



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

**“DESALACIÓN DE AGUA DE MAR
UTILIZANDO ENERGÍAS RENOVABLES Y
SU FACTIBILIDAD DE UTILIZACIÓN EN
LAS COSTAS MEXICANAS”**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A N :

**MALDONADO GONZÁLEZ SARA MÓNICA
LÓPEZ MORALES EDUARDO ENRIQUE**

Asesor: M. en C. ARQUÍMEDES SOLÍS TÉLLEZ

Bosques de Aragón, Estado de México, Febrero del 2013



DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres que dedicaron sus vidas para que cumpliéramos nuestros sueños, por su cariño y apoyo incondicional, pero sobre todo por confiar y creer en cada uno de nosotros.

A cada uno de nuestros hermanos por habernos dado ánimos para lograr muchos de nuestros objetivos y por apoyarnos en los momentos más difíciles.

A nuestros amigos de toda la vida, por haber estado siempre con nosotros en los buenos y malos momentos, por sus consejos y sinceridad, pero sobre todo por lo que pasamos con cada uno de ellos.

A todos nuestros profesores, especialmente al M. en C. Arquímedes Solís Téllez quien confió en nosotros y nos brindó su apoyo desde el principio que iniciamos este proyecto y hasta el final del mismo.

Agradecemos a Dios, porque nuestro esfuerzo, dedicación y a veces los malos momentos son caricias bondadosas de Él, llamándonos para que nos volvamos cada día hacia Él, y para hacernos reconocer que no somos nosotros los que controlamos nuestras vidas, sino que es Dios quien tiene el control, y podemos confiar plenamente en Él.

Y especialmente, a la Universidad Nacional Autónoma de México, quien nos abrió las puertas y nos dio las herramientas necesarias para un buen desarrollo profesional.

”DESALACIÓN DE AGUA DE MAR UTILIZANDO ENERGÍAS RENOVABLES Y SU FACTIBILIDAD DE UTILIZACIÓN EN LAS COSTAS MEXICANAS”.

1.- Conceptos Teóricos

2.- Procesos de Desalación

3.- Energías Renovables

4.- Plantas Desaladoras en México

5.- Ejemplo de Aplicación

INDICE

INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO 1	2
CONCEPTOS TEORICOS	2
1.1 GENERALIDADES.	3
1.2 NATURALEZA DEL AGUA DE MAR.	7
1.3 CONCEPTO DE DESALACIÓN.	8
1.4 BREVE HISTORIA DE LA DESALACIÓN	10
1.5 SITUACIÓN ACTUAL DE LA DESALACIÓN.	12
1.6 IMPACTO AMBIENTAL DE LAS PLANTAS DESALADORAS.	14
CAPÍTULO 2	17
PROCESOS DE DESALACIÓN	17
2.1 CLASIFICACION DE LOS METODOS DE DESALACIÓN.	18
2.2 DESTILACIÓN SÚBITA POR EFECTO FLASH	18
2.3 DESTILACIÓN POR EFECTO MÚLTIPLE	19
2.4 COMPRESIÓN TÉRMICA DE VAPOR	20
2.5 DESTILACIÓN SOLAR.	21
2.6 COMPRESIÓN MECÁNICA DE VAPOR	23
2.7 ÓSMOSIS INVERSA	24
2.8 ELECTRODIÁLISIS	26
2.9 OTROS PROCESOS DE DESALACIÓN.	27
2.10 AHORRO DE ENERGÍA EN LOS PROCESOS DE DESALACIÓN.	29
2.11 PROCESOS DE DESALACION DE NUEVA GENERACION.	31
CAPÍTULO 3	33
ENERGIAS RENOVABLES	33
3.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA.	34

3.2 LA IMPORTANCIA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.	35
3.3 TIPOS DE ENERGÍAS RENOVABLES Y SU POTENCIAL.	37
3.4 ENERGÍA EÓLICA.	37
3.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.	41
3.6 INNOVACION DE CELULAS FOTOVOLTAICAS.	47
3.7 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.	50
3.8 DESALACIÓN DE AGUA UTILIZANDO ENERGÍAS RENOVABLES.	54
3.9 COSTOS DE ENERGIA RENOVABLE EOLICA Y FOTOVOLTAICA.	61
3.10 COSTOS DE MANTENIMIENTO DE MODULOS FOTOVOLTAICOS Y AEROGENERADORES.	63
CAPÍTULO 4	66
PLANTAS DESALADORAS EN MEXICO	66
4.1 PLANTAS DESALADORAS.	67
4.2 LA DESALACIÓN EN MÉXICO.	70
4.3 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.	74
4.4 IMPACTO ECONÓMICO DE ENERGIAS RENOVABLES APLICADAS A PLANTAS DESALADORAS.	77
CAPÍTULO 5	79
EJEMPLO DE APLICACIÓN	79
5.1 UBICACIÓN DE EJEMPLO DE APLICACIÓN.	80
5.2 EVALUACIÓN DEL SISTEMA EÓLICO FOTOVOLTAICO.	82
5.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA EÓLICO FOTOVOLTAICO.	84
CONCLUSIONES.	93
BIBLIOGRAFÍA.	95

INTRODUCCIÓN.

El siguiente proyecto de investigación es una propuesta mediante un análisis, en función de las bases y necesidades que actualmente se requieren en México, para solucionar aspectos de origen hídrico y energético que se presentan como problemas relevantes para el desarrollo del país, debido a las crisis de fuentes de energía no renovables o convencionales, que actualmente se presentan. Así mismo, al respecto podemos resaltar que los servicios energéticos tienen un profundo efecto en la productividad, la salud, la educación, el cambio climático, la seguridad alimenticia e hídrica y los servicios de comunicación. La falta de acceso a la energía obstaculiza el desarrollo social y económico de manera importante para el logro de los objetivos del progreso Nacional, por lo que sugerimos una solución basada en energías renovables provenientes de recursos inagotables, no contaminantes que nos permiten proporcionar una opción, por medio de la implementación de nueva tecnología al alcance y confiable.

La opción de implementar fuentes de energías renovables ofrecen una valiosa oportunidad para profundizar la toma de conciencia sobre la importancia de incrementar el acceso sostenible a la energía, la eficiencia energética y la energía renovable en el ámbito local, nacional, regional e internacional, de manera que se profundice así mismo en el aspecto económico, en el que todos nos veremos beneficiados además del medio ambiente que contribuye a ser uno de los problemas actuales que se deben solucionar progresivamente.

Reconociendo la importancia de la energía en el pleno desarrollo sostenible, al considerar que se tienen recursos inagotables que deben ser aprovechados al máximo, desarrollamos el siguiente proyecto mediante una amplia investigación de lo cual tomamos como referencia múltiples fuentes de información con la finalidad de aportar una opción a las situaciones antes establecidas con suma conciencia, de que en efecto, el implementar diseños nuevos en cuanto a vanguardia y tecnología pueden ser aplicados en regiones estratégicas para excelentes resultados en México.

México cuenta afortunadamente con los recursos inagotables necesarios y tiene el desarrollo productivo y la infraestructura necesaria para lograr metas satisfactorias, requiere de además de cubrir sus necesidades de energía y reducción gastos relacionados específicamente al consumo y beneficio humano principalmente, el cual requiere aprovechar de la manera más óptima sus recursos energéticos renovables para su bienestar y medio ambiente. El cambio de suministro de energía beneficiaría bastante como sugerencia a su población de manera progresiva y evolucionará al dar un paso adelante y permitir que estas tecnologías participen en su consumo de energía.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS TEORICOS

1.1 GENERALIDADES.

Uno de los más graves problemas que se visualizan en el siglo XXI es la escasez de agua, entendiéndose por ello una agua en calidad y cantidad apta para el desarrollo humano. La vida humana depende de la existencia de agua dulce, así, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un mínimo de 150 litros por persona al día para mantener un límite de higiene que no permita la transmisión de enfermedades infecciosas. De ellos, tan solo 0.75 litros es el mínimo necesario para beber, y el resto para cocinar, lavar, bañarse, etc.

Generalmente, el nivel de desarrollo incide en el consumo de agua dulce per cápita, pero normalmente la climatología también influye. La siguiente tabla resume el consumo per cápita anual a nivel mundial a finales del año de 1992.

Continente	M³/hab. anual
Europa	1,900
Antigua URSS	1,330
Asia	526
África	244
América del Norte y Central	1,692
América del Sur	476
Oceanía	907
Promedio Mundial	660

Tabla 1.1.- Consumo de agua per capita por continentes.

De esta cantidad, la mayoría se destina a la agricultura (80%), a la industria (5%) y al consumo humano (15%). El grado de desarrollo incide en un mayor peso en el uso industrial (en USA es el 49%) en detrimento del consumo agrario (en China llega al 87%).

Por otro lado, las reservas de agua en el planeta son inmensas. Estimaciones actualizadas calculan que la hidrosfera contiene cerca de 1,386 millones de km³, sin embargo los océanos que representan una gran reserva de agua, cubriendo las tres cuartas partes de la superficie terrestre y el 97.5% del total, tienen una salinidad media de más de un 3% en peso, haciéndola inservible para cualquier tipo de uso agrícola, industrial o humano.

El resto es agua dulce, es decir el 2.5%. De esta cantidad, el 68.9% está en forma permanente como hielo y nieve que cubren las regiones polares y montañosas, el 29.9% son aguas subterráneas y tan solo el 0.3% se encuentra en lagos, presas y ríos, están en condición de ser utilizadas sin limitaciones en actividades humanas. (Ver figura 1.1)

Recursos Globales

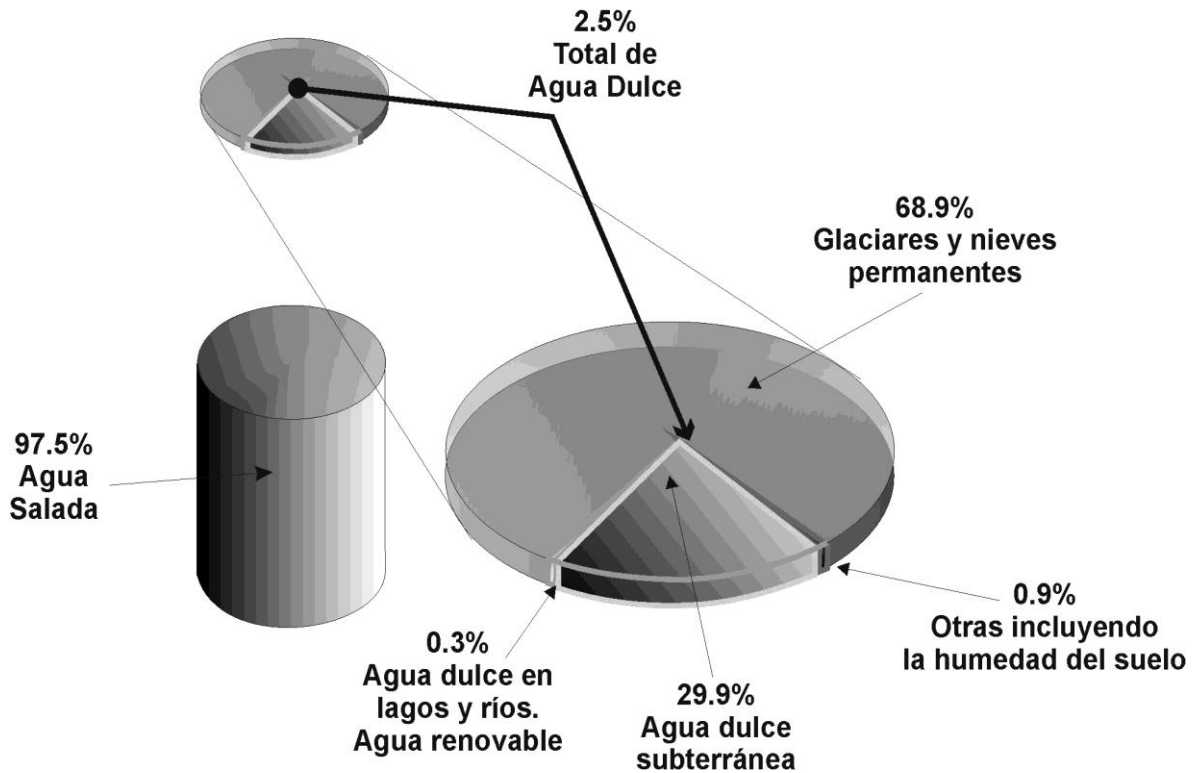


Figura 1.1.- Recursos hídricos globales de la tierra.

