiesta de diversas

formas, olas (energía eólica), y gradientes térmicos, gradientes salinos y corrientes marinas, (energía solar maremotérmica). Las más estudiadas son las debidas a las mareas, olas y térmica marina, estando las de las corrientes y gradientes salinos mucho menos desarrolladas.

A estas formas de energía hay que sumar la de las mareas (energía mareomotriz) debida a la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, y a la rotación de la Tierra,  $3 \times 10^6$  MW.

Los mares y los océanos son una fuente de energía prácticamente inagotable. Muchos han sido los proyectos propuestos para aprovechar el enorme potencial energético contenido en el movimiento perpetuo de sus aguas, pero la mayoría no se han realizado a causa de los efectos corrosivos del agua salada sobre las partes metálicas, de las condiciones atmosféricas adversas, las dificultades de transporte de energía producida y los elevados gastos que supone.

Las principales fuentes para aprovechar la energía del mar son:

- Energía de las mareas:

Las mareas son un movimiento cíclico alternativo de ascenso y descenso del nivel del agua del mar, producto de la acción gravitatoria de la Luna y el Sol y favorecido por la poca viscosidad del agua. Este movimiento de subida y bajada del nivel del agua es aprovechado en las centrales mareomotrices para generar energía eléctrica.

- Energía de las olas:

La principal fuente de energía de las olas es el sol. El calentamiento desigual de la superficie terrestre genera viento, y este, al pasar por encima del agua, genera olas.

Los dispositivos que se están experimentando o que están en proyecto son muchos, aunque la mayoría utilizan el mismo principio: la ola presiona sobre un cuerpo que comprime el fluido (líquido o gas) el cual acciona una turbina.

- Energía térmica de los océanos:

La diferencia de temperatura entre las capas superficiales y las profundidades de los océanos se puede aprovechar para desencadenar un ciclo termodinámico y obtener energía eléctrica.

### 3.3.1. Fenómeno de la marea

El primero que estudió el fenómeno de las mareas fue Newton, quien analizó el equilibrio de un elemento de agua oceánica sometido a la gravedad terrestre y a la atracción solilunar. Un modelo de este se muestra en la figura 3.12.

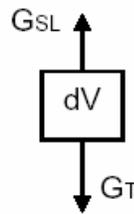


Figura 3.12. Fenómeno de la marea de acuerdo a Newton.

De esta forma, logró determinar un valor que hoy se denomina "marea estática", y que casi, nunca coincidía con las mediciones reales en ninguna parte. Solamente cuando Lagrange analizó el fenómeno desde el punto de vista oscilatorio, al considerar en vez del equilibrio estático, los movimientos resultantes de considerar a la masa oceánica como un cuerpo elástico sometido a fuerzas de origen gravitatorio con componentes armónicas.

En efecto, considerando la deformación de la masa elástica supuesta continua y concéntrica con la esfera terrestre, también considerada continua y lisa, el esquema es el que se muestra en la figura 3.13, exagerando el espesor de la capa de agua y las amplitudes de las deformaciones.

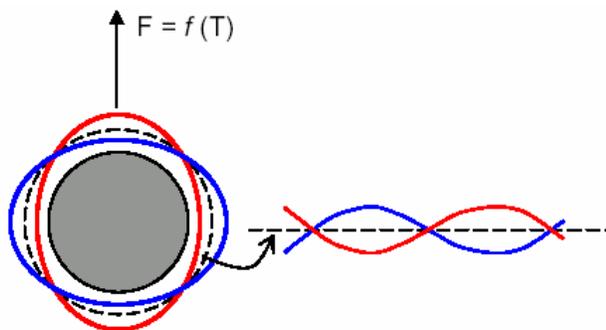


Figura 3.13. Deformación de la masa elástica.

Rectificando la línea estática de nivel de agua (trazos) se nota entonces que el fenómeno se trata de oscilaciones de una masa elástica. En algunos casos, dichos fenómenos resonantes pueden combinarse con otros factores, como por ejemplo corrientes marinas, dando origen a fenómenos más complejos. La marea es la fluctuación periódica del nivel de los océanos, debida principalmente a la atracción gravitatoria de la Luna y en menor cuantía del sol, (la luna ejerce una atracción 2.2 veces la del sol), y al movimiento de rotación de la Tierra, (aceleración de Coriolis); otros factores son la forma y fisionomía del relieve de las costas y del fondo, los fenómenos meteorológicos, etc. La aceleración que produce el efecto de marea aumenta con la masa y disminuye con el cubo de la distancia. Con relación a la Tierra, y teniendo en cuenta las distancias y las masas, sólo el Sol y la Luna son capaces de producir mareas apreciables; el Sol, más distante, influye por su masa; la Luna, de masa mucho menor, por su proximidad a la Tierra.

### 3.3.2. Tipos de mareas

Marea tipo diurno: Con una pleamar y una bajamar en el transcurso del día lunar. Considerando que el día lunar es de 24 horas 50 minutos se producirá una pleamar y una bajamar cada 12 horas 25 minutos.

Diurnas irregulares: Con dos ciclos por día lunar pero con marcadas diferencias en las alturas y en los períodos de tiempo.

Mareas mixtas: Régimen de tipo intermedio, durante un día lunar se presenta dos pleamares y una bajamar o dos bajamares y una pleamar.

Mareas vivas o de sicigia: Cuando la posición de los tres astros, sol, luna, tierra se encuentran sobre una misma línea se suman las fuerzas de atracción de la luna y el sol, por lo que se producen las pleamares de mayor valor y en consecuencia las bajamares son más bajas que las promedio.

Mareas muertas o de cuadratura: Cuando la luna y el sol forman un ángulo de  $90^\circ$  con centro en la tierra, la luna se encuentra en cuarto creciente o menguante (en el caso de creciente se asemeja a la letra C y cuando parece una D cuarto menguante). En este caso las fuerzas de atracción se restan por lo que la mayor atracción de la luna se ve disminuida por efecto de la del sol y se producen mareas de menor magnitud a las mareas promedio. En consecuencia las corrientes serán también menores por ser menor el volumen de agua a trasladarse en el mismo tiempo.

### 3.3.3. Funcionamiento de una central maremotriz

Como hemos visto las mareas se producen por la atracción gravitatoria que ejerce la luna sobre los mares. En consecuencia durante el día se producen altos y bajos niveles de los mares en las distintas zonas costeras.

La energía mareomotriz aprovecha estas diferencias, para interponer elementos móviles, que el agua al pasar por ellos, pueden hacer girar aspas que se conectan a generadores y así producir energía eléctrica. En la figura 3.14 se muestra un esquema básico de una central maremotriz.

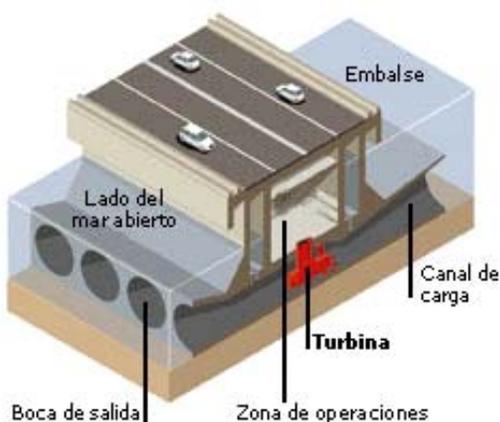


Figura 3.14. Esquema de una central maremotriz.

El funcionamiento de este tipo de central de generación de energía eléctrica se enuncia en los siguientes puntos:

- Al subir la marea las compuertas se abren ingresando el agua de mar al embalse.
- En el momento que el agua llega al nivel máximo del embalse, se cierran las compuertas.
- Se produce la marea baja y el nivel al lado contrario del embalse desciende.

-Al producirse la máxima diferencia entre el embalse y el nivel del mar, se abren las compuertas de las turbinas para que el agua pase a través de ellas generando electricidad.

-Como una disposición de este tipo proporciona energía sólo durante 3 horas, dos veces al día, se han dispuesto diversas variaciones de este esquema como medio de generar potencia de forma más continúa .

### **3.3.4. Ciclos de funcionamiento de la una central maremotriz**

En esta sección se describen los ciclos de funcionamiento de una central, los cuales son:

Ciclo de simple efecto.- Se dispone de un embalse único, siendo los modos operativos los siguientes:

a) Generación durante el refluo de marea, (bajamar). El llenado del embalse se efectúa con las compuertas abiertas y el vaciado con turbinación.

b) Generación durante el flujo, (pleamar). El llenado del embalse se efectúa con turbinación y el vaciado con las compuertas abiertas. Es menos eficiente que el anterior; porque el embalse trabaja con niveles más bajos y la capacidad de almacenamiento es menor. En consecuencia generan sólo durante la bajamar, vaciándose el embalse, o sólo durante la pleamar, llenándose el embalse; estas operaciones requieren de una turbina hélice de flujo axial y alta velocidad específica.

Durante el vaciado del embalse se realiza lo siguiente:

a) Cuando sube la marea se abren las compuertas y el embalse se llena.

b) Cuando comienza a bajar la marea se cierran las compuertas y se espera un tiempo, del orden de 3 horas, para alcanzar una diferencia de nivel adecuada entre el mar

y el embalse.

c) A continuación, durante 5 ó 6 horas, se hace pasar el agua por las turbinas generando energía eléctrica.

En los ciclos de simple efecto que funcionan con vaciado del embalse sólo se genera energía, cada día, durante dos períodos de unas 10 a 12 horas en total, que además se irán produciendo en horas diferentes cada día. En la figura 3.15 se muestra un esquema de funcionamiento de esta central basado en el ciclo de simple efecto.

