

39  
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS  
AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN  
DE ENERGÍA ELÉCTRICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
(ÁREA ELÉCTRICA ELECTRONICA)  
P R E S E N T A  
GÓMEZ VILCHIS SAÚL

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. JACINTO VIQUEIRA LANDA



MÉXICO, D.F.

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

278979

I



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

*A mis padres:*

*Santiago Gómez Velázquez y Leonarda Vilchis de Gómez,  
gracias por el apoyo, su cariño, su dedicación y por los valores  
que me han inculcado a lo largo de toda mi vida.*

*A mis hermanos:*

*Gabriel, Armando, Alfonso y Lidia,  
quienes con sus logros obtenidos  
me sirven de ejemplo para  
superarme cada día.*

*Agradezco:*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, particularmente a la Facultad de Ingeniería por haberme permitido realizar una formación profesional.*

*Al Ingeniero Jacinto Viqueza Landa por haber aceptado ser mi director de tesis, por su tiempo y por su invaluable ayuda en la realización de esta tesis.*

*A todos los profesores que me brindaron sus inapreciables conocimientos a través de las clases, muchas gracias.*

**A todos mis amigos que siempre estuvieron presentes para brindarme su apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera.**

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**INDICE**

	Pág.
INTRODUCCIÓN	X
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA UTILIZACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES, A LA FISIÓN NUCLEAR Y A LA ENERGÍA GEOTÉRMICA</b>	
1.1 Emisiones provenientes de centrales termoeléctricas	1
1.2 La lluvia ácida y algunos de sus efectos	6
1.3 El dióxido de carbono y el efecto invernadero	8
1.4 Efectos producidos por centrales nucleares	13
1.4.1 Efectos no radiológicos	14
1.4.2 Efectos radiológicos	15
1.4.3 Exposición a la población de efectos radiológicos	18
1.4.4 Radiación por accidentes del reactor	19
1.5 La energía Geotérmica	21
1.5.1 Hidrotérmica	21
1.5.2 Geopresión	23
1.5.3 Roca seca caliente	23
1.5.4 Magma	23
1.6 Impactos ambientales debidos a las plantas geotérmicas	24
1.6.1 Ácido sulfídrico	24
1.6.2 Bióxido de carbono	25
1.6.3 Venenos contenidos en el agua	26
1.6.4 Venenos contenidos en el aire	26
1.6.5 Contaminación por calor	27
1.6.6 Hundimiento del terreno	27
1.6.7 Sismicidad	28
1.6.8 Reinyección	28

## **CAPÍTULO 2**

### **GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA**

2.1 Generalidades sobre centrales hidroeléctricas	30
2.1.1 Disponibilidad del agua y del potencial hidroeléctrico	31
2.2 Tipos de centrales hidroeléctricas	33
2.2.1 Centrales de agua afluente	34
2.2.2 Centrales de agua embalsada	35
2.2.3 Centrales de regulación	35
2.2.4 Centrales de bombeo	36
2.2.5 Centrales de alta caída	37
2.2.6 Centrales de media caída	37
2.2.7 Centrales de baja caída	37
2.3 Componentes de las centrales hidroeléctricas	38
2.4 Impactos ambientales y sociales de las centrales hidroeléctricas	39
2.4.1 Sobre el suelo	40
2.4.2 Sobre el agua	40
2.4.3 Sobre la vegetación	41
2.4.4 Sobre la fauna	42
2.4.5 Sobre la sismicidad	45
2.4.6 Sobre el paisaje	45
2.4.7 Sobre la socioeconomía	46
2.5 Un caso de generación hidroeléctrico en México	47
2.5.1 Reseña histórica	47
2.5.2 Objetivo de la obra	48
2.5.3 Obra de generación	48
2.5.4 Impactos ambientales del proyecto	50

## **CAPÍTULO 3**

### **GENERACIÓN EOLEOELÉCTRICA**

3.1 Generalidades sobre centrales eólicas	53
3.1.1 Disponibilidad del recurso	55
3.2 Tipos de generadores eoleoeléctricos	57

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

3.2.1 Turbinas de viento de eje horizontal	57
3.2.2 Turbinas de viento de eje vertical	59
3.3 Componentes de las turbinas de viento de eje horizontal	60
3.3.1 Rotor	61
3.3.2 Tren impulsor	62
3.3.3 Sistemas de controles de desvío	62
3.3.4 Torre	62
3.3.5 Sistema eléctrico	63
3.3.6 Aspas	63
3.3.7 Acumulador de energía	64
3.4 Impactos ambientales causados por centrales eoleoeléctricas	64
3.5 Disponibilidad para la generación eólica en México	66

**CAPÍTULO 4**

**CONVERSIÓN FOTOTÉRMICA DE LA ENERGÍA SOLAR**

4.1 Generalidades sobre la conversión de la energía solar	69
4.1.1 Incidencia de la radiación solar	70
4.2 Tipos de colectores para el aprovechamiento de la energía fototérmica	74
4.2.1 Colectores planos	74
4.2.2 Colectores tubulares	74
4.2.3 Colectores con concentración	75
4.2.4 Colector térmico con seguimiento	75
4.3 Aprovechamiento de la energía fototérmica	77
4.3.1 Calefacción de ambientes	77
4.3.2 Bombeo solar de agua	78
4.3.3 Calentamiento solar del agua para consumo doméstico	79
4.3.4 Conversión de la energía solar en energía eléctrica	80
4.4 Impactos ambientales por la conversión fototérmica de la energía solar	81
4.5 Disponibilidad de la energía fototérmica en México	83

**CAPÍTULO 5**

**CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA DE LA ENERGÍA SOLAR**

5.1 Generalidades sobre la conversión fotovoltaica de la energía solar	85
5.1.1 Radiación solar sobre la Tierra	87
5.2 La celda solar fotovoltaica	88
5.2.1 Rendimiento de la celda fotovoltaica	91
5.3 Sistema solar fotovoltaico	93
5.3.1 El módulo fotovoltaico	94
5.3.2 Acumulador o batería	95
5.3.3 Regulador de carga	97
5.3.4 Sistemas de medición y control	98
5.4 Aplicaciones de la conversión fotovoltaica de la energía solar	100
5.4.1 Telecomunicaciones	100
5.4.2 Electrificación rural	100
5.4.3 Bombeo de agua	101
5.4.4 Conexión a la red eléctrica	103
5.4.5 Otras aplicaciones	105
5.5 Impactos ambientales debidos a la conversión fotovoltaica de la energía solar	106
5.6 Disponibilidad de la energía fotovoltaica en México	106

**CAPÍTULO 6**

**UTILIZACIÓN DE LA BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA**

6.1 Generalidades sobre la biomasa	108
6.1.1 Producción de biomasa	108
6.2 Procesos de transformación de biomasa en energía	110
6.2.1 Gasificación	112
6.2.2 Pirólisis	114
6.2.3 Combustión directa	115
6.2.4 Fermentación alcohólica	116
6.2.5 Digestión anaeróbica	117

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

6.3 La biomasa y los impactos ambientales	119
6.4 Utilización de la biomasa en el mundo	120
6.5 Aprovechamiento de la biomasa en México	123

**CAPÍTULO 7**

**APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LOS OCEÁNOS**

7.1 Generalidades sobre los océanos	124
7.2 La energía de olas	124
7.2.1 Principios de conversión de la energía de olas	126
7.2.2 Aprovechamiento de la energía de olas en el mundo	127
7.3 La energía de mareas	129
7.3.1 Principios de conversión de la energía de mareas	132
7.3.2 Aprovechamiento de la energía de mareas en el mundo	133
7.4 Energía térmica oceánica	134
7.4.1 Principios de conversión de la energía térmica oceánica	136
7.4.2 Aprovechamiento de la energía térmica oceánica en el mundo	138
7.5 Impactos ambientales causados por el aprovechamiento de la energía de los océanos	139
CONCLUSIONES	142
BIBLIOGRAFÍA	144

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

### INTRODUCCIÓN

Día con día se incrementa la demanda de energía eléctrica en el mundo, ya sea por el crecimiento del consumo en las zonas electrificadas o por la electrificación de zonas rurales. Esto lleva a la construcción de nuevas plantas generadoras de energía eléctrica, que por lo regular utilizan tecnología para generar con combustibles fósiles o con fisión nuclear, teniendo como consecuencia un incremento significativo en la producción de sustancias contaminantes que producen efectos adversos al medio ambiente, o produciendo desechos radiactivos de alto nivel, muy larga vida y riesgo de contaminación por algún accidente en la central, como es el caso de las nucleoelectricas. En el capítulo uno de esta tesis se habla de los problemas ambientales que se derivan de la utilización de tecnologías convencionales de generación eléctrica; algunos de estos problemas son: la lluvia ácida, las emisiones de dióxido de carbono, el efecto invernadero, efectos radiológicos por accidentes del reactor entre otros.

Para frenar el incremento de contaminantes o los riesgos de accidente, es necesario disminuir la construcción de centrales que utilicen combustibles fósiles o nucleares; una estrategia para disminuir estos impactos ambientales es el utilizar fuentes de energía renovables como alternativas para generar energía eléctrica.

Por lo tanto dentro de las estrategias para disminuir la contaminación se encuentra el aprovechamiento de diferentes tipos de recursos naturales renovables como el aprovechamiento de la hidroenergía, la energía eólica, la energía solar, tanto a través de una conversión fototérmica como de una conversión fotovoltaica, la energía de la biomasa y la energía que se puede producir en los océanos. Estas fuentes de energías alternativas son tratadas en los capítulos dos al siete de esta tesis, desde el punto de vista de su desarrollo tecnológico y de la posible afectación que puedan ocasionar al medio ambiente, ya que se trata de disminuir la contaminación existente y no de generar nuevas formas de contaminación. Otro punto que se trata en los capítulos mencionados es la disponibilidad del recurso natural en el mundo y en particular en México, mencionando también algunos

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

ejemplos de plantas con tecnología para utilizar la energía renovable que se encuentren trabajando en el mundo y en el país.

El desarrollo de la tecnología para utilizar combustibles fósiles en forma económica marcó una preferencia hacia estos energéticos, dejando casi en el olvido las demás formas para generar energía eléctrica, pero hay que recordar que los combustibles fósiles son recursos naturales no renovables y puede llegar el momento en que se agoten. Esta puede ser otra razón para impulsar el desarrollo y la utilización de las tecnologías renovables de energía, principalmente en el sector eléctrico, además de la disminución de los impactos ambientales.

La energía eléctrica producida en México, es generada principalmente con hidrocarburos; en la tabla I [45] se dan valores de la capacidad instalada de energía eléctrica del sector Paraestatal y en 1998 se obtuvo un valor preliminar de 34,977.9 megawatts, en la misma tabla se puede observar los valores en megawatts y porcentual en que se encuentra repartida la capacidad instalada de energía eléctrica del sector Paraestatal utilizando diferentes tecnologías.

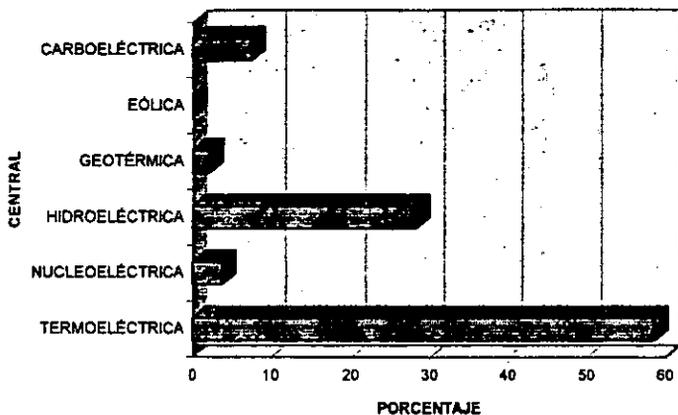
TIPO DE CENTRAL	CAPACIDAD INSTALADA	
	MW	%
Carboeléctrica	2,600.00	7.43
Eólica	1.60	0.004
Geotérmica	749.90	2.14
Hidroeléctrica	9,849.40	28.15
Nucleoeléctrica	1,309.10	3.74
Termoeléctrica	20,467.90	58.51
<b>TOTAL (1998)</b>	<b>34,977.90</b>	<b>100</b>

Tabla I

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

**CAPACIDAD INSTALADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL SECTOR  
PARAESTATAL (1998)**



Gráfica correspondiente a los valores porcentuales de la tabla I

Por otra parte la tabla II [41] es un programa de unidades generadoras de la Comisión Federal de Electricidad que debe cumplirse del año de 1998 al año 2007. En este programa de unidades generadoras con un intervalo de diez años se puede observar una preferencia a instalar plantas de ciclo combinado. Este programa se planteo para cubrir la creciente demanda de energía eléctrica que se tiene en el país.

**PROGRAMA DE UNIDADES GENERADORAS (CAPACIDAD BRUTA)**  
1998 - 2007

POISE DEL 22 DE OCTUBRE 1999  
ACTUALIZACIÓN: 20 DE MAYO DE 1999

1998			1999			2000			2001			2002															
NOMBRE	UNID	TIPO	MW	MES	NOMBRE	UNID	TIPO	MW	MES	NOMBRE	UNID	TIPO	MW	MES													
SAMALAYUCA II	P 1	C C	173.9	JUN	HERRALTA	U 1	T O	141	MAR	GR NEGRO 1	3 U 8	C 1	107	ENE													
SAMALAYUCA II	P 2	C C	173.9	SEF	RIO BRAVO	U 1	T O	154.2	JUN	MERIDA III	P 1	C C	249.5	FEB													
SAMALAYUCA II	P 3	C C	173.9	DIC	ROSARITO	U 7	T O	104.7	JUN	MERIDA III	P 2	C C	249.5	ABR													
HERMOSILLO	U 1	T O	131.8	DIC	TELLO DEL SAUZ II	U 2	T O	100.0	MAY	RIO BRAVO II	C C	4 90	JUN	JUN													
EL SAUZ	U 1	T O	122	DIC	MONTERREY II	P 1	C C	409.9	JUN	HERMOSILLO	C C	775	JUN	JUN													
					CERRITOS IV	4 U 8	GEO	107.6	OCT	EL SAUZ	C C	275	OCT	CHIRALAHUA III													
					VA DE MEX REF 2	U 4	T O	280	OCT	EL SAUZ	VARCC	150	OCT	CHAMPECHEV (HERNOSA)													
					PTD SAN CARLOS	U 3	C 1	40.6	DIC	TUXTEPEH II	C C	450	NOV	CHICOASEN U 6													
										BAJO EL SAUZ	C C	450	NOV	CHICOASEN U 7													
														CHICOASEN U 8													
SUMA ADICIONES			715.5		SUMA ADICIONES			459.9		SUMA ADICIONES			2078.7	SUMA ADICIONES													
														2009													
2003			2004			2005			2006			2007															
NOMBRE	UNID	TIPO	MW	MES	NOMBRE	UNID	TIPO	MW	MES	NOMBRE	UNID	TIPO	MW	MES													
ROSARITO 10 Y 11	C C	450	ABR		ALTAMIRA V	C C	450	ABR		POZA RICA I	C C	450	ABR														
TUPAN III	C C	450	ABR		NOROESTE II	C C	275	ABR		NORTE I	C C	275	ABR														
ALTAMIRA III	C C	450	ABR		LA LAGUNA II	U 7	C C	275	ABR	MATAMOROS I	C C	450	ABR														
LA LAGUNA II	U 1	C C	275	ABR	RIO BRAVO III	C C	450	ABR		GRD NEGRO II	C 1	9	ABR														
BAJA CAL SUR I	C C	375	ABR		ALTAMIRA VI	C C	450	OCT		NOROESTE III	C C	275	ABR														
TUPAN IV	C C	450	OCT		TUPAN V	C C	450	OCT		BAJA CALIF N	C C	275	ABR														
ALTAMIRA IV	C C	450	OCT		VALLADOLID	C C	450	OCT		MATAMOROS II	C C	450	OCT														
					POZA RICA II	C C	450	OCT		EL CAJON	H D	318	FEB														
										POZA RICA III	U 2	C C	450	OCT													
										ALTAMIRA VIII	C C	450	OCT														
										DOB VOCAS VER	C C	450	OCT														
SUMA ADICIONES			2517.5		SUMA ADICIONES			2250		SUMA ADICIONES			3319.3	SUMA ADICIONES													
														2655													
<b>TOTAL</b>												<b>21821.2</b>															
<b>SUM COMBUSTIBLE</b>												<b>C C</b>	<b>COQUE</b>	<b>COQUE</b>	<b>CAR</b>	<b>CARBON</b>	<b>GEO</b>	<b>GEOTERMA</b>	<b>TG</b>	<b>TURBOGAS</b>	<b>EDL</b>	<b>EDUCA</b>	<b>HD</b>	<b>HERP</b>	<b>ELECTRICA</b>	<b>IMC</b>	<b>NUCLEAR</b>

2/ Accion propuesta por el grupo de trabajo designado por la junta de gobierno de CFE para revisar la situacion de la oferta y la demanda de energia electrica  
3/ Los gobiernos de los estados de Hidalgo y Jalisco han manifestado interes de continuar este proyecto con linea de autoabastecimiento

Nota: Para los proyectos que se encuentran en proceso de construcción a la fecha, se consignaron las fechas oficiales de entrada en operación

**Tabla II**

## CAPÍTULO 1

### IMPACTOS AMBIETALES DEBIDOS A LA UTILIZACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES, A LA FISIÓN NUCLEAR Y A LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

#### 1.1 Emisiones provenientes de centrales termoeléctricas.

Además de la liberación de energía térmica (calor) que ocurre en cualquier tipo de central termoeléctrica o nucleoeeléctrica (cerca de 2/3 del calor producido es liberado al medio ambiente), las del primer tipo también emiten partículas y gases durante el proceso de combustión.

Entre estos productos, destacan:

- Partículas constituidas por las cenizas del combustible quemado.
- Óxidos de azufre producidos por la combustión del contenido de azufre del combustible.
- Óxidos de nitrógeno producidos por el contenido de productos nitrogenados, contenidos en el combustible y por oxidación del nitrógeno del aire durante la combustión.
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o gas carbónico.

Después de emitidas a la atmósfera y transportadas en ocasiones por el viento, a lugares distantes de la emisión, tales sustancias pueden mediante procesos químicos complejos, ser transformadas en contaminantes secundarios, como ácido sulfúrico, ácido nítrico y partículas finas de sulfatos y nitratos.

Se ha comprobado que una serie de contaminantes atmosféricos, entre ellos los óxidos de azufre y nitrógeno, el ozono y algunos compuestos de flúor, afectan el metabolismo básico de las células vegetales y disminuyen sensiblemente el crecimiento de las plantas.

El dióxido de azufre, SO<sub>2</sub>, figura entre los principales agentes contaminantes en muchas regiones del mundo, siendo el origen de grandes pérdidas económicas al

---

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

reducir la productividad forestal. La fotosíntesis se ve principalmente afectada por el  $\text{SO}_2$ [1]. En concentraciones ambientales elevadas, el dióxido de azufre afecta los sistemas respiratorios, humano y animal, y puede causar grandes pérdidas de cosechas agrícolas. El efecto más grave causado por la emisión del  $\text{SO}_2$ , sobre todo por las plantas termoeléctricas de combustible fósil, esta relacionado, a través de una transformación en la atmósfera, con el deposito de ácido, comúnmente llamado lluvia ácida (figura 1.1.1)

**PROCESO DE FORMACION DE LLUVIAS ACIDAS Y SU EFECTO EN LA ACIDIFICACION DE LAGOS, MORTALIDAD DE PECES Y DESTRUCCION DE BOSQUES**

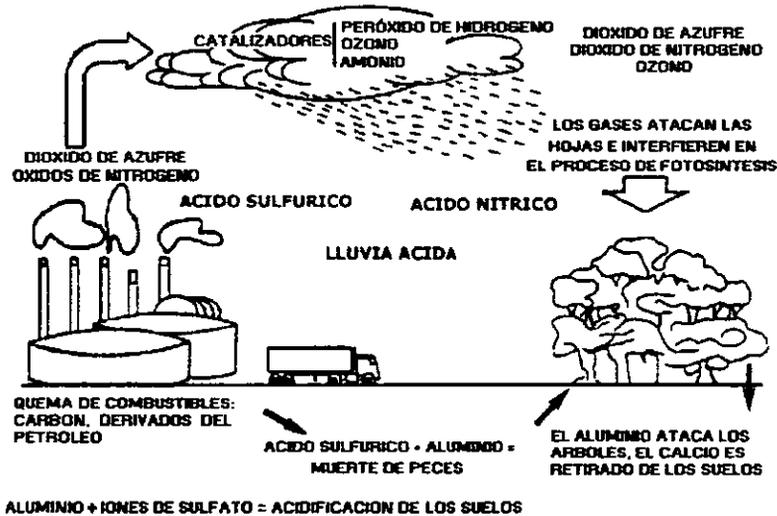


figura 1.1.1

La lluvia ácida puede dañar materiales y tejidos sensibles, poniendo en peligro ecosistemas acuáticos, cosechas agrícolas y la salud humana. La lluvia ácida es la causa principal de la muerte de bosques en muchos países de Europa. En Checoslovaquia, 60% de los bosques están afectados; 50% en la República de Alemania, 38% en Austria y 38% de las coníferas de Suiza, sufren las consecuencias de esta afección.

La lluvia ácida también es la causa principal del declive ecológico de los ríos y lagos en la región este de Canadá y de Estados Unidos[2]. Los vegetales en

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

descomposición, el plancton y los volcanes, también son fuentes importantes de  $\text{SO}_2$ . Sin embargo la quema de carbón es la fuente principal. En Europa cerca de 85% del total de las emisiones provienen de la quema de carbón[3]. En Estados Unidos las Centrales termoeléctricas que utilizan este combustible, fueron las responsables de 68% del total de las emisiones de dióxido de azufre en 1987.

Otros contaminantes son los óxidos de nitrógeno. Estos producen efectos negativos en las cosechas. Además de que estas sustancias también forman ácidos, como en el caso de dióxido de azufre los óxidos de nitrógeno son precursores del ozono ( $\text{O}_3$ ), especialmente en presencia de hidrocarburos.

Naturalmente las emisiones de dióxido de azufre, óxido de nitrógeno y material particulado, pueden ser reducidas en gran parte en una planta termoeléctrica, mediante la utilización de varios procesos tecnológicos, aún cuando todos ellos tienen sus limitaciones y exigen grandes inversiones.

Cualquier reducción de las emisiones de contaminantes, implica el aumento tanto de los costos de inversión como de los costos operacionales. En una caldera de carbón de tipo convencional, el combustible es molido hasta alcanzar una consistencia parecida a la del talco; en tales condiciones es soplado al horno donde se realiza la combustión. Los contaminantes generados durante este proceso, incluyen entre otros, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y las partículas. Estos contaminantes son transportados a la chimenea por los gases de combustión. El control de las partículas requiere de la utilización de precipitadores electrostáticos, o de la instalación de filtros para retener las cenizas volantes. Para la remoción de dióxido de azufre, se utilizan frecuentemente purificadores de gases (*scrubbers*). La reducción de los óxidos de nitrógeno pueden alcanzarse por la utilización de quemadores especiales, que también reducen la temperatura de combustión, esto se logra también con la combustión en lecho fluidizado.

El concepto de "fluidizar" sólidos para acelerar las reacciones químicas fue aplicado por la industria del petróleo en 1940. En los inicios de 1960 las agencias de investigación de los gobiernos de Estados Unidos y Gran Bretaña comenzaron a desarrollar

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

un proyecto piloto con calderas de carbón que podrían competir con calderas de gas y de aceite. En 1967 investigadores ingleses habían comenzado la combustión del lecho fluidizado del carbón en una cama de piedra caliza a presión atmosférica. Cuando la mezcla se quema la piedra caliza quita el azufre liberado durante la combustión; la tecnología del lecho fluidizado tiene una eficiencia buena de combustión y niveles bajos de emisiones contaminantes. Hay varias ventajas claves de las calderas de lecho fluidizado, entre ellas se encuentra la operación a una temperatura más baja, típicamente de 840°C (1544°F) y con esta operación baja de temperatura la piedra caliza absorbe el bióxido de azufre con una mayor eficiencia, no hay formación de óxidos de nitrógeno que requieran equipo extra para mantener las emisiones contaminantes por abajo de los estándares permitidos.

Hay dos métodos para la combustión de lecho fluidizado: Atmosférico y presurizado. En el primero la combustión se realiza con una presión de 1 atmósfera; en el segundo la combustión sucede de 5 a 15 atmósferas.

La combustión de lecho fluidizado a presión se caracteriza por un rendimiento elevado, emisiones mínimas y sencillez de explotación. Las centrales térmicas con combustión de lecho fluidizado a presión alcanzan la misma seguridad de explotación y la misma disponibilidad que las centrales térmicas convencionales. En la figura 1.1.2 se muestra el circuito simplificado de una central térmica de lecho fluidizado a presión. Algo característico es la disposición de turbinas de gas y de vapor en el sistema de ciclo combinado, así como el hecho de que la combustión en lecho fluidizado se explota a una presión de 12 a 18 bar.

La desulfuración se efectúa en el "combustor", es decir directamente en la caldera del lecho fluidizado a presión, con la ayuda de un absorbente de azufre, como lo es la piedra caliza.

Concepto de instalación de una central térmica de lecho fluidizado a presión con  
circuito de ciclo combinado.

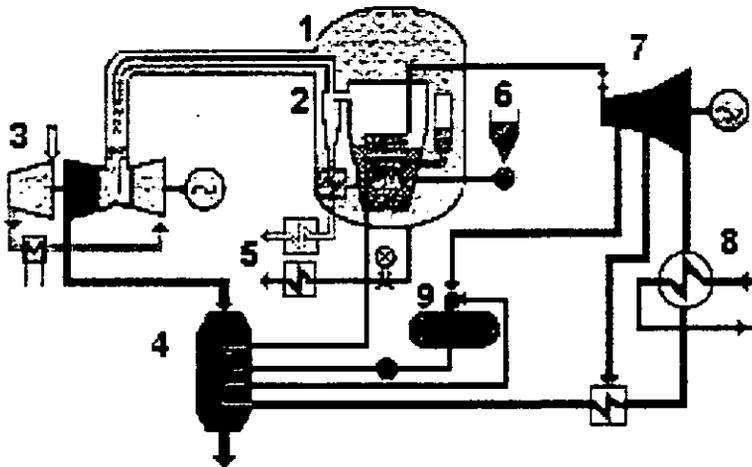


figura 1.1.2

- 1 Caldera de combustión en lecho fluidizado a presión
- 2 Separador de polvo de ciclones
- 3 Turbina de gas y compresor
- 4 Economizador
- 5 Extracción de cenizas
- 6 Alimentación de combustible y de absorbente
- 7 Turbogrupos de vapor
- 8 Condensador
- 9 Depósito de agua de alimentación

Todos estos equipos pueden significar un aumento de costo de construcción de una planta, en una cantidad que oscile entre 15% y 25% y el costo de producción de la energía eléctrica experimenta un aumento que puede variar de 10% a 15%, conforme a los estudios americanos[2,4,36]. O del 10% a 23%, conforme a estudios de la Conferencia Mundial de Energía .

Con base en estudios específicos conducidos por la conferencia Mundial de la Energía, para centrales termoelectricas que utilicen carbón tipo antracita, el costo de los

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

equipos para la reducción de emisiones se ha estimado como se establece en la tabla 1.1.1 [5] como porcentajes del costo básico.

Ejemplos de costos de protección ambiental en plantas termoeléctricas nuevas utilizando antracita como combustible.

Equipo	Aumento en inversiones específicas (%)	Aumento en costos de generación (%)
Desulfuración de gases de combustión	8.0 - 14.0	9.0 - 12.0
Desnitrificación de gases de combustión	5.5 - 11.0	5.4 - 9.6
Precipitación de cenizas volantes	1.0 - 2.0	0.8 - 1.2
<b>TOTAL</b>	<b>14.5 - 27.0</b>	<b>15.2 - 22.8</b>

Tabla 1.1.1

Las inversiones necesarias para una planta ya existente, serán mucho mayores que las necesarias para una planta nueva, pudiendo alcanzar cerca del 25% únicamente para el equipo de desulfuración.

Una reducción significativa de los contaminantes emitidos por las centrales termoeléctricas que utilizan carbón como combustible, si bien es cierto que es técnicamente posible, es una operación costosa que incide tanto en el monto de la inversión, como en el costo de la energía eléctrica producida, con el agravante de que el problema no se erradica totalmente, ya que la reducción de la contaminación atmosférica, implica en muchos casos la afección de tierras y aguas, por los productos derivados de los procesos, que también son nocivos y ocasionan con frecuencia problemas importantes.

## 1.2 La lluvia ácida y algunos de sus efectos.

La lluvia ácida representa una interferencia en gran escala en los ciclos biogeoquímicos, a través de los cuales los organismos vivos se integran con su ambiente.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

La acidificación representa un riesgo potencial de daños a las raíces de las plantas, con el subsecuente riesgo de la disminución de la productividad del ecosistema. La lluvia ácida ocasiona efectos muy negativos en los ecosistemas acuáticos, en la agricultura, los bosques, peces, animales salvajes, en la salud pública y en bienestar de la población. Materiales como los metales, maderas, pinturas y obras arquitectónicas, sufren considerable deterioro por su causa.

En los ecosistemas boscosos de algunas regiones de Europa y América del Norte, se han encontrado pruebas de acidificación, que son únicamente atribuibles a la emisión de contaminantes. En ciertas áreas, principalmente en el sur de Suecia y de la República de Alemania, la acidez del suelo aumentó hasta en una unidad de pH durante los últimos cincuenta años[7]. (Siendo el pH una función logarítmica, una disminución de una unidad de pH, significa un aumento en la acidez de diez veces. El agua pura tiene un pH de 7, el jugo de limón, 2 y el ácido de una batería, 1, para darse una idea del asunto. Una lluvia ácida con pH de 4 es diez veces más ácida que una lluvia ácida de 5. Las lluvias ácidas son generalmente definidas como lluvias de pH promedio anual de 5).

El efecto principal de este fenómeno, es la concentración cada vez mayor de metales pesados, incluyendo el manganeso y el cadmio, siendo este último de importancia significativa en las aguas superficiales y subterráneas.

En Canadá los daños causados por la lluvia ácida se evalúan en cantidades del orden de mil millones de dólares por año[9]. La mitad de la corrosión que ataca los carros canadienses, tiene su origen en las lluvias ácidas.

Los daños resultantes de la acidificación del suelo debido a lluvias ácidas, en el territorio europeo de la ex Unión Soviética, alcanza mil millones de rublos anuales. En esta región se aplican cerca de 1.5 millones de toneladas de óxido de calcio en la lucha contra la acidificación[10].

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Los peces, particularmente la trucha común y el salmón, desaparecieron de diferentes lagos y ríos de Escandinavia, a partir de los años 50, lo que indica que la cuarta parte de los lagos suecos, están acidificados o “muertos”.

Muchos lagos de Escocia también ya se encuentran sin peces. Lo mismo pasa en Canadá y en la región Este de Estados Unidos; cerca de 14,000 lagos canadienses están acidificados y biológicamente muertos. De acuerdo con un trabajo del “Science Council of Canada”, se estima que entre 10,000 y 40,000 lagos canadienses, tendrán el mismo destino futuro, en el caso de que la lluvia ácida no sea reducida[9]. La muerte de los peces se debe principalmente, al envenenamiento con aluminio liberado por el ácido que es transportado a los lagos y ríos.

La mezcla de aluminio y ácidos en los lagos y ríos, afectan también a la ecología del agua dulce. El resultado principal es un ecosistema con un número menor de especies.

Los bosques sufren igualmente con la lluvia ácida. Las aguas ácidas al escurrirse en el suelo, eliminan sustancias nutrientes y liberan aluminio que es absorbido por las raíces de los árboles. Sin absorber nutrientes esenciales, tales como el magnesio y el calcio, los árboles mueren de inanición. El óxido de azufre también ataca directamente antes de la formación de ácidos, a las hojas y a las espinas, dificultando el proceso de fotosíntesis. Es un hecho irrefutable que los daños causados a los bosques, se multiplicaron en el Continente Europeo en los últimos 10 años. La República de Alemania ha sufrido particularmente y el termino alemán *Waldsterbern* o muerte de bosques, es utilizado en todo el Continente Europeo.

### 1.3 El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el efecto invernadero.

Contrario a lo que acontece con otras emisiones provenientes de procesos de combustión de combustibles fósiles (emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, material en forma de partículas y metales pesados), no existe un medio práctico y económico conocido para

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

evitar y/o controlar las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), producto inherente al proceso de combustión.

La quema de combustibles fósiles y otras actividades humanas, aumentaron la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, en cerca de 25% desde la era preindustrial hasta nuestros días, poniendo fin a milenios de estabilidad de la atmósfera. Existen diversos riesgos relacionados con la emisión de  $\text{CO}_2$ . Uno de los posibles resultados es el aumento del llamado "efecto invernadero" que puede causar, de acuerdo con la mayoría de los especialistas en la materia, un aumento en la temperatura de la superficie terrestre, de consecuencias imprevisibles sobre el clima del planeta, como se ve en la figura 1.3.1.

### EL EFECTO INVERNADERO

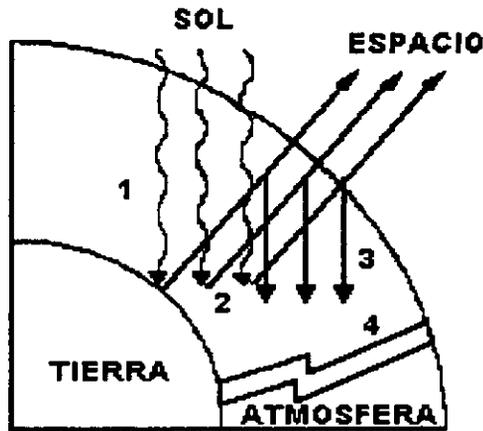


figura 1.3.1

1. La radiación solar penetra la atmósfera.
2. La luz solar es absorbida en parte por la tierra y en parte es reflejada en dirección al espacio en forma de energía calorífica con una longitud de onda mayor (infrarroja).
3. La atmósfera absorbe parte de esta irradiación de manera análoga a lo que pasa en un invernadero.
4. Concentraciones más altas de  $\text{CO}_2$ , metano y otros gases en la atmósfera absorben más de este calor irradiado, aumentando la temperatura de la atmósfera y de la superficie terrestre.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los hechos básicos de esta problemática (CO<sub>2</sub>/efecto invernadero), son conocidos desde hace mucho tiempo; los principales puntos son los siguientes:

- La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire creció desde 1860, inicio de la fase preindustrial, de un valor de 280 ppm, a cerca de 350 ppm al día de hoy, en términos de contenido de carbono, lo cual significa un aumento de 25%. La tendencia de crecimiento es exponencial como se muestra en la figura 1.3.2.

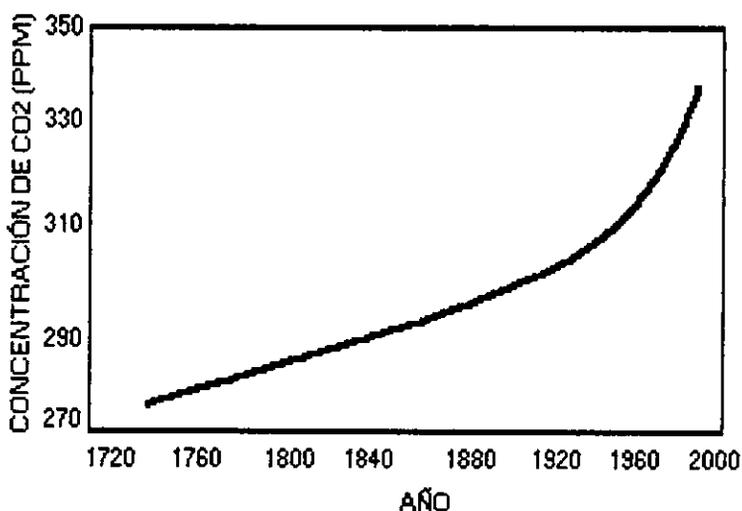


figura 1.3.2

- La principal causa de emisiones de CO<sub>2</sub> es la combustión del carbón, derivados del petróleo y gas (cerca de 2/3 del total). La deforestación, las quemas de diversos combustibles, etc., son responsables de la tercera parte restante.
- La emisión de CO<sub>2</sub> está aumentando actualmente a una tasa de 2 a 3% por año.
- Con una tasa de incremento de 1% por año, dentro de 50 a 100 años, la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire sería de 500 a 600 ppm.
- Con una duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub> en relación a la época preindustrial, se producirá, de acuerdo a los resultados de diversos modelos climáticos, un aumento

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

promedio de la temperatura de 2 a 4°C. El calentamiento será más pronunciado en las latitudes altas donde el aumento promedio de la temperatura sería de 6 a 8°C

- En consecuencia, habría modificaciones drásticas de las condiciones climáticas mundiales, con efectos profundos en los ecosistemas globales, en la agricultura, y en los recursos hidráulicos, con graves consecuencias socioeconómicas a nivel mundial.