El Ciclo Hidrológico Terrestre, mostrado en la figura 1.2, permite la existencia de los recursos hídricos renovables. El ciclo hidrológico, llamado también ciclo de agua, es el movimiento perpetuo del agua a nivel planeta. Su fuerza motriz es la acción conjunta realizada por la energía solar y la fuerza de gravedad.

El sol evapora el agua y los vientos transportan este vapor sobre la tierra o el mar, donde se condensa y se precipita como lluvia. Cuando cae sobre la tierra, la lluvia se evapora, fluye por ríos y arroyos, se infiltra en el suelo y fluye subterráneamente en su regreso al mar, o bien es absorbida por las raíces de las plantas y árboles, llega a las hojas donde se evapora y regresa a la atmósfera para continuar el ciclo.

Los procesos que forma el Ciclo Hidrológico son: Condensación, que es la transformación del agua del estado gaseoso al líquido debido a cambios de presión y temperatura; Precipitación, que es la caída del agua por efecto de la gravedad, principalmente en forma de lluvia, aunque también como nieve y granizo; Infiltración, o sea, la penetración del agua en el suelo y Evaporación, que constituye el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso.

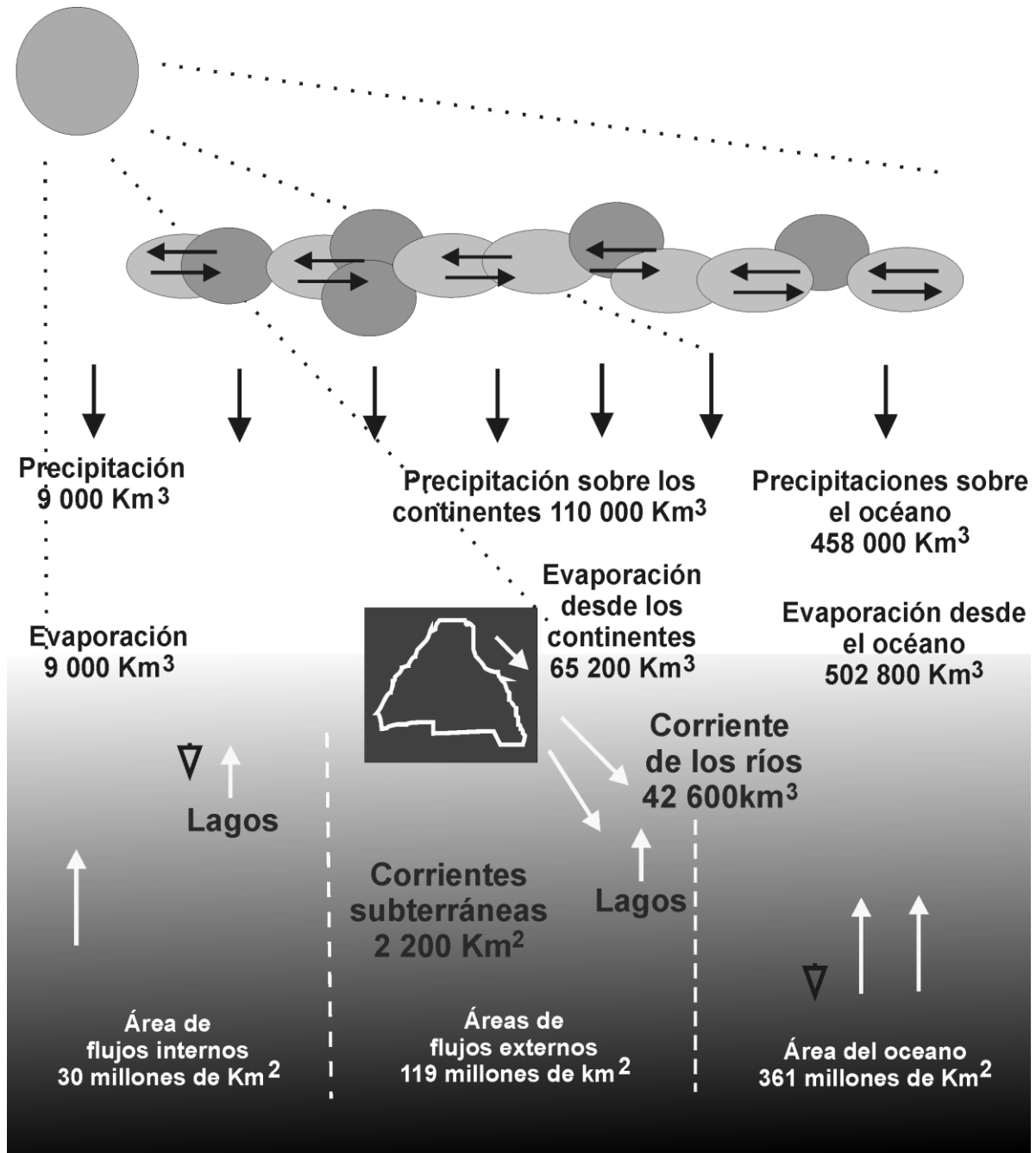


Figura 1.2.- Ciclo hidrológico del agua en la tierra.

El período de renovación de los hielos polares es de 10,000 años y de 17 años para los acuíferos y glaciares, cuando éstos se extraen a una velocidad superior a la recarga la diferencia se considera recurso hidráulico no renovable. El valor medio de los recursos hidráulicos renovables mundiales se calcula en 42,750 km³ por año, pero este valor es muy variable. La tabla 1.2 muestra la distribución por continentes y de sus países con menores y mayores recursos, como dato significativo de la irregular distribución en el planeta.

País o Continente	Anual (km³)	Per cápita (m³/hab)	País o Continente	Anual (km³)	Per cápita (m³/hab)
Alemania	96	1,165	Angola	184	15,376
España	110.3	2,775	Camerún	268	18,711
Francia	180	3,065	Egipto	2.8	43
Irlanda	47	13,187	Guinea	226	29,454
Noruega	384	87,691	Libia	0.6	100
Reino Unido	71	1,219	Sierra Leona	160	34,957
Rusia	4,312.7	29,115	Sudáfrica	44.8	1,011
Suiza	42.5	5,802	África	3,988.1	
Europa	6,142.9		Arabia Saudita	2.4	119
Canadá	3,287	120,000	China	2,800	2,231
Estados Unidos	2,930	11,500	Emiratos Árabes	0.15	64
México	345	3,670	India	1,850	1,896
América del Norte	6,562		Indonesia	2,530	12,251
Argentina	270	17,000	Japón	547	4,344
Brasil	6,220	45,200	Kuwait	0.02	11
Colombia	1,200	35,000	Malasia	456	21,259
Cuba	34.7	3,110	Turquía	196	3,074
Perú	1,100	50,300	Asia	12,686.5	
Venezuela	856	36,830	Australia	343	18,596
América Central y del Sur	10,338		Nueva Zelanda	313	89,400
Argelia	13.87	460	Oceanía	1,539.3	

Tabla 1.2.- Recursos hidráulicos renovables locales y per capita de diferentes países y por continentes.

Como puede verse en esta tabla, hay 6 países que acaparan casi el 50% de los recursos hidráulicos totales: Brasil, Canadá, Rusia, Estados Unidos, China e India. Hay 5 grandes ríos que concentran el 27% de dichos recursos renovables: Amazonas, Ganges, Congo, Amarillo y Orinoco. Lo que sí queda muy claro es la mala distribución de los recursos hidráulicos que existe en el planeta, con zonas de baja población y abundancia de recursos difícilmente aprovechables en su totalidad.

La cifra anual de 1,000 m³/hab de recursos hidráulicos renovables es el límite a partir del cual una zona ó país se considera que tiene escasez de recursos hidráulico que impiden su desarrollo, ya que ello implica la utilización de recursos de naturaleza no renovable, principalmente acuíferos sobreexplotados, los cuales van perdiendo paulatinamente su calidad.

La realidad actual es que 26 países con una población de aproximadamente 300 millones de personas sufren ya problemas de escasez y las proyecciones para el

año 2050 son mucho más pesimistas, con 66 países afectados que concentran las 2/3 partes de la población mundial.

Además, la existencia de recursos suficientes no implica que su calidad o disponibilidad permita su simple uso: así puede ponerse como ejemplo que hay 1,500 millones de personas que dedican de 3 a 4 horas diarias a conseguir agua, generalmente en los países africanos y asiáticos y también pueden destacarse el problema de aguas salobres de algunas regiones de la India donde se concentran más de 60 millones de personas.

La desigualdad patente entre los recursos y el consumo de agua en las diferentes zonas del planeta provoca situaciones de insostenibilidad muy claras en aquellos lugares con menores recursos hidráulicos renovables que su consumo demandado. Queda claro que es necesario ahorrar agua en todos los sectores consumidores, desde la utilización de técnicas de riego más avanzadas que eviten el despilfarro de la misma, el ahorro en el consumo humano, con su posterior depuración y hasta reutilización. Pero aún así hay zonas del planeta muy áridas o aisladas que tienen una dependencia de fuentes externas de agua para su desarrollo.

La utilización del agua del mar por medio de la desalación es una opción que permite aumentar dichos recursos. La tecnología actual de desalación de agua de mar permite obtener agua apta para el consumo humano a un costo muy aceptable.

1.2 NATURALEZA DEL AGUA DE MAR.

El agua de mar es una solución compuesta por una compleja combinación de constituyentes químicos, partículas diversas, burbujas de distintos gases y evidentemente agua. El agua no solo actúa como solvente sino también como medio de transporte de las distintas partículas insolubles suspendidas tanto en superficie como dentro de la masa acuosa.

En el momento que un objeto entra en contacto con el agua de mar, ocurre un proceso de solubilización. El pH del agua de mar es alcalino (7.5-8.4) debido a las sales disueltas que contiene. La mezcla de constituyentes químicos está compuesta con cerca de 70 elementos. El 99.5 % de los constituyentes químicos son iones libres y formas complejas (sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, etc.) de los iones: Cl, Na⁺, SO₄, Mg⁺⁺, K⁺, HCO₃, CO₃. Los constituyentes menores son: iones hierro y hierro, hidróxido de hierro, sílice, silicatos, nitratos, fosfatos, oxígeno.

La salinidad se determina a partir de las mediciones en el agua de la conductividad eléctrica, temperatura y presión mediante el salinómetro. La salinidad promedio es de 35,000 ppm. En mar abierto la salinidad fluctúa del 32,000 a 36,000 ppm. La salinidad aumenta en mares cerrados y sujetos a un alto grado de evaporación (ver tabla 1.3).

Océano/Mar	Salinidad (ppm)
Océano Pacífico	33,600
Océano Atlántico Sur	35,000
Golfo Pérsico	43,000-50,000
Mar Báltico	28,000
Mar del Norte	34,000
Mar Mediterráneo	36,000
Mar Rojo	44,000
Mar Muerto	50,000-80,000
Media Mundial	34,800

Tabla 1.3. Salinidad media de los principales océanos y mares del planeta.

A pesar de los cambios de salinidad, la concentración de los mayores constituyentes químicos es constante. Esto es el resultado de una circulación física normal y procesos de mezcla. Los constituyentes menores no siguen ese patrón. Esto tampoco es válido en mares cerrados, desembocaduras de ríos y donde el piso es el sedimento.