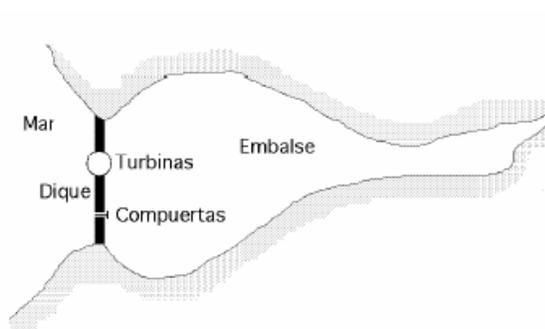


Figura 3.15. ciclo simple.

Si el turbinaje se realizase durante el llenado del embalse, los tiempos de generación utilizando este ciclo son del orden de 4 a 5 horas, con tiempos de espera o de Bombeo de 3 horas, funcionando un total de 8 a 10 horas. Fundy y Kislaya son centrales de este tipo de ciclo.

Ciclo de doble efecto con turbinas reversibles.- La generación de energía se efectúa con ambas mareas, que exige que las turbinas operen eficazmente con un determinado caudal de agua en cualquier dirección, funcionando tanto durante el llenado, como durante el vaciado del embalse.

Se pueden utilizar dos tipos de turbinas:

a) Reversibles

b) No reversibles, con un sistema de canales y compuertas; es un procedimiento complejo y caro.

La energía utilizable es menor debido a que las diferencias de niveles entre el embalse y el mar son menores que en los ciclos de simple efecto, reduciéndose el rango de variación del nivel embalsado, y disminuyendo también el rendimiento al no ser posible optimizar las turbinas y el caudal, pero aún así el factor de utilización de la planta es mayor, lo que proporciona un 18 % más de energía que en los casos de simple efecto.

Los tiempos de funcionamiento son del orden de 6 a 7 horas por marea, lo que supone entre 12 y 14 horas diarias de generación de energía, con tiempos de espera entre 2 y 3 horas por marea. En la figura 3.16 se ilustra el ciclo de doble efecto con turbinas reversibles.

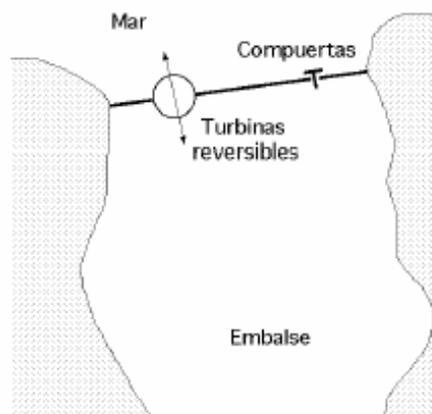


Figura 3.16. Embalse con turbinas de doble efecto.

### 3.4. Energía de las olas

Los convertidores de agua oscilante (OWCs) son dispositivos que transforman la energía del oleaje en energía útil; tienen que ser capaces de resistir los embates del mar y de funcionar eficientemente para las amplias gamas de frecuencia y amplitud de las olas.

Son muchas las modalidades OWCs que permiten obtener energía del oleaje, aunque no está todavía claro cuáles son las opciones más favorables, realizándose el aprovechamiento de la energía de las olas en base a algunas de las siguientes metodologías.

Conversión primaria.- Consiste en la extracción de la energía de las olas mediante sistemas mecánicos o neumáticos, convirtiendo el movimiento de las olas (oleaje), en el movimiento de un cuerpo o en flujo de aire. La energía del oleaje se puede aprovechar para mover flotadores en sentido vertical y en rotación.

En aguas poco profundas se pueden aprovechar los movimientos horizontales del oleaje mediante flotadores o estructuras fijas. La energía de la ondulación del movimiento de las partículas del agua de una ola, se puede extraer mediante un dispositivo tipo noria.

La oscilación del agua a causa del oleaje, dentro de una estructura semisumergida, se puede aprovechar por medios mecánicos o neumáticos, así como la variación de la presión causada por el oleaje, por debajo de la superficie del agua.

Conversión secundaria.- Consiste en la conversión de movimientos mecánicos o neumáticos en energía utilizable, generalmente electricidad. Los medios utilizados para ello son turbinas neumáticas e hidráulicas, dispositivos de transmisión mecánica, y de inducción magnética; a veces, el sistema se diseña exclusivamente para la desalinización del agua

La investigación actual de los OWCs está basada en los siguientes sistemas: Colum-

na oscilante, Péndulo, Tapchan, Boyas mecánicas, Duck, Sea Clam, Cilindro Bristol, Raft, Rompeolas sumergido, etc.

### 3.4.1. Técnicas de utilización energética del olaje

Las técnicas de utilización energética del oleaje aprovechan estos fenómenos básicos que se producen en las olas, y son:

- Empuje de la ola.- En aguas poco profundas la velocidad horizontal de las olas no varía con la profundidad; la energía de las olas se puede absorber mediante un obstáculo que transmite la energía a un pistón; es un sistema poco usado, figura 3.17.

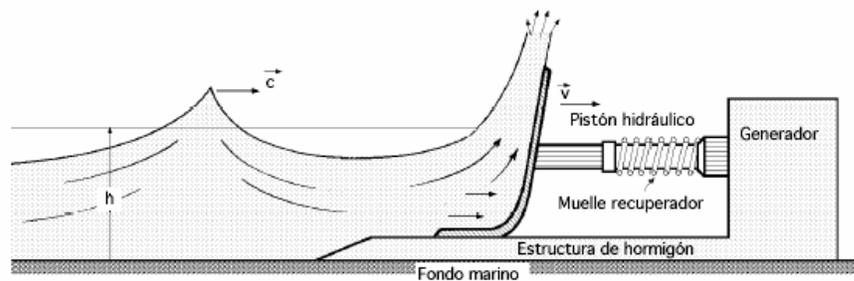


Figura 3.17. Aprovechamiento del empuje de la ola; por un pistón.

- Vacación de la altura de la superficie de ola.- Situando estructuras flotantes que se mueven con las olas, sintonizadas de manera que puedan captar la su energía. Se dispone de un gran número del mismo para captura la energía, de forma similar la de un receptor de ondas de radio, ya que se basan en cualquier proceso que pueda generara olas, también sirve para extraer su energía, figura 3.18.

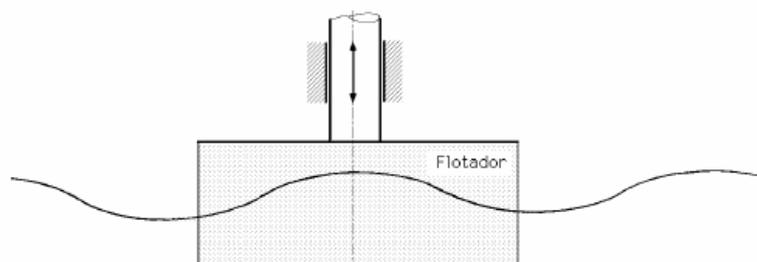


Figura 3.18. Aprovechamiento de la variación de la altura de la superficie de la ola.

- Variación de la presión bajo la superficie de la ola.- Son los sistemas de columna oscilante; consisten en una cámara abierta al mar, que encierra un volumen de aire que se comprime y expande por la oscilación del agua inducida por el oleaje, figura 3.19; el aire circula a través de una turbina que puede ser bidireccional. Se les puede considerar aparatos de primera generación.

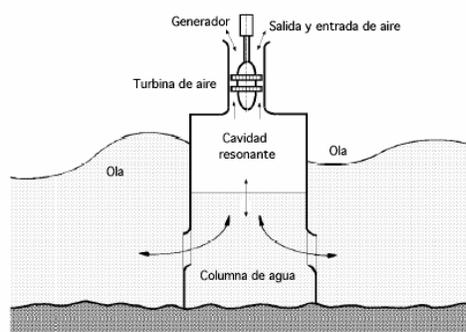


Figura 3.19. Cavidad o columna resonante.

Los sistemas activos son aquellos en los que los elementos del dispositivo, al moverse a impulsos del oleaje, generan energía aprovechando el movimiento relativo entre sus partes fijas y móviles.

Los sistemas pasivos son aquellos en los que la estructura permanece inmóvil, generándose energía directamente, a partir del propio movimiento de las partículas de agua.

Totalizadores o terminadores. Están situados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola (paralelos al frente de onda), y pretenden captar la energía de una sola vez; son los más estudiados. Podemos considerar los siguientes:

### 3.4.2. OWC Rectificador Russel

Es un totalizador pasivo; consiste en una gran estructura tipo depósito construida sobre el lecho marino, que consta de dos cuerpos o tanques, uno superior y otro inferior, separados del mar por unas compuertas. Las compuertas superiores se abren con la cresta de la ola, penetrando grandes cantidades de agua en el tanque superior, mientras que las compuertas inferiores permiten la salida del agua del tanque inferior con el valle de la ola; ambos tanques están comunicados por una turbina la cual funciona al hacerse el trasvase de agua del tanque superior al inferior, de acuerdo con el movimiento de las olas, figura 3.20.