El carbón es el mayor emisor de CO<sub>2</sub> por unidad de energía producida como se señala en la figura 1.3.3 [5], y cualquier política dirigida a la disminución de este contaminante en la atmósfera, implicará necesariamente una disminución en el empleo de esta clase de combustible.

EMISIONES DE GAS CARBONICO TCO<sub>2</sub> / tce  
(toneladas de carbón equivalente)

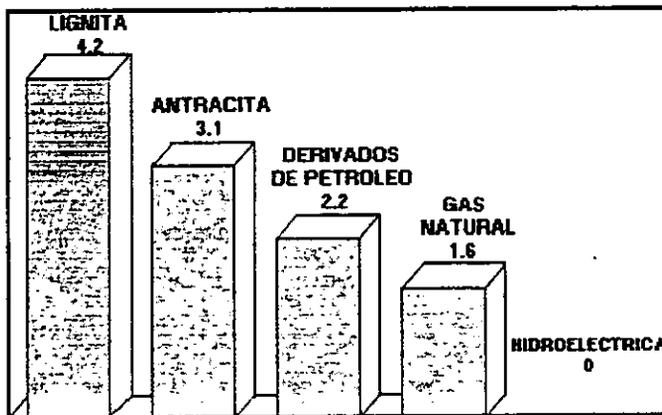


figura 1.3.3

La quema de combustibles fósiles está ocasionando la emisión de 22 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año y si el aumento anual en la atmósfera es de 12 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año, la diferencia se debe a la existencia de grandes sistemas de absorción y a los vegetales, que gracias a la fotosíntesis, lo aprovechan para su nutrición.

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

Gran parte del gas carbónico que es emitido permanece en la atmósfera, teniendo un efecto acumulativo en el transcurso del tiempo.

El gas carbónico, en el curso de los últimos cien años, fue el principal causante del efecto invernadero, pero en las últimas dos décadas, otros gases de efecto invernadero se están volviendo importantes, como consecuencia del desarrollo de nuevos procesos industriales. Tal es el caso del metano (CH<sub>4</sub>), el ozono (O<sub>3</sub>) troposférico (baja atmósfera) y los clorofluorocarbonos, también llamados popularmente "freones". Actualmente el CO<sub>2</sub> continúa siendo el principal causante del efecto invernadero; su contribución es de cerca de 50%.

Los clorofluorocarbonos, utilizados como refrigerantes en refrigeradores y equipos de aire acondicionado y en la producción de espumas plásticas, contribuye a dicho problema, con cerca del 15% mientras que el metano, el N<sub>2</sub>O, y los demás gases mencionados son responsables del restante 35% (figura 1.3.4).

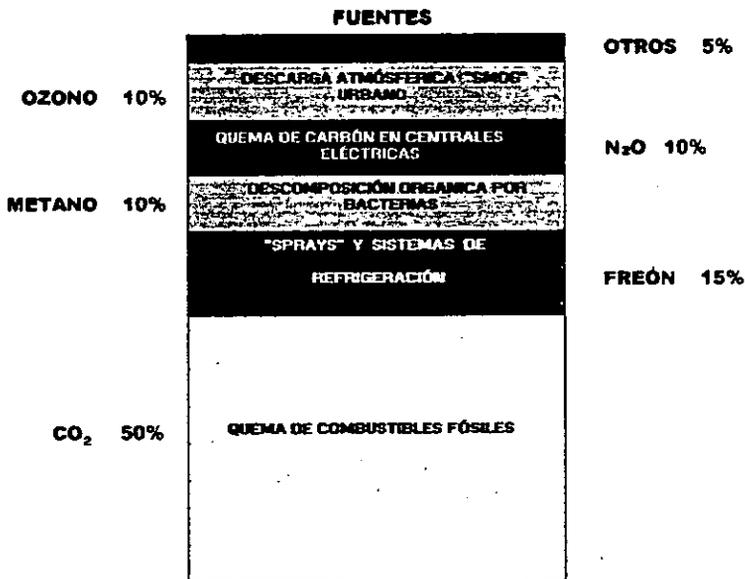


Figura 1.3.4

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

El aumento creciente de la concentración de  $N_2O$  en la atmósfera, está también íntimamente ligado al aumento de la utilización de combustibles fósiles especialmente el carbón.

Varios de estos gases de efecto invernadero, tienen vidas muy largas en la atmósfera variando de décadas a siglos, lo que significa que sus concentraciones atmosféricas responderán muy lentamente a los cambios en las tasas de emisión[12]. Particularmente el  $CO_2$  emitido hoy en la atmósfera, tendrá influencia en la concentración atmosférica del  $CO_2$  de los siglos futuros. Para conseguir una estabilización en los niveles actuales, sería necesaria una reducción inmediata de las emisiones producidas por el hombre, del orden de 60% a 80%.

Es importante no subestimar los riesgos ambientales a largo plazo, causados por las centrales termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles y por procesos industriales. Aún cuando nuestra sociedad decida parar las emisiones de los gases del efecto invernadero, su concentración en la atmósfera aún crecerá durante los próximos 25 o 30 años debido a la inercia de los grandes sistemas. Existe un consenso científico en el sentido de que el aumento de la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera, está relacionado de manera directa con el aumento de la temperatura media de la Tierra.

Con el aumento medio de las temperaturas del planeta, existe el riesgo de que el derretimiento de los polos, ocasione la elevación de los niveles de los océanos y mares. Como aproximadamente, la mitad de la población mundial habita en las proximidades del mar, el ignorar este riesgo sería irresponsable. De acuerdo con el "Laboratory for Coastal Research, University of Maryland", los océanos ya se han elevado, en promedio, cerca del 15 cm durante los últimos cien años.

El aumento del efecto invernadero no es un fenómeno nuevo. Desde hace aproximadamente cien años, los científicos del mundo señalaron la aparición del fenómeno, a partir de los siguientes cincuenta años se detectó y, durante todo ese tiempo no se hizo nada para evitarlo o mitigarlo. Es de esperar que ahora, cuando sus efectos se empiezan a sentir intensamente, se tomen acciones más responsables. Algunos científicos opinan que este fenómeno ya no puede ser evitado, y que tan sólo será posible moderar su intensidad.

#### 1.4 Efectos producidos por centrales nucleares.

Los efectos sobre la población de los impactos ambientales que puede producir una central nucleoelectrica dependen en gran parte de su localización con respecto a los centros de consumo de energía eléctrica, áreas pobladas, aguas superficiales, tierras agrícolas, topografía del terreno, meteorología, etc. Por lo tanto las consideraciones para el emplazamiento de una central nuclear deben de ser muy estrictas por las liberaciones de sustancias radioactivas durante operación normal, liberación potencial en situaciones de emergencia y en la fase post-operacional cuando se tenga que llevar a cabo el paro definitivo.

Además deberán observarse los efectos producidos durante la selección y preparación del sitio, para la construcción de la central y por las descargas térmicas, de desechos sanitarios y de productos químicos y biocidas.

##### 1.4.1 Efectos no radiológicos.

###### a) Necesidades del terreno.

Las necesidades del terreno pueden variar de planta a planta dependiendo de la localización de la misma respecto a aguas superficiales, áreas de población, tipo y tamaño del reactor y las condiciones meteorológicas.

Un problema muy importante, relacionado con el uso de la tierra, puede surgir de la necesidad de controlar los patrones de población cerca de las grandes centrales nucleoelectricas. Las evaluaciones del impacto ambiental tratan de considerar, a largo plazo, las tendencias de la población, sin embargo la selección del sitio normalmente supone que las áreas de baja densidad de población cerca de una central, conservaran su carácter normal, aunque la zona se convierta en un polo de atracción para nuevas industrias y para sus empleados.

Otro aspecto que debe observarse, es el producido por las actividades de preparación del sitio y la construcción de la central, tales como: limpieza del terreno,

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

excavación, construcción de caminos de acceso, etc., y por la construcción, conservación y mantenimiento de los sistemas de transmisión.

### **b) Descargas térmicas.**

El calor producido por la fisión en el núcleo del reactor se extrae por medio de refrigerantes apropiados que a su vez hace funcionar la turbina para operar el generador y producir electricidad. En la descarga de la turbina el vapor se condensa para aumentar la conversión de energía. En este proceso, se desecha una gran cantidad de calor; esta cantidad es considerablemente mayor que el calor equivalente a la energía eléctrica generada.

La eficiencia térmica de los reactores de agua ligera es de aproximadamente el 33% lo que significa que casi dos tercios de la energía calorífica generada en el núcleo del reactor tiene que desecharse al ambiente en las cercanías de la central nuclear. Como se menciona al inicio de este capítulo las descargas térmicas son producidas también en centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles.

El calor liberado de las centrales nucleares influye sobre todo en la actividad biológica del cuerpo de agua receptor produciendo cambios favorables o desfavorables en el ecosistema. El efecto ambiental más notorio de algunas centrales nucleares se manifiesta en la muerte de peces, resultante del diseño no apropiado de las obras de toma, lo que lleva al choque y mutilación de peces sobre las mallas utilizadas para evitar la entrada de basura, o debido al impacto térmico producido sobre los organismos por el cambio de estaciones, esto es que en verano por ejemplo, se tendría un mayor calentamiento del agua debido a las descargas térmicas, o bien se tendría un enfriamiento mayor en invierno por el apagado de la central. Además pueden producirse efectos combinados por la descarga térmica, radioactiva y de productos químicos y biocidas.

### **1.4.2 Efecto radiológico.**

La radiación consiste en la emisión de energía en forma de partículas atómicas o radiación electromagnética como resultado de la desintegración de elementos radioactivos.

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

Puede tratarse de partículas cargadas eléctricamente, como las partículas alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ), de radiación electromagnética gama ( $\gamma$ ) o de radiación neutrónica.

La radiación alfa esta formada por núcleos de helio que tienen doble carga positiva, por lo que su principal interacción con la materia es la ionización y por lo tanto es poco penetrante; toda la energía de transporte es cedida a lo largo de una trayectoria muy corta, unos cuantos centímetros en el aire y milésimas de milímetro en los tejidos de los organismos vivos.

La radiación beta está formada por electrones y como tiene una carga negativa también producirá ionización y es un poco más penetrante que la radiación alfa, pues alcanza unas decenas de centímetros en el aire. Otra forma de interacción con la materia es la excitación de la misma, transfiriendo su energía a los electrones que giran al rededor del núcleo.

La radiación gama es de naturaleza electromagnética, sin carga por lo que no ioniza el medio de manera tan inmediata como la radiación alfa o la radiación beta; es muy penetrante y puede atravesar una distancia grande en el aire sin que sea absorbida una fracción significativa de su energía.

La radiación neutrónica está constituida por neutrones y no tiene carga alguna; su poder de penetración en los materiales es en general mayor que la radiación gama. No produce ionización en los átomos del medio del desplazamiento el efecto predominante en este tipo de radiación es la interacción con los núcleos, excitándolos.

Se evalúa el efecto de la radiación por la energía absorbida por unidad de masa de materia irradiada; esta energía se llama "dosis absorbida". La unidad de dosis absorbida es el "rad", que es igual a  $10^{-2}$  joule/Kg.

Los efectos biológicos de las dosis absorbidas depende de varios factores: el principal es la naturaleza de la radiación, pero también hay que tener en cuenta la rapidez conque se recibe la dosis y los órganos irradiados.

A fin de poder comparar los efectos biológicos producidos por la radiación se ha establecido un concepto: el de "dosis absorbida equivalente", que se expresa en "rems" (rad equivalent man) y cuya magnitud se obtiene multiplicando la dosis absorbida por

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

un factor de calidad que depende de la naturaleza de la radiación, como se indica en la tabla 1.4.1 [37]:

Tipo de radiación	Factor de calidad.
Rayos X,β,γ	1
Neutrones térmicos	23
Neutrones protones y ciertas partículas cargadas	10
Partículas	20

Tabla 1.4.1

Generalmente se distinguen los efectos precoces de la radiación y los efectos tardíos.

Los efectos precoces se refieren, por definición, a los que aparecen poco después de la irradiación; desde algunas horas hasta un mes. Las manifestaciones varían según la dosis recibida.

Si la dosis recibida no excede de 100 rems, los síntomas son ligeros y los efectos son reversibles. Si la dosis es de 400 rems o mayor, los efectos son letales y la muerte sobreviene al cabo de 20 o 30 días.

Los efectos tardíos pueden manifestarse al cabo de períodos de tiempo que pueden ser muy largos: cánceres y leucemia al cabo de decenas de años; mutilaciones genéticas al cabo de varias generaciones.

Durante la operación de las plantas nucleoelectricas se forman radionúclidos por la fisión nuclear del combustible y por activación neutrónica de los materiales estructurales, productos de corrosión e impurezas en el agua de enfriamiento del reactor. Una parte de los radionúclidos puede escapar hacia el refrigerante a través de las fisuras en el encamisado del combustible. La mayor parte de los isótopos radioactivos liberados en el refrigerante o moderado son eliminados por los sistemas de tratamiento de desechos líquidos y gaseosos, no obstante, una parte de este material radioactivo se puede liberar al ambiente.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

De la gran variedad de radionúclidos generados por las operaciones del reactor, algunos son muy importantes; ya sea por la facilidad con que aparecen en las corrientes de efluentes o por su importancia radiológica.

### a) Efluentes transportados por el aire.

En los efluentes transportados por el aire son muy importantes los gases nobles productos de la fisión y los yodados radioactivos, el tritio y las partículas resultantes del decaimiento de los gases nobles productos de la fisión.

### b) Efluentes líquidos.

Los líquidos que contienen varios radionúclidos y pueden liberarse durante la operación del reactor, se producen no solo por fugas en las tuberías del reactor sino también se deben a varias descargas. En algunos casos una cantidad importante de actividad puede surgir de las albercas de almacenamiento de combustible quemado.

Los efluentes líquidos se procesan en el sistema de tratamiento de desechos líquidos, la radioactividad residual que sale después del tratamiento se descarga mezclada con la corriente del agua de enfriamiento al medio acuático.

### c) Desechos sólidos.

Los desechos sólidos radioactivos pueden producirse en grandes cantidades por la operación del reactor; la naturaleza y el nivel de radioactividad de tales desechos depende de las fuentes de producción. En el caso de no reciclar el combustible quemado, los elementos gastados que contienen grandes cantidades de productos de fisión junto con los elementos transuránicos y uranio no quemado se clasifican como desechos sólidos de alto nivel. Las columnas de resinas y filtros usados para eliminar la actividad de las corrientes de efluentes líquidos y gaseosos formarán desechos sólidos con una concentración de radionúclidos bastante alta.

Las partes activadas o contaminadas del reactor o de los sistemas, que son quitadas durante las operaciones de reparación y mantenimiento, caen dentro de la categoría de desechos sólidos de alto nivel. Una fuente menos significativa de desechos radioactivos sólidos es el material contaminado tal como guantes, material de laboratorio, etc., que se utiliza en operaciones con sustancias radioactivas.

#### **1.4.3 Exposición a la población de efectos radiológicos.**

Los radionúclidos liberados en los efluentes líquidos y gaseosos durante la operación del reactor, sufren una serie de complejos procesos químicos, físicos y biológicos antes de llegar al hombre. Tales procesos dependen de la localización del reactor, las condiciones meteorológicas y las diferentes rutas de exposición.

Los gases nobles liberados a la atmósfera producen una dosis de irradiación directa por inmersión en la pluma radioactiva. El tritio y los yodos radioactivos contribuyen a la dosis principalmente por inhalación y posteriormente por ingestión. Las actividades de las partículas liberadas pueden ser variables pero son relativamente bajas. Producen dosis por inhalación mientras el material permanece en el aire y por ingestión y exposición directa proveniente del suelo contaminado.

Los radionúclidos descargados en los efluentes líquidos radioactivos pueden dar por resultado dosis al hombre a través del agua potable y consumo de pescado. Además, una parte de la población estará expuesta a irradiación externa proveniente de los sedimentos en las playas, ya que por el efecto de la marea se depositarían en la arena parte de estos radionúclidos que fueron descargados en efluente líquidos como por ejemplo los mares.

#### **1.4.4 Radiaciones por accidentes del reactor.**

En accidentes del reactor, el inventario de productos de fisión en el núcleo será el origen de los riesgos y la causa del daño ambiental, aunque las liberaciones de estos productos dependerá del tipo del reactor, las salvaguardias de diseño incorporadas, el comportamiento de los sistemas de concentración y la naturaleza del accidente. Después de una liberación accidental de material radiactivo a la atmósfera existe la posibilidad de un riesgo radiológico a personas que se encuentren en la dirección del viento. Parte de este riesgo se origina directamente del paso de la nube de material radioactivo transportado por el aire.

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

La radiación gamma externa emitida por la nube causará una dosis al cuerpo entero y la radiación beta causará una dosis menos peligrosa a la piel. Las persona que inhalen el aire retendrán material radioactivo en los pulmones y recibirá una dosis, especialmente del material insoluble.

Los núclidos solubles pasaran de los pulmones al torrente sanguíneo de donde serán acumulados por los diversos órganos del cuerpo, dependiendo de la fracción absorbida, de factores bioquímicos y de otros por ejemplo: los isótopos de yodo causarán una dosis a la glándula tiroides. El paso de la nube de material radioactivo a nivel del suelo, en la dirección del viento, contaminará el suelo, la vegetación y los edificios. Cuando la radiación externa termina, un riesgo muy importante puede ser la inhalación de material radioactivo depositado en el suelo y ese material puede ser vuelto a poner en el aire por las actividades del hombre y los animales.

El accidente más grave que puede ocurrir en el reactor nuclear es el originado por la pérdida del enfriamiento del núcleo del reactor. La reacción de fisión del uranio produce grandes cantidades de productos radioactivos; aunque se detenga la reacción de fisión mediante la inserción de las barras de control, los productos de fisión siguen generando calor y si se interrumpe el enfriamiento la temperatura se elevará y se producirá la fusión del núcleo, que podría causar la ruptura del contenedor y la emisión de gran cantidad de radioactividad al medio ambiente. Teniendo en cuenta que un reactor nuclear comercial para generar electricidad contiene alrededor de 100 toneladas de combustible de uranio y que al cabo de un año de funcionamiento la cantidad de productos radioactivos presentes en el núcleo es del orden de mil veces mayor que el de una bomba atómica como la lanzada en Hiroshima, la fundición de un reactor podría causar daños más extensos por radiación que una bomba atómica.

Los principales accidentes, que se han tenido en la historia de las centrales nucleoelectricas son dos, el accidente la planta de la isla de las Tres Millas y el accidente de la planta de Chernobyl.

El accidente de la planta nucleoelectrica de la isla de las Tres Millas, próxima a la ciudad de Harrisburg, en el estado de Pensylvania, en Estados Unidos, se inició el 28 de marzo de 1979. Por una combinación de fallas del equipo y errores humanos el reactor de

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

la unidad generadora No. 2 se quedo sin refrigeración y la temperatura se elevó a alrededor de 2900°C. Se formó una burbuja de hidrógeno en el interior de la vasija y la presión subió a valores peligrosos, teniendo que liberarse cierta cantidad de gases radioactivos a la atmósfera para controlar la presión. La refrigeración del núcleo del reactor pudo restablecerse y después de varios días de angustia y confusión el accidente se controló.

El 26 de marzo de 1986 ocurrió la catástrofe de Chernobyl, en la ahora ex-Unión Soviética. En el reactor No. 4 de esa planta nucleoelectrica se produjo una explosión que lo destruyo y liberó gran cantidad de productos radioactivos a la atmósfera. El accidente se debió a errores humanos y al hecho de que ese tipo de reactores, moderados con grafito y enfriados con agua, son inestables a baja carga, lo que explica el rápido aumento de generación hasta valores muy superiores a la capacidad nominal del reactor cuando, además, estaban bloqueados varios sistemas de seguridad.

### 1.5 La energía geotérmica.

La energía geotérmica, en teoría, puede capturarse de cuatro formas diferentes:

- Hidrotérmica.
- Geopresión.
- Roca seca caliente.
- Magma.

Aunque solo uno de estas formas está comercialmente disponible en la actualidad, las otras están pasando por procesos de investigación y desarrollo como fuentes potenciales de energía.

#### 1.5.1 Hidrotérmica.

La energía geotérmica usada en nuestros días es energía hidrotérmica, la cual consta de depósitos de agua caliente y vapor que están atrapados en la roca fracturada o en los sedimentos debajo de la corteza terrestre. Esta energía puede utilizarse de dos

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

maneras: a altas temperaturas, se utiliza para generar electricidad y a temperaturas bajas o moderadas se emplea para proporcionar calor directo.

Los pozos hidrotérmicos pueden ser de dos tipos: vapor seco y vapor con agua caliente. Aunque los pozos con vapor seco son de mayor calidad que los de vapor y agua, la cantidad de sitios potenciales es muy limitada. Las dos principales fuentes de vapor seco localizadas en la actualidad se encuentran en Lardereello, en Italia, y los Géiseres, en California. Los pozos de vapor y agua pueden encontrarse en mayor cantidad, pero solo algunos son apropiados para la generación de energía eléctrica.

Los depósitos hidrotérmicos se encuentran a una profundidad de más de 1000 metros por debajo de la superficie terrestre. La temperatura de los fluidos atrapados dentro varía de entre 32°C y 360°C. Estos depósitos son los únicos disponibles en la actualidad para energía geotérmica porque son los más accesibles y, por tanto los más fáciles de explotar. Para poder generar electricidad se tienen que utilizar temperaturas superiores a los 150°C. Dependiendo del estado de la fuente geotérmica (vapor o mezcla de vapor y líquido), y de su temperatura, es posible usar una de tres tecnologías diferentes para crear electricidad. Si la fuente contiene vapor seco, el vapor es conducido hacia una turbina, que a su vez se encuentra acoplada a un generador eléctrico. Si la fuente contiene líquidos hidrotérmicos con una temperatura mayor a los 200°C, se emplea la tecnología de vapor rápido: se deja que el agua se convierta en vapor al estar en la superficie terrestre y, después, el vapor se conduce a la turbina. Por último, para las fuentes con líquidos a temperaturas moderadas y los que contienen un alto grado de salinidad, se está empleando una tecnología de ciclo binario relativamente nueva. En este proceso, el líquido caliente se mantiene bajo presión mediante una bomba y luego vaporiza un fluido de trabajo secundario como un hidrocarburo que a su vez hace funcionar a la turbina. Entonces, el fluido se presuriza en un sistema de circuito cerrado.

Las plantas eléctricas geotérmicas también pueden tener diseños híbridos; combinando la energía geotérmica con energía complementaria proveniente de otra fuente, como pueden ser los combustibles fósiles o la biomasa. Los sistemas híbridos generalmente son apropiados solo para depósitos en donde la temperatura del fluido no es la apropiada y por tanto requiere de energía adicional.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

### 1.5.2 Geopresión.

Los sistemas geopresurizados son otra forma de energía geotérmica. Estos depósitos contienen fluidos calientes que están saturados de metano y cerrados con alta presión en capas de arenisca a profundidades de 3,000 a 6,000 metros de bajo de la superficie terrestre. Aunque aproximadamente 20% de la fuente de energía geotérmica de Estados Unidos se encuentra en forma de depósitos geopresurizados, los investigadores no han podido aprovechar esta energía de manera económica. La gran profundidad de estas fuentes y la presión involucrada provocan problemas que han hecho que los costos sean muy elevados.

### 1.5.3 Roca seca caliente.

La roca seca caliente es otra fuente potencial de energía geotérmica que todavía no se explota comercialmente. Esta fuente se encuentra en la parte donde la corteza terrestre es delgada y el magma está lo suficientemente cercano a la superficie para calentar la roca que contiene muy poca agua. Las regiones con roca seca caliente son las que se encuentran más ampliamente distribuidas en el planeta y son la fuente potencial más abundante de energía geotérmica. Pero una vez más los métodos económicos para aprovechar este recurso energético todavía tiene que desarrollarse. Las investigaciones actuales tiene que ver con la perforación de dos pozos: en el primero se inyecta agua, la cual circula a través de las fracturas de la roca (aprovechando durante todo el tiempo el calor proveniente de la roca) y regresa por el segundo en forma de vapor; entonces se vuelve a inyectar agua para repetir el proceso.

### 1.5.4 Magma.

El magma es la roca derretida debajo de la corteza terrestre. Puede alcanzar temperaturas aproximadas a los 1,000°C. Teóricamente, el magma puede usarse para la energía geotérmica en lugares donde se localiza a profundidades accesibles (2,000 a 6,000 m), debajo de la corteza terrestre. Pruebas realizadas en un campo superficial de lava en Hawaii han demostrado la factibilidad de extracción de energía a partir del magma, pero las técnicas para extraer la energía de esta fuente y localizarla así como usarla

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

comercialmente todavía se encuentran en etapa experimental. Un pozo de magma también se está probando en California. Se cree que la energía de magma será la más difícil de desarrollar de todos los tipos de energía geotérmica.

### 1.6 Impactos ambientales debidos a las plantas geotérmicas.

Pese a que una planta geotérmica no utiliza combustibles fósiles, si crea una polémica en cuanto a su utilización; a continuación se mencionaran algunas razones en contra y a favor del desarrollo geotérmico.

#### 1.6.1 Ácido sulfhídrico.

El ácido sulfhídrico se encuentra frecuentemente en los campos geotérmicos y se considera como un gas que puede ser letal aun cuando generalmente está presente en proporciones considerablemente modestas. Este gas se vuelve más peligroso por el hecho de que paraliza los nervios del olfato cuando se encuentra en una concentración relativamente alta. Han ocurrido casos fatales raros en los alrededores de las fumarolas; en las plantas geotérmicas en explotación no se ha tenido registro de algún tipo de incidente por causas de este gas. El ácido sulfhídrico ataca también el equipo eléctrico, los conductores de aluminio de las subestaciones y las líneas de transmisión tienen que cubrirse con un revestimiento protector que evite el ataque ulterior. Sin embargo, los instrumentos y los contactos de los relevadores pueden sufrir las consecuencias si se tienen componentes de cobre expuestos. Se puede tener también efectos adversos en los cultivos y en la vida de los ríos.

En las plantas generadoras geotérmicas, el ácido sulfhídrico en concentraciones más altas se presenta en los puntos de descarga de los eyectores de gas. Hasta mediados de la década de los 70's se considero como medida suficiente el situar las descargas de los eyectores de gas a una elevación alta y confiar en una temperatura alta de los gases para producir la flotación necesaria y así asegurar su amplia dispersión. A parte de esta precaución y de una buena ventilación en los edificios, la tendencia ha sido ignorar al ácido sulfhídrico bajo el argumento de que en todo caso este gas se presenta en forma

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

natural en los campos termales. Sin embargo se ha pasado por alto el hecho de que la explotación concentra e incrementa la liberación de este gas al medio ambiente.

Para eliminar o disminuir el problema del ácido sulfhídrico se implementaron algunos métodos como el convertir al ácido sulfhídrico en azufre elemental. Este método tuvo sólo éxito limitado, ya que la conversión resultó tanto problemática como costosa: el azufre que se obtenía era impuro e invendible. Otro tratamiento fue el utilizar sulfato de hierro y ácido sulfúrico, inyectando sosa cáustica en los condensadores y peróxido de hidrogeno en las piletas de las torres de enfriamiento, con esto se logro aproximadamente el 90 % de separación del ácido sulfhídrico pero dio a lugar a dificultades todavía peores. Se formó un lodo pesado y corrosivo en las torres de enfriamiento con lo que se redujo la eficiencia y llegó a ocasionar que el material de relleno se colapsara con el peso; y el rocío contaminado de las torres depositó mucha suciedad sobre las estructuras y la vegetación cercanas.

El siguiente método probado fue el más complicado y costoso proceso. El proceso de Stretford en el cual se necesita de la sustitución del condensador de superficie más costoso para usarlo en sustitución del condensador de chorro, o de contacto directo que resulta más barato. El proceso de Stretford es muy eficiente en un medio ácido; pero desafortunadamente, el amoniaco presente en el vapor de los géiseres ocasiona que el valor de pH sea alrededor de 8.5 en la descarga de la turbina, y esto reduce la eficiencia del proceso en casi 30% (valor que es inaceptable). Debido a estos resultados se siguen examinando opciones y una de ellas involucra las dosificación del ácido del vapor antes de entrar al condensador de manera que el proceso de Stretford pudiera volverse más eficiente.

### 1.6.2 Bióxido de carbono.

La mayor parte de los gases no condensables de un campo termal están formados por CO<sub>2</sub>. Este puede escapar al aire o corrientes de agua locales. El hecho es que la quema de combustibles produce por lo general cantidades mucho mayores de este gas en función del calor consumido que las explotaciones geotérmicas. Por lo general la emisiones de CO<sub>2</sub> de una planta geotérmica son bajas, solo en lugares excepcionales como

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

la región de Monte Amiata de Italia, estas emisiones pueden ser iguales o mayores que las que descargan las plantas generadoras que utilizan combustibles fósiles. Se han hecho estudios para la extracción comercial del CO<sub>2</sub> los procesos geotérmicos. (por ejemplo, la fabricación del hielo seco, de ácido carbónico para bebidas, la producción de alcohol metílico; pero aun no se comprueba un éxito económico para estos procesos). Mientras tanto la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera parece ser inevitable hasta que se encuentre un método permanente de fijación química. El problema de producción de CO<sub>2</sub> en una planta geotérmica no se ha vuelto serio, pero si el desarrollo geotérmico crece drásticamente, como bien puede suceder, entonces si podría ser un problema serio.

### 1.6.3 Venenos contenidos en le agua.

El agua que se produce del proceso de utilización del vapor en una planta geotérmica a veces contiene elementos tóxicos tales como el boro, arsénico, amoniaco y mercurio, los cuales si se descargan en las corrientes de algún río pueden contaminar las aguas abajo que se utilizan para riego, cria de peces o abastecimiento para consumo humano. Las soluciones posibles al problema de los venenos contenidos en el agua comprende la reinyección (de la que se hablara mas adelante), su conducción al mar (si no se encuentra muy lejos) a través de ductos o canales, otra posible solución es el uso de estanques de evaporación, o el almacenaje durante periodos de sequias y la liberación posterior durante la época de lluvias, cuando la disolución volvería a las sustancias tóxicas más o menos inocuas.

### 1.6.4 Venenos contenidos en el aire.

Durante el proceso del aprovechamiento de la energía geotérmica se pueden tener escapes de sustancias perjudiciales al aire; además del ya mencionado ácido sulfhidrico puede haber compuestos de mercurio y arsénico y elementos radiactivos. También puede haber en el aire ciertas emisiones nocivas, que si bien no son venenosas, pueden ocasionar problemas al medio ambiente circundante; estas emisiones pueden ser polvo de roca y rocío cargado de sílice, que pueden dañar a árboles o a terrenos de cultivo. Afortunadamente las sustancias tóxicas contenidas en el aire raras veces están presentes

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

en concentraciones perjudiciales (a excepción del sílice que no es en realidad una sustancia tóxica), pero es aconsejable tener una medición sistemática para ejercer una vigilancia cuidadosa sobre posibles peligros futuros.

### 1.6.5 Contaminación por calor.

La descarga de grandes cantidades de agua caliente a ríos y corrientes puede dañar a los peces y favorecer el crecimiento de maleza acuática indeseable. Una forma simple de este tipo de afectación es el descargar el agua caliente de la torres de enfriamiento a una laguna en donde puede evaporarse; el calor que escapa a la atmósfera en forma de vapor puede afectar al clima local ya que puede formar niebla y/o hielo, aunque en ciertos climas el incremento de humedad puede tener efectos benéficos. Cuando se usan rios de gran caudal para recibir la descarga de aguas de desecho muy calientes, hay posibilidades de que se forme una zona de agua caliente a lo largo de una ribera que se extiende aguas abajo tal vez medio kilometro hasta que tiene lugar la mezcla completa, esta zona resulta peligrosa para los peces, ya que les puede ocasionar la muerte. En rios pequeños los efectos podrían ser peores.

### 1.6.6 Hundimiento del terreno.

El problema del hundimiento de la tierra y los sumideros se ha visto en la planta de energia de Wairakei, Nueva Zelanda, en donde se ha desarrollado una depresión que cubre alrededor de 260 km<sup>2</sup>; no hay duda que la extracción de cantidades enormes de agua subterránea puede causar hundimientos substanciales del terreno que podrían resultar en la introducción de esfuerzos de las tuberías y estructuras superficiales, tal vez con consecuencias serias o hasta desastrosas. Después de 10 años de explotación en Wairakei se presento un hundimiento de 4.5 m. Se pronosticó que con un hundimiento de 0.4 m por año se podría tener para el año 2000 un hundimiento de 16.4 m si no se encontraba una solución al problema.

Si bien la reinyección de fluidos geotérmicos se está llevando a cabo para reducir al mínimo el hundimiento del terreno, sus efectos todavía se encuentran en observación.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Debe hacerse notar que la mayor parte de las tecnologías geotérmicas integran el sistema de reinyección en su diseño.

### 1.6.7 Sismicidad.

Se han expresado temores en ocasiones en el sentido de que la explotación prolongada de un campo geotérmico pudiera desencadenar una serie de temblores, especialmente si se practica la reinyección en zonas de alto esfuerzo cortante en las que pudiera ocurrir diferenciales de temperatura relativamente grandes. Estos temores se han manifestado porque todas las explotaciones existentes de campos hipertérmicos se encuentran en áreas de naturaleza sísmica, en las que es evidente la inestabilidad del terreno, y cualquier interferencia con la naturaleza pudiera ocasionar los temblores. Con el estado de desarrollo geotérmico no parecen ser graves estos riesgos, pero si en el futuro se emprendiera la explotación geotérmica en gran escala explotando las rocas secas calientes, el problema tal vez tomaría mayor importancia.

### 1.6.8 Reinyección.

La reinyección de los fluidos termales al terreno después de su utilización fue considerada hace muchos años pero no se le daba mucha importancia ya que se tenían dudas en cuanto a la posibilidad de realizarla. Al utilizar el proceso de reinyección en una planta geotérmica se puede reducir tanto la cantidad de calor extraída del yacimiento como también la cantidad de recarga. Si ha de lograrse esta ganancia térmica, debe tenerse cuidado en la selección de los puntos de reinyección, ya que estos puntos no deben de estar próximos a los pozos en producción debido a que pueden causar interferencia con el vapor que se extrae. El agua reinyectada debe también entrar al acuífero cerca de los confines del campo en una zona de la que se espere que fluya el líquido de recarga desde el exterior para la reposición del fluido que esta extrayéndose continuamente del acuífero por los pozos de producción. Puede a veces esperarse que el fluido de recarga entre al acuífero desde abajo, más que desde las orillas del campo.

No se ha reportado problema alguno en los campos de agua dominante por choques sísmicos resultantes de la reinyección aunque no es posible afirmar

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

categóricamente que nunca sucederán. En Italia se produjeron algunos choques durante la realización de experimentos de reinyección en un campo de vapor dominante. La reinyección en los lugares donde sea posible puede eliminar los venenos contenidos en el agua, la contaminación por calor y disminuir en gran medida algunos efectos contrarios al medio ambiente que se generan en las plantas geotérmicas.

## **CAPÍTULO 2**

### **GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA**

#### **2.1 Generalidades sobre centrales hidroeléctricas.**

La energía eléctrica se genera en una planta hidroeléctrica cuando el agua, que es almacenada por una presa, es liberada para hacer girar turbinas de agua que se encuentran acopladas a generadores eléctricos. La energía eléctrica generada es llevada por líneas de transmisión hasta los centros de consumo y de ahí es distribuida al usuario final.