Los gases disueltos en el agua de mar provienen de la atmósfera, de la actividad biológica y de la descomposición del material orgánico. Los principales gases disueltos son el oxígeno y el bióxido de carbono, cuyo índice de solubilidad se ve afectado por la temperatura, clorinidad, presión externa y en muy poco grado por la presión hidrostática. El oxígeno disuelto en el mar se pierde por intercambio con la atmósfera, biota de respiración aerobia y descomposición de materia orgánica por bacterias aerobias.

1.3 CONCEPTO DE DESALACIÓN.

La desalación es el proceso de separación de sales de una disolución acuosa, pero puede ampliarse al proceso de separación del agua de las sales, ya que existen tecnologías que realizan este proceso y el fin a perseguir es la separación de ambos componentes para el uso humano del agua dulce producto (ver figura 1.3). En castellano existe también la acepción “desalinizar” para describir el mismo proceso, gramaticalmente correcta pero a nuestro entender proveniente de otro proceso de naturaleza diferente al que se estudia aquí: “desalinización” es el proceso de lavado y drenaje de suelos salinizados por efectos del riego de aguas de naturaleza salobre.

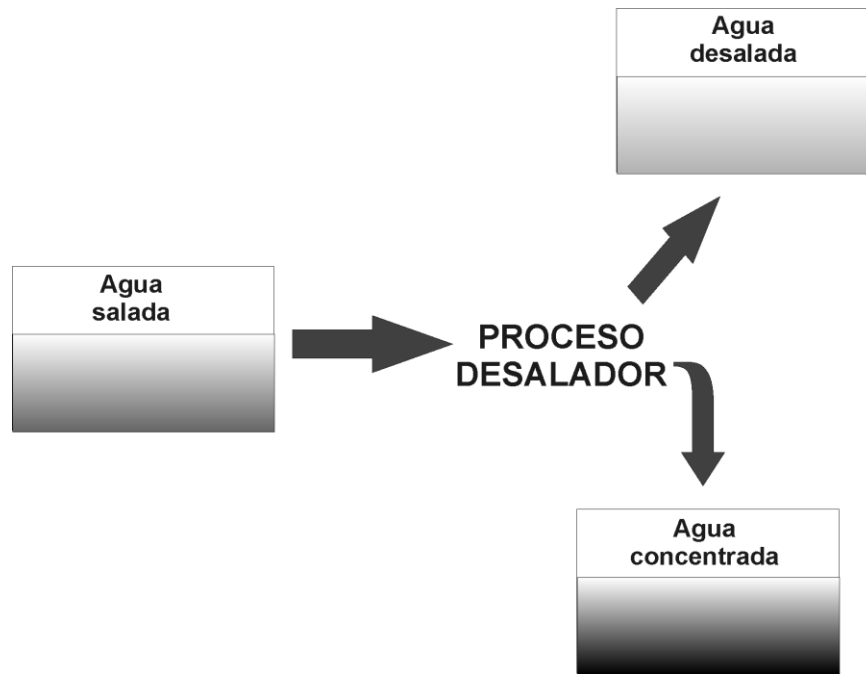


Figura 1.3 Esquema de un proceso de desalación

Desde el punto de vista termodinámico, la desalación de agua se obtiene aplicando la energía necesaria para separar las sales que contiene, previamente mezcladas en un proceso natural. La cantidad mínima necesaria para desalar puede obtenerse por lo tanto siguiendo el camino inverso del proceso de desalación, midiendo la energía que se desprende en la disolución de sales en agua pura y puede representarse por la fórmula:

$$W_{\min} = R T \ln a_w \quad (1.1)$$

Donde:

- W_{\min} = Energía mínima desprendida en el proceso de mezcla (kWh/m^3).
- R = Constante universal de los gases ($R=0.082 \text{ atm}\cdot\text{l/K}\cdot\text{mol}$),
- T = Temperatura absoluta de la mezcla ($T= ^\circ \text{C}+273.15$).
- a_w = Actividad de los electrolitos que componen la disolución salina, valor cercano a la unidad para aguas marinas.

Como la actividad depende fuertemente de la concentración de dichos electrolitos, la energía mínima desprendida en el proceso y por lo tanto la necesaria para desalar depende de la concentración del agua de aporte: para un agua media del mar de 35,000 ppm de total de sólidos disueltos (TDS), dicha energía a 25 °C es de 0.88 kWh/m^3 , pero baja hasta los 0.3 kWh/m^3 en el caso de una concentración de 15,000 ppm.

Pero ningún proceso tiene el carácter de reversibilidad total que implica que pudiéramos desalar agua salada con estos costos energéticos tan bajos. Ello implicaría un proceso extremadamente lento y cerca del equilibrio, algo que es imposible de materializar físicamente.

La tecnología actual solo permite desalar a un costo energético al menos cinco veces mayor al mínimo para cada concentración (existen rozamientos, fricciones, flujos de calor que no son convertibles totalmente en trabajo), con lo que el desarrollo futuro es esperanzador, ya que realmente el costo mínimo hace que el costo energético asociado a la desalación sea menor que el costo de amortización o de mantenimiento de una instalación desaladora.

Aunque la desalación propiamente dicha comenzó a finales del siglo XIX con el aprovechamiento del vapor de las calderas de los pequeños barcos para su consumo humano, en el propio ciclo hidrológico del agua existe el fenómeno de la desalación en el proceso de evaporación de aguas de mar: anualmente se evaporan de los océanos $502,800 \text{ km}^3$ de agua y $65,200 \text{ km}^3$ de los continentes.

Generalmente los procesos de desalación más antiguos estaban relacionados con el fenómeno de la evaporación de aguas con contenido salino, con la utilización de vapor de proceso o energía solar, hasta la aparición en los años 60 de las membranas con calidad suficiente para filtrar agua de mar. A partir de ahí, este tipo de tecnologías ha sido más rápidamente desarrollada que los otros procesos.

1.4 BREVE HISTORIA DE LA DESALACIÓN

Para el hombre siempre ha sido un reto el separar la sal del agua del mar para aprovechar sus inmensas reservas, se tiene constancia de que Aristóteles hablaba de aquello que hacía inservible el agua de mar para poder regar los campos y calmar la sed.

Desde que en la época griega clásica se definieron los principios para la separación del agua y las sales, el hombre ha buscado la manera de lograr esa separación. Existen ejemplos a lo largo de la historia antigua de hombres dedicados a tal esfuerzo: Aristóteles, Tales de Mileto, Demócrito, Plinio. En el siglo XVI ya se utilizaban alambiques en barcos para obtener agua dulce, aunque de forma muy rudimentaria.

Hasta bien entrado el siglo XIX se puede hablar de una instalación desaladora de naturaleza estable. Precisamente fue una planta de destilación solar en una explotación minera: las Salinas de Chile. Su rendimiento era de 20 m^3 producidos en una extensión de $4,000 \text{ m}^2$, pero era la primera forma de obtener agua dulce para el abastecimiento de la población minera en aquel lugar tan remoto y árido.

Posteriormente, en 1884 se fabrica por primera vez un evaporador para un barco aprovechando la energía residual del vapor de salida de su caldera. Toda la primera tecnología iba encaminada al efecto pernicioso del agua salada en los tubos de los intercambiadores: incrustaciones, corrosión, etc. La primera mitad del siglo XX fue totalmente dominada por las tecnologías de evaporación y se incidió principalmente en el diseño de nuevos tipos de intercambiadores más eficientes y compactos que producían cada vez más agua dulce con el menor consumo.

Sin embargo, su alto consumo energético, motivó la búsqueda de otras alternativas, como las membranas. Las primeras investigaciones sobre membranas datan de la década de los 30, cuando Ferry las recopila en 1936 y las clasifica por los materiales utilizados (naturales, de malla porosa, cobre, celofán..). Pero las primeras experiencias de membranas con rechazo de sales aceptable para la desalación son de Reid y Breton en la Universidad de Florida en 1953, que obtuvieron un rechazo del 98% con membranas planas de acetato de celulosa.

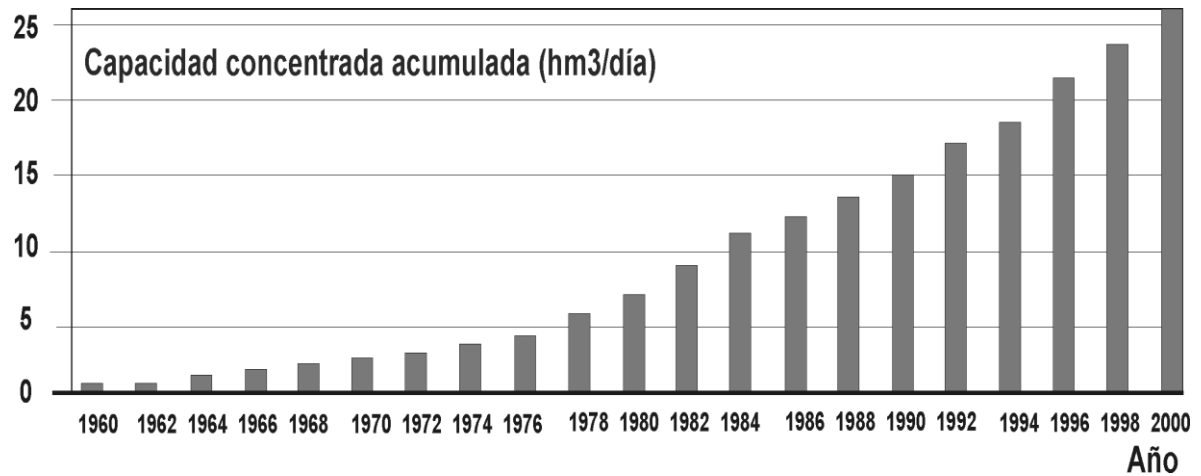
Posteriormente Loeb y Sourirajan en 1960 mejoraron el flujo en este tipo de membranas. Ya en los 70 el material de las membranas se sustituye por poliamida aromática que aumentaba el rechazo hasta el 99%; la primera membrana de este tipo para agua de mar data de 1972. A partir de esta fecha la búsqueda de nuevos materiales, la mayoría de ellos de naturaleza orgánica como la poliamida aromática, ha contribuido a evitar de forma considerable los problemas derivados de la operación de las mismas así como disminuir la presión mínima necesaria para la obtención del permeado.

Con respecto a la evolución histórica de la capacidad instalada en el ámbito mundial, se puede decir que en 1970 dicha capacidad era de tan solo 1, 700,000 m³/día, correspondientes principalmente a plantas evaporadoras de instalación muy baratas pero de alto consumo de energía, utilizadas normalmente en los barcos para reducir espacio y de acuerdo con la tecnología disponible en aquel momento.

Sin embargo, la crisis del petróleo de 1973 fue el detonante para que los países exportadores de petróleo, que además son los países con mayor escasez de agua, instalaran gran cantidad de plantas de evaporación acopladas con plantas de producción eléctrica. En los años 80, una nueva crisis del petróleo y la aparición de las membranas de ósmosis inversa para agua de mar, hizo que el incremento de este tipo de plantas no fuera tan espectacular, además de que la desalación por otros métodos se extendiera más allá del Golfo Pérsico de forma notoria, especialmente en el tratamiento de aguas salobres.

Finalmente, en la década de los 90 los procesos de evaporación siguen dominando fuertemente en el Medio Oriente, pero en el resto del mundo la ósmosis inversa es el proceso predominante, penetrando en el difícil mercado árabe con la aparición de membranas diseñadas para filtrar ese tipo de aguas y la posibilidad de acoplar instalaciones híbridas en el caso de baja demanda eléctrica en sus instalaciones duales.