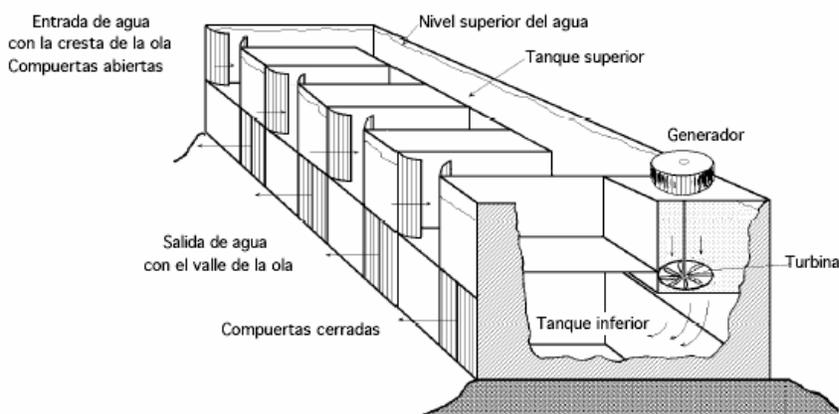


Figura 3.20. Rectificador de Russel.- Formado por módulos que se instalan en el fondo del mar, paralelos al avance de las olas. Cada módulo consta de dos cajas rectangulares, una encima

de la otra. El agua pasa de la superior a la inferior a través de una turbina.

### 3.4.3. OWC péndulo

El péndulo es un dispositivo apto para ser instalado en un rompeolas. Consiste en una cámara fabricada de hormigón de forma que el frente hacia el mar está provisto de una placa rígida de acero, articulada en su parte superior, que puede oscilar ligeramente, figura 3.21. En el interior de la cámara, de una profundidad del orden de un cuarto de longitud de ola, se produce una ondulación estacionaria que mueve la placa, cuyas oscilaciones se transmiten y se absorben por un dispositivo oleohidráulico, estimándose la eficiencia primaria de este dispositivo (olas-aceite) en un promedio del 35 %, y la eficiencia total en un 20 %; para olas regulares, de periodo igual al periodo natural del péndulo la eficiencia puede llegar al 100 %. En la planta piloto Muroran (Japón) se han observado eficiencias del orden del 50 %.

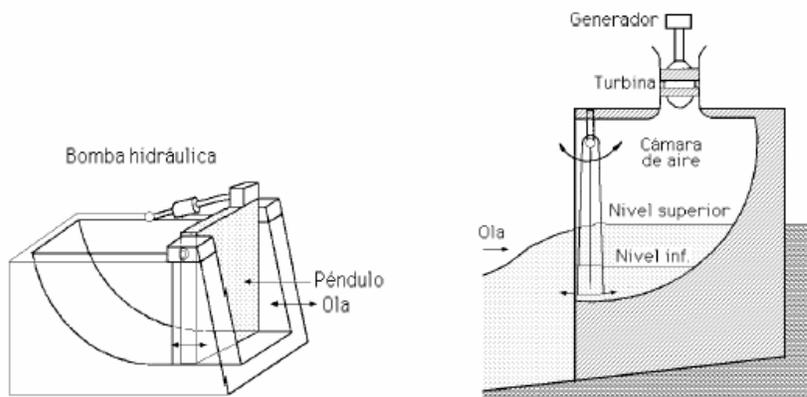


Figura 3.21. Péndulos OWC.

#### 3.4.4. OWC duck o Pato Salter

Se puede considerar como un totalizador activo para el aprovechamiento de las olas a gran escala en altamar, Figura 3.22; desarrollado en la década de los 70, consiste en un flotador alargado cuya sección más estrecha se enfrenta a la ola con el fin de absorber su movimiento lo mejor posible, mientras que su parte posterior es cilíndrica, para evitar pérdidas de energía por rozamiento. Los flotadores giran bajo la acción de las olas, lentamente, alrededor de un eje cuyo movimiento de rotación acciona una bomba de aceite que se encarga de mover una turbina.

Básicamente consiste en una estructura flotante, tal como se indica en la figura 3.22; el sistema consiste en péndulos invertidos, articulados en su parte inferior y montados sobre un eje que permite movimientos en dirección del oleaje, en la que una parte actúa como flotador de balanceo manteniendo una cierta rigidez, es decir, no se ve influenciada por la olas permaneciendo fija, mientras que la parte activa consiste unos flotadores en forma de leva que se mueven accionados por el ritmo de las olas, creándose en los mismos un movimiento oscilatorio, que acciona unos sistemas olehidraulicos ( movimiento alternativo) conectados a una turbina, originando el giro del eje de la misma y, por lo tanto, la generación de energía.

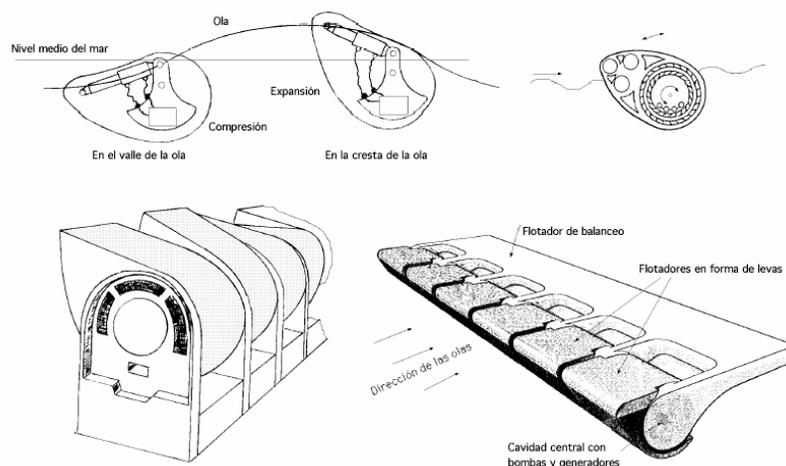


Figura 3.22. Diversos esquemas de Pato Salter.

El módulo de una supuesta central podría estar formado por 54 cilindros flotantes de hormigón, de 14 metros de diámetro y 90 metros de longitud, de 11,000 toneladas de peso cada uno, anclados a 100 metros de profundidad.

Sobre cada uno de los cilindros vienen montados dos cascos, los ducks, que pueden rotar alrededor de los cilindros en respuesta a las olas.

Una planta de 2GW estaría conformada por 8 módulos con un total de 864 Ducks, y una longitud de 38.9 km; cada Duck estaría provisto, en su interior, del equipo mecánico y eléctrico propio para la generación de electricidad. Para este sistema la conversión secundaria se realiza por un sistema hidráulico de aceite.

Una de las características del Duck sería una alta eficiencia en la conversión primaria, alcanzando casi el 100% en condiciones óptimas.

### 3.4.5. OWC Cilindro Bristol

El Cilindro, desarrollado por la universidad de Bristol, es otro concepto para grandes aprovechamientos. Una planta que funcionase con este sistema constaría de 276 grandes aprovechamientos. Una planta que funcionase con este sistema constaría de 276 módulos o cilindros; cada cilindro mediría 100 metros de longitud y 16 metros de diámetro; su parte superior estaría situada a 6 metros de la superficie del agua, y anclada a 40 metros de profundidad, por lo que el cilindro totalmente sumergido, no tiene su estructura sometida a fuerzas excesivas durante las tormentas, figura 3.23.

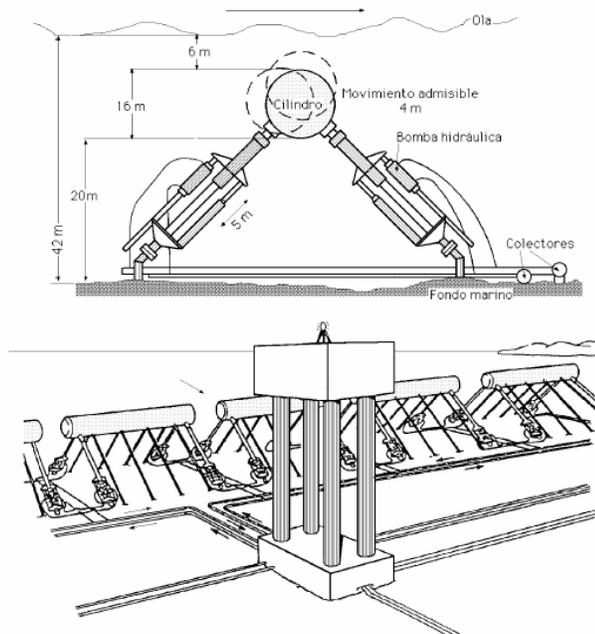


Figura 3.23. Cilindro Bristol.

En la estructura de anclaje están incorporadas bombas hidráulicas, que permiten un desplazamiento vertical. Expuesto al oleaje, el cilindro describe un movimiento circular, en respuesta al movimiento orbital de las partículas de agua dentro de la ola.

El medio de bombeo, agua del mar, sería transportado por tuberías de 1.2m a seis plataformas por encima del nivel del mar, cada una equipada con tres turbinas Pelton de 120MW.

La potencia nominal de la instalación sería 2GW, habiéndose demostrado que la extracción podría alcanzar el 100 % con una adecuada combinación de movimientos.

### 3.4.6. OWC Raft o Balsa Cockerell

Los Rafts son gigantescas plataformas flotantes, articuladas entre sí, (dos o más), unidas mediante mecanismos hidráulicos (cilindro-émbolo), que reciben el impacto de las crestas de las olas, de forma que los movimientos de giro parcial de los flotadores accionados por ellas, se aprovechan para mover un fluido mediante el sistema (cilindro-émbolo) citado, colocado en las articulaciones que une los flotadores (movimiento alternativo), figura 3.24, accionando el fluido a presión resultante una turbina.