Las presas que se construyen a través de cuerpos corrientes de agua, tienen dos propósitos. El primero es levantar el nivel de agua, para incrementar la energía potencial; el otro será crear una reserva de agua para compensar fluctuaciones en el flujo del río. La importancia de ambos propósitos varía de un sitio a otro sitio, ya que no todos los lugares muestran las mismas características hidrológicas y de tipo de terreno. Algunas presas no tienen virtualmente capacidad de almacenamiento de reserva, las centrales que utilizan este tipo de presa se les conoce como centrales de agua fluyente, que serán mencionadas más adelante.

Las presas pueden servir también para otros propósitos tales como la irrigación de tierras de cultivo, consumo humano, centros recreativos donde se puede practicar la navegación y la pesca. De hecho la mayoría de las presas existentes no se utilizan para generar energía eléctrica, aunque algunas de ellas podrían ser utilizadas para dicho propósito.

Indudablemente el aprovechamiento de la energía hidráulica no hubiera sido posible sin la turbina hidráulica, que convierte la energía de un abastecimiento de agua elevado o la corriente de un río en energía mecánica al hacer girar una flecha. Mientras que la rueda hidráulica muy al viejo estilo para mover la flecha usa el peso del agua

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

directamente, las turbinas hidráulicas modernas funcionan según el principio del impulso o la reacción, que convierte la presión y la energía cinética en energía cinética angular. Las turbinas más comunes de reacción son la turbina Francis[15], la turbina Kaplan[15], la turbina de bombilla y la turbina Straflo, la turbina principal de tipo impulso es la turbina Pelton.

Una vez que la turbina hace girar la flecha, esta mueve un generador eléctrico que se encarga a transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Hay tres tipos de generadores disponibles para el uso en plantas hidroeléctricas: para plantas de baja capacidad el tipo de generador que se utiliza es el de inducción en corriente alterna o el de corriente directa; en capacidades altas el tipo que se utiliza es el generador sincrónico convencional.

**2.1.1 La disponibilidad global del agua y el potencial hidroeléctrico.**

En una base global, la cantidad de agua precipitada con el tiempo iguala la cantidad vuelta a la atmósfera por evapotranspiración (tabla 2.1.1). En la tierra, la precipitación excede a la evapotranspiración, pero la diferencia es eliminada por las descargas de ríos y agua freática al océano.

BALANCE ANUAL DE AGUA EN EL MUNDO							
Región	Superficie 10E6 Km <sup>2</sup>	Precipitación		Evaporación		Escurrimiento	
		mm	10E3 Km <sup>3</sup>	mm	10E3 Km <sup>3</sup>	mm	10E3 Km <sup>3</sup>
Europa	10.5	790	8.3	507	5.3	283	3
Asia	43.5	740	32.2	416	18.1	324	14.1
Africa	30.1	740	22.3	587	17.7	153	4.6
Norteamérica	24.2	756	18.3	418	10.1	339	8.2
Suramerica	17.8	1,600	28.4	910	16.2	685	12.2
Australia y Oceanía	8.9	791	7.1	511	4.6	280	2.5
Antártida	14	165	2.3	0	0	165	2.3
<b>Area total de tierra</b>	<b>149</b>	<b>800</b>	<b>119</b>	<b>485</b>	<b>72</b>	<b>315</b>	<b>47</b>
Océano Pacífico	17.89	1,460	260	1,510	269.7	-83	-14.8
Océano Atlántico	91.7	1,010	92.7	1,360	124.4	-226	-20.8
Océano Indico	76.2	1,320	100.4	1,420	108	-81	-6.1
Océano Ártico	14.7	361	5.3	220	8.2	-355	-5.2
<b>Area total de océanos</b>	<b>361</b>	<b>1,270</b>	<b>458</b>	<b>1,400</b>	<b>505</b>	<b>-130</b>	<b>-47</b>
<b>Global</b>	<b>510</b>	<b>1,130</b>	<b>577</b>	<b>1,130</b>	<b>577</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabla 2.1.1

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

El potencial de la energía hidráulica es determinado por el volumen de agua pérdida y por la distancia a la que cae antes de alcanzar el océano ya que las pérdidas no se distribuyen uniformemente sobre los continentes, las altitudes promedio (con rango de 300 m en Europa, 950 m en Asia y 2,040 m en la Antártida) no son adecuadas para calcular el potencial teórico. Las estimaciones en un rango del potencial teórico anual de hidroelectricidad del mundo es de 36,000 a 44,000 TWh (tabla 2.1.1).

Potencial hidroeléctrico anual.

Región	Potencial teórico TWh	Potencial técnico TWh
Africa	10,118	3,140
Norteamérica	6,150	3,120
América latina	5,670	3,780
Asia (excluyendo la ex URSS)	16,486	5,340
Australia	1,500	390
Europa	4,360	1,430
Ex URSS	3,940	2,190
<b>Total en el mundo</b>	<b>44,280</b>	<b>19,390</b>

Tabla 2.1.2

El potencial hidráulico técnico explotable y la existencia de desarrollos por región.

Región	A Potencial técnico explotable TWh/año	B Capacidad total instalada GW	C Hidrogenación en 1988 TWh	C/A %
Africa	1,150	15.84	36	3
Asia del sur y medio este	2,280	45.44	171	8
China	1,192	32.69	109	6
Ex Unión Soviética	3,830	62.2	220	6
Japón	130	20.26	87	67
América del norte	970	129.09	536	55
América del sur	3,190	75.98	335	11
América central	350	10.71	32	9
Este de Europa	160	16.56	49	31
Oeste de Europa	910	128.44	436	48
Australia	200	12	37	19
<b>En el mundo</b>	<b>15,090</b>	<b>549.2</b>	<b>2,040</b>	<b>14</b>

Tabla 2.1.3

El potencial teórico es mucho más grande que el potencial técnico utilizable, que en cambio es substancialmente más grande que el potencial económico de explotación. Este último disminuye cuando se consideran factores de limitación como geológicos, sociales y del medio ambiente. El potencial técnico se evalúa en base a la ingeniería preliminar, con pocos criterios económicos y algunas restricciones del medio ambiente. Los criterios pueden diferir substancialmente de un país a otro y son relativamente sencillos en muchos países desarrollados que tienen las estimaciones ampliadas del potencial técnico. Tales estimaciones muestran una gran variedad de valores (tabla 2.1.2 y 2.1.3). Muy significativos son los valores regionales especialmente con respecto a Africa, Norteamérica, y la anterior Unión Soviética.

## 2.2 Tipos de centrales hidroeléctricas.

Como se determino en el apartado 2.1, se puede aprovechar la energía potencial de un río, por medio de un almacenamiento de agua o desnivel, por medio de una presa. Como se menciono con anterioridad hay dos tipos de presas, el primero no tiene virtualmente capacidad de almacenamiento de reserva, y el segundo almacena grandes cantidades de agua. Las centrales que utilizan el primer método reciben el nombre de centrales de agua fluente y las centrales que utilizan el segundo método se les llama centrales de agua embalsada.

A su vez, y dentro de las centrales de agua embalsada se encuentran:

- Centrales de regulación.
- Centrales de bombeo.

Así mismo, y en relación con la altura del salto de agua existente, o desnivel están las:

- Centrales de alta caída.
- Centrales de mediana caída.
- Centrales de baja caída.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

A continuación se dará una breve explicación sobre cada uno de los tipos indicados de centrales hidroeléctricas.

### 2.2.1 Centrales de agua fluente.

Se les llama también de agua corriente, se construyen en los lugares en que, la energía hidráulica ha de utilizarse “en el instante” que se dispone de ella, para accionar las turbinas hidráulicas. Figura 2.2.1

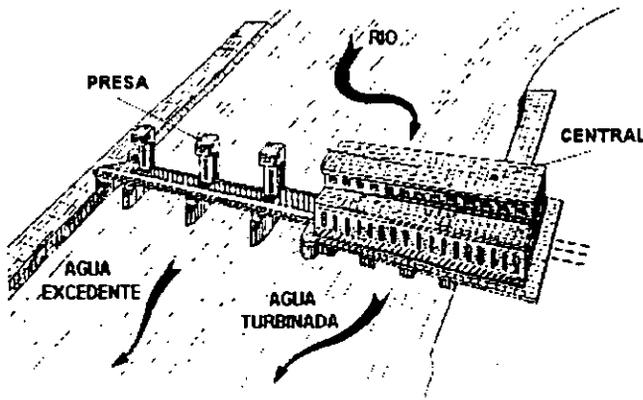


Figura 2.2.1

No cuentan, prácticamente con reserva de agua, oscilando el caudal suministrado según las estaciones del año. En las temporadas de precipitaciones abundantes, conocida como de aguas altas desarrollan su potencia máxima, dejando pasar el agua excedente; por el contrario, durante el tiempo seco o de aguas bajas, la potencia producida disminuye ostensiblemente en función del caudal llegando a ser casi nula en algunos ríos en época de estiaje.

Estas centrales suelen construirse formando presas sobre el cauce de los ríos, para mantener un desnivel constante en la corriente de agua.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### 2.2.2 Centrales de agua embalsada.

Para estas centrales el agua de almacenamiento proviene de embalses, como ya se había establecido con anterioridad se consiguen mediante la construcción de presas.

Un embalse es capaz de almacenar los caudales de los ríos afluentes, llegando en ocasiones, a elevados porcentajes de captación de agua. El agua embalsada se utiliza, según la demanda a través de conductos que la llevan hacia las turbinas como se muestra en la figura 2.2.2

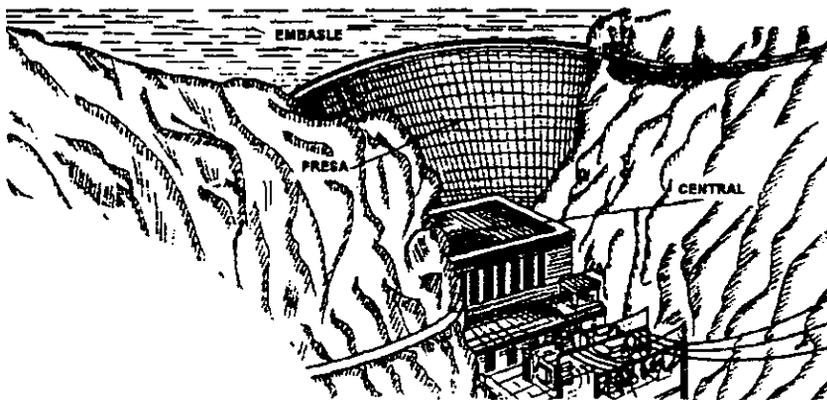


Figura 2.2.2

### 2.2.3 Centrales de regulación.

Son centrales con posibilidad de acopiar volúmenes de agua en el embalse, que representan periodos, más o menos prolongados, de aportes de caudales medidos anuales[15].

Al poder embalsar agua durante determinados espacios de tiempo, noche, meses o año seco, etc. presentan un gran servicio en situaciones de bajos caudales, regulándose estos convenientemente para la producción. Se adaptan muy bien para cubrir las horas pico de consumo.

#### 2.2.4 Centrales de bombeo.

Suelen denominarse también de acumulación. Esto es debido a que son centrales que acumulan caudales mediante bombeo. Para cumplir la misión que da nombre a estas centrales, se recurre a dos sistemas distintos.

Refiriéndose a un solo grupo, uno de los procedimientos consiste en dotar al mismo de una turbina y una bomba, ambas máquinas con funciones claramente definidas, independientemente entre sí.

El otro método, se basa en la utilización de una turbina reversible, que según las necesidades, puede funcionar como turbina o como bomba centrífuga, de manera que, durante las horas de demanda de energía los componentes del grupo se comportan respectivamente:

- Máquina motriz como turbina.
- Generador como alternador.

En los períodos de tiempo de muy baja demanda, como son las horas de media noche, el grupo se transforma en:

- Motor síncrono como generador.
- Bomba centrífuga como la máquina motriz.

Para ambos sistemas, turbina y bomba o turbina reversible, durante las horas nocturnas, y previas a las maniobras oportunas en la central de bombeo, se dispone al grupo para que funcione como bomba, una vez que, con otro grupo de la misma central o desde otra hidroeléctrica, termoeléctrica o nucleoelectrica, se alimenta al generador, el cual hace la función de motor síncrono. Des esta forma se consigue retomar agua al embalse, bombeada de las zonas de aguas abajo de la instalación. Estas aguas harán funcionar, nuevamente al grupo como equipo productor de energía, en los periodos sucesivos de demanda de la misma.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

En principio, puede parecer paradójica tal solución pero la razón que justifica tal procesos es el siguiente: La central almacena agua por bombeo durante las horas de carga mínima, en este tiempo la generación de energía eléctrica es más barata, y produce energía eléctrica con el agua almacenada durante las horas de carga máxima que es cuando la generación de energía eléctrica es más cara.

### 2.2.5 Centrales de alta caída.

Se encuentran incluidas en este tipo de centrales, aquellas cuyo valor de desnivel es superior a los 200 m (altura meramente orientativa); siendo relativamente pequeños los caudales desalojados, alrededor de 20 m<sup>3</sup>/s por turbina. Están ubicadas en zonas de alta montaña, donde aprovechan el agua de torrentes que suelen desembocar en lagos naturales.

Se utilizan, para este tipo de central, la turbina Pelton[15] que es una turbina de impulso que fue diseñada en 1890 y la turbina Francis que es una turbina de reacción y fue diseñada en 1849 accionando la primera planta hidroeléctrica en los Estados Unidos.

### 2.2.6 Centrales de media caída.

Se considera como tales, las que disponen de desniveles comprendidos entre 200 y 20 m aproximadamente, desaguando caudales de hasta 200 m<sup>3</sup>/s por cada turbina. Dependen de embalses relativamente grandes, formados por lo regular en valles de media montaña, como se ve en la figura 2.2.2.

Las turbinas utilizadas preferentemente son de tipo Francis y Kaplan que fue desarrollada en 1913, es una turbina también de reacción como la turbina Francis, se pueden colocar también turbinas Pelton para desniveles de mayor altura, dentro de los márgenes establecidos.

### 2.2.6 Centrales de baja caída.

Se incluyen en esta denominación las centrales que, asentadas en valles amplios de baja montaña, el desnivel es inferior a 20 m estando alimentada cada turbina por

caudales que pueden superar los 300 m<sup>3</sup>/s. Un ejemplo de este tipo de central lo muestra la figura 2.2.1.

Para estos desniveles y caudales, resulta apropiada la instalación de la turbina Francis y la turbina Kaplan.

### 2.3 Componentes de las centrales hidroeléctricas.

Hacer un listado completo y detallado, de todos los elementos que integran una central hidroeléctrica, sería una tarea excesivamente laboriosa, como el objeto de esta tesis es proponer formas alternativas para generar energía eléctrica de una manera más limpia, solamente se expondrán a grandes rasgos, la relación de los componentes fundamentales que conforman dichas instalaciones, para la presentación de los componentes dividiremos la central hidroeléctrica en dos grandes conjuntos.

En el primero, constan todo tipo de obras, equipos, etc., cuya misión se puede resumir diciendo que es la de almacenar el agua, en las debidas condiciones, para conseguir posteriormente una acción mecánica.

El segundo conjunto engloba los edificios, equipos, sistemas, etc., mediante los cuales, y después de las sucesivas transformaciones de la energía, llegamos a obtener ésta en forma de energía eléctrica.

De ésta forma se pueden enlistar los conjuntos de la siguiente forma:

#### - Conjunto I

- Embalses
- Presas y aliviaderos
- Tomas y depósitos de carga
- Canales, túneles y galerías
- Tuberías forzadas
- Chimeneas de equilibrio

#### - Conjunto II

- Turbinas hidráulicas
- Alternadores
- Transformadores

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

- Sistemas eléctricos de mediana, alta y muy alta tensión
- Sistemas eléctricos de baja tensión
- Sistemas eléctricos de corriente continua
- Medios auxiliares
- Cuadros de control

El primero de los conjuntos establecidos, se suele identificar como Presa-Emblase. El segundo, constituye la autentica Central, encontrándose así mismo, dentro de dicho conjunto, las instalaciones de la salida de líneas, la subestación, etc.

De la relación total indicada, no quiere decir que en una misma central concurren todos y cada uno de los componentes mencionados, pues si bien es cierto que, algunos de ellos son imprescindibles, como en el caso de turbinas y alternadores, otros sin embargo, pueden intervenir o no, dependiendo principalmente de las características del asentamiento de la instalación. Así por ejemplo, en una central de agua fluente, no es normal disponer de un depósito de carga.

Se deduce por lo tanto que, para formar las centrales hidroeléctricas, se puede realizar una serie de combinaciones de los componentes referidos, de acuerdo con las características del emplazamiento y de las potencias y rendimientos que se pretenden lograr.

### 2.4 Impactos ambientales y sociales de las centrales hidroeléctricas.

Si bien, las plantas hidroeléctricas no producen contaminantes al generar energía eléctrica como las centrales térmicas, si es necesario mencionar que afectan al medio ambiente. Si no se hace un estudio con atención en el proceso de planeación, se pueden tener consecuencias bastante negativas sobre la ecología, clima y sociedad en general.

En la década de los 70's, debido a la crisis del petróleo se le dio poca importancia al impacto ambiental y social que se podría generar al construir una central hidroeléctrica, sin hacer estudios pertinentes en la zona. Los daños ocasionados por este hecho han llegado a ser más visibles en años recientes.

Aunque los impactos varían, se pueden clasificar genéricamente. Su significado y causalidad varían de un sitio a otro sitio. Cualquier generalización es condicionada por

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

el sitio donde se realizara el proyecto hidroeléctrico, las diferencias específicas como topografía, el flujo del río, el clima, la ecología, la utilización de la tierra, etc. así como también la magnitud y el diseño del tipo de central hidroeléctrica.

La parte que requiere un estudio con atención, para minimizar los impactos ambientales y sociales al proyectar una central hidroeléctrica, es la operación y construcción de la presa.

Los principales efectos adversos que se tienen al construir una presa son los siguientes:

### **2.4.1 sobre el suelo.**

El anegamiento del lugar en que se instala el vaso, supondrá en la mayoría de los casos una pérdida de suelo fértil que se debe valorar adecuadamente. Contribuyen por otra parte, a la pérdida de suelo, la construcción de edificaciones auxiliares e infraestructura en general así como la reposición de viales, construcción de pistas de acceso, apertura de carreteras y creación de escombreras.

En el conteo de las pérdidas de suelo fértil, no hay que olvidar las posibles pérdidas que puede ocasionar la erosión. Este proceso puede ser provocado por los movimientos de tierra y la pérdida de cubierta vegetal protectora en zonas tales como el área destinada a instalaciones o a los taludes de los nuevos viales, también puede producirse erosión significativa, en la denominada "banda árida" que rodea el embalse, motivado por el oleaje que choca en ella, de forma constante en algunas de sus zonas. Esta pérdida de suelo puede influir también en otros aspectos del medio tal como la calidad del agua, azolvamiento del embalse, etc.

### **2.4.2 Sobre el agua.**

Las primeras repercusiones que se tiene sobre el agua por la construcción de la presa, se concreta en la contaminación de la corriente debido al incremento de partículas en suspensión. Estas partículas pueden tener distinto origen:

- a). Plantas de lavado de áridos
- b). Graveras u otras zonas de extracción de áridos.

c). Arrastres producidos por las lluvias procedentes, de las escombreras.

También cabe esperar contaminaciones de tipo urbano o industrial, procedentes de posibles poblados o instalaciones necesarias para la construcción, tales como talleres, oficinas etc. Por último pueden producirse contaminaciones accidentales.

Hay que considerar también las repercusiones que pueden darse al crear una presa, en las aguas abajo de la misma. El mantenimiento del caudal mínimo o ecológico, es esencial para la conservación de la fauna y el paisaje presentes en el tramo siguiente del río. Para el estudio de estas repercusiones, hay que considerar el régimen de desembalse proyectado, y comparar estos caudales de mantenimiento con los presentes en el régimen natural.

Finalmente en la fase de descarga de la presa, cabe destacar el incremento de partículas en suspensión que transporta la corriente, resultado de las necesidades del río de buscar de nuevo su propio cauce. Esta situación producirá un incremento de los depósitos en la zona de aguas abajo, cuando la corriente disminuya su capacidad de arrastre con un posible aterramiento de frezaderos, otros embalses, etc.

#### 2.4.3 Sobre la vegetación.

Tanto en la fase de construcción, como en la fase de operación, la vegetación sufrirá las consecuencias de desarrollo de la actividad. En la fase de construcción, las pérdidas más importantes se deberán fundamentalmente a la apertura de canteras y creación de escombreras, movimiento de maquinaria, construcción de accesos, construcción de la propia presa e infraestructura, reconstrucción de viales y deforestación del vaso.

En el llenado y explotación del embalse se producirán nuevas alteraciones en la vegetación de la zona en la que se ubique motivadas por:

- Cambio en la disponibilidad del agua: esta variación puede ser debida tanto a la alteración por el nivel freático como el incremento de la humedad atmosférica por la evaporación del agua embalsada.

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

- Desaparición de vegetación en la “banda árida”: en la proximidades de la lámina de agua, se alternan unas condiciones de humedad y sequia que dificultaran la instalación de cualquier tipo de vegetación.

La nueva situación de aguas abajo de la presa, dará lugar a la aparición de impactos adicionales, como son:

- Alteración de la vegetación ribereña: las oscilaciones estacionales de nivel del río, forman parte del comportamiento natural de éste, y la vegetación natural circundante estará compuesta por especies adaptadas a ellas. Es frecuente la existencia de formaciones vegetales ribereñas que necesitan del aporte suministrado por las crecidas periódicas del río.
- Pérdida de la vegetación ocasionada por el descenso del nivel freático: el descenso del nivel freático causado por el encajonamiento del río puede dejar el agua subterránea fuera del alcance de las raíces de las plantas que necesitan humedad freática para vivir o afectar el uso del suelo en localidades más alejadas.

### 2.4.4 Sobre la fauna.

Los impactos posibles sobre la fauna, pueden corresponder tanto a la fauna terrestre afectada por las obras, como a las especies acuáticas que viven en los tramos fluviales afectados por el embalse, ya sean aguas arriba de la presa o aguas abajo.

#### a).- Fauna terrestre.

La inundación del fondo del valle que acoge el embalse es, probablemente, la alteración del medio que más puede afectar a las poblaciones terrestres. Los aspectos derivados de este hecho, que será necesario considerar son:

- Efectos directos provocados por la construcción sobre el hábitat: tanto la construcción de infraestructura, como el llenado del vaso, producen la destrucción de cobertura vegetal o cualquier otra parte esencial del hábitat de muchas especies afectadas. En estos lugares, serán más abundantes esas especies, a condición de que existan hábitats similares a los destruidos. Particularmente serán afectadas las especies ribereñas que encontrarán mayores dificultades para reinstalarse. Este efecto negativo

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

será más acusado, si el llenado se produce en la época de cría. Es pues importante, considerar la presencia de biotopos semejantes a los destruidos en zonas próximas, donde la fauna desplazada podría asentarse.

- Efecto barrera: la creación del embalse, puede impedir o dificultar los movimientos locales o migratorios de animales terrestres, sólo capaces de atravesar cursos de agua estrechos o de pequeño caudal y de poca profundidad.
- Fluctuaciones de nivel: sobre todo en el caso de que los cambios de nivel en el embalse sean bruscos, las poblaciones animales establecidas en las márgenes podría verse perjudicadas por dichas fluctuaciones; las márgenes cubiertas de vegetación protectora en los movimientos regulares de aproximación al agua, son sustituidas por orillas desnudas con el consiguiente aumento de peligro.

Como el embalse que se utiliza es para alimentar una central hidroeléctrica es importante considerar también:

- La instalación del tendido eléctrico que puede aumentar la mortandad de las aves en peligro de electrocución o choque. También la calle de protección que necesita esta infraestructura puede ejercer un efecto barrera sobre determinadas especies.
- Los ruidos producidos por el turbinado del agua, que puede afectar a las comunidades de animales próximas y provocar el desplazamiento de las especies más sensibles a los mismos.
- Otros factores que deberán tenerse en cuenta, son las posibles alteraciones del comportamiento inducidas por movimientos, ruidos, etc., producidos durante la construcción de la obra. Este echo debe considerarse, sobre todo, para las especies de interés excepcional (especies protegidas).

### b).- Fauna acuática.

Las repercusiones, que la creación del embalse, pueden tener sobre la población piscícola, estarán en función tanto de los tipos de las poblaciones piscícolas, como del funcionamiento o régimen del desembalse. Las especies con marcado comportamiento migratorio (trucha salmón anguila, esturión, etc.) son las que podrían quedar más afectadas por la construcción de la presa. El tipo de regulación es también esencial para

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

caracterizar los impactos sobre los peces. Así el régimen irregular de desembalse de los aprovechamientos hidroeléctricos, puede afectar a las poblaciones piscícolas aguas abajo o aprovechar el arrastre de alevines.

Dado que el cambio de régimen lótico<sup>i</sup> a régimen léntico<sup>ii</sup> se produce en el tramo del río embalsado, aguas arriba de la presa, es conveniente considerar dos partes diferenciadas: tramo del río embalsado y aguas abajo de la presa.

En el tramo del río embalsado al ser las incidencias, durante la construcción, las causantes de una situación con características completamente diferentes a las de la fase de explotación, es conveniente distinguir entre ellas. Así tendremos que en la fase de construcción, la contaminación por incremento de turbidez, puede afectar a ciertas especies ya sea directamente o bien por aterramiento de frezaderos. También la ubicación de graveras en la ribera del río puede destruir zonas de freza, en las proximidades de las que se vayan a destruir o que puedan quedar afectadas por la extracción.

En la fase de explotación, la inundación del vaso produce el anegamiento del cause que puede hacer desaparecer frezaderos preexistentes. La alteración de la calidad del agua acumulada en el vaso, puede provocar la migración aguas arriba de las especies más sensibles. A su vez estas especies, podrían ser desplazadas por otras más resistentes.

El efecto barrera se tiene por el obstáculo físico que constituye la presa, puede afectar a determinadas especies migratorias impidiendo su reproducción. La importancia de esta incidencia dependerá de que el obstáculo que constituye la presa, puede ser franqueado. Las grandes presas en ningún caso pueden serlo. La presencia en el vaso de estratificación o eutrofización, en el caso de que las especies emigrantes puedan remontar el obstáculo podrían encontrarse con una situación no idónea para su vida.

La creación de nuevos hábitats es un importante efecto positivo de los embalses ya que se tiene la posibilidad de que algunas especies se vean favorecidas por la creación

---

<sup>i</sup> Se aplica al ambiente acuático, donde el cuerpo entero de agua se mueve continuamente en una dirección definida (aguas corrientes). Se aplica también a los organismos que viven en tal ambiente.

<sup>ii</sup> Se refiere a el ambiente acuático continental en el que la masa total de agua no se mueve continuamente en una determinada dirección (lago, laguna). Aguas estancadas.

de nuevas zonas húmedas. Este nuevo hábitat, es especialmente útil para aves acuáticas, a las que pueden servir de zonas de asentamiento o descanso en sus migraciones.

Aguas abajo de la presa, las alteraciones de la estructura de las comunidades macrobénticas pueden afectar en mayor o menor grado a las poblaciones piscícolas. La trucha quedara afectada debido a variaciones artificiales de caudales que malogran frezaderos y el desarrollo natural de alevines.

#### 2.4.5 Sobre sismicidad.

Se sabe que depósitos grandes de agua pueden influir en actividades tectónicas, pero la relación precisa entre el depósito de agua y la actividad tectónica está bajo debate. En la década de los 60's los sismos fueron asociados con el llenado de los depósitos de los embalses, basados en la experiencia con depósitos tales como el Vouglans en Francia. El Vouglans se empezó a llenar en abril de 1968 a noviembre de 1969 y se vació parcialmente en diciembre de 1970 a marzo de 1971. Después se llenó rápidamente alcanzando su capacidad máxima en julio de 1971. En julio 21 del mismo año se registro el primer sismo (4.5 en la escala Richter), y pronto fue seguido por otros 20 sismos con epicentro de a 5 km al sudeste del depósito. Ningún sismo se había registrado antes en la región.

#### 2.4.6 sobre el paisaje.

Las alteraciones sobre el paisaje, puede producirse como consecuencia de alguno o algunos de los siguientes puntos:

- Desaparición de los bosques de ribera, variación de canteras, variación de la visibilidad por aparición de nieblas cambios de uso de suelo interrupción de las líneas y formas naturales del valle etc.
- Introducción de construcciones, instalaciones o cualquier elemento extraño a las características de la edificación local, la propia aparición de la lámina de agua extraña a la zona, la construcción de vías de acceso o de tramos de las mismas que introducen líneas artificiales antes inexistentes en el paisaje, etc.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

### 2.4.6 Sobre la socioeconomía.

Una vez analizadas las características socioeconómicas del medio se pueden predecir e identificar los impactos y alteraciones que se podrían producir por la ubicación de la presa como lo son:

- Desaparición de actividades económicas, agropecuarias y ganaderas por la construcción de la presa, principalmente por la construcción que ocuparía el vaso de almacenamiento.
- Cambios en el uso de suelo a consecuencia de la construcción de la presa, lo que podría ocasionar inconformidades por los habitantes de la región, considerando mal pago de indemnización o afectaciones en sus bienes.
- Desplazamiento y reubicación de los pobladores afectados por el llenado del embalse, presentando uno de los efectos sociales adversos más significativos por la inconformidad de éstos al ser desplazados y el inicio de una nueva adaptación de vida en poblaciones extrañas, además de la aceptación de los habitantes ya establecidos.
- Afectación a los valores culturales y sociales de las poblaciones nativas, por la influencia de trabajadores ajenos a la región.
- Problemas sociales por el aumento demográfico de las poblaciones cercanas, provocando la demanda considerable de servicios y el aumento de contaminantes en la zona.
- Creación de problemas sociales al finalizar la construcción de la presa, debido a que ya no se necesitará un gran número de obreros para el funcionamiento, por lo que la mayoría de la gente empleada para la construcción no será contratada para trabajos de funcionamiento de la presa.

Los costos relacionados con la generación hidroeléctrica actual son específicos del lugar en que se trate. Los costos de construcción, del ajuste a los aspectos ambientales, el flujo del río y su energía, son todos, factores que juegan un papel importante en el costo final de la energía que es generada en un lugar específico. El costo de la electricidad

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

generada con plantas hidroeléctricas en Estados Unidos construidas en 1990 estuvo entre 3 y 6 centavos de dólar por kilowatt/hora.

### 2.5 Un caso de generación hidroeléctrica en México.

#### *Central hidroeléctrica Huites.*

##### 2.5.1 Reseña histórica.

Un ejemplo reciente de generación hidroeléctrica en México, es la presa y central hidroeléctrica Luis Donaldo Colosio Murrieta (Huites), 1992-1995. En este apartado se hablará de las características del complejo hidroeléctrico Huites y de los estudios que se realizaron para determinar el impacto ambiental que se ocasionaría por la construcción del complejo.

El complejo Huites forma parte del sistema de desarrollo agrícola y energético del río Fuerte, en el norte del estado de Sinaloa.

La obra principal del proyecto, la presa Luis Donaldo Colosio se construyó en el sitio denominado Huites, aproximadamente a 5 kilómetros aguas abajo de la confluencia del río Fuerte con el río Chinipas.

El proyecto Huites viene a formar la última etapa del sistema hidroagrícola y energético del río Fuerte. La zona agrícola del valle del río Fuerte empezó a ser desarrollada desde principios de este siglo en el que se bombeaba agua del río para abastecer los terrenos marginales. En el año de 1918 la United Sugar Companies, propietaria de gran parte de los terrenos, inició la construcción de un sistema de riego por bombeo que se desarrolló intensamente, y más adelante llegó a promoverse la construcción de una presa en el sitio Balojaqui situado en la confluencia de los ríos Urique y San Miguel, afluentes del Fuerte.

En 1938 se expropiaron los terrenos y en 1945 se promovió la construcción de un sistema de riego por gravedad. En 1947 la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), de nueva creación, continuó estudios y obras en el valle del río Fuerte y en 1951 se intensificaron estudios para definir el sitio de una presa de almacenamiento y

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

simultáneamente la Comisión Federal de Electricidad (CFE) tomó interés en hacer estudios para generación eléctrica con aguas del río.

Se hicieron levantamientos aerofotogramétricos del vaso Huites por la Secretaría de Recursos Hidráulicos y por la Comisión Federal de Electricidad; en ellos se aprecian caseríos con unidades habitacionales escasas y dispersas ya que el río Fuerte en esta zona no tiene terrenos aptos para alguna explotación agropecuaria. El río escurre por un cañón de márgenes acantiladas y únicamente se abre en dos o tres lugares donde se incorporan algunos afluentes, pero sin formar valles o planicies de alguna consideración.

### 2.5.2 Objetivo de la obra.

La presa Huites viene a constituir un elemento clave para aprovechar en forma integral el escurrimiento de esta importante cuenca. Al sumarse al sistema de las presas Miguel Hidalgo y Josefa Ortiz de Domínguez, con capacidad útil conjunta de 3,653 millones de metros cúbicos de agua, se alcanza una capacidad de regulación para riego de 6,061 millones de metros cúbicos en la cuenca que permite controlar las crecientes del río Fuerte.

Otro objetivo de la obra es la generación de energía eléctrica, con una potencia instalada de 422 MW, y generación media anual de 911 GWh, lo cual permite participar de manera importante en el suministro de energía eléctrica durante las horas de pico en el sector noreste de la República.

### 2.5.3 Obra de generación.

La central hidroeléctrica Huites está localizada en el área noreste del Sistema Eléctrico Nacional. Su operación representa un incremento del 95% de la potencia instalada y un 55% de la generación adicional en esa área.

La obra de generación se localiza en la margen derecha de la presa, al pie del macizo rocoso y aguas abajo de la cortina. Está compuesta por dos unidades de generación independiente pero en una sola estructura, y se integra por las siguientes partes:

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

- **Obra de toma.** Está integrada al cuerpo de la cortina, es de tipo vertical y aloja a las compuertas de control y a su mecanismo de operación. Tiene dos bocatomas; una por cada unidad, y están protegidas por rejillas metálicas para evitar el paso de material flotante que pudiera ocasionar daños a las turbinas o a los mecanismos de control hidráulico.
- **Tuberías de presión.** Están constituidas por dos conductos exteriores empacados en concreto, con separación entre ejes de 22 m, y longitudes de 154 y 163 m para las unidades 1 y 2 respectivamente. Ambas tienen 7.8 m de diámetro, espesor variable entre 13/8" y 7/8", y fueron proyectadas para un gasto unitario de 235 m<sup>3</sup>/s.
- **Casa de máquinas.** La casa de máquinas es del tipo exterior con playa de montaje en caverna; sus dimensiones exteriores son: 32 m de ancho, 53 m de longitud y 42 m de altura. Se proyecta para alojar dos grupos de turbogeneradores de eje vertical, equipados con turbinas Francis de 211 MW de potencia nominal cada uno, y separados entre sí 22 m.

Los siguientes rangos operativos son referidos a un factor de planta de 0.25:

	<b>Carga (m)</b>	<b>Potencia (MW)</b>	<b>Gasto (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>Máxima</b>	115.96	238	220.06
<b>Distribuidor</b>	97.00	211	235
<b>Mínima</b>	63.03	95.5	192.8

- **Subestación elevadora de 230 kV.** Consta de un grupo de seis transformadores monofásicos principales de 61.6 MVA de potencia nominal y relación de transformación de 16/20 kV se encuentra anexo hacia aguas arriba de la casa de máquinas; estos se conectan con la subestación elevadora de 230 kV. Cada transformador es de tipo encapsulado en hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) con arreglo de interruptor y medio.
- **Línea de transmisión.** La electricidad generada por la central hidroeléctrica se integra al Sistema Eléctrico Nacional a través de una línea de transmisión con torres para doble circuito de 230 kV, que va de la subestación Huites a la subestación Pueblo Nuevo y cuya longitud es de 105 km. La capacidad de cada circuito permite transmitir

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

la energía generada; de esta manera se brinda seguridad, confiabilidad y flexibilidad a la transmisión de la misma.