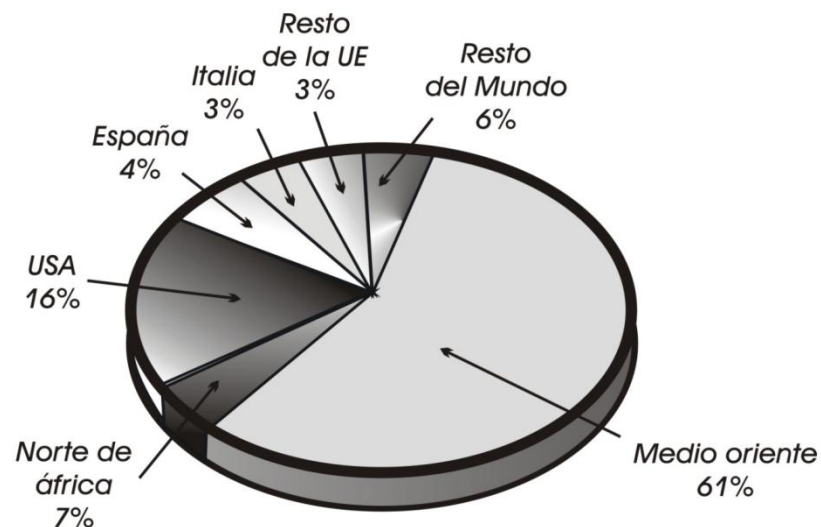
La gráfica 1.1 muestra la evolución histórica de la capacidad mundial instalada de desalación.



Gráfica 1.1. Evolución de la capacidad total de desalación en el mundo.

1.5 SITUACIÓN ACTUAL DE LA DESALACIÓN.

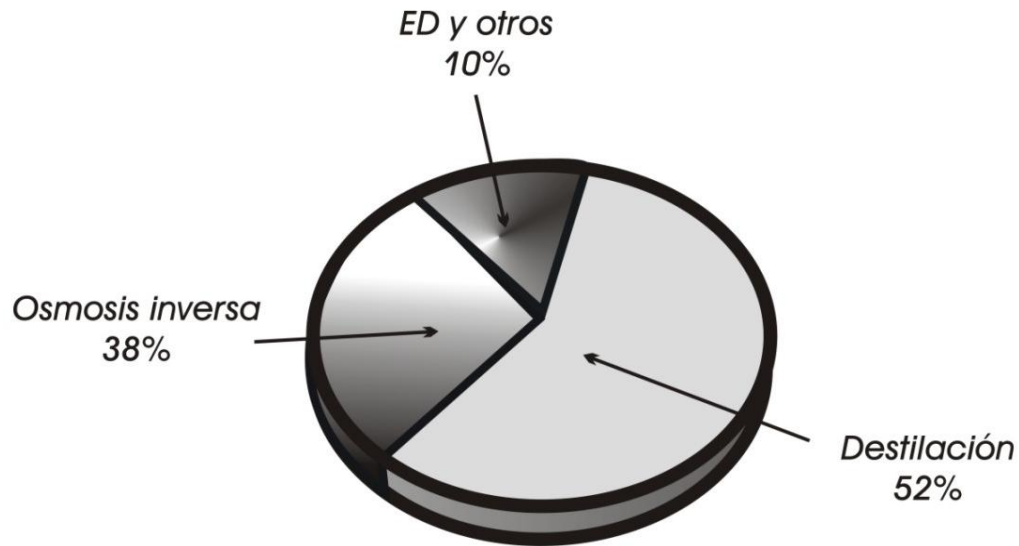
La capacidad total instalada en todo el mundo es de unos 26,000,000 m³/día, de los cuales 14,000,000 m³/día corresponden a agua de mar y 12,000,000 m³/día a aguas salobres. El peso de Medio Oriente es muy importante todavía en la industria de la desalación: el 61% del total de aguas desaladas. Arabia Saudita es el primer país en cuanto a capacidad desaladora (24,4%), seguido de cerca por los Emiratos Árabes Unidos, Estados Unidos y la antigua URSS. La gráfica 1.2 muestra la distribución porcentual por países de la capacidad total instalada actualmente.



Gráfica 1.2. Distribución porcentual de la capacidad desaladora instalada.

Si hablamos del número de unidades instaladas, el primer lugar lo ocupa los Estados Unidos, ya que tienen plantas de pequeño tamaño en comparación con las plantas de Medio Oriente, y Arabia Saudita ocupa el segundo lugar.

En cuanto a tecnologías, las de destilación suponen el 52%, las de ósmosis inversa son el 38%, y el resto (12%) es principalmente debido a la electrodiálisis (ver gráfica 1.3).



Gráfica 1.3. Distribución porcentual de los métodos de desalación.

Medio Oriente y Norte de África. El porcentaje de los países de Medio Oriente se incrementa sustancialmente respecto de ese 61% si hablamos de agua de mar. La tecnología MSF es predominante con respecto al resto de las técnicas evaporativas, con alrededor del 80% del total del agua de mar desalada. La capacidad instalada alcanza unas cifras considerables en países de densidad demográfica baja. Por ejemplo podemos destacar los Emiratos Árabes Unidos, que en tan solo 3 años han duplicado su capacidad de desalación para una población de 2,2 millones de habitantes. Sin embargo, los países del Golfo no reciclan más del 35% de sus aguas residuales, que contribuye solo al 2.2% de su suministro, dicha agua es normalmente utilizada para el riego de cultivos y jardines y algún proceso industrial, con un total de 105 plantas de tratamiento con una capacidad conjunta de 2,000,000 m³/día.

América. La desalación en los Estados Unidos se centra sobre todo en los estados de California, Texas y Florida, ya que son las zonas costeras más áridas y tienen la mayor previsión de aumento demográfico del país, con un 45% en el horizonte del año 2025. El crecimiento del número y la capacidad de las instalaciones ha sido durante los últimos años el mayor del mundo, casi todas ellas de RO potabilizando aguas de contenido salobre.

Aunque no tenga significación en el porcentaje de volúmenes desalados respecto al total mundial, la desalación en las islas caribeñas ha solucionado graves problemas de abastecimiento de agua potable. Existen numerosas plantas de reducida capacidad (Bahamas, Antigua, Barbados, Islas Vírgenes) en su mayoría de tecnología MED, MVC y RO.

Asia y Oceanía. Hay diferentes situaciones en esta región cuando hablamos de la desalación, por ejemplo Japón y Corea tienen su propia tecnología que compite en el mercado mundial. Por el contrario, Australia y China tienen tecnología propia que no exportan, y el resto de los países necesitan importarla. La capacidad es sensiblemente inferior al total de plantas instaladas en el Golfo Pérsico.

La situación en la India es digna de comentarse, donde hay más de 200,000 poblaciones con agua no potable, de ellas alrededor de 50,000 tienen problemas de salinidad, con niveles salinos de hasta 4,000 ppm, que afectan a 60 millones de personas. Además hay numerosos pueblos con un censo medio de 500 a 1,500 habitantes en zonas montañosas ó en deltas de grandes ríos, en los cuales el suministro de agua potable es crucial. En este país se han instalado cientos de pequeñas plantas de ósmosis inversa y electrodiálisis (RO/ED) de 10 a 30 m³/día de capacidad para consumo local. Solo existen 2 plantas de destilación por múltiple efecto (MED) de más de 10,000 m³/día para suplir procesos industriales, pero hay previsión de instalación de grandes plantas.

En los nuevos estados surgidos tras el desmembramiento de la antigua URSS, hay zonas muy áridas (Azerbaiyán, Turkmenistán, Uzbekistán) que utilizan generalmente tecnología MED acoplada a sus centrales eléctricas para resolver sus déficits hidráulicos.

Europa. Con respecto a la situación en Europa, la aportación de la desalación solo es representativa en islas del Mediterráneo. Chipre, una isla al este del Mediterráneo cuenta con 2 pequeñas plantas MSF, una MED y una planta RO de 20,000 m³/día. Existe un proyecto de una planta RO de 40,000 m³/día para finales de este año. La situación en Malta es similar, agravada por su condición de destino turístico.

En el resto de los países mediterráneos, la desalación es menos importante en cuanto al porcentaje de aportación al consumo, con pequeñas plantas MSF y MVC en el sur de Italia (incluyendo Sicilia y Cerdeña). Grecia, y Turquía tienen también pequeñas plantas RO generalmente para abastecimiento de las islas del mar Egeo.

1.6 IMPACTO AMBIENTAL DE LAS PLANTAS DESALADORAS.

En todo proceso desalador, se tiene una porción de agua que es rechazada y devuelta normalmente a la fuente original que aportó el agua a desalar. El problema de estos vertidos debe tratarse cuidadosamente dependiendo del tipo de proceso utilizado y de las características del lugar donde se tira la salmuera de rechazo.

La experiencia de más de 20 años de funcionamiento de plantas desaladoras en el Golfo Pérsico y en otras regiones marinas con intercambio de agua relativamente lento con océanos abiertos, las salmueras formadas en estas plantas han resultado perjudicial al medio ambiente marino circundante. Por ejemplo, la salinidad media del Golfo Pérsico es de 45,000 ppm, sin embargo, se han encontrado áreas con salinidad de alrededor de 50,000 ppm cerca de las descargas de las plantas desaladoras.

La conjunción de la contaminación térmica de la salmuera devuelta al mar con una concentración de 60,000 a 65,000 ppm y una temperatura de 7-10 °C arriba del agua de aporte, la gran cantidad de plantas desaladoras MSF instaladas, la contaminación química de los vertidos de salmuera y de petróleo de la zona en este mar cerrado de tan solo 35 metros de profundidad media, 239,000 km² de extensión y un tiempo de residencia medio de 2-5 años, hace pensar que el Golfo Pérsico va a tener serios problemas ambientales en un futuro próximo. Ello se agrava por sus especiales condiciones: una temperatura media de 18-35 °C y un alto índice de evaporación que es 10 superior al aporte de sus ríos.

Una planta de conversión media del 45% y un agua marina de 38,000 ppm debe verter al mar una salmuera con alrededor de 70,000 ppm. Se sabe que la fauna marina no es afectada muy significativamente gracias a su movilidad, incluso hay experiencias de una mayor cuota de captura pesquera alrededor del desagüe de las plantas desaladoras. Sin embargo hay que tratar con especial atención la flora marina existente en el litoral y en la plataforma marina. Aunque no se sabe a ciencia cierta el efecto de los vertidos de salmuera en la flora de las praderas marinas, lo que sí es cierto es que es necesario realizar una serie de medidas de protección para no dañar dichas praderas, que tienen una capacidad de producción de oxígeno incluso mayor que la selva amazónica.

En lo referente a la evacuación de la salmuera al mar, no hay soluciones definitivas, sobre todo en la cuantificación del efecto de cada una de ellas sobre la flora marina, siendo las siguientes algunas de las acciones comúnmente adoptadas:

- Vertido directo al mar a través de cauces. Esta posibilidad puede ser la más adecuada en zonas de fuertes corrientes marinas con vientos considerables, ya que en zonas cercanas a la costa los oleajes y la mayor temperatura de las aguas favorecen la mayor dilución de las descargas de salmuera.
- Construcción de túneles submarinos que sobrepasen la flora de las praderas marinas. No está muy claro si el efecto de la obra necesaria para construir el túnel va a ser más perjudicial para la pradera que su vertido en la costa.
- Utilización de túneles ya existentes de aguas residuales. Se sabe que las aguas residuales urbanas tienen un efecto más pernicioso para la flora marina que la salmuera de rechazo de las plantas desaladoras. Por lo tanto un mal menor puede ser verter dicha salmuera a lugares previamente degradados por los efectos de las aguas residuales.

Aunque no tienen la misma importancia que los vertidos de salmuera, gracias a la ínfima relación de volúmenes evacuados, ya que la suma total de ellos no supone más del 1% del total, existen otro tipo de vertidos en una planta desaladora por ósmosis inversa, que se resumen aquí:

- Agua de lavado de los filtros de arena: constituyen un agua muy cargada de arena y material orgánico, en general se vierte normalmente una vez al día.
- Productos de limpieza de las membranas. Su frecuencia depende mucho del tipo de membrana, pero en general al menos se realiza una vez al año con detergentes de naturaleza biodegradable.
- Aditivos provenientes del pre/post-tratamiento del agua de mar/producto. Normalmente no deben aparecer en los vertidos ya que se utilizan para incluirse en el agua para consumo, pero en todo caso es posible encontrar en menor medida: floculantes, anti incrustantes y anticorrosivos en las aguas de rechazo. Su carácter no biodegradable hace que deban ser controlados periódicamente.