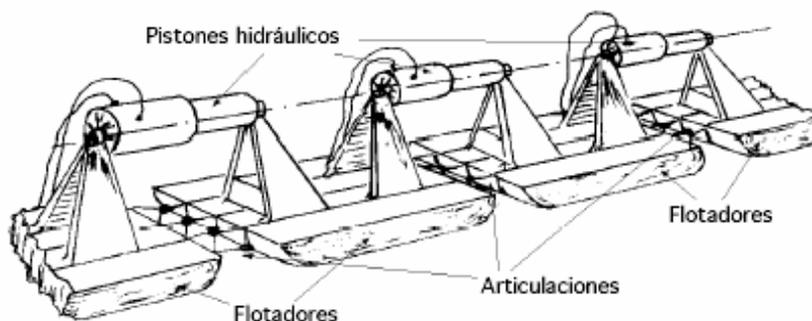


Figura 3.24. Balsa Cockerell.

Las balsas ascienden y descienden impulsando un fluido hasta un motor que mueve un generador por medio de un sistema hidráulico instalado en cada articulación.

El número óptimo de flotadores es de 3 y el tamaño óptimo del sistema es de 100m \* 50m, para conseguir potencias de 1 a 2.5MW.

El oleaje produciría una rotación en las articulaciones que se podría aprovechar para accionar bombas hidráulicas. Su eficiencia teórica puede alcanzar el 90 %. En ensayos con prototipos se han encontrado eficiencias del orden del 40 % al 50 %. Dadas sus gigantescas dimensiones, y las inmensas fuerzas que actúan sobre el anclaje, hacen que el sistema Raft no resulte competitivo.

### 3.4.7. OWC Rompeolas Sumergido

Se han propuesto rompeolas sumergidos, figura 3.25, para calmar el mar, (que evitan impactos por el oleaje y no dificultan el tráfico marino), a base de placas horizontales ancladas en el fondo, que han demostrado su efectividad para absorber parcialmente el oleaje; en ensayos de laboratorio se ha encontrado que hasta el 35 % de la energía incidente del oleaje circula por debajo de la placa, en sentido opuesto al oleaje, flujo que se podría aprovechar en una turbina hidráulica.

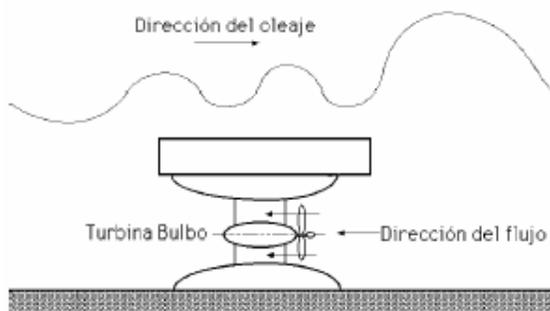


Figura 3.25. Rompeolas sumergido con turbina Bulbo.

### 3.4.8. OWC Columna Oscilante

El principio de extracción de la energía de las olas está basado en la oscilación del agua dentro de una cámara semisumergida y abierta por debajo del nivel del mar, provocada por el oleaje, que produce un cambio de presión del aire por encima el agua, obteniéndose un flujo de aire que se puede aprovechar haciéndole pasar a través de una turbina.

En algún caso, se aprovecha oscilación del agua mediante un flotador. La conversión secundaria se efectúa en este caso, por medios mecánicos o hidráulicos.

Existen varios prototipos de OWCs neumáticos, algunos de ellos a escala real, siendo el único OWC que se ha comercializado con éxito para suministrar electricidad a los sistemas de iluminación de boyas de navegación. Su popularidad se debe a su aparente simplicidad por cuanto convierte las velocidades bajas y fuerzas altas del oleaje, en un flujo de aire de alta velocidad y baja fuerza, aptos para la alimentación de un generador eléctrico. Figura 3.26 describe el dispositivo anterior.

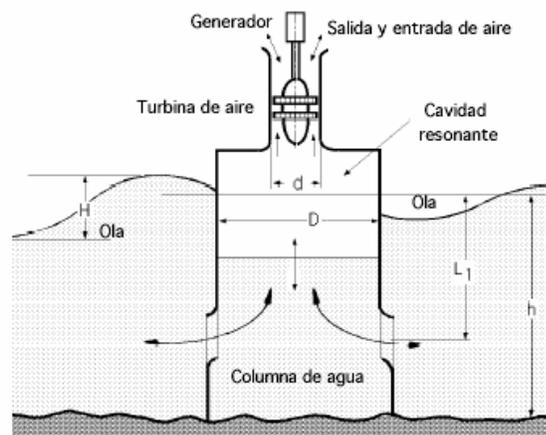


Figura 3.26. Esquema de funcionamiento de un OWC neumático anclado al fondo.

### 3.4.9. OWC Shoreline o Convertidor Belfast

Este OWC, proyectado para ser ubicado en la costa, aprovecha las formas naturales del litoral; su desarrollo fue iniciado en la Queen's University de Belfast en 1985, Figura 3.27. En el diseño se intenta concentrar el oleaje hacia la cámara; estructuralmente se basa en la simplicidad de los componentes, minimizando los costes de la obra civil, incorporando los acantilados como parte de la cámara de aire.

El aire de la cámara se conduce a través de un tubo de 1m de diámetro hacia una turbina biplana tipo Wells, (que gira siempre en el mismo sentido independientemente de la corriente de aire), de potencia nominal 75kW y velocidad nominal 1500rpm.

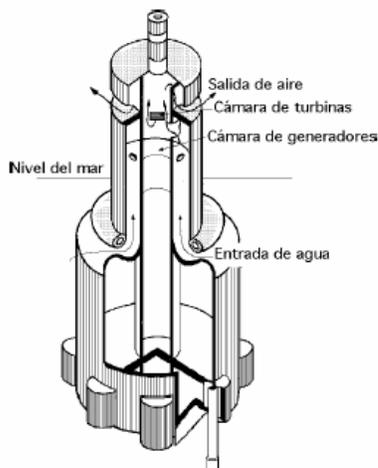


Figura 3.27. Convertidor Belfast.

## 3.5. Biomasa

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa deriva del material vegetal y animal, tal como madera de bosques,

residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o animales.

El valor energético de la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis. La energía química que se almacena en las plantas y los animales (que a su vez se alimentan de plantas u otros animales) o en los desechos que producen, se llama bioenergía, la cual se muestra químicamente en la Figura 2.1. Durante procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía a menudo en la forma de calor y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el crecimiento de la planta. Esencialmente, el uso de la biomasa para la energía es la inversa de la fotosíntesis.



Este proceso de captación de la energía solar y su acumulación en las plantas y árboles como energía química es un proceso bien conocido. Los carbohidratos, entre los que se encuentra la celulosa, constituyen los productos químicos primarios en el proceso de bioconversión de la energía solar y al formarse aquellos, cada átomo gramo de carbono absorbe 112kcal de energía solar, que es precisamente la que después se recupera, en parte con la combustión de la celulosa o de los combustibles obtenidos a partir de ella (gas, alcohol, etc.). En la Figura 3.28 se ilustra un diagrama del origen de la biomasa.

En la naturaleza, en última instancia toda la biomasa se descompone a sus moléculas elementales acompañada por la liberación de calor. Por lo tanto la liberación de energía de conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales pero en una tasa más rápida. Por lo tanto, la energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable. Al utilizar esta energía recicla al carbón y no añade dióxido de carbono al medio ambiente, en

contraste con los combustibles fósiles. De todas las fuentes renovables de energía, la biomasa se diferencia en que almacena energía solar con eficiencia. Además, es la única fuente renovable de carbón, y puede ser procesada convenientemente en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

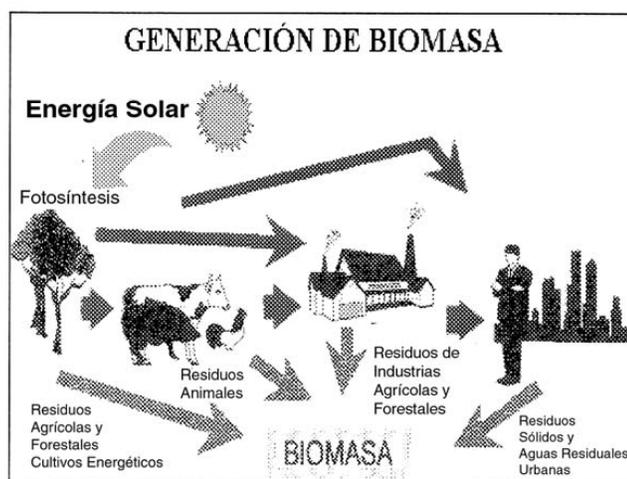


Figura 3.28. Origen de la biomasa.

La biomasa puede utilizarse directamente (por ejemplo combustión de madera para la calefacción y cocinar) o indirectamente convirtiéndola en un combustible líquido o gaseoso (ejemplo: etanol a partir de cosechas del azúcar o biogás de la basura animal). La energía neta disponible en la biomasa por combustión es de alrededor de 8MJ/kg para la madera verde, 20MJ/kg para la materia vegetal seca en horno, 55MJ/kg para el metano; en comparación con cerca de 23 a 30MJ/kg para el carbón. La eficiencia del proceso de la conversión se determina cuánto la energía real puede ser utilizada en forma práctica.

El uso cada vez mayor de energía procedente de combustibles fósiles, con el consiguiente agotamiento y alto costo, ha conducido a la obtención de nuevas fuentes de energía para el desarrollo económico mundial, en este contexto los recursos vegetales, residuos y pro-

ductos procedentes de la silvicultura, sabanas, praderas y de la agricultura, son algunas de las principales fuentes de energía renovable que puede sustituir a la energía obtenida de los hidrocarburos, de acuerdo a datos proporcionados por el IIED y el Colegio de México, la biomasa acumulada y la producida cada año es como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 2.1 Cantidad de biomasa de acuerdo a diversos usos de la tierra.