### 2.5.4 Impactos ambientales del proyecto.

El proyecto Huites está constituido por dos importantes fases: una es la presa y su extenso embalse, la segunda fase se refiere a una nueva área de riego, que al abrirse a la agricultura causará un cambio trascendente en el paisaje, en el ambiente y especialmente a los propietarios de esas tierras. De las dos fases mencionadas, la primera es a la que se le debe dar mayor importancia, en el sentido de afectación al medio ambiente.

Ha sido en defensa del medio y de los recursos naturales que por la manifestación y su consiguiente estudio se tienen previstas todas las acciones de mitigación de los impactos adversos y el fomento de los favorables. Estas provisiones se dedican exclusivamente al caso de la presa. La autorización de referencia se otorgó bajo condiciones o términos, a continuación se mencionan algunos de ellos[18]:

1. Extracción de la madera aprovechable, previamente a la inundación del vaso.
2. Precauciones para que la fauna no se ahogue con el llenado del vaso.
3. Rescate de especies de flora determinadas.
4. Alimentación adecuada del cauce de aguas abajo para la supervivencia de las especies vegetales.
5. Reforestación en las laderas circundantes.
6. Monitoreo ecológico.
7. Rehabilitación del suelo y regeneración de la vegetación donde se levanten las instalaciones temporales.
8. Calidad del agua del río.
9. Indemnización de las personas afectadas.

- Sismicidad

El sitio del vaso se ubica en la frontera entre la provincia de la Sierra Madre Occidental y la provincia de Sierras y Valles Mexicanos; éstas se encuentran dentro de la

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

zona penesísmica (sismicidad poco frecuente) y el período promedio de retorno de los sismos se ha evaluado de 10,000 a 100,000 años[19].

De acuerdo con la actual sismicidad de la región se deduce que la fuente principal de la actividad sísmica es el proceso de apertura del Golfo de California, fuente que puede llegar a producir sismos de seis grados. Por otro lado, si se utiliza la relación entre longitud del lugar donde se encuentra la falla y la magnitud de eventos que han ocurrido en todo el mundo, se puede suponer la probabilidad de generación de sismos máximos. El uso de esta relación pronostica que para falla con distancia igual o menor de 15 km con respecto al sitio, se producirá un sismo en el intervalo de magnitudes de 6.5 a 6.75 grados; y para fallas con distancias de 30 a 50 km al NW del sitio, producirían sismos en el intervalo de magnitud de 7.5 a 7.75 grados; esta última estimación de ocurrencia de eventos se considera como poco probable[18].

La magnitud máxima de sismos inducidos depende de las condiciones de los esfuerzos preexistentes en la porción de la corteza afectada; si no hay fallas cercanas a la condición de producir sismos destructivos, el llenado del embalse no los va inducir. De acuerdo con estudios de estructuras geológicas y la ocurrencia de sismicidad en la región, se estima que la probabilidad de que haya sismicidad inducida por el llenado del embalse es muy baja, el llenado puede producir microsismicidad menor de tres grados Richter, la cual no es significativa para el diseño de las estructuras del proyecto.

- Afectaciones por las obras.

El vaso de la presa ocupa una superficie aproximada de nueve y medio kilómetros cuadrados, y por la población de 1350 habitantes que acuso ahí el censo, puede decirse, como circunstancia particular de esa área, que se encontró muy poblada. Toda la extensión del vaso se ubica dentro del municipio de Coix, que tiene una superficie de 3810 Km<sup>2</sup> y una población total de 26000 habitantes. La extensión del vaso, en proporción con el municipio, significa apenas una cuatrosientosava parte de la superficie total. Sin embargo el impacto socioeconómico de la realización de la obra hidráulica ha sido ahí de gran trascendencia.

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

A las personas desalojadas del vaso de la presa Huites se les presentó una forma de indemnización que les daba libre elección de destino en sus reasentamientos. Como primera elección se les proporcionó la alternativa de permanecer en la inmediación de sus antiguos lugares. Para este fin se consideraron tres zonas urbanas con camino de acceso, electrificación agua potable, escuela, áreas de recreo y de convivencia, donde cada familia recibiría un solar. Las familias que no quisieron elegir una de las tres zonas propuestas eligieron destinos que se abren en un abanico de más de 700 km, que va desde la ciudad de Hermosillo, Sonora, hasta la ciudad de Culiacán, en Sinaloa.

Por su cercanía a la capital municipal, el lago que se forma viene a resultar un sitio de fácil acceso, tanto para los habitantes como para los visitantes de ese centro urbano. También se crean en él fuentes de trabajo con base en la explotación acuícola y mediante el aprovechamiento conveniente de las praderas húmedas de sus riberas.

### CAPÍTULO 3

#### GENERACIÓN EÓLICA

##### 3.1 Generalidades sobre centrales eólicas.

Los vientos ocurren por diferencias de presión generadas por un calentamiento no uniforme de la atmósfera terrestre, desplazándose grandes masas de aire de las zonas de alta presión a las de baja. Aproximadamente el 2% del calor del Sol que llega a la Tierra se convierte de manera natural en energía cinética de (unos  $3.5E12$  kW) pero sólo una pequeñísima fracción de esta energía puede captarse con provecho ya que buena parte de los vientos de alta velocidad ocurren en zonas montañosas altas con baja densidad de población o sobre los océanos mar adentro.

La energía cinética del viento puede convertirse en energía mecánica rotacional en forma directa, cuando se extrae por medio de superficies que están en contacto con el viento y acopladas a motores mecánicos, o en forma indirecta, rotacional puede ser a su vez convertida en energía eléctrica o térmica. Las aplicaciones de interés corresponden todas a un aprovechamiento directo.

La energía eólica ha sido aprovechada como fuerza motriz en la navegación y para generar energía mecánica en molinos de grano y bombas de agua desde tiempos muy remotos. Sólo desde fines del siglo pasado se ha empleado para generar energía eléctrica. La primera turbina de viento de energía eléctrica fue diseñada por P. LaCour en Dinamarca y entro en operación en 1890, poco tiempo después que el primer generador eléctrico movido por vapor.

Hacia 1916 en Dinamarca se tenía en operación más de 1,300 turbinas de viento con una generación eléctrica de 500 millones de kWh/año. En Estados Unidos, antes del inicio de su programa de electrificación rural de la década de los treinta, los pequeños

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

molinos de viento de menos de 0.5 kW eran prácticamente la única fuente de energía eléctrica disponible para las zonas rurales.

En 1929 los franceses construyeron en Bourget una turbina de viento con aspas de 20 m de diámetro colocadas sobre una torre de 20 m de altura y con una capacidad de generación de 15 kW de corriente directa a velocidades de viento de 6m/s.

La primera gran turbina de viento fue construida en la anterior Unión Soviética hacia 1931 cerca de Yalta en el Mar Negro, con aspas de 30.5 m de diámetro y una torre de 23 m de altura. La capacidad de generación de esta unidad era de 100 kW de corriente alterna con vientos de 11.1 m/s.

En 1941 en los Estados Unidos se instaló una turbina de viento Smith-Putman de 12.5 MW en Vermont. Esta turbina de viento dejó de operar en 1945 después de varios cientos de horas de operación y fue el último desarrollo tecnológico a gran escala en los Estados Unidos hasta 1975.

Entre 1956 y 1957 en Dinamarca, cerca de Gedser, se construyó una turbina de viento, con una potencia nominal de 200 kW que después de un periodo inicial de prueba, operó normalmente desde 1959 hasta 1967. Durante este periodo proporcionó un total de 2,242 MWh.

En 1957 en Francia se instaló una unidad de 800 kW y en 1963 una de 1 MW. Aunque la investigación sobre el aprovechamiento de la energía eólica continuó llevándose acabo en varios países, los bajos precios de los hidrocarburos durante 1950 y 1960 disminuyeron el interés por las turbinas de viento.

En 1973 la crisis del petróleo enfocó la atención de los gobiernos de Europa y los Estados Unidos en los programas de investigación relacionados con fuentes alternativas para producir energía eléctrica. Uno de los muchos programas iniciales en ese tiempo en los Estados Unidos era un proyecto de investigación de conversión de energía eólica. A inicios de 1975, se realizó una serie sucesiva de turbinas de viento cada vez más grandes, que procuraron aplicar los conceptos más recientes del cambio de la carga y la velocidad variable. La primera turbina de viento de investigación fue la MOD-0 (100 kW); esta fue seguida por la MOD-0A (200 kW), la MOD-1 (2MW), la MOD-2 (2.5 MW) y se culminó con el MOD-5B una turbina de viento de 3.2 MW (originalmente

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

diseñada como una turbina de viento de 7.2 MW). Esta última turbina de viento fue construida por la compañía eléctrica Westinghouse.

En Dinamarca el desarrollo de turbina de viento más pequeñas se baso en la extensa experiencia obtenida de la turbina de viento de Gedser; se estableció una estación para la turbina de viento en el Laboratorio Nacional Riso. Pronto comenzó a dar resultado la estrategia del diseño mejorado de la pequeña turbina de viento.

Actualmente los daneses tienen como nuevo proyecto la implementación de granjas eólicas marinas, con la acción conjunta de las principales compañías constructoras de turbinas de viento y la Agencia de Energía en Dinamarca; es posible determinar el número de turbinas de viento necesarias para producir la mitad de la generación eléctrica actual con turbinas de viento asentadas en el mar. El plan compromete a las compañías para construir 500 turbinas de viento serán erigidas en cinco áreas principales. Después los parques marinos deberán ser agrandados para producir 4,000 MW para el año 2030 en suplemento con las turbinas de viento que se encuentran en tierra. Mientras que las turbinas de viento actualmente cubren aproximadamente el 6% del suministro de electricidad se espera que para esa fecha el suministro con turbinas de viento este cerca del 50%.

### 3.1.1 Disponibilidad del recurso.

Las velocidades de viento promedio anual van de 0.25 m/s (9km/h) en algunas zonas hasta 9 m/s (32km/h) en regiones montañosas y costeras.

Por limitaciones de tipo tecnológico y económico únicamente el viento que fluye en los primeros 150 m sobre el nivel del suelo es aprovechable. Por otra parte la potencia eólica disponible en un lugar dado sólo una fracción puede convertirse en energía útil. En 1927 Betz demostró que esta fracción tiene un límite teórico ideal de 59.3%[24].

La potencia eólica,  $P$ , es proporcional a la velocidad del viento,  $V$ , elevado al cubo, y esta dada por:  $P = 0.5\rho AV^3$ , donde  $\rho$  es la densidad de masa del aire y  $A$  es el área de la sección considerada. La selección del lugar de instalación de un sistema para el aprovechamiento de la energía eólica es crítica; diferencias en las velocidades de

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

viento de menos de 1m/s (3km/h) puede marcar la diferencia de entre un sistema exitoso y uno antieconómico.

La duración de los vientos sostenidos a altas velocidades es un factor determinante en los costos de aprovechamiento. Por otra parte, cuanto mayor sea la correlación entre la curva de demanda de energía y la disponibilidad de vientos, más económico será el aprovechamiento de la energía eólica.

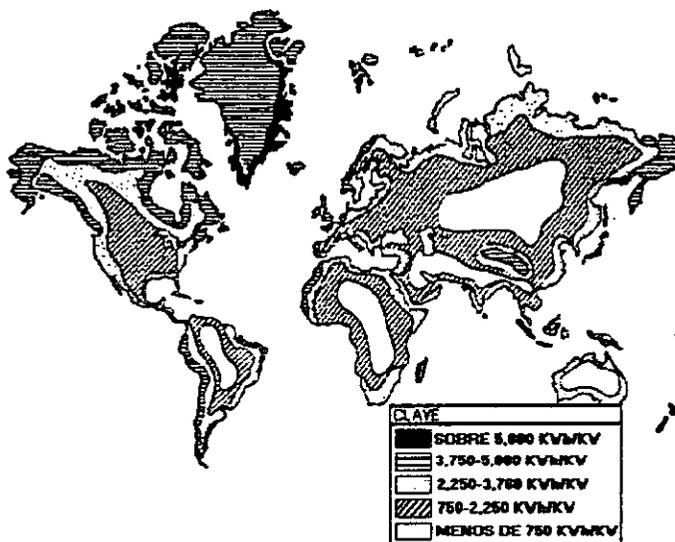


Figura 3.1.1

La cuantificación del potencial energético eólico de un lugar dado puede indicarse en términos de la energía aprovechable (por encima del umbral mínimo de velocidades de viento para que el sistema conversor de energía eólica empiece a generar) y de la cantidad de sistemas eólicos que pueden ser instalados en ese lugar, considerando todas las restricciones posibles. La Organización Meteorológica Mundial ha estimado que un poco menos del 1% de la energía eólica total podría aprovecharse en lugares propicios ya seleccionados alrededor del mundo. El mapa de disponibilidad de viento que se muestra en la figura 3.1.1 proporciona datos en kWh por año, obtenibles por cada kW de capacidad nominal instalada. Como referencia, si el viento sopla

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

constantemente durante todo el año a una velocidad igual a la nominal de diseño, por cada kW de capacidad instalada se obtendrían 8760 kWh/año[24].

### 3.2 Tipos de generadores eoleoeléctricos.

Hay dos tipos fundamentalmente diferentes de turbinas de viento, figura 3.2.1 : El primer tipo es la turbina de viento de eje horizontal, que tiene el eje de rotación del rotor paralelo a la corriente del viento; el segundo es la turbina de viento de eje vertical, que tiene el eje de rotación perpendicular a la corriente del viento.

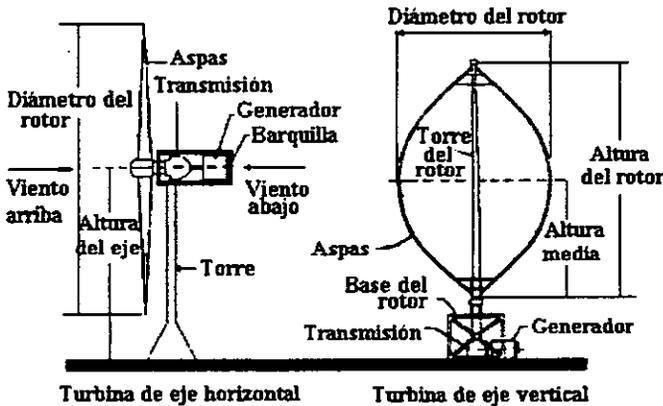


figura 3.2.1

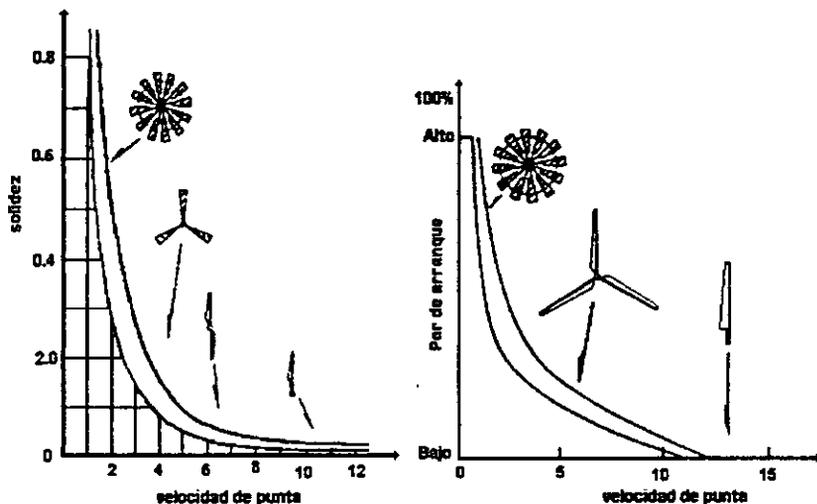
#### 3.2.1 Turbinas de viento de eje horizontal.

Las turbinas de viento de eje horizontal puede tener una, dos, tres o más aspas. A mayor número de aspas corresponde una mayor superficie de contacto con el viento. La razón entre la superficie en contacto con el viento y el área barrida por las aspas de una turbina de viento se llama "solidez". Cuanto mayor es la solidez, la turbina de viento tiene menor velocidad de giro y un par de arranque mayor, obteniéndose un mayor par a bajas velocidades del viento. Por otra parte, las turbinas de viento con menor solidez capturan con mayor cantidad de energía por unidad de costo con vientos de alta

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

velocidad. En la figura 3.2.2 se señala cómo varía la solidez de las turbinas de viento en función de la velocidad de punta de las aspas, que se define como la relación entre la velocidad debida a la rotación en el extremo más alejado del aspa y la velocidad del viento. En la figura 3.2.3 se muestra la variación del par en función de la velocidad de punta.

En las turbinas de viento de eje horizontal (de dos o tres aspas) las aspas pueden estar colocadas viento arriba o viento abajo de la torre que la soporta. Las turbinas de viento de baja potencia suelen emplear una configuración de viento arriba, principalmente porque permite que con una simple veleta colocada en la parte posterior de la turbina de viento ésta se reorienta sola al cambiar la dirección del viento, manteniéndose así el área de barrido de las aspas siempre perpendicular a la dirección del viento, maximizando la energía captada. La configuración de viento abajo puede emplearse



Figuras 3.2.2 y 3.2.3

también para turbinas de viento de pequeña potencia, pero entonces se presentan problemas de oscilaciones constantes sobre el eje vertical, además de otras dificultades ocasionadas por la "sombra" de la torre (que actúa como barrera contra el viento) y en consecuencia las aspas no están sometidas a esfuerzos constantes, causándose fatiga y disminución de resistencia en sus materiales.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Las turbinas de viento de eje horizontal de dos o tres aspas utilizan mecanismos automáticos de control que permiten girar todo el dispositivo dejando su eje de rotación perpendicular a la dirección del viento cuando éste sopla a velocidades excesivas. Se emplean además otros mecanismos para controlar el ángulo de ataque de las aspas con el viento logrando de esta manera que el rotor de la turbina de viento gire a una velocidad constante.

### 3.2.2 Turbina de viento de eje vertical.

Entre las turbinas de viento de eje vertical pueden distinguirse tres tipos importantes: Savonius, Darrieus y ciclogiro. Las de menor importancia son las de rotor tipo Savonius que presentan una gran superficie de contacto al viento siendo por ello de baja velocidad y par inicial muy alto. Un rotor Savonius consta de dos mitades de un cilindro partido verticalmente de arriba hacia abajo, unidas de tal modo que en un corte horizontal cualquiera forman una especie de S.

La turbina de viento de eje vertical más utilizada es la de rotor tipo Darrieus, cuyas aspas asemejan las de una batidora. Normalmente tiene dos o tres aspas soportadas en la parte superior e inferior de la flecha, cuya geometría presenta una curva suave, disminuyendo con la forma de estas aspas los problemas de pandeo. Estas turbinas de viento necesitan una potencia adicional no eólica para iniciar su operación, lo que representa una desventaja. Algunos prototipos emplean pequeños rotores Savonius para iniciar su operación y una vez iniciada son de alta velocidad.

El tercer tipo de turbina de viento de eje vertical de importancia es el ciclogiro; es semejante al Darrieus, con dos diferencias importantes: primero las aspas son rectas y, segundo su orientación se modifica constantemente durante la rotación a fin de maximizar el par inducido por el viento, requiriendo para ello un mecanismo de reorientación de aspas. La potencia pico predicha para este tipo de turbinas de viento es más alta que para cualquier otro.

Las turbinas de viento de eje vertical tienen ciertas ventajas sobre las de eje horizontal. Los rotores de eje vertical no requieren de un sistema de orientación; cuando se utilizan para generar energía eléctrica sólo requieren de un anillo colector

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

que transmita la energía a la base de la torre y no necesitan de un mecanismo de control para regular la inclinación de las aspas con respecto al eje rotor permanece constante y no siempre tiene la mejor orientación con respecto al viento.

### **3.3 Componentes de las turbinas de viento de eje horizontal.**

Una turbina de viento de eje horizontal moderna se compone de seis subsistemas básicos:

1. El rotor, que comprende una, dos o tres aspas montadas en un eje y puede incluir un sistema de frenado aerodinámico y controles de inclinación.
2. El tren de impulso, que incluye la caja de cambios o transmisión, los sistemas hidráulicos y las flechas.
3. El sistema de cambio que posiciona el rotor perpendicular a la corriente del viento.
4. Los sistemas eléctricos y electrónicos, incluyendo el generador, los relevadores, los interruptores del circuito, los controles y los sensores.
5. La torre
6. Los sistemas de equilibrio de la estación, incluyendo el equipo de apoyo de suelo, y el equipo de interconexión.

Los componentes básicos (excluyendo el sistema de equilibrio en la estación) se ilustran en la figura 3.3.1, que es una turbina de viento moderna de 150 kW; la sencillez relativa de una estructura de una turbina de viento es notable. Inicialmente y lejos de pensar en la aplicación que se les da ahora, los componentes industriales (caja de cambios, flechas impulsoras y los generadores) se habían desarrollado para otra aplicación, pero fueron instalados en turbinas de viento, una estrategia que permitió a la industria de las turbinas de viento crecer muy rápidamente. Ahora se encuentra un mercado ya establecido, y los componentes antes adaptados ahora son específicamente diseñados y construidos para turbinas de viento. Con esto se espera que aumente la eficiencia de la turbina y se reduzca el costo de mantenimiento.

ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

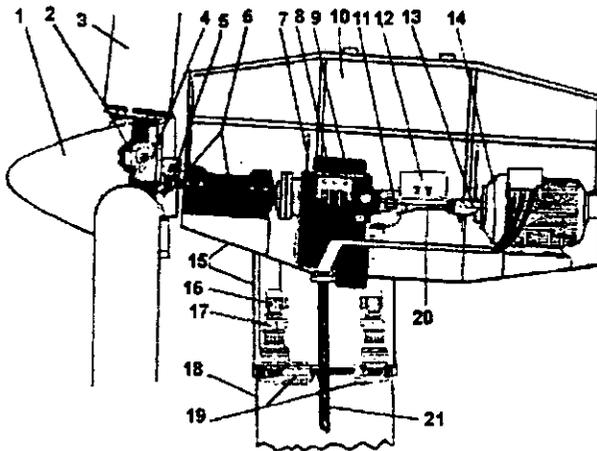


Figura 3.3.1

- |                       |                            |                           |
|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1. Nariz de cono      | 8. Caja de cambios coaxial | 15. Cubierta laminada     |
| 2. Eje                | 9. Sistema hidráulico      | 16. Motor de desvío       |
| 3. Aspas              | 10. Barquilla              | 17. Engrane de desvío     |
| 4. Sistema hidráulico | 11. Freno                  | 18. Torre                 |
| 5. Sistema de viraje  | 12. Controles              | 19. Sistema de desvío     |
| 6. Flecha principal   | 13. Sensor de vibración    | 20. Flecha de transmisión |
| 7. Amortiguador.      | 14. Generador              | 21. Cables de potencia.   |

A continuación se describe cada uno de los seis subsistemas mencionados anteriormente.

### 3.3.1 Rotor.

El rotor convierte la energía cinética de los vientos en energía cinética de rotación, es una parte extraordinaria y crítica de una turbina de viento. El rotor es expuesto de lleno a la fuerza y a los rangos de la variación en la velocidad del viento, la dirección y las turbulencias. Debido a que las cargas en el rotor son complejas y difíciles de modelar a menudo no pueden ser simulados en un laboratorio. Por eso este componente representa el desafío más grande en el diseño de una turbina de viento.

El rotor se usa también para controlar la cantidad de energía extraída de la corriente de viento. Los rotores con hojas de inclinación variable se emplean

comúnmente; la inclinación variable no solo se limita a la captura máxima de la energía, sino que también puede reducir la velocidad de arranque y proporcionar un frenado aerodinámico a la turbina.

### 3.3.2 Tren impulsor.

Los componentes principales del tren impulsor son las flechas de alta y baja velocidad, el sistema mecánico de frenos, cojinetes, acoplamientos, la caja de cambios y la barquilla. Los engranajes del tren de impulso aumentan la velocidad angular del rotor, que es normalmente de 30 a 120 r.p.m. a la velocidad rotacional de la flecha de salida de 1200 a 1800 r.p.m. que es requerida por la mayoría de los generadores para poder producir de 50 a 60 Hz; el tren de impulso debe también amortiguar parcialmente fluctuaciones de torsión causadas por turbulencias.

### 3.3.3 Sistemas de controles de desvío.

Como ya se ha mencionado las turbinas de viento de eje horizontal caen en dos categorías: turbinas de viento arriba (donde la corriente del viento encuentra primero al rotor) o las turbinas de viento abajo (donde la corriente del viento encuentra primero a la torre). Los sistemas de desvío se usan para orientar el rotor para que este se encuentre perpendicular a la corriente del viento.

### 3.3.4 Torre.

Desde el punto de vista estructural, los elementos mas criticos en los sistemas de conversión eólica son las turbinas de viento y la torre de soporte. La torre debe soportar principalmente dos tipos de fuerza. Una de levantamiento, producida al operar la turbina de viento, que tiende a levantar la torre junto con la turbina de viento, y otra que corresponde al peso de todo el sistema conversor de energía eólica.

Las torres suelen ser estructuras de concreto o metal. Existen básicamente dos tipos de amarre para las torres:

1. Contraventeadas, aseguradas por tirantes de acero.
2. Empotradas, ancladas en bases de concreto.

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

La altura apropiada para una torre es de por lo menos de 15 m mayor que los obstáculos que pueden encontrarse a menos de 15 m de ella. Las torres mas usadas son de metal, normalmente estructuras modulares de tubo o perfiles de acero.

### **3.3.5 Sistema eléctrico.**

Casi todas las turbinas de viento modernas tienen generadores de inducción, que se componen de un estátor y rotor de generación. La potencia de salida de este tipo de generador varía rápidamente con una diferencia entre la frecuencia de la línea y la velocidad angular del rotor del generador. La potencia de salida máxima se alcanza cuando esta diferencia es de un valor porcentual mínimo por encima de la frecuencia de la línea.

El equipo eléctrico en una turbina de viento en el cual se incluyen los sensores electrónicos así como también el generador deben operar con el mínimo mantenimiento bajo una gran variedad de condiciones climáticas adversas.

### **3.3.6 Aspas.**

Las aspas de las turbinas de viento tienen superficies aerodinámicas y generalmente están hechas de acero, aluminio, madera, tela, plástico, fibra de vidrio o combinaciones de estos materiales. Actualmente se emplea principalmente aluminio o aleaciones de aluminio, en ocasiones madera y para algunos prototipos se ha utilizado tela, fibra de vidrio o plástico. Los perfiles aerodinámicos tienen como objetivo que la relación sustentante-arrastre sea relativamente alta para pequeños ángulos de ataque de las aspas.

Las turbinas de viento de eje horizontal son construidas con aspas de perfil aerodinámico variable, además de dicho perfil se va torciendo a medida que se aleja de la base; la torsión del aspa es necesaria en todas las turbinas de viento de eje horizontal. Las aspas deben soportar todos los esfuerzos que se producen en ellas ocasionados por turbulencias provocadas al girar con el viento.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

para las señales de muy alta frecuencia (VHF) y de 4800 m para las señales de ultrafrecuencia (UHF).

Por otra parte el ruido que produce las turbinas de viento al operar (ruido audible y ruido infrasónico) puede causar disturbios en la vida natural del lugar e interferencias en las actividades cotidianas. Los niveles de ruido y su impacto ambiental no han sido cuantificados adecuadamente.

Al mismo tiempo pueden ocurrir colisiones de aves contra la torre y la turbina de viento, principalmente si el sistema converso está instalado en una zona con grandes poblaciones de aves o en el trayecto de aves migratorias. El vuelo nocturno puede ser perturbado, o bien estos animales voladores pueden ser atraídos por las luces en las partes altas de la estructura, incrementando así la posibilidad de choque.

En lo que respecta a las turbinas de viento marinas la mayor afectación que se tendría en el medio ambiente, es con las aves, ya que para obtener su alimento explotan los recursos del lecho marino. La Sociedad Ornitológica Danesa sugiere que las torres sean colocadas en aguas más profundas y así no se causarían los mismos problemas que en las aguas superficiales, teniendo de este modo una protección de las aves. A demás de la consideración de las aves se debe tener en cuenta si en el lugar escogido existen corrientes marinas y que tipo de comportamiento meteorológico se tiene en dicho lugar.

Finalmente puede producirse un rechazo social hacia las turbinas de viento, particularmente hacia los grandes sistemas, por considerar que son poco estéticos y perturban por lo tanto un paisaje apreciado localmente. El impacto visual de la turbina de viento depende de su tamaño, del carácter del paisaje y de su visibilidad desde las áreas de actividad humana.

El costo para producir electricidad generada por turbinas de viento se ha reducido en los últimos quince años. La Comisión de Energía de California calcula que las granjas eólicas siendo operadas por un servicio público inversionista y propietario, las plantas de energía pueden generar electricidad de 47 a 72 centavos de dólar por kilowatt/hora, estos costos de producción podrían competir con costos de plantas nucleoelectricas o de carbón.

### 3.5 Disponibilidad para la generación eólica en México.

El potencial eólico en México es desconocido, la mayoría de las estaciones meteorológicas donde se registran datos de viento no fueron concebidas desde su inicio considerando al viento como un recurso estratégico y por tanto la información obtenida de ellas no es suficiente para evaluar el potencial eólico como fuente de energía.

Se cuentan con datos diarios de la velocidad media, velocidad máxima y velocidad media dominante del viento, registrados durante un periodo de 16 años (1961- 1976) por 68 observatorios y 96 estaciones meteorológicas instaladas en el territorio nacional. Con trabajos de caracterización y evaluación energético-eólica realizados por el instituto de investigaciones Eléctricas en diversos puntos del territorio nacional, se puede tener tentativamente una regionalización del país en zonas con características de viento similares, según el siguiente cuadro (ver figura 3.5.1) [20]:

Región	Descripción geográfica.
1	Baja California Norte
2	Baja California Sur
3	Región costera de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Jalisco
4	Región costera de Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca
5	Región sur del istmo de Tehuantepec
6	Península de Yucatán
7	Costas del Golfo de México en Tabasco, Veracruz y Tamaulipas
8	Sierra Madre Oriental
9	El Altiplano Central (Edo. de México, Hidalgo, Querétaro y Guanajuato)
10	Sierra Madre Occidental
11	La Mesa del Norte

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

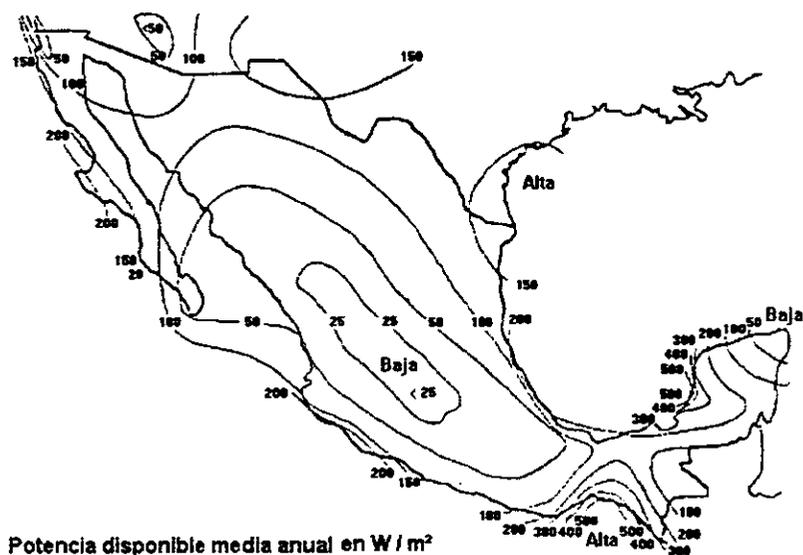


figura 3.5.1

En la mayor parte del territorio nacional predominan vientos por gradientes térmicos, en general de ciclo diario. Las regiones de la sierra y el altiplano central están expuestas a vientos alisios del noreste y carecen de periodos de calma.

Los sistemas regionales más importantes son: la región sur del istmo de Tehuantepec, con velocidades medias de viento de entre 6.5 y 7 m/s; la península de Baja California y las costas de Oaxaca, Guerrero y Michoacán en las horas de la tarde el viento alcanza velocidades de entre 13 y 15 m/s, y el altiplano central.

Actualmente se tienen turbinas de viento produciendo energía eléctrica en algunas regiones del país, como por ejemplo en la Ventosa en Oaxaca y en Ojo caliente en Coahuila. En este último se trata de una unidad piloto que forma parte de un proyecto de la empresa privada Zespa, contratista que explota la cantera de la planta de cementos Apasco en Ramos Arizpe Coahuila. Aprovecha las corrientes de aire de la zona y autogenera hasta un 70% de la electricidad requerida por los procesos de producción.

La turbina de viento es del tipo de eje horizontal y consta de una hélice con tres aspas, de 20 m de longitud cada una; se encuentra montada sobre una torre de acero de

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

40 m de altura. En la base de la torre se ubica el sistema de control computarizado que se encarga de administrar automáticamente el sistema y los giros del generador y/o el ángulo de las aspas para tener la mejor posición y así poder aprovechar al máximo las corrientes de aire. Este sistema de la turbina de viento consta también de un dispositivo de seguridad que desconecta automáticamente el generador cuando las corrientes de aire superan el límite de velocidad pudiendo ocasionar daños al sistema.

La generación de electricidad lograda con la turbina de viento llega a ser de 423 kWh y el excedente que se llega a tener se introduce a la red de transmisión de Comisión Federal de Electricidad. Cada unidad eólica tiene un costo aproximado de 400 mil dólares, inversión que se recupera en 5 o 6 años. Apasco tiene planeado instalar un conjunto de turbinas de viento similares en la zona.

## CAPÍTULO 4

### CONVERSIÓN FOTOTÉRMICA DE LA ENERGÍA SOLAR

#### 4.1 Generalidades sobre la conversión fototérmica de la energía solar.

• El uso de la energía solar para el desarrollo de actividades humanas se puede citar desde la antigüedad. La historia nos presenta un hombre que en su tiempo ya se ocupó del aprovechamiento de la energía solar: Arquímedes. Se dice que este gran científico durante el asedio de Siracusa por los romanos, en el año 212 a.C., incendió las naves enemigas con ayuda de un espejo ustorio<sup>iii</sup>.

Transcurrieron desde entonces unos 1800 años sin que se realizaran experimentos de esta clase, hasta que en el siglo 17 el físico Atanasio Kircher se le ocurrió repetir y mejorar el experimento del espejo de Arquímedes; su intención era comprobar desde que distancia podía incendiarse un haz de leña con ayuda de espejos ustorios. En el mismo siglo un matemático alemán, Ehrenfried Water von Tschirnhaus logró fundir masas cerámicas con ayuda de lentes ustorios de 80 cm de diámetro, que eran lentes con mayor tamaño a los utilizados en la época para telescopios. A principios del siglo XVIII se realizaron los primeros ensayos de fundición de metales utilizando el mismo tipo de lentes ustorios. Estimulado por los resultados anteriores, el naturalista francés Gerges Leclerc Buffon en 1747 efectuó ensayos con un aparato compuesto por 360 espejos planos. Con un dispositivo menor, que comprendía 168 de estos espejos, cada uno de ellos de 15 x 15 cm, Buffon logró incendiar un haz de leña desde una distancia de 60 m, con este aparato consiguió además fundir plomo desde una distancia de 39 m, y plata desde 18m. Más tarde, en sus experimentos Buffon utilizó espejos parabólicos, logrando con ellos fundir plomo desde una distancia de 100 m.

El sabio francés Laurent Lavoisier fundador de la química científica y muy conocido por sus trabajos fundamentales sobre la composición del aire y la importancia del hidrógeno, había incluido también la energía solar en sus investigaciones. En 1772

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

empleo una lente cóncava de 1.30 m de diámetro y 3.20 m de distancia focal. Esta enorme lente estaba llena de alcohol, para reducir el foco, Lavoisier antepuso una lente más pequeña de 15 cm de diámetro. El conjunto mencionado iba montado sobre una placa de apoyo abatible, giratoria en un plano horizontal para poder seguir los movimientos del Sol. El ajuste se realizaba con volantes que accionaban largos tornillos de regulación. Con este dispositivo logró alcanzar Lavoisier temperaturas de 1700°C suficientes para fundir metales, incluso el platino.