Las plantas desaladoras consumen, además, gran cantidad de energía. Tanto si consumen energía eléctrica como si extraen energía térmica como es el caso de una planta dual, las emisiones de CO₂, NO_x y otros componentes derivados de la combustión de estas centrales térmicas deben asociarse a la planta desaladora.

Finalmente, también hay que destacar la contaminación acústica de una planta desaladora, que no suele mencionarse debido a su relativa lejanía de poblaciones y zonas habitadas. Pero debe tenerse en cuenta sobre todo en pequeñas islas o zonas con muy escaso terreno edificable. Resumiendo, el impacto ambiental derivado de la instalación de una planta desaladora tiene varias afectaciones destacables: vertido de salmuera, emisiones contaminantes a la atmósfera y ruidos.

CAPÍTULO 2

PROCESOS DE DESALACIÓN

2.1 CLASIFICACION DE LOS METODOS DE DESALACIÓN.

Como anteriormente se mencionó, en la desalación se puede separar el agua de las sales ó viceversa. Por lo tanto la primera clasificación de los métodos de desalación se hará de acuerdo a la forma de separación de sales y agua. Las siguientes clasificaciones serán según el tipo de energía utilizada para el proceso y por el proceso físico de la desalación. La tabla 2.1 muestra dicha clasificación de los métodos existentes.

Separación	Energía	Proceso	Método
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación súbita (flash)
			Destilación multiefecto
			Termocompresión de vapor
			Destilación solar
		Cristalización	Congelación
			Formación de hidratos
	Filtración y evaporación	Destilación con membranas	
Mecánica	Evaporación	Compresión mecánica vapor	
	Filtración	Ósmosis Inversa	
Sales de agua	Eléctrica	Filtración selectiva	Electrodialisis
	Química	Intercambio	Intercambio iónico

Tabla 2.1. Métodos de desalación existentes en el mercado.

A continuación, se da una breve descripción de los procesos de desalación existentes actualmente, incidiendo de forma más detallada en aquellos más extendidos en la industria desaladora.

2.2 DESTILACIÓN SÚBITA POR EFECTO FLASH

La destilación súbita por efecto flash (Multi Stage Flash Distillation, MSF), consiste en evaporar agua para conseguir vapor que no contiene sales, el vapor se condensa posteriormente en el interior ó exterior de los tubos de la instalación. Estos sistemas suelen funcionar por debajo de la presión atmosférica, por lo que necesitan un sistema de vacío, además de extracción del aire y gases no condensables. La utilización de una cámara flash permite una evaporación súbita previa a su posterior condensación. Generalmente, la cámara flash se sitúa en la parte baja de un condensador de dicho vapor generado en la cámara inferior. Por lo tanto, la recuperación de calor necesario para la evaporación se obtiene gracias a la unión sucesiva de etapas en cascada a diferente presión y es necesario el aporte mínimo de la condensación de un vapor de baja o media calidad proveniente de una planta de generación eléctrica. La figura 2.1 muestra el esquema típico de una planta de evaporación súbita por efecto flash.

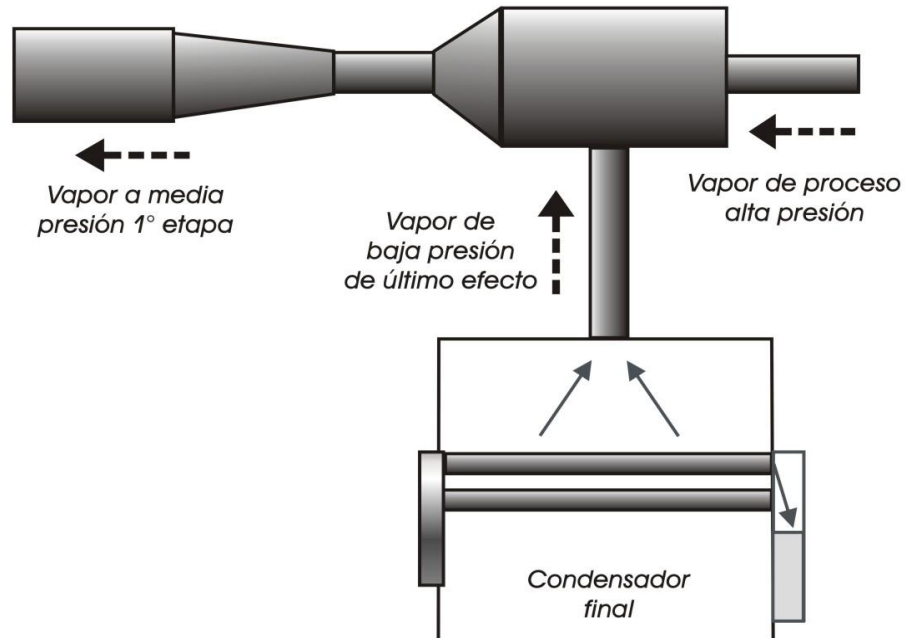


Figura 2.3 Esquema de una planta de compresión térmica de vapor.

El rendimiento de este tipo de plantas es similar a las de las plantas MED, sin embargo su capacidad desaladora puede ser mucho mayor al permitirse una mayor adaptabilidad de toma de vapor de las plantas productoras del mismo. Muchas veces se las considera el mismo proceso, pero el consumo de energía de la planta se realiza por un equipo diferente.

2.5 DESTILACIÓN SOLAR.

La energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas o muy aisladas de las poblaciones. A pesar de tener un costo energético nulo y escasa inversión, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado del colector al destilarse tan solo unos litros al día en el caso de condiciones climatológicas favorables. Por lo tanto no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce.

El principio básico es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en cuyo fondo tenemos agua salada en reposo. Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua salada se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado (ver figura 2.4).

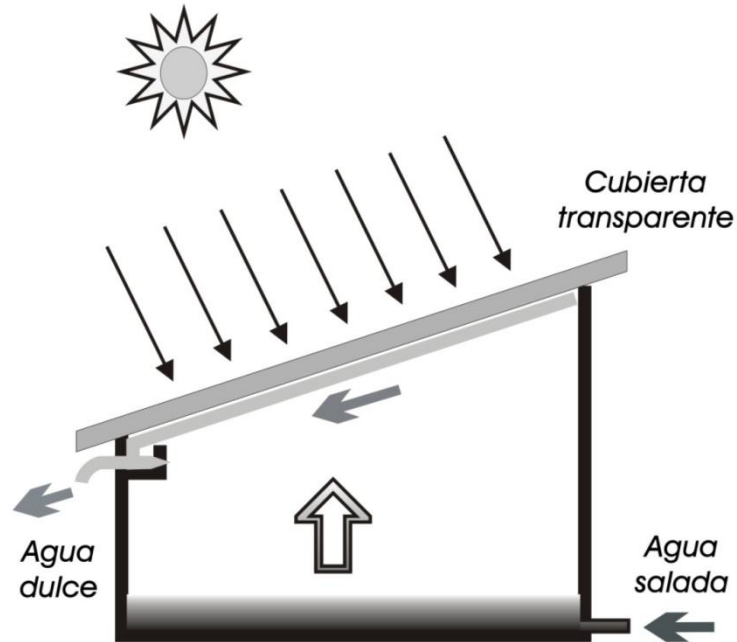


Figura 2.4. Esquema de un colector solar para destilación.

Aunque pueden utilizarse técnicas de concentración de los rayos solares apoyándose en lentes ó espejos, no suelen compensar las mayores pérdidas de calor que ello acarrea y su mayor costo económico.

Pero la energía solar también puede ser la fuente de energía de un proceso de destilación, incluso de producción eléctrica para pequeñas instalaciones de ósmosis inversa. Por ejemplo, el uso de colectores de concentración parabólicos puede usarse en procesos MSF ó MED dependiendo del costo de los colectores (producen en promedio unos 10 m³ de agua dulce por m² de colector) y factores climáticos tales como el porcentaje de factor solar del día en que la planta consume energía solar. Como se puede ver el gran problema de estas instalaciones es que no evitan la instalación convencional para producir agua dulce en circunstancias climatológicas adversas.

Un reciente estudio de recopilación de plantas de destilación solar muestra que la capacidad total instalada a escala mundial no supera los 10,000 m³/día, generalmente con colectores parabólicos acoplados a pequeñas unidades MSF ó MED.

Queda claro que estos métodos hoy por hoy no son competitivos económicamente, solo para lugares aislados, sin suministro de energía eléctrica y sin agua potable es factible pensar en estas instalaciones.

2.6 COMPRESIÓN MECÁNICA DE VAPOR

En la compresión mecánica de vapor (Mechanical Vapour Compression, MVC), se evapora el agua salada en un lado de la superficie de intercambio al ser calentada en la superficie de transferencia de calor y el vapor de agua generado es succionado y comprimido por el compresor el cual le incrementa la presión y la temperatura. El vapor ligeramente sobrecalentado se condensa, por efecto del agua de mar, en el interior de los tubos del intercambiador de calor, siendo recogido por una bomba en su parte inferior. El consumo específico de estas instalaciones es el más bajo de los procesos de destilación: normalmente el consumo eléctrico equivalente está sobre los 10 kWh/m^3 , la mitad que una planta MSF. En la figura 2.5 podemos ver el esquema de un compresor de vapor acoplado a un intercambiador de placas.

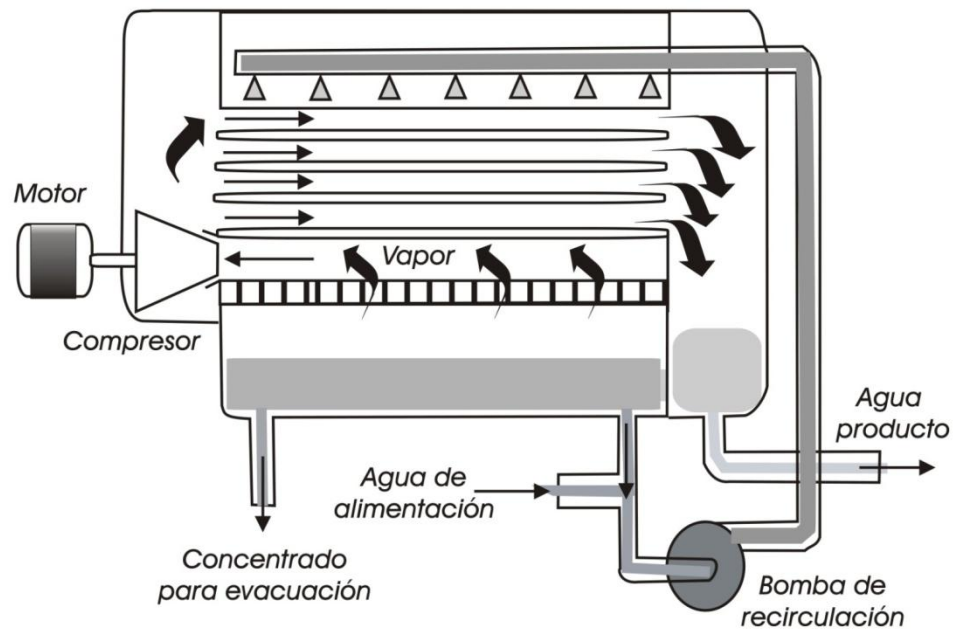


Figura 2.5. Diagrama de una unidad de compresión mecánica de vapor.

Aunque su consumo específico es con mucho menor que el de las instalaciones de destilación, tiene un gran inconveniente: la poca disponibilidad en el mercado de compresores volumétricos de baja presión de tamaño suficiente para una producción considerable. Así las unidades MVC no son mayores de $5,000 \text{ m}^3/\text{día}$, y estos compresores solo permiten un máximo de 3 etapas a diferentes presiones conectadas en cascada. Como el número de etapas es reducido hay que recuperar la energía de salida de la salmuera, por lo que normalmente existen intercambiadores de precalentamiento del agua de aporte con el destilado y la salmuera tirada al mar, ayudados por resistencias eléctricas en los arranques, así como todos los dispositivos de tratamiento de agua anteriores y posteriores al proceso de destilación.