Tipo de cobertura o uso de la tierra	% de biomasa
Áreas forestales	92
Sabanas y praderas	4
Tierras cultivadas	1
Otros	3
Total	100

### 3.5.1. Fuentes de biomasa

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la agricultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas, se usan, generalmente, para procesos modernos de conversión que involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles.

Los residuos agrícolas, como la leña y el carbón vegetal, han sido usados en procesos tradicionales en los países en vías de desarrollo y a usos primarios en pequeña escala; por ejemplo, la cocción de alimentos o las pequeñas actividades productivas como panaderías, caleras, secado de granos, etc.

- Plantaciones energéticas. Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los

diez años. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación.

- Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como jacinto de agua o las algas, para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel.
- Adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos; además puede proveer otros beneficios a los agricultores. Una granja típica, usualmente, sólo genera uno o dos productos de mayor valor comercial como maíz, café, leche o carne. El ingreso neto de ello es, a menudo, vulnerable a las fluctuaciones del mercado, al aumento del costo en los insumos, a las variaciones climáticas y a otros factores. Dado que las plantas de generación de energía requieren un suministro estable de combustible, los cultivos asociados a ellas pueden proveer un ingreso permanente a los granjeros que decidan diversificar su producción. La principal limitante para este tipo de plantaciones está en la escala, pues se requieren grandes extensiones de tierra para lograr una producción de energía rentable. Por esta razón, son factibles cuando se desarrollan con algún tipo de producción agrícola paralela, como por ejemplo, el maíz, la caña de azúcar y la palma de aceite.
- Residuos forestales. Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada en el país. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje

cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor como se muestra en la figura 3.29, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín. La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor, en sistemas de combustión directa; en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. Los desechos de campo, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada por el alto costo del transporte.

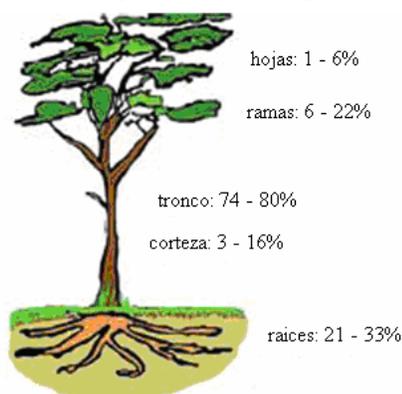


Figura 3.29. Distribución energética de un árbol.

- Desechos agrícolas. La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60% y en desechos de proceso entre 20% y 40%. Al igual que en la industria forestal muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo. Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña

de azúcar. Los campos agrícolas también son una fuente importante de leña para uso doméstico: más del 50 % del volumen total consumido. Por otro lado las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobrefertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

- Desechos industriales. La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.
  
- Desechos urbanos. Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países latinoamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación. Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía

“limpia”, es decir aquella energía que contamina menos comparada con las usadas actualmente. En el corto y mediano plazo, la planificación urbana deberá incluir sistemas de tratamiento de desechos que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas de los desechos al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido energético, pues aproximadamente el 80 % de toda la basura orgánica urbana puede ser convertida en energía.

### 3.5.2. Aplicaciones de la Biomasa

- Biocombustibles. La producción de biocombustibles tales como el etanol y el biodiesel tiene el potencial de sustituir cantidades significativas de combustibles fósiles en varias aplicaciones de transporte. El uso extenso del etanol en Brasil ha demostrado que los biocombustibles son técnicamente factibles en gran escala. La producción de biocombustibles en los E.U.A. y Europa (etanol y biodiesel ) está aumentando, siendo la mayoría de los productos utilizados en combustible mezcla, por ejemplo E20 está compuesto por 20 % de etanol y 80 % de gasolina y se ha descubierto que es eficaz en la mayoría de los motores de ignición sin ninguna modificación. Actualmente la producción de biocombustibles es apoyada con incentivos del gobierno, pero en el futuro, con el crecimiento de los sembrados dedicados a la bioenergía, y las economías de la escala, las reducciones de costos pueden hacer competitivos a los biocombustibles.
- Producción eléctrica. La electricidad puede ser generada a partir de un número de fuentes de biomasa y al ser una forma de energía renovable se le puede clasificar como "energía verde". La producción de electricidad a partir de fuentes renovables de

biomasa no contribuye al efecto invernadero ya que el dióxido de carbono liberado por la biomasa cuando es quemado, (directa o indirectamente después de que se produzca un biocombustible) es igual al dióxido de carbono absorbido por el material de la biomasa durante su crecimiento.

- **Calor y Vapor.** La combustión de la biomasa o de biogás puede utilizarse para generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal, en usos tales como calefacción de hogares y cocinar, o puede ser un subproducto de la producción eléctrica en centrales combinadas de calor y energía. El vapor generado por la biomasa puede utilizarse para accionar turbinas de vapor para la producción eléctrica, utilizarse como calor de proceso en una fábrica o planta de procesamiento, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente.
- **Gas Combustible.** Los biogases producidos de la digestión o de la pirolisis anaerobia tienen un número de aplicaciones. Pueden ser utilizados en motores de combustión interna para accionar turbinas para la producción eléctrica, puede utilizarse para producir calor para necesidades comerciales y domésticas, y en vehículos especialmente modificados como un combustible.

### **3.5.3. Conversión de la biomasa en energía**

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la dendro-energía y la cogeneración, en la figura 3.30 se resumen las formas de transformación de biomasa.

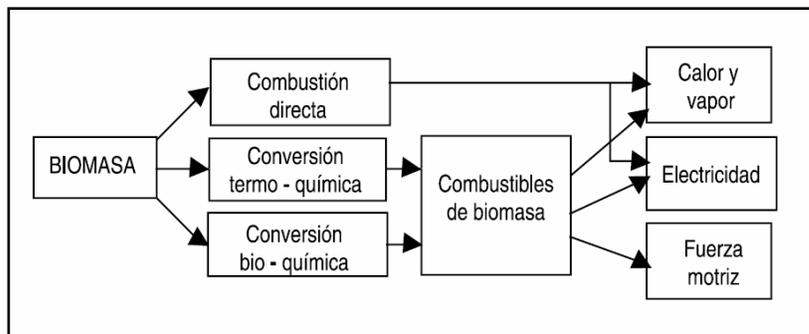


Figura 3.30. Procesos de conversión de biomasa.

#### 3.5.4. ¿Cómo es una central de biomasa?

Una central de biomasa se ocupa de obtener energía eléctrica mediante los diferentes procesos de transformación de la materia orgánica.

Básicamente el funcionamiento de una central es el siguiente:

1. La biomasa recogida se prepara para transformarla en combustible líquido.
2. Este combustible se quema y se calienta agua.
3. Se produce vapor a alta presión que mueve la turbina y esta a su vez mueve el generador que producirá energía eléctrica.
4. La energía eléctrica producida es transportada por el tendido eléctrica.
5. El calor producido por el vapor se transmite en forma de agua caliente.

En la figura 3.31 se muestra el ejemplo de una central que usa biomasa, primero se recolecta el material biomásico, para después ser transportado a la central donde es prepara-

do para ser utilizado y almacenado, después se utiliza como combustible para calentar agua que se convertirá en vapor, el cual servirá para mover una turbina acoplada a un generador el cual esta conectado a los transformadores que envían la energía a las subestaciones para su distribución a los usuarios.



Figura 3.31. Central de biomasa.

En la figura 2.6 se muestran enumeradas las etapas de una central termoeléctrica que utiliza biomasa así como también se describen los procesos para conversión de la biomasa a energía eléctrica y están ordenados de la siguiente manera:

1) Cultivo y recolección de madera, 2) Transporte, 3) Astillado, 4) Preparación, 5) Almacenamiento de combustible grueso, 6) Almacenamiento de combustible fino, 7) Dosificador, 8) Entrada de aire, 9) Almacenamiento de combustible fino, 10) Caldera, 11) Economizador, 12) Cenizas, 13) Electrofiltro, 14) Tanque de agua de alimentación, 15) Tanque de condensado, 16) Generación de vapor, 17) Generador, 18) Turbina, 19) Transformadores, 20) Líneas de transporte de energía eléctrica.

## Capítulo 4

# Algunos Dispositivos Comunes de las Centrales Eléctricas

### 4.1. Excitatrices

Al aumentar las capacidades de los turbogeneradores, se han hecho más y más difícil el problema de suministrar la excitación del campo de corriente alterna (que llega a ser de 4000 A o más en las máquinas grandes). La fuente convencional de excitación es un generador de CD cuya salida pasa al campo del generador a través de escobillas y anillos deslizantes. Los problemas de enfriamiento y mantenimiento siempre se relacionan con los anillos deslizantes, conmutadores y escobillas. Muchos sistemas modernos de excitación han reducido al mínimo estos problemas cuando reducen al mínimo el empleo de contactos deslizantes y escobillas.

La condición de estar disponible en todo momento es de importancia primordial.

La pérdida de la excitación de un generador conectado a barras constituye una perturbación muy grave, debido a que las demás unidades que siguen en servicio no sólo tienen que tomar la carga del generador desconectado, sino además suministrar la fuerte corriente reactiva absorbida por el generador que ha perdido la excitación.

El equipo de excitación debe ser construido con miras a asegurar la máxima continuidad de servicio, simplicidad, robustez, dispositivo para impedir falsas maniobras, así como la existencia de aparatos de reserva, son todos ellos factores importantes.