En el siglo XIX el profesor de física en Tours, Agustín Mouchot construyó en colaboración con el inventor francés Abel Pifre, un aparato con reflector metálico troncocónico y una caldera tubular de hierro, con tubos de vidrio dispuestos en el foco de aquél. Con este aparato pudo fundir plomo y zinc. En la exposición mundial de París, en 1878, exhibió una prensa tipográfica accionada por un "motor solar". El reflector utilizado tenía un diámetro de cinco metros y reflejaba la radiación solar sobre la caldera de una máquina de vapor que impulsaba la citada prensa.

Ya en el siglo XX el ingeniero inglés A. G. Eneas construyó en California un pequeño generador solar. Un modelo de dicho generador estuvo funcionando mucho tiempo en un criadero de avestruces de Cawston en Pasadena; otro prototipo se utilizó en Arizona para bombear agua. En esta última instalación el reflector estaba constituido por facetas de vidrio plateado dispuestas sobre la superficie interna de un cono truncado, cuya generatriz formaba con el eje un ángulo de 45°. El mayor diámetro del cono era de 10m; la parte inferior del reflector se dejó abierta con objeto de reducir la presión ejercida con el viento.

### 4.1.1 Incidencia de la radiación solar.

La reacción nuclear predominante en el Sol es la fusión de núcleos de hidrógeno con núcleos de helio. En estas reacciones una cantidad tremenda de materia se libera convirtiéndose en energía: cerca de cuatro mil millones de kilogramos de materia por segundo. Mientras la temperatura interior del Sol esta al rededor de 40 millones de grados, los gases en la superficie están cerca de los 6000°C. La figura 4.1.1 muestra la

---

<sup>iii</sup> Espejo de forma cóncava.

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

intensidad relativa de la radiación electromagnética recibida en lo alto de la atmósfera de la tierra como una función de la longitud de onda. Cerca del 9% de la radiación es

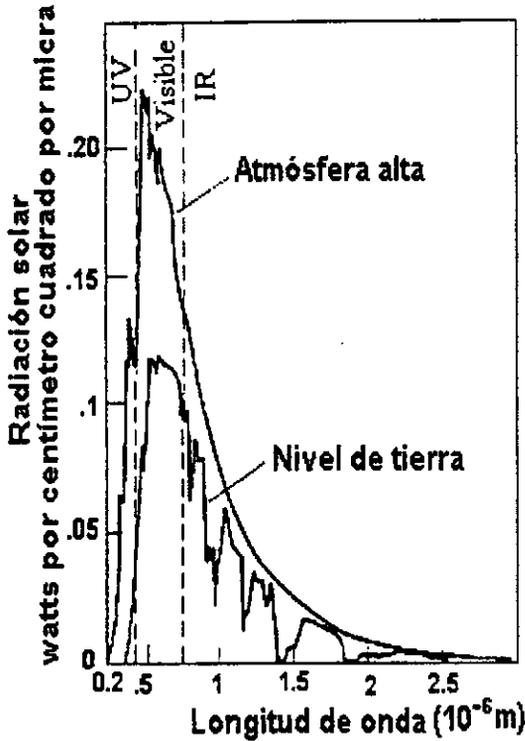


Figura 4.1.1

ultravioleta, o una longitud de onda muy corta, casi el 40% está en la región visible, y aproximadamente un 50% es infrarrojo o longitud de onda larga. Sin embargo sólo cerca de la mitad de esta radiación alcanza la superficie de la Tierra. Gran parte de la radiación ultravioleta es absorbida por oxígeno, por nitrógeno y por ozono en la atmósfera superior de la Tierra. Parte de la radiación de la longitud de onda larga es absorbida selectivamente por vapor de agua y bióxido de carbono en la atmósfera más baja. Cerca del 19% de la radiación recibida en la atmósfera de la Tierra es absorbida por nubes y otros

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

gases y 31% es reflejada de regreso a el espacio por las nubes y la atmósfera como se ve en la figura 4.1.2. La fracción de la luz reflejada por la Tierra y su atmósfera se llama

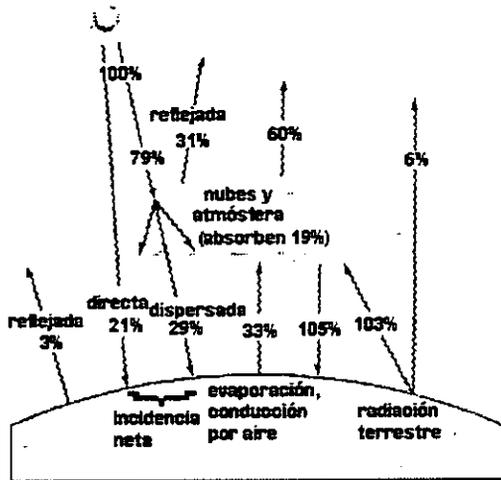


Figura 4.1.2

“albedo”<sup>iv</sup>. El restante 50 % de incidencia de la energía solar alcanza la superficie de la Tierra y casi toda es absorbida (3% es reflejada). La temperatura relativamente constante de la Tierra está debida al equilibrio de la energía entre la radiación solar entrante y la energía radiante que sale de la Tierra. La mayor parte de la radiación infrarroja emitida de la Tierra es absorbida por CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (y otros gases) en la atmósfera y entonces es reirradiada de vuelta a la Tierra o hacia el espacio exterior. A esta reirradiación hacia la Tierra se le conoce como “efecto invernadero”.

La cantidad de insolación que llega a la parte alta de la atmósfera terrestre es cercana a los 1360 W/m<sup>2</sup>. Este número, es denominado constante solar. La insolación recibida en alguna ubicación particular en la superficie de la Tierra puede variar entre 0 y 105 W/m<sup>2</sup> dependiendo de la latitud, la estación del año, la hora del día, y del grado de la nubosidad. Los primeros dos factores se deben a la geometría de la órbita de la Tierra con respecto al Sol. La órbita de la Tierra al rededor del Sol es casi circular, pero

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

el eje de la tierra tiene inclinación relativa en este plano de movimiento con un ángulo de  $23.5^\circ$  como se ve en la figura 4.1.3. Consecuentemente el polo norte se inclina hacia el Sol durante el verano septentrional del hemisferio y se aleja del Sol en el invierno. Por lo tanto, el hemisferio septentrional es expuesto a más horas de luz del Sol en el verano (se alcanza el máximo el 22 de Junio, con el solsticio de verano).

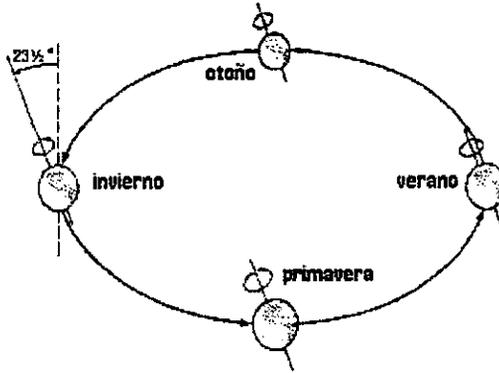


Figura 4.1.3

En el invierno, los rayos del Sol deben pasar por una atmósfera con mayor nubosidad, debido a esto menos radiación alcanza a la Tierra a causa de la absorción y dispersión. Estos dos efectos se muestran en la figura 4.1.4.

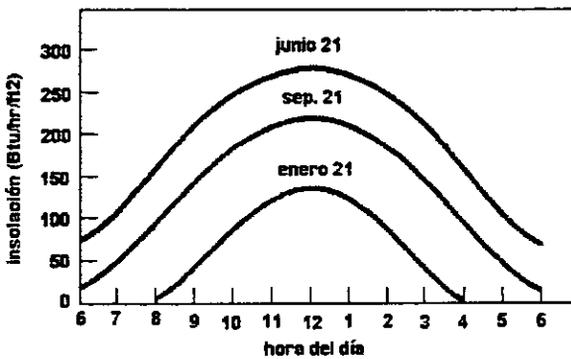


Figura 4.1.4

<sup>11</sup> Se denomina Albedo a la potencia reflectora de un cuerpo iluminado

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

En la gráfica se muestra la insolación en un día despejado con  $40^\circ$  de latitud N como una función de tiempo por día en tres meses diferentes.

### 4.2 Tipos de colectores para el aprovechamiento de la energía fototérmica.

#### 4.2.1 Colectores planos.

Los colectores planos son dispositivos robustos colocados en una posición fija, que pueden captar la energía solar. Básicamente un colector plano consta de una superficie plana o absorbente hecha de metal, usualmente de cobre, cuya superficie expuesta al sol es oscurecida para aumentar su absorción de calor, y de una red de tubos soldados a la superficie plana. Este conjunto se coloca en una caja con aislante por detrás de la superficie plana y una o varias capas de vidrio plano por delante de la misma, para lograr el efecto invernadero, o sea que de la radiación que llega a la Tierra; gran parte de esta radiación es absorbida por el vapor de agua y el dióxido de carbono presentes en la atmósfera, cerca de la superficie terrestre. Tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono son transparentes para la mayoría de la radiación solar pero absorben la radiación de onda larga procedente de la superficie terrestre, causando un cierto calentamiento en la atmósfera que dependerá de la cantidad de  $H_2O$  y  $CO_2$  presentes.

El colector plano generalmente se instala inclinado, para aumentar la eficiencia en la captación de energía solar, dependiendo el ángulo de inclinación de la latitud del lugar. Se procura que la superficie de colección quede colocada de tal forma que a lo largo del año tenga una mínima desviación de la dirección de los rayos solares. Por efecto de la radiación solar interceptada, la superficie plana absorbente se calienta y se transmite calor por conducción térmica a los tubos soldados a la misma. Por el interior de estos tubos circula un fluido (puede ser agua o aire) que incrementa su temperatura al entrar en contacto con ellos.

#### 4.2.2 Colectores tubulares.

El principio de operación de un colector tubular es muy similar al de los colectores planos, salvo que, los colectores tubulares operan con vacío (o baja presión) entre el

absorbedor y el tubo envolvente de vidrio, con lo que se reducen o eliminan las pérdidas por conducción y convección. Como en el caso de los colectores planos, los colectores tubulares se instalan en una estructura de soporte con una cierta inclinación que depende de la latitud del lugar. En los colectores tubulares se elimina el aislante en la parte posterior del colector no expuesta al Sol; en algunos diseños el tubo envolvente tiene depositado por el interior en su parte media inferior una superficie reflejante que hace las veces de concentrador.

#### 4.2.3 Colectores con concentración.

El principio de operación de los colectores solares estacionarios con concentración es el mismo que el de los colectores planos o tubulares; esto es, se expone al Sol una superficie que absorbe la radiación recibida aumentando con ello su temperatura; el calor así ganado es transferido a un fluido que se pone en contacto con la superficie absorbadora. En el caso de los colectores con concentración, para aumentar la cantidad de energía recibida sin incrementar proporcionalmente el área de la superficie absorbente expuesta al Sol y por tanto las pérdidas. Se emplean espejos que reflejan la radiación que incide sobre ellos en una área de superficie absorbente más pequeña. A la relación del área de apertura (proyección de un plano del área de espejos) con el área de la superficie absorbadora se le llama razón de concentración.

#### 4.2.4 Colector térmico con seguimiento.

Cuando se desean alcanzar temperaturas medias o altas (250°C en adelante) mediante el aprovechamiento de la energía solar, se hace necesario, dada la baja densidad energética de la radiación solar, el uso de colectores con una mayor relación de concentración que la obtiene en los colectores solares estacionarios con concentración. Los colectores con alta razón de concentración deben reflejar los rayos solares en áreas muy pequeñas comparadas con la de captación. (tan pequeñas como sea posible, para reducir las pérdidas de calor). Para lograr esto los colectores deben ser capaces de seguir el movimiento diario aparente del Sol, ya sea en una o en dos direcciones.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Entre los sistemas que emplean colectores con concentración y seguimiento del movimiento diario aparente del Sol suelen distinguirse dos grandes grupos: a) los llamados distribuidos, que pueden ser de enfoque lineal o puntual, y b) los de torre central, que emplean espejos planos llamados heliostatos, para concentrar la radiación solar en algún punto elevado sobre ellos. En los sistemas distribuidos cada módulo de espejos o colectores tiene su propio absorbedor; en los de torre central todos los espejos se enfocan hacia un absorbedor común.

### a) Sistemas distribuidos.

Como en el caso de los colectores estacionarios con concentración, en los concentradores con seguimiento, un conjunto de espejos (o lentes) recibe la radiación solar y la refleja (o refracta) hacia un absorbedor, cuya superficie es mucho más pequeña que el área de captación, con una razón de concentración mayor que 10, esto permite aumentar la densidad energética de la radiación recibida por el absorbedor pero requiere que el colector siga el movimiento del Sol en una o en dos direcciones, lo que se logra con dispositivos especiales.

Los concentradores de los sistemas solares distribuidos pueden ser de curvatura simple, en forma de canal cilíndrica parabólica, o de curvatura compuesta, de tipo platillo parabólico o casquete semiesférico. Con los primeros es posible lograr razones de concentración de entre 10 y 60 y con los segundos de hasta 1,000.

### b) De torre central.

El principio de operación de los sistemas de torre central es conceptualmente el mismo que el de los distribuidos, salvo porque en este caso todos los colectores (espejos planos o heliostatos) reflejan la radiación solar hacia un absorbedor común colocado en la parte alta de una estructura. Los absorbedores pueden ser externos o de cavidad. Los primeros reciben la radiación solar reflejada sobre su superficie exterior, mientras que los de cavidad la reciben sobre una superficie interna (a través de una o varias aberturas). La razón de concentración de estos sistemas está limitada prácticamente solo por la precisión de enfoque de los heliostatos. Los sistemas de torre central generalmente están

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

asociados con la generación de energía eléctrica en plantas de gran tamaño (algunos MWe ) pero también han sido propuestos para la generación de vapor en diferentes industrias.

### **4.3 Aprovechamiento de la energía fototérmica.**

Existen diferentes aplicaciones que se le pueden dar a la conversión fototérmica de la energía de solar en la actualidad. A continuación se mencionan algunas de ellas:

#### **4.3.1 Calefacción de ambientes**

La calefacción de ambientes por medio de energía solar recibió a mediados de los 80's la mayor popularidad en aplicación, ya que en la calefacción de ambientes es donde más se manifiesta el problema del previsto agotamiento de los combustibles fósiles. Este tipo de calefacción consume la mitad de la energía primaria utilizada en Europa y en Norteamérica, con un rendimiento pésimo, debido a las relativamente bajas temperaturas de calentamiento.

La calefacción solar de edificios se puede lograr por medio de un sistema solar activo, en donde un fluido (generalmente agua o aire) es calentado y se hace circular por medio de una bomba o un ventilador en el edificio. La posible selección práctica entre ambas alternativas es variada. El sistema de agua caliente tiene un mayor rendimiento, aproximadamente el 10%, pero los colectores con agua se congelan por las noches ocasionando que deban vaciarse o adicionar al sistema una etapa en donde se asegure que por las noches el agua se mantendrá por encima del punto de congelación. Otra alternativa consiste en usar un anticongelante en el colector. Los anticongelantes en los dispositivos de almacenamiento de agua caliente resultarían prohibitivamente caros ya que es necesario un intercambiador de calor entre el sistema anticongelante del colector y el depósito de almacenamiento térmico de agua.

Un colector de aire caliente tiene menor rendimiento pero es más sencillo de construir y de mantener. Para el almacenamiento térmico basta con un depósito lleno de

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

pedras o con botellas de agua cerradas. El sistema de control para aire es mas caro que en el caso del agua debido a que el tamaño del conducto es grande y se necesitan pantallas mecánicas o ventiladores separados para hacer discurrir el aire que ha de calentarse hacia la fuente térmica apropiada (sistema de almacenamiento de colector o bien calefacción adicional). Se han hecho experimentos utilizando ambos sistemas en casas, encontrando que el sistema por aire es más sencillo de mantener y mas sencillo de construir. En la figura 4.3.1 se puede apreciar un diagrama de ambos sistemas.

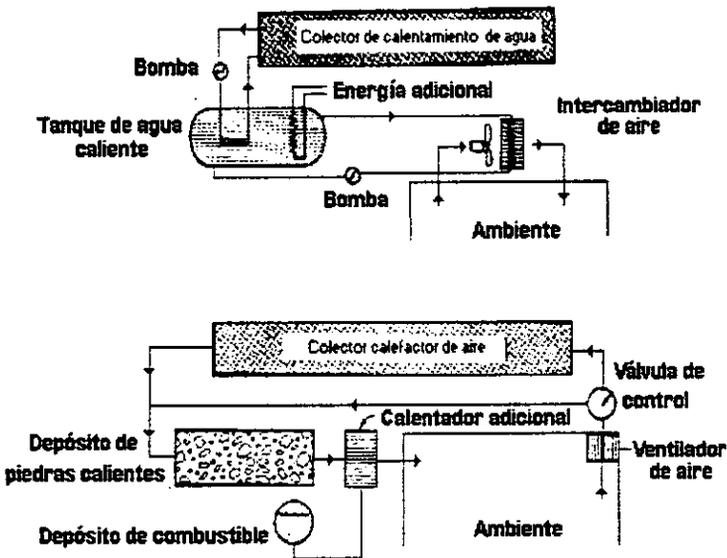


Figura 4.3.1

**4.3.2 Bombeo solar de agua.**

El bombeo de agua es una aplicación en donde puede modificarse la demanda para ajustarse a las disponibilidades. En la agricultura hay zonas en las que se tiene que estar bombeando agua las 24 horas del día, para distribuir agua a diferentes granjas según se necesite. Para sustituir las bombas diesel, gas o eléctricas actuales por bombas solares.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En la figura 4.3.2 se muestra un diagrama esquemático para un sistema de bombeo de agua mediante energía solar con almacenamiento. Es un sistema de doble fluido, que utiliza agua a presión para almacenar energía y un fluido orgánico como vapor de trabajo en la turbina. Se muestra una caldera auxiliar que suministra agua caliente para el intercambiador térmico cuando no se disponga de agua calentada por el Sol. El condensador de la turbina se enfría mediante agua bombeada del pozo.

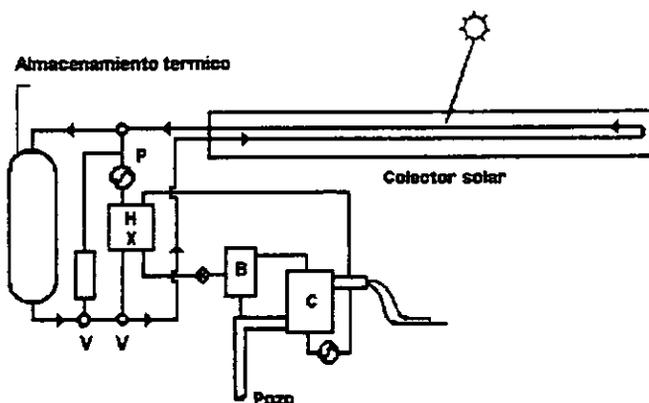


Figura 4.3.2

HX. Designa el intercambiador térmico

B. Calentador suplementario

P. Bomba-turbina

C. Condensador.

### 4.3.3 Calentamiento solar de agua para consumo doméstico.

El calentamiento de agua para uso doméstico mediante el empleo de energía solar constituye una de las aplicaciones más atractivas. Generalmente, el calentamiento de agua se logra en la actualidad con combustibles tradicionales como gas natural, gas LP, petróleo, leña etc. Sin embargo dados los niveles de temperatura tan bajos que se requieren en el calentamiento de agua para su uso doméstico (del orden de los 40-60°C) la sustitución por la energía solar de los combustibles antes mencionados constituye una alternativa sumamente atractiva.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Todos los calentadores de agua mediante energía solar consisten básicamente en un colector que recibe la energía incidente durante el día y un tanque de almacenamiento que contiene el agua que ha sido calentada. La figura 4.3.3 muestra un calentador típico operando en condiciones de circulación natural. El calentador solar se parece, en muchos aspectos, al sistema tradicional de combustión. La única diferencia estriba en que el equipo de combustión es reemplazado por el colector solar.

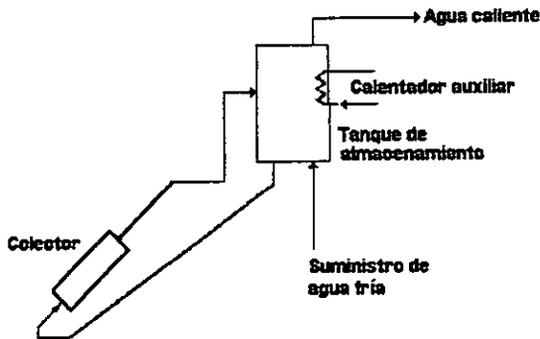


Figura 4.3.3

En ambos casos el calor es absorbido por el agua en el punto más bajo del sistema. Esto causa un incremento en la temperatura de agua dentro del colector y una consecuente disminución en la densidad de ésta. En estas condiciones la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector ya no queda equilibrada por la columna de agua caliente menos densa, por lo que la gravedad origina que la primera baje y desplace a la última hacia el tanque. Esta circulación natural continúa mientras exista suficiente calor para aumentar la temperatura del agua y la fuerza de empuje resultante pueda vencer las caídas de presión en el sistema.

### 4.3.4 Conversión de energía solar en energía eléctrica.

Como ya se ha mencionado, un sistema térmico solar usa colectores solares para aumentar la temperatura de un fluido. Para lograr grandes temperaturas se utilizan

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

preferentemente los sistemas de torre central. La tecnología térmica solar tiene un rango amplio en diferentes aplicaciones, como por ejemplo generar energía eléctrica, suministrar calor a procesos industriales y metalúrgicos y la producción de químicos. El beneficio principal de la concentración térmica es que se pueden lograr altas temperaturas en los fluidos (hasta 650°C).

El primer experimento a gran escala en el mundo para generar energía eléctrica, se construyó en Albuquerque, capital de Nuevo México (EE.UU). Con una capacidad de generación de 5 MW, en esta región la radiación solar es muy favorable, pudiendo contarse con unas 4,500 horas por año. En medio de un campo están dispuestos 300 espejos de 40 m<sup>2</sup>, del tipo heliostatos; cada uno de estos espejos está provisto de otros 25 individuales. Los heliostatos reflejan la energía térmica a una caldera solar emplazada sobre una torre de hormigón a 45.52 m de altura del suelo.

De acuerdo con las experiencias adquiridas en Albuquerque se instaló posteriormente en 1984 en Barstow/California una central solar con una salida de potencia cercana a los 13 MWe. Esta central solar hasta 1991 estaba generando 280 MWh o más y generaba más del 90% de la electricidad producida por plantas solares en el mundo. La eficiencia de la conversión de la energía solar en energía eléctrica con esta tecnología está cercana al 25%. Cuando empezó a operar esta central el costo era aproximadamente de 4,000 dólares por kilowatt. Para 1991 los precios de la energía eléctrica se encontraban entre \$ 0.8 y \$ 0.12 por kWh. Actualmente hay más de 13 millones de m<sup>2</sup> principalmente en California, donde se concentran los colectores solares que representan 1200 MW de potencia para cubrir el pico de demanda.

### 4.4 Impactos ambientales por la conversión fototérmica de la energía solar.

El tema de la eliminación de calor desperdiciado también plantea algunas cuestiones generales sobre el medio ambiente. Entre ellas intervienen, además de la simple eliminación del calor desperdiciado, el tema más amplio del equilibrio térmico con el medio ambiente y del impacto que produce sobre la utilización del terreno, e impacto secundario social producido por las granjas de energía solar en gran escala. En

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

una primera aproximación se puede decir que la conversión de energía solar en las diversas formas posibles de calor y de energía no alterarían el balance térmico global, simplemente debido a que la radiación solar está llegando diariamente al medio ambiente, se emplee o no se emplee. La modificación normal de la energía solar en el medio ambiente se puede dar de dos formas: a) haciendo que las áreas colectoras sean más oscuras que el medio ambiente y b) Se puede exportar parte de la energía de un área a otra, en el caso de las granjas de energía solar en donde la energía puede recolectarse en las áreas desérticas y transportarse a las áreas nubosas del globo terrestre.

En lo que concierne a la perturbación del albedo natural se podría balancear o equilibrar dicha variación pintando de blanco los espacios cercanos o entre los colectores o espejos. Así pues en principio se podría mantener invariable el albedo del área de recolección.

Para que una granja de energía solar pueda competir con la producción de una planta de energía nuclear moderna, es necesario que se despliegue una serie de colectores en una área de terreno de 1 km por 1 km para tener una producción media alrededor de 60 MWe. La única objeción posible en cuanto al medio ambiente de dicha granja a gran escala es que exigiría áreas grandes de terrenos que pueden tener ocupaciones de agricultura, ganadería o simplemente sean áreas verdes. A escala global existen grandes superficies de desiertos para la ubicación de las granjas pero el único inconveniente que presentan es que se encuentran alejadas de los centros de carga.

Quizás el impacto más importante sobre el medio ambiente correspondiente a las granjas de energía solar a gran escala sería el debido a la nueva población asociada con la construcción y funcionamiento de las granjas, impacto ambiental que se presentaría también en otros tipos de plantas; tanto de combustibles fósiles como de energía renovable. Así, que de esta forma, la granja solar puede ser un imán para la creación de nuevas industrias cercanas a la misma. De esta forma se pueden tener impactos ambientales indirectos que podrían ser mas severo que el de los efectos directos de situar a los colectores solares en varios millares de kilómetros cuadrados de tierras áridas.



**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

Chihuahua, Sonora y una pequeña parte de Baja California Norte y Baja California Sur. Estos estados son los lugares más propicios para establecer una central de energía solar fototérmica.

## CAPÍTULO 5

### CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA DE LA ENERGÍA SOLAR

#### 5.1 Generalidades sobre la conversión fotovoltaica de la energía solar.

La conversión de la energía de las radiaciones ópticas en energía eléctrica es un fenómeno físico conocido como el efecto fotovoltaico, fue descubierto en 1839 por el físico francés A.E. Becquerel en sus estudios sobre celdas electrolíticas. Varios años después, en 1873, W. Smith descubrió la fotoconductividad en el selenio. Tres años más tarde, en 1876, el efecto fotovoltaico fue observado por G.W. Adams y R.E. Day en una estructura semiconductor de selenio. La primera celda fotovoltaica de selenio fue descrita en 1883 por C.D. Fritts. En 1884 Hallwach observó la fotosensitividad de estructuras de cobre/óxido de cobre ( $Cu/Cu_2O$ ), y E.H. Kennard y E.O. Diterich ligaron el efecto fotovoltaico con la existencia de una barrera.

Entre la primera y la segunda Guerra Mundial los esfuerzos por entender y desarrollar dispositivos fotovoltaicos se incrementaron. En 1930 E. Schottky formuló las primeras teorías para explicar la ocurrencia del efecto fotovoltaico (en cobre/óxido de cobre) y desarrolló el circuito eléctrico equivalente. En el mismo año Lange fue el primero en sugerir el empleo de fotoceldas para conversión directa de la luz en electricidad. En 1932 Audubert y Stora observaron por vez primera el efecto fotovoltaico en sulfuro de cadmio (CdS).

En 1954 Pearson, Fuller y Chapin de los laboratorios telefónicos Bell habiendo desarrollado el método de difusión de impurezas para la formación de uniones p-n un año antes, obtuvieron el primer dispositivo fotovoltaico práctico de silicio monocristalino. En ese mismo año Welker descubrió el efecto fotovoltaico en el arsenuro de galio (GaAs) y Reynolds con ayuda de colaboradores desarrollaron dispositivos con sulfuro de cadmio (CdS). La eficiencia de conversión de energía solar a electricidad de estas primeras celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino y sulfuro de cadmio era de 3 a 6 %.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

En 1956 J. Loferski publicó un estudio sobre el rendimiento óptimo de diferentes materiales semiconductores. Las primeras aplicaciones terrestres de las celdas fotovoltaicas se dieron en ese mismo año, en luces intermitentes para la navegación y en estaciones remotas de comunicaciones. Entre 1956 y 1957 se establecieron las primeras compañías privadas norteamericanas fabricantes de fotoceldas de silicio monocristalino. Para 1958, las diferentes mejoras introducidas en los dispositivos posibilitaron el logro de eficiencias de conversión en laboratorio, del orden de 14% para celdas de silicio. Con relación a los dispositivos comerciales se obtendrían eficiencias del 10 al 11% sólo hacia finales de los sesentas y principios de los setentas.

Durante 1961 se llevaron a cabo los primeros intentos de celdas de sulfuro de cobre-sulfuro de cadmio ( $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$ ). Al año siguiente Lamorte consiguió obtener eficiencias de laboratorio del 13% en celdas de arsenuro de galio, Canberlin obtuvo la primera celda de sulfuro de cadmio depositado por rocío a bajo costo.

Durante la década de los setentas las actividades de investigación y desarrollo se centraron en: a) las celdas de silicio, cuya eficiencia permaneció entre el 11 y 13 % durante la década; b) las de telurio de cadmio ( $\text{CdTe}-\text{Cu}_2\text{Te}$ ) con eficiencias del 6% que fueron descartadas hacia finales del decenio por sus problemas de estabilidad, y c) las de arsenuro de galio, en las que se abandonaron los trabajos temporalmente a mediados de la década por falta de resultados satisfactorios.

En 1972 Lindmayer de la corporación COMSAT produjo su "celda violeta" empleando técnicas especiales de recubrimiento, depositando capas de vapor de silicio en un tanque al vacío, y un nuevo diseño de enrejado para la celda. Las uniones p-n de las celdas violetas eran poco profundas (4 millonésimas de pulgada) comparadas con las de las primeras celdas de silicio (4,000 millonésimas de pulgadas); la eficiencia de éstas aumentó a un 15 o 16 %, reduciendo además la cantidad de silicio requerida por celda.

Durante la década de los setentas aumento también el interés por otros materiales semiconductores, tales como los de las columnas III a V de la tabla periódica de los elementos. Particularmente renació el interés por el arsenuro de galio, obteniéndose en el laboratorio celdas monocristalinas con una eficiencia de un 20% y se iniciaron al mismo tiempo estudios sobre celdas de fósforo de indio, fósforo de galio y

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

arsenuro de aluminio galio. Hacia 1974 IBM obtuvo celdas de arsenuro de galio con eficiencias de conversión algo mayores de un 15%. El desarrollo de todas estas nuevas celdas se realizó sabiendo de que estas celdas serían más costosas que las de silicio, con ventajas muy limitadas sobre ellas, y que aun resultando exitosas las investigaciones, sería difícil satisfacer una demanda masiva, dadas las previsibles dificultades para la obtención de los materiales empleados en su producción (por contraste, el silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre).

### 5.1.1 Radiación solar sobre la Tierra.

De igual forma que en el capítulo cuatro, en este capítulo se tiene como fuente de energía al Sol por ello se hará un breve recordatorio de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra.

El sol es una estrella cuya superficie se encuentra cercana a una temperatura media de 6000°C y, debido a complejas reacciones que producen una pérdida de masa, ésta se convierte en energía. Dicha energía liberada del Sol, se transmite al exterior mediante la ya denominada radiación solar.

El espectro de radiación solar que se muestra en la figura 4.1.1 del capítulo cuatro, se puede observar que la gran mayoría de la energía emitida por el Sol se encuentra en la parte visible de dicho espectro y ésta representa el 47% del total. Es cierto que las radiaciones ultravioleta son muy energéticas pero también es cierto que son poco abundantes, ya que tan solo el 7% del total pertenece a dicho tipo de radiación. Al contrario ocurre con las radiaciones infrarrojas que son muy abundantes (46% del total) pero mucho menos energéticas que las anteriores. Por esta razón, se dice comúnmente que podemos convertir la "luz" en electricidad mediante las celdas solares.

La radiación solar recibida fuera de la atmósfera terrestre es de 1353 W/m<sup>2</sup>, medida sobre una superficie perpendicular a la dirección de su propagación. A este valor se le denomina constante solar y discrepa sensiblemente del que recibimos en la superficie terrestre. Esta disminución de energía recibida del Sol está justificada por el paso obligatorio que ha de hacer la radiación a través de la atmósfera y se produce fundamentalmente por los tres factores siguientes:

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

- Gases atmosféricos ( nitrógeno, oxígeno, ozono, etc.)
- Vapor de agua
- Polvo

La combinación de estos tres elementos hace que sobre la superficie terrestre y al nivel del mar sólo se reciban unos  $1000 \text{ W/m}^2$ , valor que incluso solo se alcanza en días despejados donde el aire es muy transparente.

### 5.2 La celda solar fotovoltaica.

Debido a que la materia esta constituida por átomos, los cuales a su vez están formados por dos partes bien diferenciadas: el núcleo, dotado de una carga eléctrica positiva, y los electrones, que giran alrededor en diferentes bandas de energía, con carga eléctrica negativa que compensa la del núcleo, formando de esta manera un conjunto totalmente estable y eléctricamente neutro.

A los electrones de las última capa se les ha dado el nombre de electrones de valencia, y tienen la facultad de interrelacionarse con otros similares, formando una red cristalina.

Haciendo una división se puede afirmar que existen tres tipos de materiales, eléctricamente hablando, y que son:

- Conductores: Disponen de unos electrones de valencia poco ligados al núcleo y que pueden moverse con facilidad dentro de la red cristalina respondiendo a un pequeño agente externo.
- Semiconductores: Sus electrones de valencia están más ligados a sus núcleos que en los conductores, pero basta suministrar una pequeña cantidad de energía para que se comporten igual que éstos, liberando sus electrones más externos.
- Aislantes: Presentan una configuración muy estable, la cual es difícil de modificar, ya que los electrones de valencia están sumamente ligados al núcleo, y la energía a suministrar para que saltaran del átomo sería excesivamente grande.

Precisamente, los materiales usados para las celdas fotovoltaicas son los semiconductores, ya que la energía que liga a los electrones de valencia con su núcleo es similar a la energía de los fotones que constituyen la luz solar. Al incidir ésta sobre

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

el semiconductor (normalmente silicio), sus fotones suministran la cantidad de energía necesaria a los electrones de valencia como para que se rompan los enlaces y queden libres para circular por el semiconductor.

Al lugar dejado por ausencia del electrón liberado se le llama hueco y dispone de carga eléctrica positiva (igual a la del electrón pero de signo contrario). Estos huecos también se desplazan, ya que el electrón liberado es susceptible de caer en un hueco próximo, produciéndose entonces un movimiento de estas "ausencias de electrones". Al hecho de que los electrones ocupen huecos dejados por otros electrones se le denomina recombinación.

Estos electrones libres y esos huecos creados en los puntos donde hay luz tienden a difundirse hacia las zonas oscuras, con lo cual pierden su actividad. Sin embargo al moverse ambas partículas en el mismo sentido, no producen corriente eléctrica, y antes o después se recombinan restableciendo el enlace roto. No obstante, si en algún lugar próximo a la región donde estas parejas y huecos han sido creados se formara un campo eléctrico en el interior del semiconductor, este campo separaría a los electrones de los huecos, haciendo que cada uno circule en dirección opuesta y, por consiguiente, dando lugar a una corriente eléctrica en el sentido del citado campo eléctrico.

Existen varias formas de crear un campo eléctrico de este tipo en el interior del semiconductor, pero todas ellas están basadas en el concepto de potencial de contacto y la afinidad que diferentes sólidos tienen por los electrones. En las celdas solares convencionales este campo eléctrico se consigue mediante la unión de dos regiones de un cristal de silicio, que han sido tratadas químicamente de modo diverso. Una de las regiones la denominada n, ha sido dopada (impurificada) con fósforo, tiene cinco electrones de valencia, uno más que el silicio, de manera que la región dopada con fósforo muestra una afinidad por los electrones mayor que el silicio puro.

La otra región denominada p, ha sido dopada con boro. El boro tiene sólo tres electrones de valencia uno menos que el silicio, y por ello el silicio dopado con boro tiene una afinidad por los electrones inferior al silicio puro. De esta manera la unión p-n así formada presenta una diferencia de potencial  $V_c$  que hace que los electrones tengan

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

menos energía en la zona n que en la zona p. Consecuentemente, un campo eléctrico dirigido de la zona n hacia la zona p tiende a enviar los electrones hacia la zona n y los huecos hacia la zona p.