2.7 ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis es un proceso natural que ocurre en plantas y animales, es de fundamental importancia en los mecanismos de transporte y control en los sistemas biológicos, como por ejemplo en el crecimiento de las plantas y el funcionamiento general de las células. De forma esquemática (ver figura 2.6) podemos decir que cuando dos soluciones con diferentes concentraciones se unen a través de una membrana semipermeable (es decir, permite el paso de agua pero no de sales), existe una circulación natural de la solución menos concentrada para igualar las concentraciones finales, con lo que la diferencia de altura obtenida (suponemos los recipientes de cada soluto al mismo nivel inicial) se traduce en una diferencia de presión, llamada osmótica.

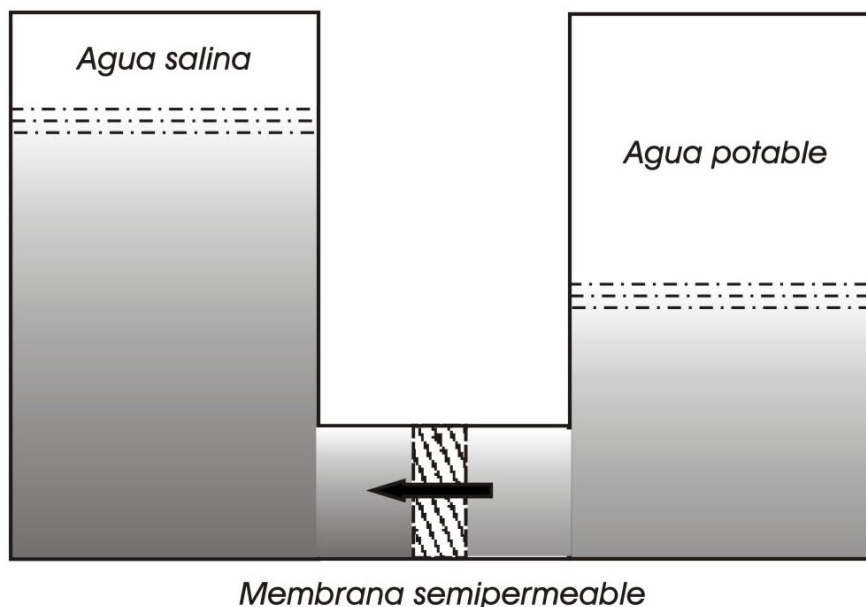


Figura 2.6. Proceso natural de ósmosis.

Sin embargo aplicando una presión externa que sea mayor a la presión osmótica, el proceso se puede invertir, haciendo circular agua de la disolución más concentrada y purificando la zona con menor concentración, obteniendo finalmente un agua de pureza admisible, aunque no comparable a la de procesos de destilación (ver figura 2.7). Por eso es altamente recomendable para la filtración de aguas salobres, en las que la sal a rechazar es mucho menor que en aguas marinas. La cantidad del permeado depende de la diferencia de presiones aplicada a la membrana, sus propiedades y la concentración del agua a tratar. La calidad del agua permeada suele estar en torno a los 300-500 ppm de TDS, cifra un orden de magnitud mayor al agua obtenida en un proceso de evaporación.

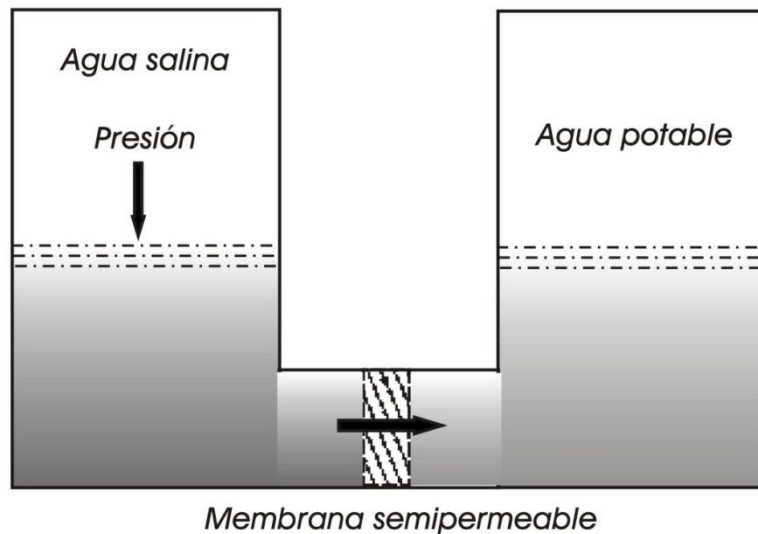


Figura 2.7 Proceso de ósmosis inversa.

Una membrana para realizar ósmosis inversa (Reverse Ósmosis, RO) debe resistir presiones mucho mayores a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones. Por ejemplo un agua de mar de 35,000 ppm a 25 °C tiene una presión osmótica de alrededor de 25 bar, pero son necesarios 70 bar para obtener el permeado. Además deber ser permeable al agua para permitir el flujo y rechazar un porcentaje elevado de sales. Sin embargo no se puede considerar la RO como un proceso de filtración normal, ya que la dirección de flujo del agua a tratar es paralela y no perpendicular como un caso cualquiera de filtración. Ello implica que tan solo una parte del agua de alimentación pasa realmente a través de la membrana y que no se acumulen sales en la membrana al ser arrastradas por el agua bruta que no pasa por la membrana (ver figura 2.8).

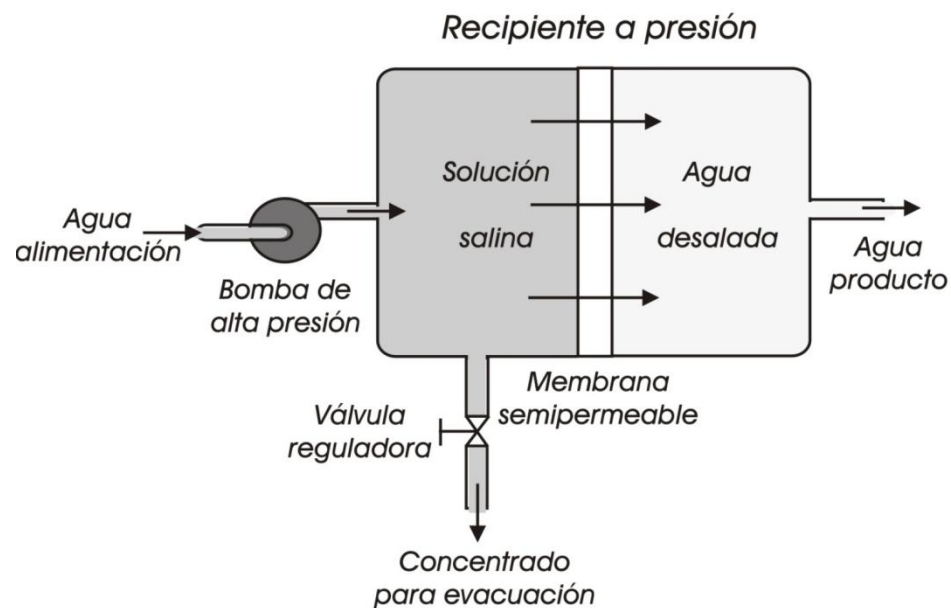


Figura 2.8 Desalación por ósmosis inversa.

El proceso de ósmosis inversa es tan simple que solo son necesarias las membranas que filtren el agua salina y el equipo presurizador. Pero una planta de RO es mucho más compleja que una agrupación de módulos y una o varias bombas, por ejemplo las membranas se ensucian muy fácilmente con la operación continua y necesita un pretratamiento intensivo mucho mayor que en los procesos de destilación. El postratamiento en una planta de este tipo suele ser un tratamiento complementario para conseguir las condiciones de potabilidad requeridas.

El proceso de ósmosis inversa es predominante en nuestro país. Las razones de su imposición con respecto a otras tecnologías son las siguientes:

- El consumo eléctrico de una instalación de ósmosis inversa es el menor de los estudiados hasta ahora (6-8 kWh/m³), pero se puede aprovechar la energía contenida en la salmuera rechazada a alta presión para disminuir esa cifra hasta por debajo de 3 kWh/m³.
- Al ser un proceso de filtración, el costo energético depende de la concentración del agua de alimentación, cosa que no ocurre en las tecnologías de evaporación.
- Permite una adaptabilidad mayor que otras plantas a una ampliación de su capacidad si la demanda es creciente en la zona.
- Los costos de inversión de una instalación de RO están por debajo de otras tecnologías de destilación.

2.8 ELECTRODIÁLISIS

El proceso de Electrodialisis (Electrodialysis, ED) permite la desmineralización de aguas salobres haciendo que los iones de diferente signo se muevan hacia zonas diferentes aplicando campos eléctricos con diferencias de potencial aplicados sobre electrodos, y utilizando membranas selectivas que permitan solo el paso de los iones en una solución electrolítica como es el agua salada.

El proceso puede verse más claramente en la figura 2.9, donde los iones van a los compartimentos atraídos por los electrodos del signo contrario, dejando en cubas paralelas el agua pura y en el resto el agua salada más concentrada. Es un proceso que solo puede separar sustancias que están ionizadas y por lo tanto su utilidad y rentabilidad está especialmente indicada en el tratamiento de aguas salobres ó reutilización de aguas residuales, con un consumo específico y de mantenimiento comparable en muchos casos a la ósmosis inversa.

En algunas ocasiones, la polaridad de los ánodos y cátodos se invierte alternativamente para evitar el ensuciamiento de las membranas selectivas al paso de dichos iones. En este caso se habla de electrodialisis reversible (EDR).

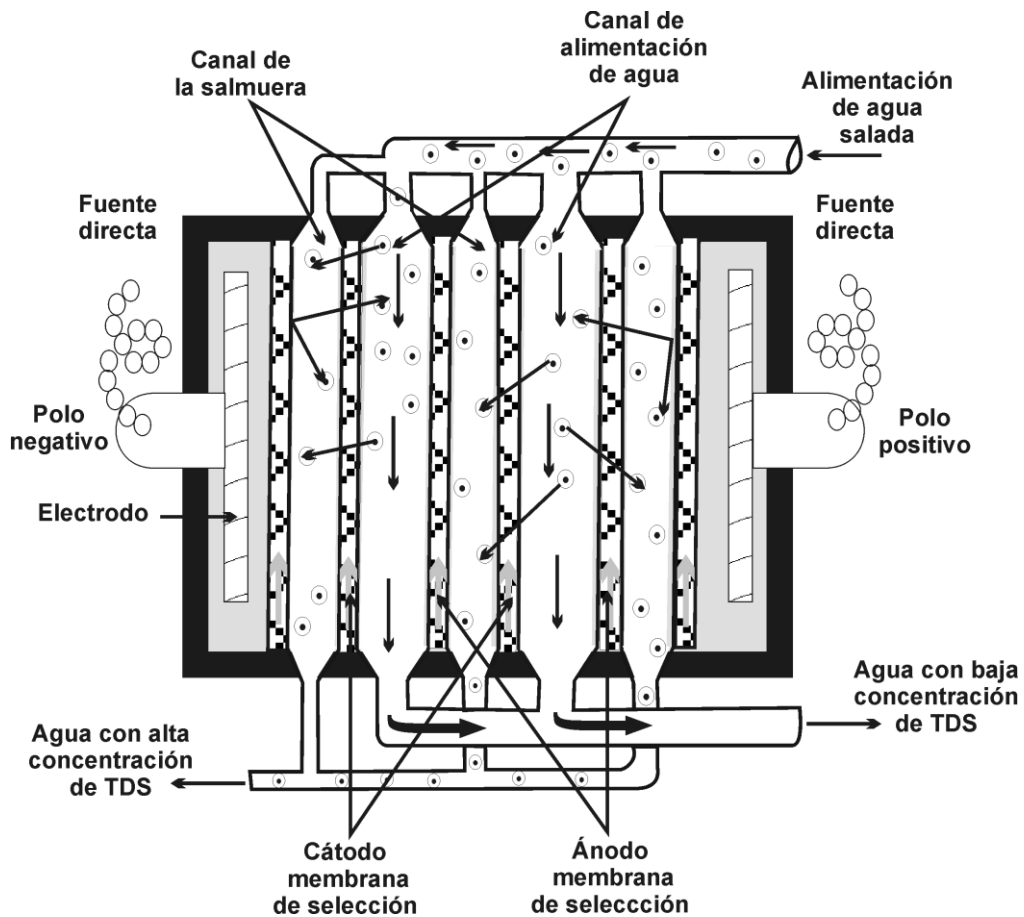


Figura 2.9 Proceso de electrodiálisis.