#### 4.1.1. Principales sistemas de excitación

Los principales sistemas de excitación se muestran en a continuación:

- **Excitatrices acopladas directamente.** Estas constituyen la forma más antigua y gozan de una aceptación casi general; se adaptan especialmente al sistema unitario o de unidades independientes, de explotación de centrales. Las principales características de este sistema son: Simplicidad, alto rendimiento, ausencia de grandes reóstatos de campo, reduce a un mínimo la posibilidad de perder simultáneamente la excitación en más de una unidad. Las desventajas son: peligro de que una gran unidad quede fuera de servicio, debido a averías en su excitatriz y posibilidad de que las fluctuaciones de la tensión, sean de doble magnitud que las fluctuaciones de la velocidad.
- **Excitatrices accionadas por máquinas motrices separadas.** Estas excitatrices se construyen para funcionar con cualquier clase de máquina motriz. Por causa de su reducida potencia, el rendimiento de la unidad resulta muy bajo, lo que constituye su principal inconveniente. En los casos en que se necesita vapor de escape para el

calentamiento del agua de alimentación, la reducción del rendimiento es de menor importancia, pero la tendencia actual no se inclina hacia este tipo de sistema. En algunos casos se hace necesario instalar excitatrices accionadas por máquinas motrices para necesidades de la puesta en marcha.

- **Excitatrices accionadas por motores eléctricos.** En muchas centrales se emplean este tipo de excitatrices. Son baratas, eficientes y seguras, pero necesitan que se instale por lo menos una unidad accionada por un máquina motriz, para la puesta en marcha. Se usan casi siempre motores de inducción, y constituyen el mejor medio de accionamiento a condición de tener seguridad en el suministro de corriente alterna. Estos motores pueden entrar en servicio inmediatamente, lo que tiene una gran importancia. Una central eléctrica con un sistema de excitación bien equilibrado se compone de unidades accionadas por medio de motores eléctricos y por máquinas motrices. En algunos casos, las unidades accionadas por motores eléctricos son consideradas como auxiliares de las unidades con máquinas motrices.

#### **4.1.2. Importancia de asegurar una excitación continua**

La importancia de asegurar una excitación sin interrupciones ha conducido al uso de baterías de acumuladores en caso de emplear barras comunes de excitación, estas baterías se instalan frecuentemente con una capacidad suficiente para suministrar la corriente de excitación de toda la central durante una hora. No siempre se considera que el peligro de una interrupción total de la central por fallas de las excitatrices sea tan grande que justifique los grandes gastos que representa la instalación de una batería. Cuando se usa baterías, estas

pueden funcionar flotando conectadas a las barras de excitación o estar lisa para entrar en servicio, completamente cargada.

### **Accionamiento Duplex**

Se trata de otro sistema de asegurar la continuidad del servicio, empleado con mucho éxito. La dínamo excitatriz puede ser accionada por un motor eléctrico y por una máquina motriz. El motor eléctrico está provisto de un relevador que corta su alimentación cuando la tensión cae hasta un valor determinado. El regulador de la máquina motriz tiene cerrado el vapor cuando la velocidad es la nominal, pero cuando ha funcionado el motor antes mencionado, desconectando el motor eléctrico, la máquina motriz continua accionando la excitatriz, con una velocidad ligeramente inferior evitando así toda la interrupción de la corriente de excitación.

### **Las excitatrices electrónicas**

Consisten en rectificadores, de vapor de mercurio, se han utilizado para suministrar la corriente de excitación, especialmente en el caso de condensadores síncronos totalmente blindados. La regulación de la tensión se obtiene variando el tiempo de encendido de cada media onda, lo cual puede realizarse por medio de un regulador de tensión electrónico.

#### **4.1.3. Características eléctricas de las excitatrices**

##### **Potencia**

La potencia del equipo de excitación depende de la importancia de la central eléctrica y del tipo de generadores. Los generadores de reducida potencia y baja velocidad

necesitan hasta el 3% de su potencia para la excitación. Los turbogeneradores de gran potencia y de alta velocidad pueden no necesitar más que el 0.5%. Las necesidades exactas vienen siempre indicadas por el fabricante. La potencia total debe ser suficiente para suministrar toda la corriente de excitación, con el equipo de reserva fuera de servicio. La magnitud del equipo de reserva no está bien definida, en la práctica esta reserva puede estar comprendida, según la capacidad de sobrecarga, entre el doble y el triple de la potencia total necesaria.

El número y potencia de las unidades de excitación deben ser elegidas con miras a la mayor simplicidad, con la flexibilidad necesaria. La capacidad mínima de cualquier unidad acostumbra establecerse de acuerdo con las necesidades del generador más grande.

### **Tensión de excitación**

La tensión de excitación generalmente usada es de 125 V en todas las centrales, excepto las más grandes, en que se emplean 250V. Los generadores son, normalmente, de excitación compuesta con característica plana. Con un tipo normal de excitatriz se puede trabajar con una tensión que no exceda más que un 15% a la tensión normal de servicio, lo que es completamente suficiente para hacer frente a la excitación de un alternador común a plena carga. En los casos en que es necesario contar con sobrecargas, frecuentemente es conveniente elevar la tensión de excitación en un 25% en las horas pico.

El costo de una excitatriz acoplada al eje de un generador principal, puede expresarse en tanto por ciento del generador, y varía entre un 3 y 5% de dicho valor, según la velocidad.

### **Excitación de acción rápida**

La excitación de acción rápida respuesta rápida"ha sido objeto de mucha atención en los últimos años, a causa de la importancia de mantener la tensión de los generadores, por su repercusión en la transmisión de energía y la estabilidad del sistema. Se emplean excitatrices con un límite relativamente alto de tensión y gran rapidez de aumento de tensión, para aumentar la estabilidad transitoria del sistema en los momentos del corto circuito.

En una excitación de acción rápida, la rapidez de elevación de la tensión es del orden de 400 a 600V por segundo, el voltaje máximo obtenible mediante excitatrices del tipo normal, es de unos 320V con unidades de 250V.

### **Superexcitación**

La aplicación efectiva del principio de acción rápida o respuesta rápida de la excitación en los condensadores síncronos y en los generadores, ha conducido a adoptar una rapidez o velocidad de elevación de tensión del orden del 6000 a 7000 volts por segundo, aplicándose el término de superexcitación estos dispositivos. Las excitatrices construidas para este propósito poseen un voltaje nominal más elevado 600 V para una excitación de 250 V y tienen en consecuencia un voltaje límite de unos 1000 V aproximadamente.

El uso de interruptores y relevadores de alta velocidad para eliminar los cortos circuitos con gran rapidez, ha disminuido la tendencia hacia el empleo de excitatrices de respuesta rápida.

## 4.2. Reguladores de Velocidad

Para poder adaptar la potencia de una turbina de velocidad constante a la demanda de una máquina receptora (generador eléctrico), se pueden utilizar algunos de los siguientes tipos de regulación:

- Regulación por variación de la presión mediante laminado en la válvula de admisión.  
En este tipo de regulación, también llamado regulación cualitativa, el laminado se efectúa a entalpía constante.
- Regulación por variación de la presión en la caldera. Si la temperatura del vapor se mantiene constante, y se desplaza por una isoterma y se obtiene una caída de entalpía, el cambio de flujo se tiene presente. El punto que representa el estado del vapor a la salida de la turbina se desplaza hacia las regiones de menor humedad; sin embargo, este tipo de regulación que parece mejor que el anterior, no se puede emplear generalmente en calderas de tipo clásico en las que la variación de presión se produce con un retardo exagerado.
- Regulación por admisión parcial, o regulación cuantitativa.

*Sobrecarga.* Para preveer un margen de potencia, del orden del 10% al 20%, más allá de la potencia normal de servicio, algunas turbinas están previstas para funcionar en sobrecarga, lo que lleva consigo un descenso del rendimiento.

### 4.2.1. Problemática de la Regulación de las Turbinas de Vapor

El primer problema que se plantea es el control de la velocidad, que se tiene que mantener en ciertos casos en un valor determinado, y que hay que limitar a un máximo aceptable en todos, ya que ningún grupo puede soportar una velocidad de embalamiento igual, en general, al doble de la velocidad de régimen, por lo que es de vital importancia controlar la velocidad de rotación.

En la regulación de turbinas industriales que, aparte de generar energía, suministran vapor a baja presión para el calentamiento, y en las turbinas de las centrales destinadas exclusivamente a la generación de energía mecánica, aparecen otras exigencias por lo que las soluciones que se dan al problema de la regulación varían según el caso, como se indica a continuación:

- **Regulación de turbinas industriales.** El caso más sencillo es el de la turbina de contrapresión cuya potencia es función del consumo de vapor suministrado a presión constante. El generador eléctrico va forzosamente conectado a una red eléctrica que absorbe la energía que sobra, o cede la energía que falta, ya que es imposible, para este tipo de máquinas, regular de manera independiente la potencia y el gasto de vapor. La velocidad se mantiene constante por la frecuencia de la red y el taquímetro sólo entra en acción para detener la máquina cuando se corta la conexión con la red.

En la Figura 4.1 se muestra un esquema simplificado de esta regulación: la velocidad de rotación de la turbina, (manteniendo invariable la posición de la palanca oscilante), es fija, y el regulador de presión acciona la válvula de admisión en función de la demanda de vapor de calentamiento; si se presentan variaciones de frecuencia en la

red, el desplazamiento resultante de la válvula es compensado por el regulador de contrapresión. Después de un corte en la conexión con la red exterior, el regulador de presión deja de actuar automáticamente y entra el regulador de velocidad.