La constitución de una celda de silicio convencional parte de una barra cristalina de silicio dopado con boro, que se corta en discos de un espesor de 0.3 mm. Una de sus caras se dopa fuertemente con fósforo, mediante difusión a alta temperatura en una atmósfera gaseosa rica en el mismo, de forma que este elemento penetre en el silicio más concentrado que el boro que éste contenía, hasta una profundidad aproximada de 0.3 micras. Encima de esta capa se deposita una rejilla metálica conductora y en la parte posterior una capa continua. Ambas sirven para facilitar la toma de contactos eléctricos con las dos regiones.

Cuando inciden fotones sobre la capa superior de la celda, algunos enlaces se rompen, generándose entonces pares de electrón-hueco.

Si esta generación se produce a una distancia de la unión menor que lo que se denomina longitud de difusión, antes o después estos portadores serán separados por el fuerte campo eléctrico que existe en la unión, moviéndose el electrón hacia la zona n y el hueco hacia la zona p y dando lugar, por consiguiente, a una corriente desde la zona n a la zona p. Si la longitud de difusión es muy corta, esto significa que, en un corto recorrido, el electrón y el hueco se recombinarán y la energía luminosa que fue absorbida para crear el par se recuperará en forma de calor, lo cual en el caso de el efecto fotovoltaico no es deseable.

De este modo, los fotones absorbidos en las zonas posteriores de la celda solar (que son los de mayor longitud de onda) tendrán pocas posibilidades de alcanzar la unión si la longitud de difusión no es lo suficientemente grande; para que esta última lo sea es necesario que el cristal de silicio sea estructural y constitucionalmente muy puro, es decir que sea monocristal y que tenga una bajísima concentración de impurezas distintas a las añadidas intencionalmente ( boro y fósforo). Esto se debe a que la mayor parte de las impurezas, así como los defectos estructurales, catalizan con gran eficacia el procesos de recombinación del par electrón-hueco en su trayecto hacia la unión p-n.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La corriente eléctrica producida, al ser empleada en un trabajo útil, desarrolla una caída de tensión que hace que la zona p sea más negativa. Como esta zona era de la menor energía potencial de electrones (es decir, la de mayor potencial o más positiva), el efecto de la carga exterior es reducir el potencial de la zona p, o sea, reducir el campo separador que aparece en la unión.

La corriente dada por cada celda solar para una iluminación determinada varía en función de la caída de tensión producida en el exterior, de acuerdo con lo que se muestra en la figura 5.1.1.

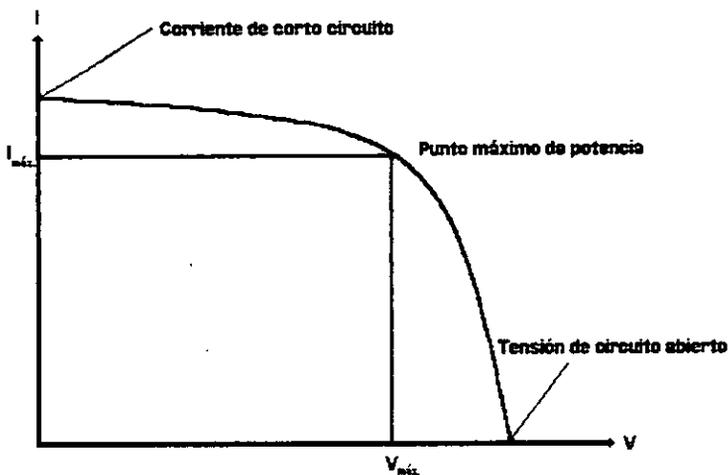


Figura 5.1.1

La corriente suministrada es casi constante, hasta que se llega a un valor de tensión para el cual el campo de la unión decrece sensiblemente. Entonces la corriente tiende a cero rápidamente.

### 5.2.1 Rendimiento de las celdas fotovoltaicas.

El rendimiento se define como el cociente entre la potencia eléctrica máxima que puede suministrar una celda fotovoltaica y la potencia luminosa que incide sobre su superficie.

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

El rendimiento obtenido en laboratorio sobre celdas de silicio monocristalino es del 22-24%, pero una vez que se pasa a su fabricación masiva éste baja a un valor aproximado del 15%, lo que quiere decir que, de cada 100 vatios que recibimos del Sol sólo 15 se aprovechan para el uso deseado. El hecho de este rendimiento tan bajo se debe fundamentalmente a los siguientes factores:

### **a) Energía de los fotones incidentes.**

Ocurre en gran medida que los fotones que contienen la luz solar no disponen de la energía suficiente como para romper el enlace covalente y crear el par electron-hueco. También se da el caso contrario, y es el de que el fotón incidente tenga más energía de la necesaria, en cuyo caso ese exceso de energía se disipa en forma de calor.

Por los motivos anteriores expuestos se puede afirmar que un 50% de la energía incidente en nuestra celda fotovoltaica se pierde, no produciendo por lo tanto electricidad.

### **b) Pérdidas por recombinación.**

El hecho de que parte de los electrones liberados por los fotones ocupen de nuevo huecos vecinos (recombinación), hace que la tensión de vacío disminuya desde aproximadamente 1.1 V (tensión teórica), hasta un máximo de 0.6 V en circuito abierto, debido a factores y procesos de fabricación de la celda solar. Las pérdidas se elevaran por esto a un 15%.

### **c) Pérdidas por reflexión.**

Si se dispusiera la oblea de silicio tal y como queda después de haberse producido el corte en la barra de silicio monocristalino, la cantidad de luz reflejada tendría un valor aproximado del 30 %. No obstante, se han experimentado diferentes recubrimientos que reducen este valor aproximadamente al 10%.

d) Pérdidas por los contactos eléctricos.

Evidentemente, el hecho de dotar a la celda solar de unos contactos que canalicen los electrones liberados hacia el circuito exterior, hace que parte de su superficie de captación se vea tapada por estos contactos eléctricos de rejilla, que no son transparentes y, en definitiva, restan iluminación. Las pérdidas por este concepto pueden evaluarse como media, en un 8%, ya que depende del diseño de la celda.

e) Perdida por resistencia serie.

Es debida al efecto Joule que se produce al circular la corriente eléctrica a través del silicio, produciendo un calentamiento. Representan sobre el conjunto un 2-3%.

Con lo anterior y sumando los distintos valores, se obtiene que la eficiencia real de la celda solar fotovoltaica no puede superar el 15%, como ya se ha mencionado; en los laboratorios se puede obtener valores más altos, dado que se puede variar la precisión en los procesos de fabricación que raramente pueden darse en las cadenas de producción.

### 5.3 Sistema solar fotovoltaico.

El sistema solar fotovoltaico nos permite convertir la energía del Sol en energía eléctrica aprovechable; este sistema se encuentra constituido por el módulo fotovoltaico, un regulador de carga, un banco de baterías y un sistema de medida y control que se ubica antes de conectar a la carga el sistema solar fotovoltaico. A continuación se muestra un diagrama a bloques de lo que es en sí un sistema solar fotovoltaico figura 5.3.1.

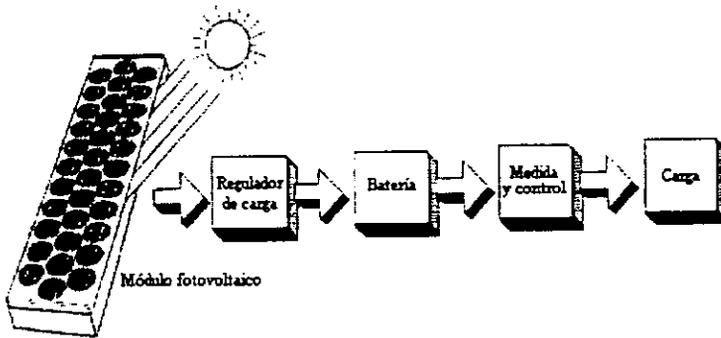


Figura 5.3.1

En seguida se hablará de cada uno de estos elementos que integran a un sistema solar fotovoltaico.

### 5.3.1 El módulo fotovoltaico.

Salvo muy pocas aplicaciones (juguetería, equipos didácticos, etc.), las celdas se agrupan en lo que se denomina módulo o panel fotovoltaico, que no es otra cosa que un conjunto de celdas conectadas convenientemente, de tal forma que reúnen unas condiciones óptimas para su integración en sistemas de generación de energía, siendo compatibles (tanto en tensión como en potencia) con las necesidades y equipos estándares existentes en el mercado.

Normalmente se habla de paneles de 6, 12 y 24 voltios, no obstante que su tensión esta por encima de las mencionadas, oscilando las potencias producidas entre los 2.5 y los 80 W. El módulo fotovoltaico consta de diversas capas que recubren a las celdas por la parte de arriba y por la parte de abajo, con el fin de darles una protección mecánica, toda vez que además las protegen contra los agentes atmosféricos, especialmente el agua, que puede llegar a ser causante de la oxidación de los contactos, con lo cual las celdas quedarían inservibles para la producción de energía eléctrica.

Los módulos fotovoltaicos tienen estructuras y formas muy variadas, según los diferentes fabricantes. Pero se puede decir que por lo general los módulos cuentan con las siguientes partes:

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

- Cubierta exterior. La cual tiene la función de proteger, ya que es la que sufre la acción de los agentes atmosféricos. Por este motivo suele utilizarse vidrio en vez de siliconas que presentan problemas de durabilidad; en cambio el vidrio, especialmente el templado presenta una buena protección contra los impactos, a la vez que tiene una excelente transmisión de la radiación del espectro solar.

El cristal utilizado para la fabricación de módulos y paneles fotovoltaicos debe ser, en su parte exterior, sumamente liso y capaz de no retener suciedad. No ocurre así normalmente en la parte posterior, que está en contacto con el encapsulante, y es rugosa con el fin de mejorar la penetración de la radiación y la adherencia con éste, el cual ajusta a las celdas.

- Capas encapsulantes. Son las encargadas de proteger las celdas solares y los contactos de interconexión. Los materiales utilizados deben presentar sobre todo una excelente transmisión a la radiación solar, así como una nula degradación frente a las radiaciones ultravioletas, ya que de no ser así puede disminuir el rendimiento del módulo. El encapsulante debe prestar también la misión de proteger y amortiguar las posibles vibraciones e impactos que se pueden producir, así como actuar de adhesivo entre las cubiertas posterior e inferior.

- Protección posterior. Su misión consiste fundamentalmente en proteger contra los agentes atmosféricos, ejerciendo una barrera infranqueable contra la humedad; algunos materiales utilizados son acrílicos y siliconas. Habitualmente suelen tener color blanco, ya que esto favorece al rendimiento del panel, debido a que al reflejar la radiación incidente entre las hendiduras que dejan las celdas, ésta se refracta en las rugosidades del vidrio en su parte interior, haciendo que incida de nuevo sobre las celdas.

### 5.3.2 Acumulador o Batería.

La energía solar llega a la Tierra de una forma variable no sólo respecto al día y la noche, sino también en la época del año, condiciones meteorológicas, etc. Algunas de estas variaciones son perfectamente predecibles, como las estaciones del año o la duración de la noche, pero no ocurre así con la nubosidad, que es mucho más aleatoria lo que hace necesario la utilización de acumuladores o baterías capaces de alimentar el

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

consumo previsto inicialmente durante los días que dure la perturbación. El acumulador o batería es un dispositivo capaz de transformar una energía potencial química en energía eléctrica. Se compone esencialmente de dos electrodos sumergidos en un electrólito donde se producen las reacciones químicas debidas a la carga o descarga.

La capacidad de un acumulador se mide en amperios/hora (A/h), para un determinado tiempo de descarga. Si este tiempo es muy corto, la capacidad de la batería disminuye, por otra parte si el tiempo de la descarga aumenta haciéndose ésta lenta, la capacidad de la batería aumenta.

Se define la capacidad como la cantidad de electricidad que puede obtenerse durante una descarga completa del acumulador plenamente cargado.

Existen diferentes tipo de baterías en el mercado, pero fundamentalmente se pueden hacer dos grandes grupos: las de níquel-cadmio y las de plomo-ácido, las primeras presentan cualidades excepcionales, pero debido a su alto costo se usan con menos frecuencia. Por el contrario, las baterías de plomo-ácido en sus diferentes versiones son las más usadas para las aplicaciones solares, adaptándose a cualquier corriente de carga y teniendo un precio razonable. Básicamente se trata de dos electrodos sumergidos en un electrólito que es una solución de ácido sulfúrico. El diseño del acumulador es muy dependiente de la aplicación; de tal forma se tiene que los acumuladores para sistemas fotovoltaicos residenciales se caracterizan por los siguientes rangos:

- 1) Ciclos diarios suaves
- 2) Periodos estacionales largos con bajo nivel de carga
- 3) ciclos anuales profundos.

Las características de las aplicaciones fotovoltaicas enunciadas son parecidas a las características de otras aplicaciones, como las de las telecomunicaciones con rasgos similares. Los acumuladores utilizados por esas aplicaciones se denominan "estacionarios" con un diseño de electrodos diferente, adecuados para soportar ocasionalmente descargas profundas y ciclos suaves. Estas características que los hacen adecuados para aplicaciones de alta seguridad, los hacen también adecuados para las aplicaciones fotovoltaicas.

### 5.3.3 Regulador de carga.

Como ya se mencionado con anterioridad, los módulos fotovoltaicos tienen una salida en tensión superior a la tensión nominal que manejan las baterías o acumuladores. Este hecho es debido fundamentalmente a dos causas:

- La tensión del panel debe ser más elevada, para cubrir la disminución que se puede producir debido al aumento de temperatura.
- La tensión del panel fotovoltaico debe ser siempre mayor que la tensión de batería para poder cargarla adecuadamente.

La misión del regulador se centra por lo tanto, en evitar que, debido a una tensión excesiva proporcionada por el panel, este puede en algún momento dado sobrecargar el acumulador, teniendo como consecuencia daños que acortarian la vida útil de la batería.

La misión del regulador de carga es de suma importancia en la mayoría de los casos, ya que la fuente de energía es variable y estacional. Si se considera la generación diaria en un periodo de un año, se tendría que tomar como base la radiación invernal para asegurar el correcto funcionamiento del sistema en la peor época del año. Pero cuando llegue el verano, el valor de la radiación debe ser duplicada, por lo que la producción será el doble a la calculada para la estación invernal y tal vez el consumo sea el mismo. De no existir un sistema regulador, se producirá un exceso de corriente que sería capaz de hacer hervir el electrolito causando pérdida de agua y deterioro del grupo acumulador, al no estar limitada la tensión.

Habitualmente, el control del estado de carga de las baterías se realiza mediante la medición de tensión en los bornes del panel, usando los datos proporcionados por los diferentes fabricantes, ya que existe una relación entre estos dos parámetros. De esta forma, el circuito de control del regulador de carga sabe cuando éste debe empezar a actuar limitando la tensión y corriente proporcionada por el grupo fotovoltaico.

Esencialmente, existen dos grandes grupos de reguladores: los de tipo shunt o paralelo y los de tipo serie. La misión en ambos casos es la misma y se diferencian en la forma de trabajo y prestaciones de cada uno de estos elementos.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

El regulador shunt se coloca en paralelo con el panel solar y en el sistema de baterías, detecta la tensión en los bornes de la batería, y cuando ese potencial alcanza un valor establecido de aumento, crean una vía de baja resistencia a través del panel solar, derivando con ello la corriente y apartándola de las baterías. Un diodo en serie se coloca entre el regulador de derivación y la batería; este diodo impide que la corriente del acumulador retorne a través del regulador o del panel solar. Como el sistema al que se está dando energía toma corriente de la batería, su tensión en los bornes descenderá hasta que se desconecte el regulador en derivación y se reanude la carga.

Los reguladores tipo serie actúan desconectando el panel solar del sistema de baterías cuando se logra un estado de plena carga. En una palabra, este equipo es equivalente a un interruptor conectado en serie que proporciona una vía de baja resistencia desde el panel solar al sistema de baterías durante la carga, y un circuito abierto entre el panel solar y la batería cuando ésta se encuentra plenamente cargada. En el regulador serie no se disipa nada de energía en uno u otro estado, porque cuando esta en la posición cerrado no hay caída de tensión en el interruptor, y cuando se encuentra en la posición abierto no hay un paso de corriente. La única potencia consumida es la requerida en el interior del equipo para los circuitos de detección y control.

### 5.3.4 Sistemas de medición y control.

Un sistema de medición nos puede dar información de como esta funcionando el sistema solar, la tensión de las baterías, la corriente consumida por los diferentes equipos conexiados, etc. Por lo tanto es necesario contar con una información capaz de hacernos comprender en cada momento el estado en el que se encuentra el sistema.

Son muy abundantes en el mercado los equipos que cumplen con una misión de control del conjunto fotovoltaico, pero fundamentalmente sus medidas se centran en la intensidad producida por el panel solar (mediante amperímetro) y el estado de carga de la batería, cuya función la realiza un voltímetro. Muchos de los sistemas de medición llevan incorporada una alarma acústica; la misión de esta alarma no es solamente indicar que la batería esta baja de carga, sino que puede haber un consumo excesivo en la

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

carga, o que la conversión de energía en los módulos fotovoltaicos es menor a la establecida en un principio.

Existen muchos casos donde los sistemas fotovoltaicos están totalmente inatendidos; para estos casos no se puede usar un sistema de alarma visual o acústico por baja tensión ya que nadie podría verlo ni escucharlo. Se han diseñado unos aparatos que en el momento que la tensión de la batería se iguala a una tensión de referencia (previamente ajustada), hace que se abra un relé que interrumpe la alimentación de la carga conectada a la batería. Cuando la batería se ha recuperado, este contacto de relé vuelve a cerrarse reanudando la alimentación.

Existen también los interruptores horarios que son muy utilizados dentro de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica en aquellos casos donde necesitamos una serie de maniobras (conexiones y desconexiones) de una forma automática, debido a la inaccesibilidad del módulo fotovoltaico. Generalmente los interruptores horarios constan de un dispositivo en donde se programa el encendido y apagado diario; el sistema es accionado por un motor de pasos con oscilador de cuarzo y reserva de funcionamiento de tres días. El consumo que suele ser de 0.5 W, puede considerarse totalmente despreciable en cualquier instalación.

Hay ocasiones en las que la tensión del módulo fotovoltaico no coincide con la tensión que especifica el fabricante de algunos equipos; para esos casos se utiliza un convertidor de continua-continua (cc/cc), ya que sería una mala solución el tomar tensiones parciales del grupo de baterías pues generaría pasos de corriente entre elementos. Mediante el uso de convertidores de cc/cc la descarga de las baterías se hace por igual. Además de que se favorece el funcionamiento del equipo al que se le esta suministrando la energía eléctrica. En el convertidor de cc/cc la corriente es transformada a corriente alterna mediante el uso de un inversor, y una vez que este cambio está realizado, se eleva o reduce el voltaje mediante un transformador hasta el valor adecuado para volver a convertir a corriente continua. De esta forma conseguimos la tensión adecuada.

Existen también los convertidores de continua-alterna (cc/ca) o inversores; su aplicación en sistemas solares fotovoltaicos hace que las instalaciones tengan compatibilidad con otros sistemas de producción de energía eléctrica. Un convertidor

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

cc/ca consta de un circuito electrónico realizado con transistores o tiristores, que cortan la corriente continua alternándola y creando una forma de onda cuadrada. Este tipo de onda puede ser utilizada después de haberla hecho pasar por un transformador que eleva la tensión, obteniendo entonces los denominados convertidores de onda cuadrada, o bien si se filtra, obtenemos una forma de onda sinusoidal igual a la de la red eléctrica.

### **5.4 Aplicaciones de la conversión fotovoltaica de la energía solar**

#### **5.4.1 Telecomunicaciones.**

Son muchos los equipos relacionados con la telecomunicación, en general, que se ubican en lugares de difícil acceso (montañas, cerros, etc.) y, con frecuencia alejados de la red eléctrica convencional. Para estos equipos de comunicación tiene sentido recurrir a la generación de electricidad por medio de sistemas fotovoltaicos, ya que el costo de instalación de este sistema resultaría más barato que el extender la red de transmisión para poder alimentar a los sistemas de telecomunicaciones.

La mayoría de los sistemas fotovoltaicos considerados para los equipos de telecomunicaciones deben de ser autónomos y deben de trabajar en corriente continua. Su diseño debe de prestar atención a todos los aspectos relativos a la durabilidad y seguridad: protección a sobre tensiones, umbrales de regulación de carga, tomas de tierra, protección de partes del módulo fotovoltaico, etc.

#### **5.4.2 Electrificación rural.**

Una gran parte de la población mundial no tiene acceso a las redes de distribución de electricidad. Este contexto y las razones económicas de extensión de la red, han permitido el desarrollo de un importante sector del mercado fotovoltaico destinado a la electrificación de viviendas, escuelas y granjas. Las necesidades energéticas a cubrir y, con ellas, la tipología de los sistemas fotovoltaicos dependen mucho del entorno socioeconómico de cada lugar.

A modo de ejemplo representativo se presenta el consumo doméstico característico del ámbito rural en los países de la Europa mediterránea. Este escenario

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

asume que las lámparas y refrigeradores son de alta eficiencia y las estufas y calentadores funcionan con gas. Se tomaron tres tipos de familias clasificadas de la siguiente forma (tabla 5.4.1)[30]: familias extensas constituidas por matrimonios mayores con hijos casados (viviendo en la misma casa) matrimonios mayores con hijos solteros de edades comprendidas entre 20 y 35 años o matrimonios jóvenes con hijos pequeños y/o algún otro miembro de la familia; familias intermedias, constituidas por matrimonios mayores con hijos mayores de 35 o por matrimonios jóvenes sin hijos; familias reducidas, constituidas por matrimonios mayores sin hijos y por solteros de más 35 años. El hecho de que se establezca el escenario en función de la composición de la familia en lugar de el número de aparatos electrodomésticos, es debido a que la utilización de los aparatos depende de las costumbres particulares de sus habitantes, frecuentemente relacionadas con la composición familiar. Este escenario conduce a sistemas fotovoltaicos cuya potencia pico varía entre 150 y 500 Wp.

Aplicación	Tipo de familia		
	Extensa	Intermedia	Reducida
Iluminación	230	160	120
TV color	184	128	96
Electrodomésticos	300	150	80
Bombeo de agua	72	54	36
Refrigerador.	400	360	320

Tabla 5.4.1 Escenario de consumo de para viviendas rurales. Las cifras representan la energía en W-h consumida diariamente en una vivienda.

#### 5.4.3 Bombeo de agua.

Los recursos hídricos tienden a disminuir en muchas zonas del planeta, en parte debido al aumento de consumo y, en parte, debido a las sequías que se han repetido desde la década de los 70's. En amplias zonas de Africa y Asia existen graves problemas de abastecimiento de agua. En este caso, se entiende la creciente necesidad de energía para bombear agua desde pozos y ríos. Los sistemas de bombeo fotovoltaicos presentan características que los hacen especialmente atractivos para estas regiones. Por un lado, son relativamente pequeños y extremadamente fiables, y por otro lado su particular forma de trabajo, consiste en bombear poco caudal durante mucho tiempo.

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

A grandes rasgos el mercado fotovoltaico ofrece dos tipos de bombas cuyas características se resumen en la tabla 5.4.2 [30].

Los sistemas de cc, son en general, de pequeño tamaño y están constituidos por un generador fotovoltaico que ataca directamente a un motor de corriente continua acoplado a una bomba de superficie. Al variar la irradiación incidente sobre el sistema fotovoltaico, varía la tensión del punto de trabajo que resulta de cruce de las características del sistema fotovoltaico y de la motobomba y con ello varía la velocidad de giro del motor y el caudal de agua que proporciona la bomba.

	Sistema de CC	Sistema de CA
Constitución	Generador y bomba	Generador, bomba e inversor.
Generador Wp	160 - 600	600 - 2000
Voltaje CC (V)	< 60	> 120
Motobomba	flotante	sumergida
Rango(km <sup>2</sup> /día)	1 - 2	5 - 15
Fiabilidad	media	muy elevada
Periodo de mantto	6 - 12 meses	5 - 7 años
Fuente de agua	ríos y pozos	pozo profundo

Tabla 5.4.2 Características de los sistemas de bombeo fotovoltaicos más frecuentes.

Los sistemas de ca están constituidos por un sistema fotovoltaico que cuenta con un inversor de corriente y actúa sobre una motobomba de corriente alterna sumergible. Al variar la irradiación sobre el sistema fotovoltaico, varía la frecuencia y la tensión de salida y, con ello varía la velocidad de giro del motor y el caudal bombeado.

El tipo de sistema a emplear en cada caso está fuertemente condicionado por las características de la fuente de agua a la que esta destinado:

Por un lado existen los ríos, desde los que únicamente se bombea para aplicaciones de riego, ya que la calidad sanitaria del agua es con frecuencia muy pobre. Las alturas de bombeo son, típicamente inferiores a 5 m de profundidad. Las bombas fotovoltaicas tienen aquí su aplicación para irrigar terrenos con una superficie de 1 a 1.5 km<sup>2</sup> por día, que corresponde a regadíos de superficie inferior a una hectárea.

Los pozos abiertos que alcanzan las aguas superficiales, típicamente tienen una profundidad entre 5 y 20 m; su capacidad para dar agua es inferior a 10 m<sup>3</sup>/día y exhiben

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

un comportamiento fuertemente estacional llegando a secarse totalmente al final de la época de sequía.

Por último existen los pozos profundos de 15 y 70 m de profundidad, con una capacidad de 6 pulgadas de diámetro. El rango de capacidades varía entre 2,000 y 15,000 l/h. se trata en general de fuentes de agua de muy buena calidad. Los sistemas fotovoltaicos de ca representan una alternativa especialmente interesante en terrenos con una superficie que fluctúa en un rango de 5 a 15 km<sup>2</sup> por día. El pozo profundo de muchas regiones del mundo tiene una profundidad de 20 a 30 m y una capacidad de abastecimiento de agua de 20 y 50 m<sup>3</sup> por día lo que encaja perfectamente en dicho rango.

### 5.4.4 Conexión a la red eléctrica.

En términos estrictamente económicos, el suministro de energía eléctrica de origen fotovoltaico a la red de transmisión sólo se justifica si su costo es comparable al de las fuentes de energía convencional. Sin embargo otras razones como el futuro suministro de energía, la reducción de emisiones contaminantes, etc. han dado importancia a la generación fotovoltaica. En Carrisa, California, fue construida una central fotovoltaica en 1983 con una potencia nominal de 6 MWp. En 1993 un consorcio formado por las compañías Fenosa (española) y RWE de origen alemán construyó una central de 1 MWp en Toledo España. Para esta central los módulos fotovoltaicos se instalaron sobre estructuras estáticas orientadas al sur y formando un ángulo de 30 grados con la horizontal, y otra parte se encuentra sobre seguidores de un solo eje horizontal y orientado en la dirección norte-sur.

Estas centrales han demostrado una gran fiabilidad, así como el escaso tiempo en que se tardan en construir las, en general el tiempo es inferior a un año, en donde se derivan obvias ventajas financieras.

Por otra parte se tienen sistemas que intercambian energía con la red, se trata en realidad de consumidores convencionales de la red que, además, incluyen en su instalación eléctrica un sistema fotovoltaico conectado a la red, tal y como se muestra en la figura 5.4.1. Esta disposición consumidor-generador puede intercambiar energía con la red, es

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

decir, suministrar (vender) energía a la red en los momentos en que su generación es superior a su consumo, y extraer (comprar) energía de la red en caso contrario.

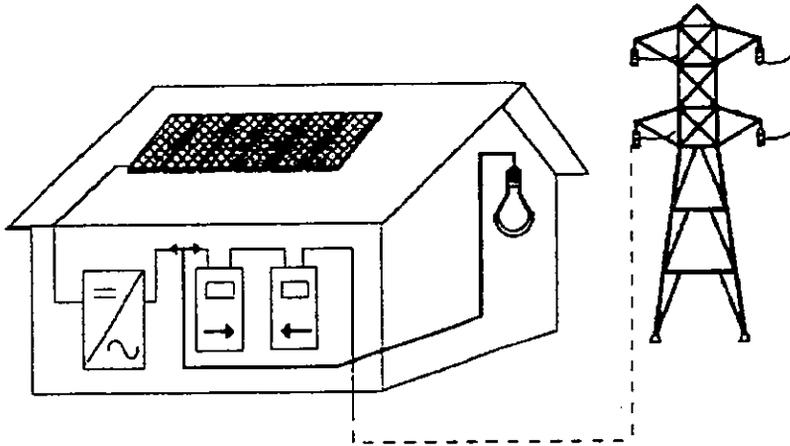


Figura 4.5.1

Para estos sistemas de intercambio de energía se debe de tener mucho cuidado en aspectos que puedan afectar la seguridad de los ocupantes. Para ello se recomienda tener las siguientes consideraciones[30]:

1. No sobrepasar en el generador la tensión nominal de 120 V.
2. Separar los cables correspondientes a los potenciales positivo y negativo en la caja de conexión que recoge las líneas procedentes del generador fotovoltaico y en la entrada del inversor.
3. Utilizar cables que resistan la intemperie y dimensionar apropiadamente su aislamiento para que no exista riesgo alguno de incendio, aun en la eventualidad de cortocircuitos en el generador fotovoltaico.
4. Instalar descargadores de sobretensión entre ambos polos y tierra en la caja de conexión que recoge las líneas procedentes del generador fotovoltaico y en la entrada del inversor.

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

5. Con el objeto de no provocar averías en la red, ni dar origen a condiciones peligrosas de trabajo para el personal encargado de mantenimiento y explotación, la conexión y desconexión a la red se dará si las condiciones de la red están fuera de determinados márgenes como tensión, frecuencia, etc.

### **5.4.5 Otras aplicaciones.**

Se podría hablar de un gran número de aplicaciones de la energía eléctrica fotovoltaica, pero por una razón u otra no es posible enlistar todas; a continuación se mencionan algunas de ellas:

- Frigoríficos para medicinas. En la actualidad y desgraciadamente en las comunidades rurales remotas no es posible contar con un suministro de energía eléctrica y en consecuencia se limita el uso de medicinas, debido a que algunas de ellas como las vacunas requieren de un sistema de refrigeración para que puedan conservarse. Hasta 1994 se encontraban funcionando en el mundo más de 3,000 frigoríficos con un sistema fotovoltaico para suministrar la energía eléctrica para su funcionamiento.

- Postes de iluminación pública. La necesidad de iluminación pública en diferentes lugares ( caminos, cruces, parques, etc.) combinada con un escaso consumo energético (entre 350 y 500 Wh/día por poste de alumbrado) ha hecho que las "farolas fotovoltaicas" gocen de mucha aceptación en países europeos. Estas farolas incorporan una batería y uno o dos módulos fotovoltaicos, para garantizar el buen funcionamiento del sistema de alumbrado.

- Conexión a la red con baterías de acumulación. Algunas terminales de línea de los tendidos eléctricos sufren problemas de calidad de suministro, como consecuencia de la poca capacidad de la línea en relación con el consumo que debe alimentar. Para solucionarlo se ha propuesto algunas alternativas basadas en la combinación de un generador fotovoltaico, un inversor y una batería de acumulación. El conjunto suministra en el punto problemático de la red, energía procedente del generador fotovoltaico, durante el día, y de la batería durante las horas de la noche con mayor consumo. La recarga de la batería puede efectuarse desde el generador fotovoltaico o desde la

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

propia red aprovechando las horas de menor consumo. De esta manera, el sistema permite disminuir la carga aparente de la red en los momentos de mayor consumo.

### 5.5 Impactos ambientales por la conversión fotovoltaica de la energía solar.

La utilización de sistemas fotovoltaicos para convertir la energía solar a energía eléctrica no produce ningún contaminante que pueda afectar al medio ambiente. Al igual que cualquier otra planta destinada a la generación de energía eléctrica, se tendría que disponer de una superficies determinada que en el peor de los casos podría ser un terreno apropiado para la agricultura. Pero como la mayor parte de la radiación solar se da en zonas desérticas este hecho beneficia la conversión fotovoltaica de la energía solar, ya que no afectaría tierras de cultivo o ganadería, o como en la generación hidroeléctrica que en ocasiones se tiene que desplazar a comunidades de las tierras en las que se va a crear el vaso de almacenamiento.

De hecho la única inconveniencia que presentaría una planta de generación fotovoltaica es la ubicación de la misma, pues estaría alejada de los centros de consumo. La construcción de la planta generadora de energía podría en un momento dado ocasionar un desajuste en las poblaciones cercanas a la construcción de esta u ocasionar nuevos asentamientos de trabajadores, pero como ya se ha mencionado este fenómeno se da en cualquier construcción, no solo de plantas generadoras, sino también en cualquier construcción de industrias o fábricas.

El hecho es que la conversión fotovoltaica de la energía solar es una de las formas más limpias para producir energía eléctrica.

### 5.6 Disponibilidad de la energía fotovoltaica en México.

En cierta forma las plantas de generación fotovoltaica y generación fototérmica son parecidas, debido a que en las dos se utiliza la radiación solar para producir energía. Debido a esto, el mapa de radiación solar que fue elaborado por el Instituto de Ingeniería y se encuentra en el capítulo cuatro (figura 4.5.1), es aplicable también para determinar las regiones en donde se da el mayor índice de radiación solar en la República

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

Mexicana. De esta forma se encuentra que la parte norte del país, principalmente en los estados de Chihuahua y Sonora se tiene la mayor incidencia de energía solar, dando la oportunidad de implementar plantas generadoras con tecnología fotovoltaica para producir energía eléctrica.

Se encuentran también otros estados en el país como son Zacatecas, Durango y Guanajuato que tienen un índice aceptable de radiación solar; en estos estados tal vez no es conveniente colocar una planta generadora, pero si es posible adecuar la tecnología fotovoltaica para electrificar comunidades rurales o para bombear agua de pozos, ya que son estados en donde se dedican a la agricultura y por tal motivo es necesario que siempre se cuente con un sistema de riego.

Es de esta forma como se puede aplicar la conversión fotovoltaica de la energía solar en el país en donde la mayor parte del año se tiene sin ningún costo la energía de la radiación solar.

## CAPÍTULO 6

### UTILIZACIÓN DE LA BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

#### 6.1 Generalidades sobre la biomasa.

Biomasa es un termino genérico referido a cualquier producto biológico que pueda convertirse en energía útil (incluye madera, productos vegetales y animales y todo tipo de residuos orgánicos).

Existen dos fuentes productoras de biomasa, las fuentes terrestres y las fuentes marinas. Dentro de las fuentes terrestres se puede mencionar la corteza de los arboles, los residuos de las actividades forestales (que representan cerca de la mitad de toda la madera cortada), pastos de diferentes tipos y residuos resultantes de los cultivos como lo son los granos, la caña de azúcar, el sorgo, mandioca, soya, girasol, etc. En lo que respecta a las fuentes marinas se encuentran las plantas acuáticas, en particular las micro y macro algas marinas, las algas de agua dulce, y plantas como el lirio y la lenteja de agua. Las fuentes terrestres se encuentran mucho mejor definidas y cuantificadas y han sido más estudiadas que las fuentes marinas.

##### 6.1.1 Producción de biomasa.

La producción de la biomasa de origen vegetal ocurre con ayuda de la energía solar a través de la fotosíntesis, en la que el agua y el bióxido de carbono de la atmósfera son transformados en materia orgánica y oxígeno. La eficiencia de conversión de energía solar en energía almacenada en forma de materia orgánica (a través de la fotosíntesis) es muy baja, estimándose su límite máximo en un 3%[33]. La eficiencia fotosintética es importante porque determina la producción de biomasa por unidad de superficie y por tanto, el máximo potencial energético del recurso.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

La producción máxima de biomasa por unidad de superficie depende de factores genéticos y ambientales directamente relacionados con, entre otros, la fracción de suelo cubierto por la vegetación, la duración de la estación de crecimiento, la razón neta de promedio de actividad fotosintética entre cosechas, la temperatura ambiente, la humedad y la duración del día (brillo solar).

La energía primaria obtenida de la biomasa proviene de su contenido de carbohidratos, mismos que constituyen el principal producto de la fotosíntesis, apareciendo en forma de azúcares, almidones o celulosa. Los azúcares y almidones requieren para su explotación energética del cultivo de especies específicas (por ejemplo, caña de azúcar, remolacha o sorgo dulce para los azúcares y maíz para los almidones). La celulosa es el principal material estructural de las plantas y está presente en toda la vegetación, particularmente en los desperdicios agrícolas. A la celulosa corresponde casi una tercera parte del peso de todos los árboles, pastos y pajas.