2.9 OTROS PROCESOS DE DESALACIÓN.

Congelación.- Este proceso consiste en congelar el agua y recoger los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener agua dulce independientemente de la concentración del agua inicial. Aunque pueda parecer un proceso muy sencillo tiene problemas de adaptación para su implantación a escala industrial, ya que el aislamiento térmico para mantener el frío y los mecanismos para la separación de los cristales de hielo deben mejorarse para que este proceso sea algún día competitivo. No se ofrecen datos del consumo específico de este proceso porque solo existen experimentos a pequeña escala no extrapolables a la realidad.

El proceso de congelación es un fenómeno natural que se contempla con mucha facilidad en nuestro Planeta, como se indicó anteriormente, alrededor del 70% del agua dulce está contenida en los polos terrestres. La utilización del hielo de los polos para el consumo humano es muy poco conveniente para la conservación del equilibrio térmico del Planeta.

Formación de hidratos.- Es otro método basado en el principio de la cristalización, que consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18. Al igual que el anterior proceso, su rendimiento energético es mayor que los de destilación, pero con lleva una gran dificultad tecnológica a resolver en cuanto a la separación y el lavado de los cristales, que impiden su aplicación industrial.

Destilación por membranas.- Es un proceso combinado de evaporación y filtración. El agua salada se calienta para mejorar la producción de vapor, que se expone a una membrana que permite el paso de vapor pero no del agua. Después de atravesar la membrana el vapor se condensa, sobre una superficie más fría, para producir agua desalada. En estado líquido, esta agua no puede retroceder atravesando la membrana por lo que es recogida y conducida hacia la salida. Desgraciadamente, este proceso únicamente ha sido desarrollado a nivel de laboratorio por varios grupos de investigación científica y sus perspectivas son esperanzadoras.

Intercambio iónico.- Las resinas de intercambio iónico son sustancias insolubles, que cuentan con la propiedad de que intercambian iones con la sal disuelta si se ponen en contacto. Hay dos tipos de resinas: aniónicas que sustituyen aniones del agua por iones OH⁻ (permutación básica), y resinas catiónicas que sustituyen cationes por iones H⁺ (permutación ácida).

La desmineralización por intercambio iónico proporciona agua de gran calidad si la concentración de sal es menor de 1 gr/l. Por lo tanto se utiliza para acondicionar agua para calderas a partir de vapores recogidos o acuíferos, o en procesos industriales con tratamiento de afino. Las resinas normalmente necesitan regeneración con agentes químicos para sustituir los iones originales y los fijados en la resina, y terminan por agotarse. Su cambio implica un costo difícilmente asumible para aguas de mar y aguas salobres.

A modo de recopilación es conveniente realizar un análisis comparativo de las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos métodos utilizados en la desalación del agua de mar. La tabla 1.5 muestra la valoración de todos los métodos comentados anteriormente frente a ciertas características exigibles a un método desalador.

Característica	MSF	MED-TVC	MVC	RO	ED
Tipo energía	térmica	Térmica	eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo energético primario (kJ/kg)	alto (>200)	alto/medio (150-200)	medio (100-150)	bajo (<80)	bajo (<30)
Costo instalaciones	alto	alto/medio	alto	Medio	Medio
Capacidad producción (m ³ /día)	alta (>50.000)	Media (< 20.000)	baja (<5.000)	Alta (>50.000)	media (<30.000)
Posibilidad ampliación	difícil	Difícil	difícil	Fácil	Fácil
Fiabilidad de operación	alta	Media	baja	Alta	Alta
Desalación agua de mar	sí	Sí	sí	Sí	No
Calidad agua desalada (ppm)	alta (< 50)	alta (< 50)	alta (< 50)	Media (300-500)	media (<300)
Superficie terreno requerida de instalación	mucha	Media	poca	Poca	Poca

Tabla 2.2. Valoración de diferentes características deseables para los métodos de desalación.

A la vista de esta tabla, queda claro que la ósmosis inversa es en conjunto la tecnología más favorable, en base a su mejor precio de obtención del agua, su ampliabilidad y su fiabilidad. La calidad del agua es menor que el resto de las tecnologías, si no se contempla la posibilidad de añadir un segundo paso para reducir esa concentración salina residual tras un único paso por las membranas.

2.10 AHORRO DE ENERGÍA EN LOS PROCESOS DE DESALACIÓN.

En las plantas de destilación súbita por efecto flash (MSF), el agua salada es calentada gradualmente en el interior de los tubos de los condensadores, hasta llegar a un calentador final que usa como fuente de calor la condensación del vapor proveniente de una planta de potencia. Para ahorrar energía, el proceso se realiza en varias etapas o cascadas y se recircula la salmuera, que permite además reducir la alimentación del agua del mar y el consumo de aditivos químicos.

La mayoría de las plantas de destilación por efecto múltiple (MED) y las de compresión térmica de vapor (TVC), contienen evaporadores horizontales, en los cuales la salmuera cae en forma de fina película a través de cada efecto. Pero también existen en el mercado evaporadores de tubos verticales, en ellos, una delgada película de agua salada va cayendo por el interior de los tubos hasta evaporarse parte de la misma, condensándose el vapor en el exterior de los tubos. En general la eficiencia es mayor en los tubos verticales ya que necesita menor superficie de intercambio para producir la misma cantidad de destilado, pero su costo es más alto.

Es en las plantas de ósmosis inversa (RO) en donde se han desarrollado más sistemas o dispositivos de recuperación de energía que han permitido la desalinización de agua de mar con un consumo energético de algo menos de 4 kWh/m³. Algunos de estos dispositivos son los siguientes:

Utilización de turbinas Pelton convencionales o Francis, acopladas al eje del motor de la bomba. Existen equipos integrados que contienen los dos elementos. El ahorro promedio conseguido es del 40%.

Introducción de bombas centrífugas que pueden girar en sentido inverso aprovechando la alta presión de la salmuera de rechazo.

Aprovechamiento de la presión de la salmuera de rechazo para instalar un segundo paso de membranas que soporten una alta presión (superior a 90 bar) junto con una bomba de alta presión para vencer la diferencia de presiones osmóticas generada en este segundo paso.

Uso de un Intercambiador de Presión (Pressure Exchanger, PE) que es un pistón que transfiere la energía de presión directamente desde la salmuera de rechazo al flujo de alimentación. Después de haberse efectuado el proceso de ósmosis inversa, la salmuera de rechazo sale a alta presión y acciona el pistón del PE, que en el otro extremo está ingresando parte del agua a desalar, incrementándole la presión hasta un 97% de la requerida en el proceso, pasando este flujo a la bomba de recirculación, que proporciona el 3% faltante. El flujo de la bomba de alimentación (45%) se mezcla en el flujo de la bomba de recirculación (55%) y el flujo total pasa a las membranas. Este sistema permite ahorros de energía del 50 al 65% del consumo normal.

La integración de bombas de calor a sistemas de destilación ha sido propuesta por varios autores con el objeto de reducir los consumos de energía. El equipo consta de una bomba de calor por absorción integrada a un sistema de purificación de efluentes. El par de trabajo utilizado es agua/bromuro de litio, donde el agua es el fluido de trabajo y el bromuro de litio es el absorbente.

En el generador se suministra vapor como medio de calentamiento, la solución rica en refrigerante se calienta y se desprende parte del fluido de trabajo. Después, este fluido de trabajo pasa al condensador donde al condensarse cede calor al efluente. Posteriormente, pasa por una válvula de expansión antes de llegar al evaporador donde al recibir calor del destilado del efluente se evapora; enseguida pasa al absorbedor donde se absorbe con la solución pobre en fluido de trabajo, la cual proviene del generador pasando previamente por el economizador antes de llegar al absorbedor; al absorberse cede calor al efluente. Finalmente, la solución rica en fluido de trabajo se bombea hacia el economizador antes de llegar de nuevo al generador.

El trayecto del efluente es el siguiente: la alimentación se divide en dos corrientes, una de ellas va hacia el condensador donde recibe una cantidad de calor mientras se condensa el fluido de trabajo. La otra corriente va hacia el absorbedor donde recibe otra cantidad de calor al absorberse el fluido de trabajo con la solución pobre en fluido de trabajo. Luego se juntan las dos corrientes para pasar por un separador donde se separa el vapor y el líquido. El vapor se envía hacia el evaporador donde se condensa y se obtiene el agua destilada.

2.11 PROCESOS DE DESALACION DE NUEVA GENERACION.

Recientemente, se prestó atención al hecho de que la industria de la desalación trae consigo un nuevo y serio problema ecológico relacionado con la descarga de salmueras concentradas en las áreas marinas circundantes. Es conocimiento común que la elevación de la salinidad del agua del mar tiene un efecto desfavorable en el bio-sistema existente y que la exposición a largo plazo al exceso de sal, trae como consecuencia la destrucción de muchos tipos de flora y fauna marinas.

El desarrollo de una nueva generación de tecnologías amistosas con el medio ambiente, así como la modificación de los procesos de desalación industrial existentes es la forma de obtener procesos seguros ecológicamente. Es difícil esperar en el futuro cercano la conversión ecológica de los métodos de desalación actuales.

Una alternativa es el tratamiento de las salmueras de tal manera que dejarán de contaminar el ambiente marino, para lo cual es necesario aumentar la concentración de ellas de 4 a 6 veces mayor que la salinidad del agua de mar original, en contraste con el 1.5 a 2.5 veces que se alcanzan con las tecnologías convencionales en la actualidad.

Esto permitiría el desarrollo de tecnologías libres de desechos al procesar el agua salina, produciendo agua potable y valiosos productos minerales. En la actualidad, muchos países están realizando grandes esfuerzos para el desarrollo de este tipo de tecnologías.

Las altas concentraciones de salmueras permiten la producción de valiosos minerales y proteger el ambiente marino si las descargas de salmueras pueden evitarse. El problema es que este incremento requiere descalcificación profunda del agua del mar para evitar erosionar las superficies de transferencia de calor o saturar las membranas. Se conocen métodos de adsorción que podrían resolver este problema y desmineralizar el agua de mar ampliamente.

Estos métodos consisten en utilizar la salmuera de desecho para la regeneración del adsorbente en procesos de funcionamiento cíclicos. El problema es que la cantidad de salmuera producida en un ciclo de funcionamiento no es bastante para la regeneración completa del absorbente y requiere reactivos adicionales para la regeneración. Si fuera posible el regeneramiento completo del solvente en un solo ciclo de funcionamiento, permitiría la creación de un ciclo autosuficiente con un proceso de desmineralización y desalación, que sería totalmente ecológico dando origen a la creación de una nueva generación de procesos amistosos con el medio ambiente.

Mironova y Khamizov (1993), elaboraron un método simple de producción de un adsorbente barato de alta extra selectividad hacia el Ca^{2+} y al Mg^{2+} . Ellos demostraron la posibilidad de lograr la regeneración completa de un adsorbente por cada ciclo de adsorción usando una porción de salmuera concentrada producida en el ciclo de ablandamiento-desalación. Este fenómeno fue descrito como un fenómeno fundamental de Intercambio de iones Isotérmicos sobresaturados (IXISS). Esta solución sobresaturada se cristaliza espontáneamente después de dejar la columna. El IXISS ofreció nuevas posibilidades para la creación de procesos de intercambio de iones eficaces para: funcionar con soluciones concentradas de compuestos solubles pobres ya que cambiar el equilibrio de intercambio iónico a la dirección deseada, simplificar y combinar los procesos de desadsorción, regeneración y aislamiento de producto de sólido en una fase y separa selectivamente los compuestos puros.