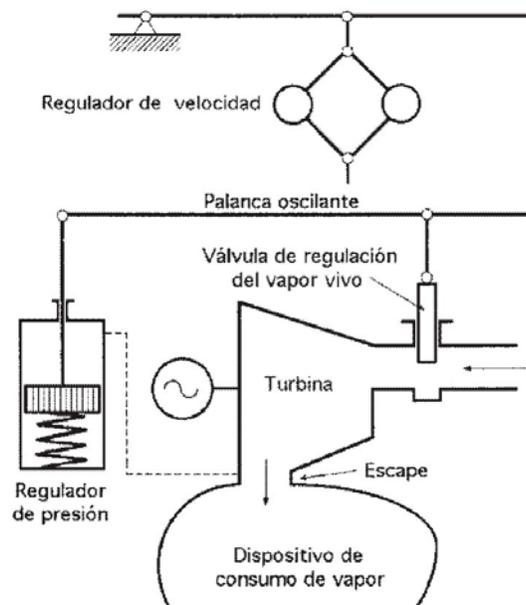


Fig. 4.1. Regulación de una turbina de contrapresión.

- **Regulación de turbinas de centrales eléctricas.** La turbina de condensación, sin recalentamiento, no lleva generalmente más que un regulador de velocidad. En algunos casos se utiliza una regulación compuesta de *velocidad-presión de admisión* que mantiene constante la presión a la entrada del turbina.
- **Comparación de la regulación de las turbinas de vapor con la de las turbinas hidráulicas.** Como el vapor es un fluido prácticamente sin inercia, no hay que temer el riesgo del golpe de ariete. El único factor desfavorable lo constituye la expansión del fluido entre las válvulas de admisión y los álabes del distribuidor del primer escalonamiento, ya que el volumen comprendido entre los dos órganos está limitado

al mínimo. Por la misma razón, el vapor con recalentamiento intermedio se introduce en la turbina después de pasar por una válvula moderadora. La ausencia de inercia del vapor favorece la estabilidad de la regulación que se obtiene con un grado de control moderado que no es necesario sea periódico. La moderación de los esfuerzos de maniobra de los obturadores, permite la regulación directa en el caso de máquinas pequeñas, que junto a la ausencia de inercia del fluido, implica tiempos de maniobra  $T$  pequeños.

### 4.3. Reguladores de Voltaje

Es conveniente y aún precisa en las centrales que suministran una energía que experimenta grandes variaciones. Es, así mismo necesaria cuando las centrales sirven en líneas de alta tensión, o cuando los generadores tienen baja realción de cortocircuito. Son varios los tipos de regulación automáticos y se exponen a continuación:

- **Reguladores reostáticos de contactos rodantes.** Un regulador de este tipo es de construcción Brown Boveri y ha sido adoptado universalmente por las grandes ventajas que reporta. Se denomina regulador de acción rápida. Su funcionamiento aparece representado esquemáticamente en la figura 4.2.

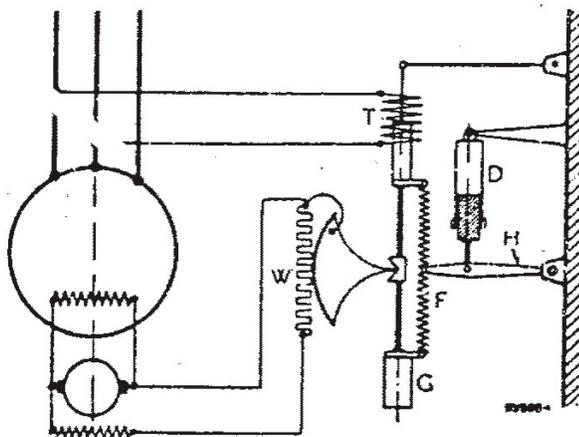


Fig. 4.2. Disposición esquemática del regulador de tensión de acción rápida, tipo Brown-Boveri.

Una bobina T ejerce sobre su armadura un esfuerzo de tracción que depende de la fuerza aplicada en sus extremos, y opuesto a esta acción existe el esfuerzo de un contrapeso G. El movimiento de la armadura hace funcionar el cursor (sector) del reostato W. Se admite que el esfuerzo de tracción en el campo utilizado, de la bobina T, es independiente del campo recorrido, es decir, que el esfuerzo de la bobina T y el contrapeso G se equilibran en cualquier posición cuando la tensión alcanza su valor de referencia.

Desde que una u otra fuerza arrastra el núcleo, el sector se mueve hacia arriba o hacia abajo. Si, por ejemplo, la tensión del generador aumenta, la punta del sector se desplaza hacia arriba y provoca la inserción de resistencias en el circuito shunt de la excitatriz para hacer volver la tensión del generador al valor necesario.

La figura 4.3 muestra el acoplamiento compuesto utilizado generalmente para este objetivo. Se introduce, en el circuito de tensión del regulador, una tensión adicional producida, en una resistencia ohmica, por la corriente que circula en la línea, de forma

que las dos corrientes se adicionen verticalmente. La influencia del transformador de intensidad de compuesto depende, entonces, no solamente del valor absoluto de la corriente de servicio, sino también de su retraso con respecto del generador.

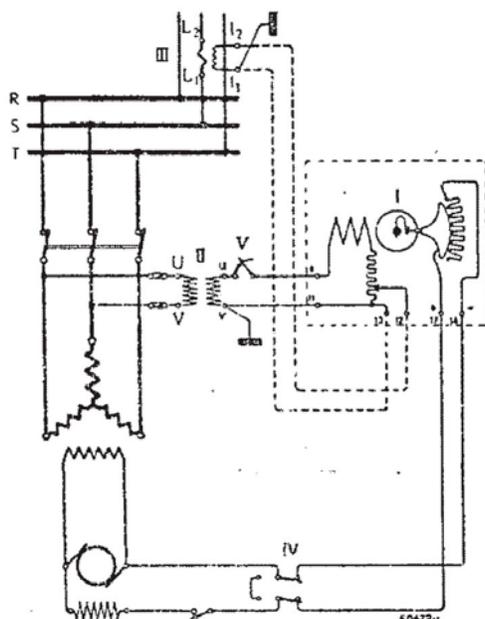


Fig. 4.3. Regulación de tensión de un generador trifásico que trabaja aisladamente.

El sistema indicado de montar un transformador de intensidad para el compuesto, es suficiente para las necesidades de la práctica, si bien es necesario hacer constar que, para obtener un compuesto rigurosamente exacto y por consiguiente una tensión absolutamente constante en la extremidad de la línea, es necesario producir la tensión adicional en el circuito de tensión del regulador, no sobre una resistencia ohmica, sino sobre una impedancia que tenga las mismas características que la línea.

## 4.4. Otros Dispositivos Auxiliares

Las precauciones que deben tomarse para asegurar la protección de una máquina comprenden, de una parte, dispositivos preventivos para impedir la formación de una perturbación como consecuencia de circunstancias excepcionales en el servicio, y de otra parte, dispositivos de protección para limitar al mínimo los daños cuando se produce una avería. Las clases de protecciones necesarias pueden resumirse en lo siguiente.

- Protección preventiva contra las averías en los aislamientos, es decir, contra las sobretensiones de origen atmosférico, contra las sobretensiones debidas al servicio, contra las sobrecargas y la vigilancia de la ventilación de la máquina.
- Protección preventiva contra las averías de origen mecánico. En esta comprenden los dispositivos de vigilancia de los cojinetes.
- Protección contra los daños internos del aislamiento como son: los cortocircuitos entre fases, los defectos con tierra en el estator, los cortocircuitos entre espiras y los defectos con tierra en el rotor.
- Protección contra las perturbaciones externas.

### 4.4.1. Protección preventiva contra las averías en los aislamientos.

- **Protección contra las sobretensiones de origen atmosférico.** Los rayos indirectos o los que causa de que aparezcan en las redes ondas móviles que alcanzan a las subestaciones y también a las centrales eléctricas. Estas sobretensiones de origen atmosférico, que no hay posibilidad de impedir, precisan de protección que las límite,

haciéndolas inofensivas y derivándolas a tierra sin que provoquen perturbaciones.

Para la defensa contra estas sobretensiones, se aplican los principios generales de coordinación del aislamiento y se instalan apartarayos para fijar el nivel de protección. En esta forma las sobretensiones que se dirigen a las máquinas son derivadas a tierra sin que el servicio sea perturbado, y aún en caso de que el apartarayos fallase, la coordinación permitiría evitar las averías en los arrollamientos de las máquinas.

Cuando los transformadores conectados a las líneas van acoplados en estrella-delta impiden de forma apreciable que las sobretensiones en las líneas alcancen a las máquina. Si éstas trabajasen directamente concentradas a líneas aéreas o por intermedio de transformadores acoplados estrella-estrella, será preciso protegerlas contra las sobretensiones de origen atmosférico.

- **Protección contra las sobretensiones debidas al servicio.** Esta clase de sobretensiones pueden ser debidas a fenómenos transitorios que se originan por causa de maniobras de acoplamiento y de descargas a tierra en las redes, cuya frecuencia es la de servicio, y también pueden ser estas sobretensiones de una frecuencia próxima a la normal de funcionamiento pero de duración relativamente larga. Las primeras se limitan por dispositivos propios de las máquinas y aparatos. En cuanto a las segunda clase de sobretensiones, es preciso tomar las precauciones necesarias empleando a tal objeto relés apropiados, que entrarán en función cuando se produzca un fallo en los dispositivos de regulación.
- **Protección contra sobrecargas.** Para la medición de la temperatura de los arrollamientos, se emplean corrientemente , y con gran éxito por ciento, a fin de proteger

los generadores contra las sobrecargas, relés térmicos.