La energía recuperable depende, desde el punto de vista bioquímico, tanto del contenido de carbohidratos como de la forma de éstos en la biomasa. La lignocelulosa es la porción estructural de las plantas y contiene principalmente celulosa en estrecha asociación física y química con lignina. La celulosa es la parte esencial de las paredes celulares de la madera y, junto con la hemicelulosa, constituye el 95% de la madera (el 5% restante está compuesto de aceites, azúcares, resinas, grasas, ceras, alcaloides, etc.).

La estructura y propiedades físicas de la madera están determinadas por su contenido porcentual de celulosa, hemicelulosa y lignina. Las maderas suaves (árboles de hojas anchas) poseen mayor cantidad de lignina y contienen manano (polisacárido convertible en manosa) en su parte hemicelulósica. Por otra parte, las maderas duras (coníferas) contienen un polímero de xilosa (azúcar del grupo de las pentosas) en lugar de manano. Ambos tipos de madera difieren considerablemente en sus características como combustibles. Las maderas suaves se queman más fácil y rápidamente con una flama más intensa debido a su mayor contenido de resinas volátiles y aceite (brea), que tienen un contenido energético por unidad de masa del orden del doble que el de la madera.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

La hemicelulosa es también un hidrocarburo, pero se diferencia de la celulosa en que es amorfo, se hidroliza más fácilmente y esta compuesto por pentosa más que por hexosa.

La lignina es la parte de la pared de la célula que no es carbohidrato y representa entre el 18 y 28% de la madera; es un polímero, compuesto por unidades de fenil propano, muy aromático, difícilmente degradable por microorganismos y que protege a la parte celulósica de la madera debiendo removerse antes del proceso de fermentación.

Las tecnologías más adecuadas para convertir la biomasa en energía y los productos que se obtienen en ese proceso dependen, entre otros factores, de:

- a) La clase de la biomasa.
- b) Su contenido de humedad.
- c) Las condiciones del proceso de conversión (relación biomasa-aire, tasa de alimentación de la materia, tamaño de las partículas, etc.).
- d) El uso final del producto energético.

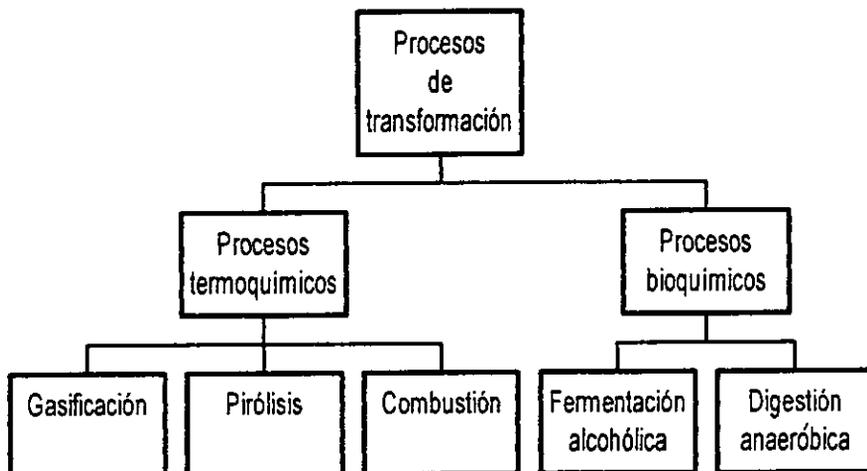
### 6.2 Procesos de transformación de biomasa en energía.

Algunos combustibles pueden obtenerse de la biomasa directamente por extracción (plantas productoras de hidrocarburos), pero es más normal someter la biomasa a distintas manipulaciones, según su naturaleza y contenido de humedad, para su transformación en combustible. Estas transformaciones pueden dividirse en dos grupos, de acuerdo con la naturaleza de los procesos implicados. Por una parte tenemos a los procesos termoquímicos y por otra los procesos bioquímicos.

Los procesos termoquímicos se basan en someter a la biomasa a la acción de altas temperaturas. Los materiales más idóneos para la conversión termoquímica son los de bajo contenido en humedad y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, cascara, etc. La biomasa con alto grado de humedad puede transformarse mediante procesos bioquímicos. En la actualidad, las técnicas más desarrolladas son, por un lado, la fermentación de materiales azucarados, celulósicos o con un alto contenido de almidón para la producción de etanol y por otro, la biomatanación de residuos con un alto

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

contenido en celulosa (residuos agrícolas, ganaderos, urbanos, plantas acuáticas, etc.) para la generación de metano.



En la tabla 6.1.1 [20] se presentan las eficiencias promedio de conversión para diferentes procesos de aprovechamiento energético de la biomasa.

<b>Procesos.</b>	<b>Eficiencias.</b>
<b>Combustión directa:</b> (madera a vapor)	60 - 80 %
(madera a electricidad)	20 - 30 %
<b>Biometanación</b>	30 - 65 %
<b>fermentación:</b> (granos a etanol)	30%
(algas a etanol)	30%
(frutas y granos a etanol)	75%
(madera a etanol)	65%
(desperdicios a metano)	55%
(trigo a etanol)	11%
<b>Pirólisis:</b>	23 - 35 %
<b>Gasificación:</b> (maderas y residuos vegetales)	65- 70 %
(desperdicios animales)	40%
(desperdicios urbanos)	50- 60 %

Gobernament Institutes Inc. Rochervilles, Maryland EE.UU.

Tabla 6.1.1

### 6.2.1 Gasificación.

La tecnología de gasificación de biomasa tiene sus antecedentes directos en los gasificadores de carbón, que tuvieron un desarrollo continuo desde la primera mitad del siglo XIX hasta la segunda década del siglo XX cuando el petróleo se estableció como el combustible deseable por excelencia. En 1839 se creó el primer dispositivo gasificador. En 1878 Dowson introdujo el primer gasificador de succión. En 1889 una planta de sulfato de amonio empezó a operar junto con un gasificador. Entre los años de 1920 y 1930 los gasificadores fueron desplazados del mercado aunque siguieron empleándose en localidades alejadas como minas, que disponían de arbustos para alimentar a los gasificadores. En los años treinta se desarrollaron unidades ligeras con tiro invertido para la propulsión de automóviles. Durante la Segunda Guerra Mundial la escasez de combustibles hizo renacer el interés por los gasificadores móviles y estacionarios en países como Canadá, Inglaterra, Suecia y la anterior Unión Soviética. Hacia principios de los años cincuenta se abandonó la producción comercial de gasificadores. El incremento en el precio del petróleo a principios de los años setentas despertó el interés nuevamente por la tecnología de gasificación a partir de la biomasa.

- Proceso de la gasificación.

La gasificación es un proceso de combustión parcial usado para transformar la biomasa en una mezcla de gases que contienen monóxido de carbono e hidrogeno como principales combustibles. Los procesos de gasificación pueden ser directos o indirectos. El primero utiliza aire o calor para producir una combustión parcial en un reactor; el segundo transfiere el calor al reactor a través de sus paredes usando intercambiadores de calor o arena caliente.

El proceso de gasificación produce gases en un rango de bajo a alto contenido calorífico, dependiendo de la utilización de aire u oxígeno puro, así como también depende de la utilización de temperaturas y presiones de la reacción. Después de que se ha gasificado la biomasa, el gas resultante debe ser purificado antes de ser almacenado, transportado o empleado.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Dependiendo de su construcción y su funcionamiento existen diferentes tipos de gasificadores para biomasa, a continuación se mencionan algunos de ellos.

- Gasificador de tiro directo. Este tipo de gasificador es el más antiguo y sencillo que existe. En este gasificador la toma de aire se encuentra en el fondo del mismo y los gases salen por la parte de arriba. Cerca de la parrilla, casi en el fondo es donde se dan las reacciones de combustión, que van seguidas de reacciones de reducción algo más arriba en el gasificador. En la parte alta del gasificador tiene lugar el calentamiento de la biomasa como resultado de la transferencia de calor, por convección forzada y radiación de las zonas inferiores. Este tipo de gasificador tiene la ventaja de funcionar con muchos tipos de biomasa (aserrín, cascaras de cereales, etc.), pero tiene la desventaja de arrastrar alquitrán con la corriente de gas producido.

- Gasificador de tiro invertido. En este gasificador el gas producido sale por el fondo del aparato de modo que el combustible y el gas se mueven en una misma dirección. En su camino hacia abajo, los productos ácidos y alquitranes de la destilación procedentes del combustible deben pasar a través de un lecho incandescente de carbón vegetal y se transforman por ello en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano. La principal ventaja de los gasificadores de tiro invertido radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán que puede ser utilizado para accionar motores de combustión interna.

Sin embargo tienen la imposibilidad de funcionar con una serie de combustibles no elaborados, como por ejemplo la biomasa sólida tiene que ser granulada antes de ser utilizada y la biomasa blanda y de baja densidad ocasiona problemas de circulación y una caída excesiva de presión en el gasificador.

- Gasificador de lecho fluidizado. Este diseño de gasificador pretende eliminar las dificultades que presentan los gasificadores de tiro directo y tiro invertido. Para ello se sopla aire a través de un lecho de partículas sólidas a una velocidad suficiente para mantener las partículas en estado de suspensión. Se comienza por calentar externamente el lecho y la biomasa se introduce tan pronto como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen por el fondo del reactor, se mezclan muy rápidamente con el material del lecho y se calientan casi

instantáneamente alcanzando la temperatura del lecho. Como resultado de este tratamiento, el combustible se piróliza muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes, con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos. En la fase de gas se produce una nueva gasificación y reacciones de transformación de los alquitranes. La mayoría de los sistemas van equipados con un ciclón interno, a fin de reducir al mínimo el escape de alquitrán por soplado.

### 6.2.2 Pirólisis.

Los equipos para la obtención de gas con un bajo contenido calorífico a partir del carbón mediante pirólisis, fueron desarrollados durante el siglo XIX y principios del siglo XX. En la mayor parte de las ciudades existían plantas que generaban gas para iluminación y usos comerciales. Los esfuerzos de desarrollo se centraban en ese momento en sistemas que permitieran suministrar automáticamente el combustible y la agitación y remoción de cenizas. Existe un gran número de ejemplos de motores y gasificadores por destilación destructiva de biomasa que datan de principios de siglo.

- Proceso de la pirólisis.

La pirólisis es un tipo de gasificación, descompone la biomasa, nuevamente en procesos con ausencia de oxígeno, con temperaturas de hasta 200°C. Este proceso se ha utilizado tradicionalmente para producir carbón de leña.

Dado que las temperaturas usadas en este proceso son más bajas que las de otros métodos de gasificación, los productos finales son diferentes. El calentamiento lento produce proporciones iguales de gas, líquidos y carbón, pero la producción puede variar cambiando los componentes, la temperatura y el tiempo en el reactor. Con temperaturas cercanas a los 650°C se producen gases que constan de monóxido de carbono, hidrógeno, bióxido de carbono y pequeñas cantidades de metano etano y otros hidrocarburos. Cuando las temperaturas se controlan alrededor de los 250°C se obtienen principalmente líquidos que pueden ser similares al petróleo crudo y generalmente deben ser tratados antes que se puedan usar como combustibles líquidos, estos combustibles líquidos presentan un bajo contenido de azufre cenizas y nitrógeno y al quemarse crean

pocos problemas de contaminación ambiental. También se pueden tener productos finales sólidos como el carbón y las cenizas.

### 6.2.3 Combustión directa.

La combustión directa de la madera y otras plantas siempre ha sido una fuente primaria de energía para los seres humanos. Este tipo particular de conversión de biomasa es el más antiguo y el más usado en la actualidad, principalmente porque casi cualquier tipo de biomasa puede quemarse para producir calor, vapor, o electricidad.

En la actualidad la tecnología para las plantas de energía que utilizan la combustión directa de la madera los desechos de la madera, se encuentra muy desarrollada, ya que se han incorporado a los quemadores precipitadores electrostáticos, filtros y otros colectores que limitan la producción de cenizas producidas durante la combustión. Los sistemas de combustión directa varían considerablemente en tamaño. Las grandes plantas de energía pueden producir hasta 400 megawatts de energía, mientras que los sistemas pequeños incluyendo los usados para la calefacción y las estufas domésticas de leña bien diseñados, es posible lograr una eficiencia de hasta un 60-80 %. La mayor parte de los sistemas de combustión directa puede tomar cualquier tipo de biomasa siempre y cuando su contenido de humedad sea de menos del 60 %. Mientras que la madera y sus residuos es el tipo de biomasa más comúnmente utilizado, una gran variedad de otros residuos agrícolas también puede usarse en este proceso.

Para el aprovechamiento energético de los desechos sólidos urbanos (basura) mediante combustión directa, existen básicamente dos procesos:

- a) La incineración convencional, en que los desechos se reciben y queman en un sistema de emparrillado inclinado.
- b) La combustión de material en suspensión, que para homogeneizar el material alimentado al sistema de combustión se emplean separadores magnéticos, sistemas de cernido, etc.

#### 6.2.4 Fermentación alcohólica.

Los procesos de fermentación de alcohol y su destilación son conocidos y empleados por el ser humano desde la antigüedad para la producción de vinos. La utilización de este proceso para obtener energía fue utilizado en Estados Unidos en 1864, fecha en la que el sistema de alumbrado era con lámparas que utilizaban combustibles; lo que se hizo fue fermentar maíz para producir alcohol y utilizarlo como combustible en las lámparas. La fermentación de azúcar de madera se logró en 1910. Posteriormente, durante la década de los cuarenta y como consecuencia de la Segunda Guerra Mundial se intensificaron los esfuerzos por obtener combustibles líquidos de la biomasa. Los intentos por mejorar este proceso fueron abandonados durante la década de los años cincuenta cuando el precio del petróleo era muy barato, pero el interés volvió en la década de los años setenta cuando el precio del petróleo sufrió un incremento desmedido.

- Proceso de la fermentación alcohólica.

Durante siglos se ha sabido que fermentar granos con levadura produce alcohol de grano. El proceso también funciona con otros materiales de biomasa. En la fermentación, la levadura descompone carbohidratos (almidones, en el caso de los granos o azúcar del jugo de la caña) en alcohol etyl (etanol). Los azúcares fermentables pueden obtenerse directamente de ciertas plantas, como la caña de azúcar, la remolacha o mediante el procesamiento de materiales de celulosa como la madera, paja, o desperdicios agrícolas pretratados.

El etanol es un alcohol empleado como combustible en sustitución de la gasolina o se hace una mezcla de los dos, como por ejemplo en Brasil; Estados Unidos se utiliza 90% gasolina y 10% alcohol. También se utiliza como insumo en la obtención de productos químicos (vitaminas, antibióticos, solventes y otros).

El etanol puede obtenerse a través de dos procesos: a) Hidrólisis, en este proceso se extraen azúcares al convertir almidones y celulosa en glucosa y eliminando partículas sólidas. El proceso de hidrólisis puede ser químico (hidrólisis ácida) o enzimático (hidrólisis de enzimas), y b) Fermentación, en este proceso se convierte, mediante levadura, la glucosa en etanol, bióxido de carbono y linaza, un subproducto no fermentable que

también puede emplearse como combustible, como materia prima para la biometanación o si contiene proteínas, como complemento alimenticio de animales.

La caña de azúcar, el sorgo dulce, las frutas y la remolacha son los cultivos que pueden ser fácilmente convertibles en etanol; los azúcares base de la fermentación se obtienen con pretratamientos suaves, tales como prensado, corte, o lavado.

La hidrólisis enzimática es preferida a la hidrólisis ácida por no requerir equipos resistentes a la corrosión (que elevan el costo), tiene un factor de conversión cercano al 90% comparado un 50% en la hidrólisis ácida.

#### 6.2.5 Digestión anaeróbica.

Como su nombre lo sugiere, este proceso de transformación de la biomasa se lleva a cabo sin la presencia de aire. Durante el siglo XIX se ligo por primera vez la producción natural de gas con las actividades metabólicas de organismos vivos. En 1871 se presentó, en una exhibición de tecnología en Londres, el principio de obtención de un gas combustible a partir de desechos de granja, vegetales y aguas residuales domésticas. En 1883 Pasteur y Gayón concluyeron que la fermentación de estiércol en ausencia de aire producía un gas que podría ser utilizado para calefacción e iluminación. En 1896 el biogás fue empleado en Exeter, Inglaterra, en sistema de alumbrado publico. En 1911 la ciudad de Birmingham contaba ya con un digester municipal. Los mayores esfuerzos en la investigación de la digestión anaeróbica se realizaron entre los años de 1930 y 1940.

- Proceso de la digestión anaeróbica.

El proceso de la digestión anaeróbica también es conocido como biometanación, en este los desperdicios orgánicos o biomasa con alto contenido de humedad se alimenta a un recipiente llamado digester biológico. Por la acción de microorganismos adecuados a la materia orgánica se transforma en "biogás" (una mezcla de bióxido de carbono y metano esencialmente), que puede aprovecharse como combustible, produciéndose además lodos residuales empleables como mejoradores de suelos o fertilizantes.

El tratamiento de la materia orgánica mediante la digestión anaeróbica cumple así con tres funciones:

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

1. Producir un gas combustible.
2. Producir mejoradores de suelos, fertilizantes o complementos de alimentos
3. Reducir la contaminación ambiental producida por la disposición de desechos no tratados.

Los procesos de descomposición de materia orgánica dependen del tipo de microorganismos que producen la hidrólisis enzimática de la materia orgánica. Estos procesos pueden ser en presencia de oxígeno o en ausencia del mismo. Para la producción de biogás se emplean los procesos anaeróbicos.

La biodigestión se realiza en tres procesos degenerativos:

- a) Hidrólisis enzimática, en que los sólidos fermentables son convertidos en compuestos solubles.
- b) Acidulación, en que los compuestos solubles (azúcares), se convierten en ácidos orgánicos volátiles, como el acético, el bórico y el propionico.
- c) Metanación, en que los ácidos orgánicos volátiles se convierten en biogás mediante la acción de una familia de bacterias.

Los procesos de digestión anaeróbica se pueden realizar en un rango de temperaturas que va desde los 10°C hasta los 60°C y a la presión atmosférica.

Según la forma de alimentación pueden distinguirse dos tipos diferentes de biodigestores: intermitentes y continuos. Cuando la alimentación es intermitente el digestor se llena y se cierra. La producción de biogás se manifiesta algún tiempo después, alcanza un máximo y vuelve a declinar. Al llegar a una producción muy pequeña de biogás el digestor se destapa, se limpia y se cierra nuevamente para repetir el ciclo. Esto ocurre típicamente cada 3 o 6 meses, aunque este tiempo puede reducirse drásticamente calentando y/o agitando el digestor. En los digestores de alimentación continua, una vez establecidas las condiciones normales de operación, la materia orgánica se alimenta diariamente (una o dos veces por día) de acuerdo al volumen del digestor. Los digestores intermitentes suelen requerir una inversión bastante menor que los de alimentación continua, pero su eficiencia de conversión es menor y su tiempo de retención es bastante mayor que los del digestor de alimentación continua.

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

Para aumentar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica se han propuesto diferentes pretratamientos de la materia orgánica. Entre ellos procesos físicos (fraccionando, reducción del tamaño de los sólidos en la carga, control de humedad); calorífico ( ebullición, vaporización y congelamiento); químicos (ácidos o alcalinos o uso de SO<sub>2</sub>).

Los sistemas anaeróbicos pueden variar notablemente en tamaño, desde grandes sistemas industriales, que manejan 400,000 pies cúbicos de material y producen 1.5 millones de pies cúbicos de biogás por día, hasta pequeños sistemas agrícolas que manejan 400 pies cúbicos de material y producen 6,000 pies cúbicos de biogás al día.

### **6.3 La Biomasa y los impactos ambientales.**

Debido a la naturaleza orgánica, la biomasa no participa de muchos de los inconvenientes de los combustibles fósiles, es decir, posee las siguientes ventajas:

- Presenta escaso contenido en azufre.
- no forma escorias en su combustión.
- Tiene bajo contenido de cenizas.

Las ventajas ambientales de la utilización de biomasa para producir energía aprovechable, son muy importantes. La transformación de la biomasa no provoca lluvia ácida porque contiene poco azufre y nitrógeno. Si se explota de manera sustancial, no provoca aumento neto en el bióxido de carbono (la causa principal de los gases del efecto invernadero) y el uso de combustibles de alcohol reduce las emisiones de monóxido de carbono.

Los intereses ambientales se relacionan también con los posibles efectos de manejo irresponsable y no sostenido del desarrollo de la biomasa. Un aumento incontrolado de la producción de energía con biomasa tiene el potencial de provocar serios problemas ambientales. Los aspectos concernientes al uso de la tierra y el aumento de la contaminación son otras causas de preocupación. En lo que al uso del suelo se refiere, se tienen los temores de que los encargados de desarrollar biomasa a partir de la madera de los árboles caigan en la tentación de agotar los bosques, ya que se podría dejar

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

de plantar la misma cantidad de árboles que se talan. También existe la preocupación de que las tierras húmedas en vez de que se conserven tal cual, se acondicionen para producir un determinado cultivo de biomasa, ya que las tierras húmedas son raras y albergan ecosistemas frágiles. En las tierras agrícolas se debe tener cuidado el no generar una competencia con la producción de alimentos, ya que sería contraproducente el dejar de cultivar productos alimenticios para producir biomasa. La pérdida de la fertilidad en el suelo debido a un uso excesivo es otro temor ecológico latente. Para evitar estos posibles problemas del uso de la tierra, la producción de la biomasa debe ser variada y sostenida, teniendo cuidado de conservar los ecosistemas locales.

Es posible que los problemas de contaminación proveniente del desarrollo de la biomasa en un futuro no lejano no sean muy fáciles de resolver. El cada vez mayor uso de fertilizantes y organismos tratados con la bioingeniería en las granjas, la contaminación urbana de aire, agua y tierras, son aspectos reales que deben de ser estudiados.

En lo que respecta a los costos de la producción de energía eléctrica con biomasa se tienen diferentes precios. Un estudio del uso de la biomasa en Honduras mostró que una planta de energía eficiente que usará todos los desechos de un gran aserradero y vende la energía a la red eléctrica en menos de 5 centavos de dólar por kilowatt/hora, tendría una tasa de recuperación de su inversión del 75% y se pagaría la inversión inicial en 3 años. Un proyecto de la Agencia de Estados Unidos para el desarrollo Internacional estudió el potencial de los residuos de la caña de azúcar para generar energía eléctrica y venderla a la red eléctrica en diversos países. En Tailandia el equipo de investigación descubrió que una planta de energía de caña abastecería energía eléctrica con un costo de 28 a 32 centavos de dólar por kilowatt/hora. Costo que estaría por debajo del costo de la energía generada en ese país con carbón importado.

### **6.4 Utilización de la biomasa en el mundo.**

La aplicación de la biomasa en todo el mundo esta bien establecida. La biomasa es usada para sobrevivir: aproximadamente 2,500 millones de personas depende de la biomasa para actividades tales como cocinar, calentar y alumbrar. El uso de la biomasa

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

está extendido, es muy diverso y se enfoca a los recursos que hay localmente. Las tierras forestales y agrícolas, tierras áridas pantanosas, lagunas y mares pueden significar excelentes recursos de biomasa.

Los países industrializados y los que se encuentran en vías de desarrollo, por igual, pueden beneficiarse del uso de este recurso natural, aunque a la fecha, los últimos utilizan los recursos de la biomasa mucho más que los primeros. La biomasa representa aproximadamente entre el 12 ó 13 % de la producción mundial de energía, mientras que en los países en vías de desarrollo esa cantidad puede ser de hasta el 50 %.

El uso más extendido de la biomasa para producir energía se da en las zonas rurales de los países en desarrollo. Se han señalado algunos países en los que la producción de energía depende de la biomasa; por ejemplo Nepal, Etiopía y Haití derivan casi toda su energía de la biomasa; Kenia, Maldivas, India, Indonesia, Sri Lanka y Mauritania derivan más de la mitad; China, Papua Nueva Guinea, Samoa y Cabo verde, más de la tercera parte; Brasil, una cuarta parte; Egipto y Marruecos una quinta parte.

Brasil cuenta con el programa más grande en el mundo de alcohol combustible (etanol). El alcohol se produce a partir del azúcar y el almidón. El programa brasileño para producir etanol de la caña de azúcar comenzó en 1975 y ha dado por resultado más de cuatro millones de automóviles en ese país que funcionan a base de etanol. La forma de etanol que más se usa en Brasil es una mezcla de 95% de etanol y 5% de agua (en algunas ocasiones se utiliza hasta un 3% de gasolina).

El uso de etanol esta muy extendido en Brasil. Un 90% de los automóviles nuevos funcionan a base de etanol puro y el 10% restante opera con una mezcla de 20% etanol y 80% gasolina. El país puede producir esta cantidad de etanol usando sólo el 1 % del total de su tierra laborable, y esto se debe, principalmente al hecho de que la caña de azúcar puede cultivarse casi todo el año en Brasil. Sin embargo el programa recibe ayuda del gobierno.

El formidable éxito del programa de Brasil realmente ha ocasionado algunos problemas. En la actualidad el país esta sufriendo escasez de etanol porque los más de 15 mil millones de litros producidos anualmente no alcanzan a cubrir la demanda del

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

consumidor. El gobierno Brasileño está tratando de importar etanol para cubrir esa fuerte demanda.

En Estados Unidos entre el 5% y el 18% de la energía consumida lo proporciona la biomasa. De eso se calcula que el 90% proviene del proceso de combustión directa de la madera y sus residuos. El uso de la biomasa ha aumentado de 1980 con una capacidad instalada de 200 megawatts a más de 7,700 megawatts en 1990. La biomasa representa el 50 % de la cantidad de energía renovable actualmente producida en dicho país. La búsqueda de combustibles más limpios y las crecientes restricciones en cuanto a la utilización de los energéticos en la Tierra son algunas de las razones en el aumento de la utilización de la biomasa. Casi la mitad de la población de los Estados Unidos vive en zonas que exceden los estándares de ozono de la calidad nacional del aire.

Algunos estados han desarrollado más que otros la producción de energía utilizando la biomasa como fuente. En Florida, las plantas de energía generan más de 700 megawatts de energía de la biomasa y 23 % de los requerimientos de carga fundamental de Maine, se cubren con instalaciones eléctricas de biomasa. Hawaii genera casi la mitad de su energía de fuentes renovables y las biomasa proporciona casi el 50 % .

En Canadá, la biomasa representa un contribuidor importante para el abastecimiento nacional de energía. En 1990, la energía producida con biomasa igualó la energía producida por la industria nuclear y representó aproximadamente la mitad de la producida a partir de carbón. Algunas regiones usan la biomasa a un mayor grado, la biomasa representa el 12 % del abastecimiento de energía en la región del Atlántico, y 23% en Columbia Británica. El uso de biomasa en Canadá se está extendiendo a numerosos sectores, como lo son hospitales, instituciones educativas y grandes aplicaciones industriales como la fabricación de automóviles y el procesamiento de alimentos.

La India está expandiendo su ya establecida red de digestores de biogás, que suministra composta a granjeros y electricidad a comunidades locales. En Finlandia se está cubriendo casi el 20 % de sus necesidades energéticas gracias a la biomasa, se

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

espera que incremente su autosuficiencia energética en un 32 a 35 % mediante el uso de turba y elementos de bosques.

### 6.5 Aprovechamiento de la biomasa en México.

La tecnología de aprovechamiento de la biomasa mas estudiada en México, y quizás la única investigada seriamente y de manera sostenida, es la digestión anaeróbica o la biometanación. Diversas instituciones tienen desde hace varios años proyectos de investigación, desarrollo y demostración en ese campo. Entre las instituciones con mayor experiencia en el área de biometanación se encuentran:

- El Instituto de Investigaciones Eléctricas, en Cuernavaca Morelos, en donde se ha desarrollado un biodigestor mesofílico con capacidad de hasta 40 metros cúbicos. Algunos diseños han sido implantados en comunidades rurales. También ha estudiado la utilización del biogás en hornillas domésticas, lámparas para iluminación y generación de energía eléctrica (planta de 16 kW). Dicho Instituto ha participado en programas de biogás.
- El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha estudiado la biodigestión mesofílica tanto a nivel de laboratorio como prototipo, con y sin filtro anaerobio, en diseños tipo chino, hindú y flujo tapón, para estiércoles de tipo bovino, porcino, y de aves de corral. Ha implementado también biodigestores en diferentes comunidades rurales de Morelos, Tlaxcala y Oaxaca.
- El Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, de la Universidad Nicolaita de Morelia Michoacán. Empezó a trabajar desde 1980 en la biodigestión; construyó y operó un biodigestor de 5.6 metros cúbicos de alimentación continua y desarrollo otro para estiércoles de aves de corral.
- La Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa investiga desde hace tiempo los procesos de digestión anaeróbica, sobre todo pensando en el aprovechamiento de los lodos como fertilizantes.

En general puede decirse que en México se dispone de los conocimientos tecnológicos necesarios para la aplicación de la biodigestión anaeróbica.

## CAPÍTULO 7

### APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LOS OCÉANOS

#### 7.1 Generalidades sobre los océanos.

Los océanos desde los tiempos remotos han sido una fuente de suministro de alimentos para el ser humano y una ruta alternativa para desplazarse por medio de embarcaciones, pero también puede ser aprovechada la energía que se genera en los mismos, ya que las aguas de los océanos nunca están quietas. Existe una sucesión constante de olas y mareas. Y además se tienen cambios de temperatura significativos entre las aguas superficiales de los océanos y las aguas frías que se encuentran en algunas capas más profundas. De ahí que esta energía producida en forma natural pueda ser transformada para obtener energía mecánica y eléctrica.

#### 7.2 La energía de olas.

El agua de los océanos nunca descansa; siempre existe cierta ondulación. A veces las olas producen configuraciones comparativamente regulares; otras, su movimiento parece totalmente caótico. Pueden ser muy altas, o tan bajas que resultan casi imperceptibles. La mayor parte de este movimiento ondulatorio se debe a la acción de los vientos. Aunque algunas de las olas pueden ser generadas por terremotos submarinos.

Cualquiera que sea la causa, una ola representa un tipo de perturbación, cuyo resultado no es un desplazamiento constante del agua, sino más bien un movimiento de sube y baja. En general cada partícula asciende y desciende. Cuando las olas barren la superficie del mar, el movimiento aparente de avance no es más que una ilusión óptica. Ocurre que la perturbación causada por el viento se transmite de una zona a la siguiente, en otras palabras: es el conjunto de ondas el que se desplaza y no el agua.

La cantidad de energía que puede extraerse de una ola, depende de su altura (la cantidad de agua que el viento desplaza del nivel superficial del océano) y la velocidad de

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

las olas. Así de esta forma se tiene que una ola que mide 60 cm de altura va a tener cuatro veces más energía que una ola de 30 cm de alto, y una ola de 90 cm de altura tendrá entonces nueve veces más energía que la misma ola de 30 cm. Los aparatos que se han diseñado toman la energía de las olas y la convierten en energía mecánica o eléctrica.

Al igual que la energía eólica y la solar, el potencial de la energía de las olas es mayor en ciertas partes del planeta. El área entre las latitudes de 40° y 60° en los hemisferios norte y sur (figura 7.2.1), ofrece el mayor potencial para aprovechar la energía

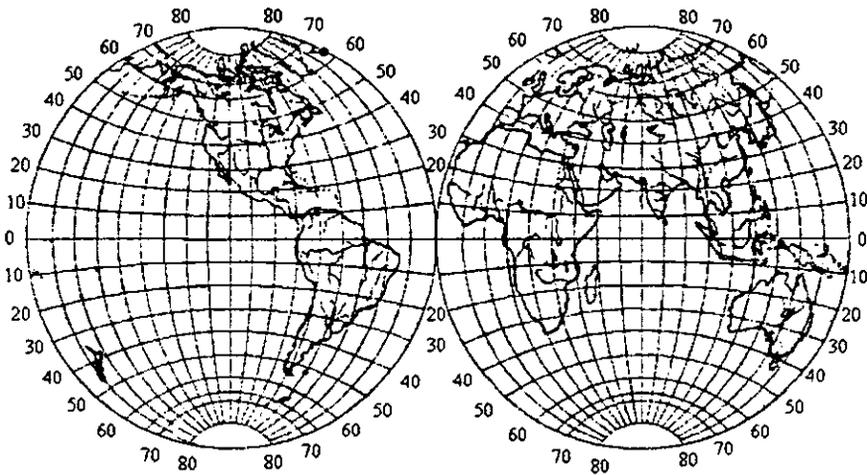


figura 7.2.1

de las olas. Otro factor importante es lo que se conoce como “abra”: la distancia sobre la cual el viento ha soplado sobre el mar, sin interrupción antes de alcanzar el punto de interés, que es el lugar donde se podría instalar el mecanismo para aprovechar la energía de las olas. Las costas localizadas al final de una larga abra tienen una energía de olas importante. Las costas de ciertos países se encuentran en el lugar apropiado dentro de las latitudes señaladas, así como algunos al final de una abra, haciéndoles ideales para el

desarrollo de la energía de las olas. Algunos de los lugares más favorables son la costa este de Japón, y las costas oeste de Escocia, Noruega y Estados Unidos.

La primera referencia histórica del aprovechamiento de la energía de las olas, se cree que data del año de 1799. La primera patente de un aparato para energía de las olas se dio en esta fecha en París, de un padre y su hijo de apellido Girard. El aparato que implementaron y patentaron no era muy diferente de los que se estudiaron a principios de la década de los 80's. Sin embargo, a partir de fines del siglo XVIII y hasta hace veinticuatro años no se había trabajado mucho en esta tecnología. Uno de los primeros esquemas se estudio en la isla de Mauricio en la década de los 60's. Ahí se inicio la investigación en un proyecto que teóricamente pudo haber proporcionado toda la energía necesaria para la población entera de la isla, pero el proyecto se canceló por el descenso en los precios del petróleo.

#### 7.2.1 Principio de conversión de la energía de olas.

La energía de olas puede producirse ya sea a partir de un aparato flotante en la superficie del océano o de una planta de energía fija al suelo marino. Una planta fija puede tener su base en tierra o localizarse alejada de la costa mar adentro. De los numerosos dispositivos inventados y probados en los últimos años, la mayoría se encuentra en alguna de las tres categorías principales:

- Seguidores de superficie.
- Dispositivos activados a presión.
- Aparatos de concentración.

Los seguidores de superficie utilizan la conexión mecánica entre un dispositivo que flota en la superficie del océano y un pivote fijo para convertir en electricidad los movimientos ascendentes y descendentes de la ola. Un ejemplo de un seguidor de superficie es el aparato conocido como el Pato de Salter, desarrollado por Stephen Salter de la Universidad de Edimburgo en Escocia. La Comunidad Europea se encuentra estudiando la viabilidad de este dispositivo, que sube y baja rápidamente en la

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

superficie del océano para extraer la energía de las olas. El Pato de Salter ha demostrado una eficiencia de absorción de más del 80%.

Los aparatos activados a presión se valen del nivel cambiante del agua para producir una presión variable. Un ejemplo de este tipo de mecanismo es uno que utiliza cambios de presión para impulsar aire a través de una aeroturbina, la cual se encuentra acoplada a un generador para producir electricidad. Una columna de agua oscilante es un aparato de energía de olas activado a presión. Funciona a partir de la subida y la bajada de las olas. Cuando el nivel de agua baja, el aire se succiona hacia dentro de la turbina desde la atmósfera. La turbina puede girar en la misma dirección, sin importar de donde provenga el aire, por lo que puede trabajar mientras el agua sube y baja en la columna de agua. Las plantas de columna de agua oscilante se han construido por menos de 1,900 dólares por kilowatt, y el aparato ha generado energía por 4 a 6 centavos de dólar por kilowatt/hora; tasas que resultan competitivas con otras fuentes de energía actuales.

Los aparatos de concentración utilizan barreras físicas para redirigir las olas, concentrando su energía hacia un punto particular y potenciando su energía. Mas específicamente: las olas se dirigen hacia un canal estrecho e inclinado que impulsa el agua hacia arriba hasta una altura suficiente para que pueda derramarse dentro de una cisterna de desagüe. Aunque los aparatos de concentración son los más sencillos de la tecnología de la energía de olas, se cree que tienen un excelente potencial para producir grandes cantidades de energía.

### 7.2.2 Aprovechamiento de la energía de las olas en el mundo.

Ha sido durante los últimos 20 años cuando la energía de las olas se ha considerado de una manera seria, como fuente potencial de energía eléctrica. Noruega presentó las primeras plantas que aprovechaban la energía de las olas en 1986. Una de estas plantas es un dispositivo de concentración, una reserva de 5,500 m<sup>2</sup> que esta abierta al mar en un canal cónico, mientras que la otra es un aparato activado a presión, una columna de agua oscilante. Si bien son diseños prototipo los fabricantes de la columna de agua oscilante ofrece su sistema para que se venda comercialmente.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Japón también ha estado usando los aparatos de energía de olas durante varios años, aunque a menor escala. Cientos de pequeñas boyas de navegación con capacidades generadoras de aproximadamente 0.5 a 3 kilowatts se están usando en los mares que rodean a este país. Aunque hay relativamente pocos modelos de energía de olas en funcionamiento en el mundo, son varios los países que están trabajando en el desarrollo de su tecnología, tales como: Japón, Noruega, Gran Bretaña e India.

Japón ha sido el lugar de varios proyectos internacionales de investigación en el campo de la energía de olas. Un generador de energía de olas de 40 kilowatts, fijo en lecho marino se instaló en 1983 cerca de un pueblo llamado Sanze. Estudios anteriores han probado también un generador de energía de olas flotante en la forma de una barcaza, llamada Kaimei. Ambos proyectos permitieron a los investigadores obtener valiosa información acerca del funcionamiento de estos tipos de plantas generadoras de energía de olas.

El generador de olas flotante Kaimei fue construido en 1976 por el centro de Tecnología y Ciencia Marina de Japón, y la Agencia Internacional de energía lo adoptó como un proyecto internacional. Las pruebas iniciales del Kaimei demostraron la factibilidad de la generación de las olas a gran escala y produjeron una exitosa transmisión a pequeña escala de la energía generada para instalaciones con base en tierra. También demostró que un sistema del tipo flotante de energía de olas puede tener una larga vida: el casquillo, las amarras, el cable de energía a la playa, las turbinas y los generadores todos pasaron el periodo de prueba de casi 10 años en buenas condiciones, únicamente con problemas menores.

El generador de energía Saenz, fijo en la playa, se instaló después de que se terminaron las pruebas del Kaimei. Este generador era un aparato de columna de agua oscilante, y el desempeño de este sistema se encontró superior al de la barcaza Kaimei. Durante el periodo de una semana el sistema generó el siguiente promedio de energía eléctrica:

de 30 a 40 kilowatts en dos días.

de 10 a 15 kilowatts en dos días.

de 3 a 5 kilowatts en dos días.

un kilowatt o menos por un día.

La Comunidad Europea en 1991 comenzó a conceder dinero a los estudios de factibilidad dentro de los países miembros de la organización. Durante mucho tiempo se ha pensado que Europa ofrece una gran potencial para la conversión de la energía de olas en energía eléctrica. Estudios realizados muestran que hay un potencial de 110 GW de energía de olas disponible a lo largo de las costas europeas. Países como Irlanda, Escocia y Portugal podrían recibir, teóricamente toda su electricidad a partir de la energía de olas.

### 7.3 La energía de mareas.

El ascenso y descenso periódico del mar, es conocido como marea y se cuenta entre los fenómenos naturales más llamativos. Las mareas oceánicas son originadas por la atracción gravitacional entre la Tierra y dos cuerpos celestes: la Luna y el Sol. Esta atracción también afecta la corteza terrestre, pero su movimiento es tan leve que deben utilizarse instrumentos especiales para detectarlo. Los otros planetas de nuestro sistema solar, las estrellas y otros objetos celestes también atraen a la Tierra, y son atraídos por ella; pero son demasiado pequeños o están muy lejos para ejercer una influencia apreciable en el mar.

El efecto del Sol sobre las mareas es sólo unas 46 veces el de la Luna a pesar de que la masa del Sol es casi 28,000,000 de veces mayor. De acuerdo con la ley de Newton, los cuerpos se atraen entre sí con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. El Sol está casi a 150,000,000 de kilómetros de la Tierra; la Luna el cuerpo celeste más cercano a la Tierra, sólo se halla a alrededor de 385,000 kilómetros. La menor distancia entre la Luna y la Tierra compensa la masa mayor del Sol.

De aquí que las aguas del océano respondan, ante todo a la atracción gravitatoria de la Luna. En la figura 7.1.1 suponemos que el agua cubre completamente la faz de la Tierra. Cuando la Luna esta directamente sobre A, su atracción hará que el agua se

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

acumule hacia este punto, y se producirá una marea alta o pleamar. Como el agua es arrastrada hacia A desde otras zonas, su nivel descenderá en los puntos B y D, y en estos puntos habrá marea baja o bajamar.

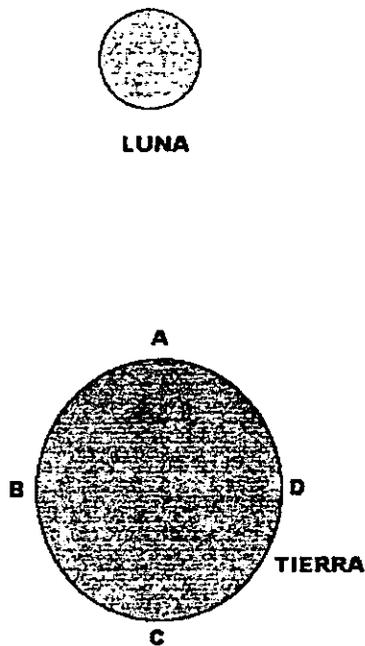


Figura 7.1.1

Al mismo tiempo habrá una acumulación de agua en el otro lado de la Tierra, hacia C. De acuerdo con una teoría muy difundida, esto sucede porque la Luna atrae la litosfera, o parte sólida de la Tierra, más que el mar en C, que tiene menos masa y está más alejado. La litosfera es atraída hacia la Luna dejando el agua en C más distante del centro terrestre.

Se sabe que la tierra está rotando constantemente sobre su eje; transcurriendo un período de más o menos 24 horas y 50 minutos entre dos salidas sucesivas de la Luna. Este período se denomina día lunar y es más largo que el día solar de alrededor de 24 horas, porque a medida que la Tierra rota, la Luna gira lentamente en su entorno. La

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

rotación de la Tierra hace que la Luna aparezca sobre diferentes partes de la Tierra en el curso del día lunar, determinando la sucesión de mareas altas y bajas.

Las mareas resultan afectadas por la distancia entre la Luna y la Tierra, distancia que cambia a medida que la Luna circunda a la Tierra en su órbita elíptica. En el perigeo es decir, en el punto en que ambas están más próximas, su fuerza de marea puede ser un 40 % superior que en el apogeo, cuando la Luna se halla más alejada de la Tierra. De modo similar, la fuerza de marea del Sol aumenta cuando la Tierra está más próxima a él. Otro factor que influye las mareas es la declinación de la Luna, los períodos naturales de oscilación de los mares, el ancho y la profundidad del agua. Como por ejemplo cuanto menos profunda y más estrecha es una bahía, tanto más altas son las mareas. Los cambios de presión barométrica, vientos prevalecientes en la costa y el contorno de la ribera, son también factores importantes.

Como resultado de todos estos factores existen diferentes clases de mareas, que varían en una amplitud desde unos treinta centímetros hasta unos 15 metros. Se pueden distinguir tres tipos principales.

- Mareas semidiurnas. Estas mareas ocurren comúnmente en el océano Atlántico, las dos mareas altas diarias son casi iguales y las bajas más o menos equivalentes.
- Mareas mixtas. En los océanos Pacífico e Índico prevalecen éstas mareas, en las que dos pleamares de un día lunar pueden ser iguales, mientras que las bajamares son muy desiguales, o bien la situación puede invertirse.
- Mareas diurnas o diarias. En el golfo de México, el mar de China y otros lugares, se pueden encontrar este tipo de mareas. En ellas las pleamares y bajamares alternadas desaparecen casi completamente. Solo hay un ascenso y un descenso de agua apreciables en un día lunar.

La energía real disponible de las mareas se genera de la energía cinética del agua que se mueve de una elevación más alta a una más baja de un modo no muy diferente al

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

de las presas hidroeléctricas. En los sistemas de energía de mareas, el agua se captura cuando se eleva y después se libera y dirige a través de turbinas, generando así electricidad. La fuerza que puede aprovecharse de las mareas es proporcional al cuadrado del rango de la marea. Así por ejemplo una marea de tres metros genera nueve veces más energía que una marea de un metro.

El poder de la marea se ha usado en el pasado para proporcionar energía mecánica. Sólo hasta hace unos cuantos años se ha observado como una posible fuente para generación de electricidad. Antes del siglo XX, las personas usaban el poder de las mareas para crear energía mecánica con molinos. Los primeros molinos de mareas se encontraron al norte de las costas del Atlántico en Europa, en Gran Bretaña, en la ciudad de Andalucía, e Inglaterra. La colonia de Nueva Inglaterra también utilizó pequeñas plantas de energía de mareas ya en el año de 1609 para dar energía mecánica a aserraderos y molinos de harina.

### 7.3.1 Principio de conversión de la energía de las mareas.

Hay dos diseños principales para aprovechar la energía de las mareas: La generación en reflujo y en dos direcciones.

La generación en reflujo (marea menguante o descendente) permite que el agua fluya a través de canales hacia una presa (un dique artificial) cuando la marea sube. Todos los pasajes se cierran poco después de la marea alta para atrapar el agua que quede retenida detrás de una presa hasta que la marea ha bajado lo suficiente para permitir una diferencia conveniente en el nivel de agua capturada y la del océano. En este punto el agua se libera y conforme fluye a través de las turbinas, genera electricidad. Cuando los niveles de agua en cualquiera de los lados de la presa se acercan mucho, el sistema se cierra hasta que llega el momento para empezar a capturar el agua nuevamente, punto en el cual el proceso vuelve a comenzar. Este es el método más común de generación de la energía de mareas.

La generación en dos direcciones produce energía de la misma forma que la generación de reflujo, pero también puede generar energía mientras la marea fluye en el

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

otro sentido. Esto presenta la ventaja de ofrecer un periodo más largo de generación de energía, sin embargo, sus desventajas son principalmente un elevado gasto inicial y la producción de un poco menos de energía que la de tipo de reflujo.

La tecnología de energía de mareas está probada; los mecanismos que se emplean son parte de una tecnología bien establecida y los lugares de prueba de todo el mundo han demostrado la eficiencia del concepto. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, se requiere de poca investigación y desarrollo en este campo.

### 7.3.2 Aprovechamiento de la energía de la mareas en el mundo.

Aunque esta fuente de energía es todavía relativamente poco común, puede sorprender a muchos el saber que realmente existen varias plantas de energía de mareas en operación en todo el planeta. La planta más grande de energía de mareas (con una capacidad de 240 MW) está en el estuario de la Rance, al noroeste de Francia. Esta estación de energía ha estado en operación desde 1968 con índice global de disponibilidad del 93 %. Otra instalación importante de pruebas para la energía de mareas es el proyecto de energía de mareas de Annapolis, con 20 MW (en la bahía de Fundy en Nueva Escocia, Canadá). Operó en su primer año (1984) con un 99 % de disponibilidad. Ambos sitios han proporcionado valiosa información a los investigadores y han demostrado la viabilidad de esta fuente de energía.

La planta de la Rance es la única en operación hoy en día sobre una base comercial, pero varios países están desarrollando la energía de las mareas a través de una serie de estudios de factibilidad que resultan prometedores. La anterior Unión Soviética construyó una pequeña planta de demostración de 400 kilowatts en Kislaya en 1967. Los países que han sido pioneros en el desarrollo de la energía de mareas son Francia, Canadá, la anterior Unión Soviética, Estados Unidos (Hawai) y China.

Los Estudios que se han realizado hasta la fecha han demostrado que las plantas de mareas deben ubicarse en áreas dentro de un rango de mareas de más de 5 m. Estos sitios también deben ofrecer una gran amplitud (la diferencia entre las mareas altas y

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

bajas) y la posibilidad de crear grandes reservas para almacenar una gran cantidad de agua productora de energía.

El potencial de la energía de mareas es importante, ya la Agencia Internacional de Energía ha calculado que los diversos proyectos en el mundo podrían producir, en teoría 635,000 GW/h de energía. Ciertas áreas del mundo se han identificado por ofrecer el mayor potencial de producción de energía de mareas. Algunas de estas áreas son: la Bahía de Fundy en Canadá y Estados Unidos; Cook Intel en Alaska; Chasey en la Bahía del Monte St. Michel en Francia; El Golfo de Mazen en la anterior Unión Soviética; el Estuario Severn River en Inglaterra; el Welcott Intel en Australia; San José en Argentina; y la Bahía Asan en Korea del Sur. En la Bahía de Fundy, por ejemplo es común que las mareas varíen entre 10 a 12 m y las mareas extremas pueden alcanzar hasta más de 15 m. Se ha dicho que el flujo total de cada marea en la Bahía de Fundy podría generar 400 millones de KW/h de energía, aproximadamente la misma producción de 250 plantas nucleares grandes.

El futuro de la generación de energía de mareas depende mucho de la disponibilidad de los fondos para su desarrollo. Aunque la tecnología ya se ha probado requiere de una significativa cantidad de inversión, que sólo puede estar disponible en fuentes gubernamentales, que puedan financiar los costos iniciales de construcción de estas plantas energéticas. El grupo Severn Tidal Power, que estudió la factibilidad inicial de la presa Severn, calculó sus costos iniciales de construcción en 8,250 millones de dólares, pero se espera que la planta produzca energía a un costo de 45 centavos de dólares por KW/hora, más barato que el costo de la producción de energía eléctrica en una planta de carbón que esta en 6 centavos de dólar por kW/h.

### 7.4 Energía térmica oceánica.

Las temperaturas de superficie en los océanos son máximas en los trópicos, o latitudes bajas, y disminuyen hacia el norte y el sur. El cinturón más elevado de temperatura se conoce como ecuador térmico. En general está algo al norte del ecuador

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

geográfico. Esto se debe, principalmente, a que la relación agua-tierra es mayor en el hemisferio austral que en el boreal, y esta diferencia afecta la circulación atmosférica general; además, el hemisferio austral sufre la influencia del vasto casquete de hielo del Antártico. La temperatura del agua de mar varía desde 0°C, o un poco menos, en las altas latitudes, hasta unos 28°C cerca de la superficie en el ecuador térmico.

La conversión de energía térmica oceánica tiene que ver con la explotación de las diferencias de temperatura entre el agua templada de la superficie y las capas profundas más frías. Particularmente en las latitudes tropicales las diferencias de temperaturas en la superficie y la de las aguas profundas a unos 1,000 metros, puede variar en una diferencia de 20°C. Esta diferencia de temperatura puede utilizarse para generar electricidad al vaporizar y condensar de manera alterna un fluido de trabajo.

En 1881, el físico francés Arsene d'Arsonval fue el primero en proponer que se podría obtener energía eléctrica explotando las diferencias de temperatura de los océanos. Sin embargo, no fue sino hasta casi 50 años después, que uno de los alumnos de d'Arsonval, Georges Claude, realmente intentó poner en práctica el concepto de la conversión de energía térmica oceánica construyendo una pequeña planta cerca de la costa de Cuba.

La fuente de energía potencial representada por la tecnología de la conversión de energía térmica oceánica es importante. La relativa regularidad de las temperaturas oceánicas significa que los sistemas de conversión de energía térmica oceánica pueden brindar niveles constantes de energía, lo que los hace aptos para un uso de carga eléctrica fundamental (el nivel mínimo de potencia continua para el servicio público). También tiene potencial para lugares lejanos de la costa que tienen pocas o ninguna otra opción de energía.

Debido a la necesidad de diferencia de temperatura, los sistemas de conversión de energía térmica oceánica sólo se aplican en ciertas partes del mundo. Cuando se toman en cuenta las variaciones anuales de temperatura, el recurso de la conversión de energía térmica oceánica útil se encuentra principalmente entre los trópicos de Cáncer y Capricornio (figura 7.4.1), con los lugares más atractivos en el océano Pacífico, en donde

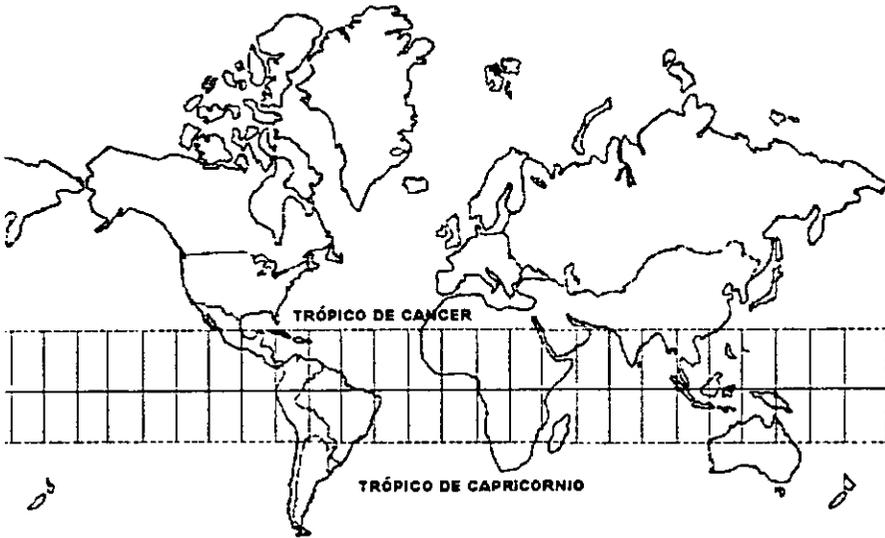


Figura 7.4.1

una gran área ha mostrado diferencias de temperatura de  $24^{\circ}\text{C}$ . La ubicación real de una instalación varía según las características locales del lugar. Por ejemplo, el sistema puede estar flotando, puede estar fijo en la tierra o fijo en alguna especie de plataforma.

#### 7.4.1 Principio de conversión de la energía térmica oceánica.

Hay dos tipos de sistemas para convertir en energía las diferencias de temperatura de los océanos:

- Sistema de ciclo cerrado.
- Sistema de ciclo abierto.

El sistema desarrollado por d'Arsonval se basaba en un concepto de ciclo cerrado, pero el que su discípulo Claude intentó cincuenta años después tomó esa idea y la desarrolló aun más, convirtiéndola finalmente en un sistema de ciclo abierto.

Los dos sistemas son relativamente similares: La conversión de energía térmica oceánica funciona como un motor de calor que utiliza la temperatura del agua templada del mar para vaporizar el fluido de trabajo; el vapor entonces acciona una turbina. El

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

agua de mar que se encuentra a más profundidad y por consiguiente con menor temperatura es bombeada hasta el sistema para condensar el fluido de trabajo después de su paso por la turbina. El proceso de condensación proporciona el impulso necesario para que el fluido de trabajo corra, este fluido puede ser agua de mar templada o cualquier otro líquido como amoníaco. En el último caso, el vapor condensado se bombea de vuelta al evaporador, formando un ciclo cerrado. En el primer caso, el vapor condensado se descarga en un sumidero, en este proceso el mar.

Cada sistema tiene ventajas y desventajas. Todavía se cuestiona cual es el mejor sistema. Algunas personas creen que los sistemas de ciclo cerrado ofrecen lo mejor para una aplicación comercial a corto plazo, otras personas opinan que las plantas de ciclo abierto serán las más eficaces en términos de costos a largo plazo.

Las plantas de ciclo cerrado usan turbinas más pequeñas que las turbinas grandes de baja presión empleadas en el sistema de ciclo abierto. Problemas tales como el costo, la corrosión, eficiencia y la biodegradación (cuando la materia marina queda atrapada en el sistema) de los intercambiadores de calor todavía tienen que resolverse. El sistema de ciclo abierto es más fácil de construir porque no tiene que soportar una presión tan alta. Por otra parte algunas desventajas de este sistema son que sus componentes deben mantenerse bajo un elevado vacío y que requiere de una turbina más grande (porque el vapor es mucho menos denso que el de un fluido de trabajo en un sistema típico de ciclo cerrado). Gracias a su sencillez y bajos costos y la producción de un subproducto como lo es el agua dulce, los investigadores han decidido concentrar un interés particular en la conversión de energía térmica oceánica utilizando los sistemas de ciclo abierto.

Se han desarrollado también sistemas de tipo híbrido, que utilizan un condensador y una turbina más pequeños que en un sistema de ciclo abierto y pueden producir agua desalada como en dicho ciclo.

Por otra parte se tienen muchos componentes en un sistema de conversión térmica oceánica, muchos de los cuales constituyen o tienen una tecnología bien desarrollada y algunos otros están en proceso de investigación. Los principales componentes que se están estudiando son los intercambiadores de calor. Los aspectos que se investigan son la

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

resistencia a la corrosión, a la presión, a la temperatura y la tensión. Los intercambiadores de calor (el evaporador y el condensador) se consideran los componentes más costosos de un sistema de conversión térmica oceánica de ciclo cerrado. Los problemas que se están investigando con estos componentes incluyen la biodescomposición, la corrosión y la durabilidad. Para vencer estos problemas se están considerando diversos materiales, incluyendo combinaciones de titanio y aluminio, aleaciones de cobre y níquel y diversos plásticos.

### 7.4.2 Aprovechamiento de la energía térmica oceánica en el mundo.

En la actualidad varios países han hecho demostraciones de sistemas de conversión de energía térmica oceánica, entre los principales países se puede mencionar a Japón, Francia, el Reino Unido y los Estados Unidos de Norteamérica, particularmente en el Laboratorio de Energía Natural de Hawaii.

Hawaii ofrece las condiciones ideales para operar una planta de conversión de energía térmica oceánica, ya que las aguas de la superficie tienden a estar alrededor de los 26°C, la temperatura a una profundidad de 600 metros llega ser de alrededor de 6°C. esto ha conducido al desarrollo de programas de investigación de los sistemas de ciclo abierto, siendo su principal interés la investigación en el desarrollo de sistemas de ciclo abierto de 2 a 15 MW para utilizarse sólo cerca de las costas. Parte de las investigaciones del Laboratorio de Energía Natural en Hawaii se concentran en aliviar los problemas que con anterioridad se mencionaron y otros esfuerzos se dirigen a la solución del problema de tubos de agua templada en los sistemas de ciclo cerrado que se atascan de organismos marinos.

La tecnología de la conversión de energía térmica oceánica como ya se dijo se esta desarrollando en Japón, Francia y el Reino Unido; al igual que Taiwan, India, y las Islas Vírgenes tienen proyectos de investigación en diversas etapas de desarrollo, pero el proyecto en Hawaii es el más avanzado hasta el momento. Actualmente no hay instalaciones comerciales de plantas generadoras de energía eléctrica que utilicen la conversión de energía térmica de los océanos.

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Los altos costos iniciales para utilizar la conversión de energía térmica oceánica están obstaculizando su desarrollo. El equipo inicial, especialmente el evaporador, el condensador y el tanque de almacenamiento de agua fría, comprende aproximadamente el 70% del costo total del sistema. Los costos de mantenimiento también pueden ser más altos que los de las plantas convencionales que utilizan combustible fósiles, pero a la larga el generar energía eléctrica con este tipo de sistemas puede ser bastante costeable por varias razones. Primero los costos de combustible en una planta de conversión de energía térmica oceánica no existen, así que, dependiendo de la vida de una planta de conversión de energía térmica oceánica, los costos a largo plazo se reducen considerablemente.

El hecho de que no se encuentre ninguna planta operando comercialmente y el posible hecho que se tenga una lenta recuperación económica, hace que los inversionistas no muestren interés para invertir dinero en la construcción de una planta de este tipo. Por estas razones se cree que los gobiernos tendrán que financiar la construcción de las primeras plantas de conversión de energía térmica oceánica.

### 7.5 Impactos causados por el aprovechamiento de la energía de los océanos.

Debido a que el aprovechamiento de la energía de los océanos no se encuentra bien desarrollada y en algunos casos se encuentra en investigación, es difícil hacer una evaluación detallada de las posibles afectaciones que se tendría al utilizar alguna de las formas de energía que proporcionan los océanos. A continuación se hacen algunas observaciones que podrían afectar el medio ambiente marino.

Con respecto al impacto ambiental de la tecnología de la energía de olas se tienen poca información ya que se ha realizado poca investigación, además de que existe una gran variedad de aparatos que se están desarrollando. Aunque es posible hacer algunas observaciones sobre los aparatos mecánicos flotantes, y los dispositivos de barrera.

Para los aparatos mecánicos flotantes se considera que tienen muy poco impacto ambiental. El único peligro potencial sería si el aparato se llega desprender de su ancla y pueda representar un peligro para la navegación. Incluso si el aparato no se desprende,

## ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

si es pequeño y esta cerca de la superficie del nivel de agua, puede ser difícil de detectar y por lo tanto, significa un peligro. Este problema puede resolverse fácilmente, si se le agrega alguna especie de luz o señal electrónica en la parte superior de un poste.

Los dispositivos de barrera probablemente pueden causar alguna clase de cambio ambiental, estén o no alejados de la costa. Es muy posible que cambien ligeramente los patrones locales del movimiento de las olas y de las mareas, lo cual puede afectar a algunas especies del ecosistema de la región. Así mismo los hábitos migratorios de algunas especies de peces también pueden verse afectados.

En lo que concierne a las posibles afectaciones ambientales de una planta de energía de mareas puede decirse por los estudios realizados a cargo del grupo Severn Tidal Power, que los sistemas de energía de mareas ofrecen la misma clase de beneficios ambientales que los sistemas de energía eólica, solar y fotovoltaica ya que no producen gases tóxicos en el proceso de conversión de energía. En lo que respecta a la afectación del medio ambiente la principal preocupación es el poner en peligro las especies de aves y peces, los cambios en los ecosistemas y la posible acumulación de contaminantes. La construcción de una presa, la cual cambiará los niveles de agua en ambos lados de la barrera, alterará naturalmente el ecosistema local. Las fuertes corrientes de mareas tienden a elevar y depositar los sedimentos del fondo, un fenómeno que puede verse afectado por la colocación de una barrera. Por otra parte se puede tener un peligro latente en ciertas especies de plantas y seres vivos marinos que no puedan sobrevivir en el nuevo ambiente, los peces y las aves que se alimentan de ellos también perecerían. La presencia de barreras en los océanos puede ser un obstáculo a la navegación en la zona donde se instale una planta de energía de mareas.

Existen varios aspectos ambientales de la conversión de energía térmica oceánica que deben tomarse en cuenta, y los cuales tienen que ver principalmente con la liberación ya sea de químicos o de agua residual de vuelta al océano circundante.

En los sistemas de ciclo cerrado existe el peligro de que el fluido de trabajo escape hacia el mar circundante, en el caso de que el sistema este flotando, o dentro de la tierra si se tiene su base allí. Es evidente que se pueden tomar precauciones para reducir ese tipo de riesgo. Además que los intercambiadores de calor se limpian con una

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

clorinación intermitente, se pueden emitir quejas por el cloro que se libera en el ambiente circundante. Sin embargo, es posible recoger el cloro. La descarga de agua templada o fría en el agua circundante con una temperatura diferente también representa una preocupación. Pero la tecnología actual permite liberar agua a una temperatura apropiada, así que no necesariamente es un problema si se maneja con propiedad. Sin embargo algunos expertos han expresado inquietud porque interferir con el agua profunda de los océanos puede tener efectos ambientales imprevistos.

Finalmente, el efecto de un sistema de conversión de energía térmica oceánica en los cardúmenes que puedan estar circundando al sistema es tema de preocupación. Algunos huevecillos y larvas pueden quedar atrapados en el sistema, lo cual puede afectar la distribución local de estas especies; asimismo, los cambios de la salinidad de y temperaturas locales pueden afectar el ecosistema del entorno. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía los estudios demuestran que estos efectos son limitados.

CONCLUSIONES

1. La tecnología que actualmente cubre la demanda de generación de energía eléctrica, en su mayoría se basa en la utilización de energéticos no renovables. Estos energéticos al ser utilizados afectan al medio ambiente en el que vivimos. Debido a esto es necesario buscar formas alternas y ecológicas para cubrir la demanda de generación de energía eléctrica.
2. La utilización de centrales de energía renovable nos permite reducir considerablemente las emisiones de sustancias contaminantes y disminuir los riesgos de accidentes con materiales radioactivos.
3. La energía eléctrica generada con fuentes renovables de energía, pueden a largo plazo dar ventajas económicas a pesar de tener costos iniciales altos, ya que esto se compensa con los bajos costos de operación debido a que no se tiene que utilizar un combustible determinado.
4. La utilización de tecnologías de energía renovable en sustitución de energías no renovables puede promover, una menor dependencia del consumo de hidrocarburos a países que no posean en su territorio yacimientos de estos energéticos. Los países que si poseen energéticos no renovables les permite hacer un uso más racional y adecuado de sus recurso.
5. Es necesario, por razones ambientales, que se impulse el desarrollo de las tecnologías de energía renovable que aun se encuentran en fase experimental, y no esperar a tener una crisis energética de hidrocarburos para darles mayor importancia, que es como se ha venido haciendo.
6. Con la investigación realizada en este trabajo se puede constatar que varios tipos de tecnologías (hidráulica, eólica, solar fototérmica, solar fotovoltaica, biomasa y mareas;

## **ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

junto con la conversión de energía térmica oceánica y la de olas) se encuentran desarrolladas a un grado que podrían competir comercialmente si las normas ambientales penalizan suficientemente el uso de los combustibles fósiles.

7. Las posibles afectaciones al medio ambiente que se puedan dar por utilizar algunas de las tecnologías de energía renovable son mínimas en comparación, con las afectaciones que se tienen al medio ambiente por utilizar centrales que utilizan combustibles fósiles y otras tecnologías convencionales.

8. La disponibilidad de los recursos renovables para generar electricidad, es muy amplia, ya que en todo el planeta sale el Sol, sopla el viento, se produce biomasa, se cuenta con ríos en los continentes y recordemos que la tercera parte del planeta son océanos. De tal forma que de no poder utilizarse en alguna región una tecnología en particular, podrá aprovecharse alguna otra o hacer una combinación de tecnologías.

ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

**BIBLIOGRAFÍA**

---

1. KATAINEN, H-S et All, Environmental pollution. Effects of SO<sub>2</sub> on the Photosynthetic and respiratory Rates in Scots Pine Seedlings 1987 (241-251).
2. HAMILTON, L.D. Health and Environmental Risks of Energy Systems. Simposium April 1984.
3. PEARSE, Fred, Acid Rain. New Scientist. 1987.
4. CONGRESS OF THE UNITED STATES, Office of technology Assessment. Acid Rain and Transported Air Pollutants Implications For Public Policy.
5. MARQUES DE SOUZA, Jair Albo, Energía nuclear para la protección del medio ambiente. Comisión Federal de Electricidad. México 1993.
6. FACULTAD DE INGENIERÍA Y SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA, Energía v Medio ambiente, Simposio, UNAM. México 1986.
7. UNITED NATIONAL ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, Transboundary Air Pollutions Efects and Control. Air Pollution Studies n.3. UN. New York. 1986.
8. HRMSTEAD H., H.Christopher, Energía geotérmica. Editorial LIMUSA. México D.F. 1989.
9. LAGAULT, Benoit, The Environmental Challenge-Mother Nature Calls for Help. Ascent. Volume 8 Number 1. 1989.
10. YU, A Izrael. Energy Development and its Efects on the Environment Energy. Vol. 12 No. 10/11.

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

11. CARLESS, Jenifer. Energía renovable. EDAMEX. México D.F. 1995.
12. World Meteorological Organization (WMO) and United National Environment Programme (UNEP) Intergovernmental Panel on Climate Change. Volume I june 1990.
13. ROJAS RODRÍGUEZ, S., MARTÍN TEJEDA, U, Centrales hidráulicas, teoría y problemas. Manuales UNEX No. 18. Universidad de Extremadura. Madrid 1997.
14. GRUPO FORMACIÓN DE EMPRESAS ELÉCTRICAS. Centrales Hidroeléctricas I Conceptos y Componentes Hidráulicos. Madrid 1994.
15. ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto, Elementos de Centrales Eléctricas I. Editorial Limusa, Preedición.
16. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Guías Metodológicas para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental. Tomo 2 Grandes Presas. Tercera reimpresión.
17. FACULTAD DE INGENIERÍA. UNAM. Apuntes de ingeniería ecológica.
18. COMISIÓN NACIOANL DEL AGUA. Presas y central hidroeléctrica Luis Donaldo Colosio Murrieta (HUITES) Tomo I. México, sept. 1997.
19. GRUPO PROFESIONAL DE PLANEACIÓN Y PROYECTOS, S.A. DE C.V. Estudios de riesgos sísmicos y de sísmicidad inducida, presa Hites, Sin. Archivo General, CNA, México 1990.
20. ALONSO CONCHEIRO, Antonio, RODRIGUEZ VIQUEIRA, Luis, Alternativas Energéticas. Fondo de cultura Económica. México D.F. 1985.
21. RAMANAGE, Janet, Energía. EDAMEX. México D.F. 1987.

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

22. GARCÍA GARDUÑO, Mario. Energía Eólica. PROGRESA (Promotora General de Estudios S.A.) Sevilla España 1987.
23. CADIZ DELEITO, Juan Carlos. RAMOS CABRERA, Juan, La Energía Eólica. Hermann Blume. España 1984.
24. SERIE DE DOCUMENTOS OLADE, Aerogeneración de energía. No. 23 noviembre 1985.
25. HINRICHS, Roger A., Energv. Saunders College Publishing. U.S.A. 1991.
26. MEINEL Aden B. y MEINEL Marjorie P. Aplicaciones de la Energía Solar. Editorial Reverté S.A. España 1982.
27. MANRIQUE José A., Energía Solar Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas. Editorial HARLA S.A. de C.V. México 1984.
28. ALCOR CABRERIZO, Enrique. Instalaciones solares fotovoltaicas. PROGRESA (Promotora General de Estudios, S.A), Segunda Edición. España 1995.
29. CASTAÑER MUÑOZ, Luis. Energía solar fotovoltaica. Ediciones UPC Barcelona febrero de 1994.
30. LORENZO, Eduardo. Electricidad solar. Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. PROGRESA (Promotora General de Estudios S.A.) Sevilla España 1994.
31. LASNIER, F. and ANG, T.G. Photovoltaic Engineering Handbook. Edit. Adam Hilger England 1990.
32. ESTUDIO FAO MONTES. El gas de madera como combustible para motores. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Italia 1993.

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

33. BENEMAN J.R. Biofuels: A survey. Informe del Electric power research Institute, Palo Alto. California. Junio 1978.
34. ENCICLOPEDIA DE LAS CIENCIAS, Ciencia de la Tierra II, Energía. Editorial Cumbre S.A. Sexta Edición. México D.F. 1983.

REVISTAS:

35. Revista ABB, Centrales térmicas de combustión con lecho fluidizado a presión. No.4, 1994.
36. Revista IEEE SPECTRUM, Burning coal more cleanly and efficiently. Agosto 1986.
37. Revista Desarrollo y Medio Ambiente, Laguna verde y los riesgos de la energía nuclear. Vol. 1, núm. 3, 1987.
38. REVISTA: DANISH ENVIRONMENTAL. Marine Windmills to replace coal-fired power station. Copenhage Edition 8 November 1997.
39. REVISTA: DENMARK REVIEW. Storming success for Danish wind-power. Copenhage. April 1998.
40. REVISTA: OBRAS. Generador eólico a pleno pulmón. México Abril 1998. Vol. XXV, No 304.
41. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Relación de Unidades Generadoras Actualmente en Operación. Septiembre de 1998.

**ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEBIDOS A LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

---

CONSULTAS EN INTERNET:

42. JARABO FRIEDRICH, Francisco., La Energía de la Biomasa.
43. COMUNIDAD DE ENERGÍA, Energías Alternativas. [www.ictnet.es/esp/comunid/amedio-amb/energia/1/](http://www.ictnet.es/esp/comunid/amedio-amb/energia/1/)
44. COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Generación Eléctrica en México.  
[www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)
45. SECRETARIA DE ENERGÍA, Estadísticas. [www.secretaria.gob.mx](http://www.secretaria.gob.mx)