La protección por medio de relés térmicos permite la separación de éstos del objeto protegido. Dichos relés son un instrumento de medida de la temperatura de los arrollamientos y sirven así mismo como relés de sobrecargas, se conectan en la misma forma que los amperímetros.

El calentamiento de los arrollamientos de un generador tiene lugar esquemáticamente en dos escalones es provocado por la sobre-elevación de la temperatura del hierro con relación al aire de enfriamiento, la cual se debe a las pérdidas en el hierro, dependiendo esencialmente de la tensión de servicio, y de la carga nominal y llega aproximadamente al 30% del calentamiento del cobre, cuyo valor es proporcional al cuadrado de la corriente de carga y se suma al calentamiento del hierro. Las pérdidas en éste no son medidas en el relé térmico pero se adiciona su valor, que es fijo, a las pérdidas en el cobre con objeto de que la temperatura indicada corresponda a la temperatura del devanado, para el calentamiento a plena carga.

En la construcción de los relés se tiene en cuenta exactamente y según la realidad, las masas del hierro y de los arrollamientos que contribuyen al calentamiento del generador, así como la resistencia térmica de paso a través del aislamiento.

#### **4.4.2. Vigilancia de la ventilación**

La vigilancia de la ventilación de una máquina forma parte del gobierno de su temperatura. En la práctica no es posible proceder a este gobierno directamente midiendo el gasto y la temperatura de refrigeración, y por ello recurre a procedimientos indirectos.

El circuito de enfriamiento por el aire fresco en las grandes máquinas va provisto corrientemente de cierto número de ventanas que pueden cerrarse con pantallas de plancha, todas ellas acopladas mecánicamente. Cuando éstas están en su posición normal de servicio dejan pasar el aire de enfriamiento a través de la máquina y hacia el canal de salida del aire caliente y además cierran todos los pasos entre los canales de aire caliente y de aire frío. Estas pantallas de cierre son una parte de los dispositivos de protección contra incendio.

A fin de impedir que la máquina trabaje con una ventilación insuficiente, se dispone un contacto de señalización unido al mando de las pantallas, contacto que sirve para señalar el paro de la circulación del aire fresco. Este dispositivo se completa con termómetros a distancia antes de la entrada del aire fresco y después de la salida del aire caliente de la máquina.

En los generadores que son ventilados en circuito cerrado, no existe el peligro de ensuciamiento y por tanto de estrangulación en el circuito del aire, será necesario por si acaso comprobar estas máquinas y sus refrigerantes.

Es también conveniente limpiar periódicamente los conductos de agua para quitar los depósitos calcáreos inevitables y cuyo gasto debe ser vigilado, por medio de un aparato que va provisto de un contacto regulable para mandar un circuito de señalización o de desconexión.

Cuando la circulación del aire de refrigeración, sobre todo en circuito cerrado, se efectúa por medio de ventiladores separados, accionados por sus propios motores, éstos se equipan con interruptores centrífugos cuyos contactos sirven para dar la señal de alarma o para provocar la puesta fuera de servicio del generador cuyo ventilador falle.

#### 4.4.3. Protección preventiva contra las averías mecánicas

**Vigilancia de los cojinetes.** Los cojinetes son elementos de la máquina sometidas a fuertes oscilaciones. En general, la vigilancia de los mismos se limita a la comprobación del engrase y del agente de refrigeración.

- El estado del aceite de engrase puede ser comprobado de varias maneras. Para los cojinetes en los que un buen engrase depende de que el recipiente se encuentre lleno de aceite, basta un indicador ordinario del nivel de aceite, se utiliza excepcionalmente un flotador con un contacto de señalización.

La circulación de agua en los cojinetes de refrigeración forzada debe vigilarse, permanentemente, con indicadores de gasto provistos de un contacto de señalización.

#### 4.4.4. Protección contra los deterioros internos del aislamiento

- **Protección diferencial.** La protección diferencial longitudinal empleada corrientemente, contrasta la igualdad de las intensidades de las corrientes de fase, y la entrada y salida en las dos extremidades del dominio de protección. Esta engloba todas las partes de la instalación situadas entre los dos grupos de transformadores de corriente de la protección, tanto si se trata de un generador con sus cables de conexión, o de un generador y transformador acoplados en bloque hasta los transformadores de corriente del lado de alta tensión. La protección diferencial es de acción rápida.
- **Protección por potencia inversa.** Se emplea como protección contra los cortocircuitos entre fases, los cortocircuitos entre espiras y también contra las puestas a masa

de los arrollamientos, para los generadores sin punto neutro al exterior o de pequeña potencia.

Los relés de potencia inversa son excitados por la componente inversa de la potencia que aparece en caso de disimetría simultánea de las corrientes y de las tensiones. Cuando se produce el cortocircuito, esta potencia se dirige siempre del defecto siempre del defecto hacia la red y se mide con filtros constituidos por resistencias y por impedancias y de tensión. En ésta son: 1.- Generador. 2.- Transformador de intensidad, 3.- Transformadores de tensión, 4.- Filtro para la componente inversa de las tensiones, 6.- Relé de potencia, 7.- Disyuntor principal y 8.- Interruptor de excitación. En servicio normal equilibrado, el relé no recibe ni corriente ni tensión, por lo que puede hacerse muy sensible, cierra su contacto cuando el origen del desequilibrio, por la perturbación, está en la máquina.

El relé señala en los generadores los accidentes siguientes: cortocircuito entre fases suficientemente alejado del punto neutro, cortocircuito entre espiras que afecta al menos el 20% aproximadamente del arrollamiento de una fase, puesta a la masa a condición de que la disimetría producida sea bastante fuerte, es decir, que se origine simultáneamente una segunda tierra en la red.

- **Protección contra los defectos a tierra en el estator.** Un defecto a tierra en el estator es debido a la perforación del aislamiento de las espiras hasta el hierro próximo y según demuestra la experiencia, son averías más frecuentes en las máquinas giratorias. En caso de un defecto a tierra con el neutro aislado, que en servicio normal tiene el potencial de la tierra, la tensión de aquel punto con respecto a ésta aumenta

proporcionalmente a la distancia que existe hasta el lugar de defecto.

- **Protección contra los cortocircuitos entre espiras.** Esta forma de perturbación aparece sobre todo en los generadores que tienen un gran número de conductores por ranura, es decir, en las máquinas de tensión relativamente elevada y de potencia media. Las causas directas de estos defectos son, en general, sobretensiones de origen atmosféricos y también deterioros mecánicos del aislamiento.

Cuando una espira está cortocircuitada, la tensión de la fase con averías se reduce en el número de volts que las espiras en cortocircuito producirías para contribuir a la tensión total con una máquina sana y en las mismas condiciones de excitación.

- **Protección contra los defectos a tierra en el rotor.** Cuando el aislamiento del arrollamiento del rotor se avería puede producirse un defecto a tierra. El circuito de excitación no está puesto a tierra y por ello no es posible destacar un único defecto a la misma. Pero se comprende que si una segunda puesta a tierra del rotor tiene lugar, una parte del arrollamiento de excitación quedará cortocircuitado produciéndose vibraciones peligrosas en el generador. Por consiguiente, es necesario que una puesta a la masa en el circuito de excitación de los grandes generadores, sea señalada para evitar las consecuencias a que podría dar lugar y proceder a reparar la avería en la primera ocasión.

#### 4.4.5. Protección contra las perturbaciones externas

Se comprende la necesidad de tomar precauciones contra toda perturbación que pudiera afectar entre el dominio de la protección de los generadores y la de las líneas, es

decir, principalmente en las barras colectoras. Su protección representa el último órgano de protección de las líneas y debe por tanto ser incorporada en el sistema de escalonamiento de los tiempos de la red como escalón final y de reserva. Cuando esta protección funciona, los generadores se desconectan de la red, por lo cual es preciso tomar las medidas de seguridad para que no pueda entrar en acción más que en caso de perturbaciones en la central eléctrica.

- **De-excitación rápida.** El dispositivo de excitación de una máquina eléctrica tiene por objeto anular lo más rápidamente posible el campo magnético. En el caso de un defecto en el aislamiento del devanado del estator del generador, es conveniente anular el campo tan rápidamente como sea posible y a la vez tan completamente como es de desear, a causa de los daños que un arco puede causar al cobre, a su aislamiento y a los circuitos magnéticos.
- **Dispositivo de vigilancia para el circuito de excitación.** Un incidente que puede tener graves consecuencias es el corte accidental de la excitación de una máquina síncrona. este corte puede provenir de una desconexión inapropiada, de hacerse aflojado una conexión o por rotura de un conductor del circuito de excitación. Si la máquina funciona sola alimentando su línea de transporte, la tensión se anula y cesa el suministro de energía pero si aquella trabaja acoplada con otras máquinas, toma de la red en forma de potencia reactiva la corriente de excitación que le es necesaria y continúa a su funcionamiento en régimen subexcitado. La potencia reactiva que el generador suministraba antes, así como su propia corriente magnetizante, deben ser aportadas por las otras máquinas, que pueden sobrecargarse en ciertas condiciones, sobre todo cuando son pocas las unidades interconectadas.

# Bibliografía

- [1] Introduction to Physical System Modelling, P. E. Wellstead, Academic Press, 1979.
- [2] Dinámica de Sistemas Físicos, Ogatha K.
- [3] The Kinematics of Rigid Body Motions, Goldstgein H.
- [4] System Dynamics, Karnopp, Margolis, Rosenberg, Wiley Interscience, 2000
- [5] Bond Graph in Modeling Simulation and Fault Identification, Muhherjee, Karmakar,  
Taylor & Francis, 2006