Otra tecnología propuesta a futuro y en etapa de investigación es la de plantas de ósmosis inversa en el fondo del mar. Consiste en instalar a profundidades de 365 a 619 m. (1,200 a 2,000 pies), recipientes con membranas que aprovechando la presión del mar a esa profundidad se realizaría el proceso de ósmosis inversa, obteniéndose agua potable que sería enviada a la superficie por medio de una bomba sumergible. Este proceso consumiría únicamente la mitad de energía y el costo de inversión sería también la mitad comparados con una planta convencional. El proceso sería totalmente ecológico, no requeriría pretratamiento, no se tendría salmuera rechazada, no requeriría dispositivos de recuperación de energía, no requeriría inversión en la compra de terreno y únicamente tendría como parte móvil la bomba sumergible.

CAPÍTULO 3

ENERGIAS RENOVABLES

3.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA.

Las energías renovables se pueden clasificar, según su procedencia, en biomasa, biocombustibles, hidráulica, eólica, solar térmica, solar fotovoltaico, geotérmico y marina (mareas y olas). Su duración está unida a la vida de nuestro planeta y su disponibilidad no es controlable por el ser humano, ya que depende de las condiciones climáticas, que son factores externos a la demanda. Por otra parte, las fuentes de energía primaria no renovable o convencionales son el petróleo, el gas natural, el carbón y la energía nuclear, cuya duración depende del agotamiento de las materias primas.

Principalmente haremos referencia a la evolución de las energías renovables de tipo solar y de tipo eólico. Su aprovechamiento por parte de la humanidad se remonta a varios miles de años a.C., con el uso de espejos curvados que concentraban la radiación solar para iniciar un fuego o con la utilización de velas para navegar. Las crisis energéticas por la escasez de combustibles han sucedido desde el siglo V a.C. en Grecia, lo que ha impulsado desde entonces el desarrollo de tecnologías de explotación de recursos renovables. Estas etapas de desarrollo sostenible han estado seguidas de períodos de olvido, cuando se ha encontrado otra fuente energética de bajo coste y de mayor eficiencia. La última crisis energética importante ha sido la del petróleo en el período entre 1973 y 1979.

Sin lugar a dudas, se puede considerar a la segunda mitad de los siglos XIX y XX como las épocas de mayor apertura y avance tecnológico en las energías renovables, derivadas del desarrollo de la electrotecnia y la electrónica, potenciadas con el desarrollo de las tecnologías de los materiales y la aerodinámica. Simplificando muchísimo la historia de estas energías, cabe destacar el desarrollo de los molinos de viento en los siglos XII y XIII para producir energía mecánica, y habría que esperar hasta finales del siglo XIX para que el americano Brush generara electricidad (12 kW en corriente continua). En Europa, La Court inició el desarrollo eólico, y posteriormente Joules, en los años cincuenta, logró generar corriente alterna. Los avances se han ido sucediendo hasta conseguir potencias del orden del megavatio.

En el desarrollo de la energía solar térmica se puede distinguir una primera etapa basada en la concentración de la energía con espejos. Hasta el siglo XVIII no se puede hablar de captador plano o cajas calientes solares, inventadas por Saussure, que se basan en la capacidad del vidrio para retener calor. En paralelo a este descubrimiento se desarrollaba la óptica como una rama de la física, llegando a conseguir Lavoisier fundir platino con un sistema de lentes que concentran la radiación. En el siglo XIX, Mouchot inventó la primera máquina solar con reflectores cónicos, que fue perfeccionada posteriormente por otros técnicos, aunque la comercialización tuvo poco éxito.

Un cambio significativo en el aprovechamiento de la energía solar llegó con el descubrimiento del efecto fotovoltaico por Becquerel en el siglo XIX, estudiado por Hertz en los sólidos y con el que Einstein obtuvo el premio Nobel en 1921.

Los años cincuenta se propulso el despegue tecnológico de las celdas fotovoltaicas con el desarrollo de los semiconductores, que en 1958 fueron aplicadas al satélite Vanguard para suministrar energía. Desde entonces, se han ido produciendo mejoras de eficiencia muy significativas.

3.2 LA IMPORTANCIA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.

La energía solar es la luz y el calor irradiado por el sol el cual influye sobre el clima y la meteorología de la tierra y sustenta la vida. Desde tiempos ancestrales la energía solar ha sido utilizada por los humanos a través de distintas tecnologías. La radiación solar junto a otros recursos solares secundarios como es el viento, la energía de las olas, hidroelectricidad o la biomasa suman la mayoría de la energía renovable disponible sobre la tierra.

Las diferentes tecnologías que captan la energía solar pueden generar electricidad por medio de motores de calor o módulos fotovoltaicos. Con estas tecnologías podemos calentar o enfriar espacios en construcciones solares activas o pasivas, obtención de agua potable por destilación y desinfección, dar luz, calentar agua, energía termal para cocinar, procesos de alta temperatura para propósitos industriales y de desalinización. La energía solar se refiere principalmente al uso de la radiación solar con fines prácticos. El resto de las energías renovables excepto la geotérmica y mareomotriz derivan su energía del sol. Las aplicaciones de la tecnología solar van desde la generación de electricidad hasta calentar el agua.

El sol irradia su energía en todas direcciones, de tal manera que la energía que recibe la Tierra por unidad de área es la cantidad resultante de dividir su energía total entre el área de una esfera que tenga como radio la distancia media de la tierra al sol. Esta distancia es de 1.5×10^{11} m, y se conoce como "Unidad Astronómica. Si efectuamos el cálculo, obtenemos el valor de la llamada "Constante Solar", $1,367 \text{ W/m}^2$].

Esta potencia incide sobre un disco circular con un área de $1.27 \times 10^{14} \text{ m}^2$, como se muestra en la (Ver figura 3.1), (el radio promedio de la Tierra es aproximadamente de 6,371 Km). Al multiplicar el valor de la constante solar por el área transversal de la tierra obtenemos $1.74 \times 10^{17} \text{ W}$ que es la potencia que incide sobre la tierra].

La tierra recibe 174 peta vatios (PW) de radiación solar en la atmósfera superior. Aproximadamente el 30% es reflejada de vuelta al espacio mientras que el resto es absorbida por las nubes, océanos y masas de tierra. La energía solar total absorbida por la atmósfera de la Tierra, océanos y masas de tierras es aproximadamente 3.850.000 Ej. (Exajulios) por año.

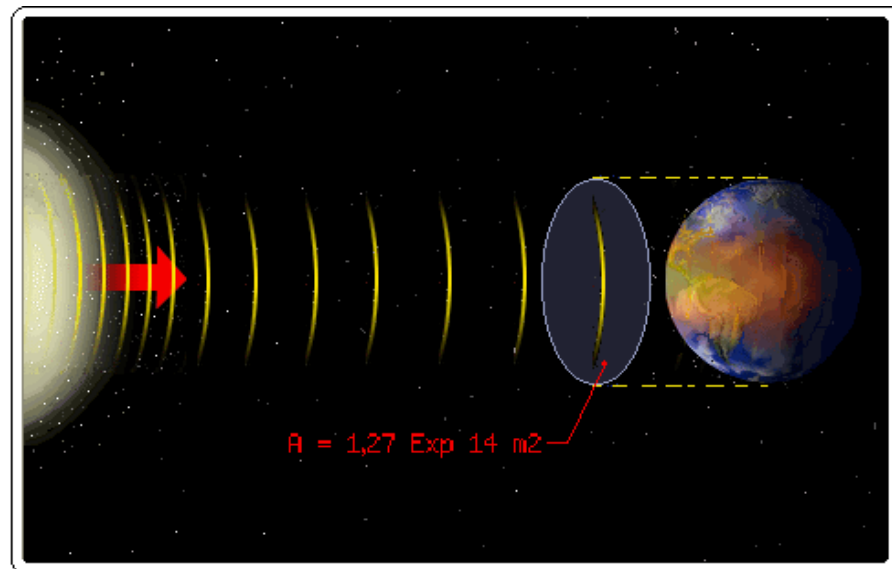


Figura 3.1.- La radiación del sol incide sobre el área transversal de la tierra, propiciando el origen de la mayor parte de las fuentes de energía.

La cantidad de energía solar que alcanza la superficie del planeta es tan grande que en un año llega el doble de energía que se pueden obtener de todos los recursos no renovables de la tierra juntos, carbón, petróleo, gas natural y uranio extraído (ver tabla 3.1).

Flujos del Año Solar y Consumo de Energía Humanos (Ej)	
Solar	3,850,000
Eólica	2,250
Biomasa	3,000
Uso de energía primaria	487
Electricidad	56.7

Tabla 3.1 Flujos del Año Solar y cantidades de Consumo de Energía Humanos.

Parecería que con la energía solar, eólica y la biomasa sería suficiente para satisfacer todas nuestras necesidades energéticas. La energía solar es muy potente. La energía del sol, conjuntamente con otras energías renovables, debería ser mucho mejor aprovechada de lo que es en la actualidad. Al parecer, si la energía solar fuera utilizada en todo su potencial, sería posible alimentar 24 billones de planetas similares al planeta Tierra.

Estudios realizados sobre los beneficios reportados por la electrificación autónoma, utilizando como fuente primaria las energías renovables, han arrojado resultados diversos en distintas zonas rurales y resuelto los problemas concretos, ya que se presentan casos en los cuales la aceptación por parte de los beneficiarios es casi absoluta; pero en otros han chocado con intereses infraestructurales. Las energías renovables pueden ser una opción para las zonas aisladas de la red eléctrica.

Las energías renovables son una fuente inagotable proveniente de los recursos naturales, así mismo se encuentran en armonía con el medio ambiente pues su

función dentro de los sistemas es nula con respecto a la liberación de emisiones de bióxido de carbono, lo cual es un tema de gran importancia en la actualidad, y resultan ser una alternativa para solucionar aspectos de los sistemas energéticos.

3.3 TIPOS DE ENERGÍAS RENOVABLES Y SU POTENCIAL.

El potencial para la generación de electricidad térmica solar que es técnicamente posible es varias veces mayor que el consumo de electricidad en todo el mundo, la principal aplicación de la energía térmica es ser una fuente suministro de alto potencial de energía. En contraste con la energía fotovoltaica, que son eficaces para baja y media potencia en los sistemas descentralizados, las centrales eléctricas termosolares generan electricidad a gran escala entre 50 y 250 megavatios.

Con la integración de almacenamiento térmico, este poder puede ser suministrado bajo demanda, permitiendo así a las plantas de energía solar generar electricidad, incluso después de la puesta del sol. Las plantas de energía solar térmica por lo tanto tienen el potencial de reemplazar las centrales eléctricas de combustible fósil. Las plantas de energía solar térmica es un término general para referirse a las diversas tecnologías.

Con respecto al potencial de la energía eólica, es capaz de adquirir potencias de alto, medio o bajo rendimiento desde viviendas hasta MW de potencia efectiva, para cubrir necesidades perfectamente de consumo energético únicamente o en combinación con otros equipos. El aerogenerador esta diseñado para cubrir demandas de energía necesarias y adaptables a las instalaciones de distintas magnitudes y ubicaciones, por características y requerimientos, lo mismo que los sistemas de implementación solares, finalmente son bastantes los beneficios, pues incluyen reducción de costos y contaminantes.

La importancia de obtener el potencial eólico radica en que nos da una idea clara acerca de la cantidad de potencia que en un momento dado, podríamos aprovechar o sustraer del viento al implementar aerogeneradores, que son máquinas capaces de transformar la energía cinética del aire en energía eléctrica.

3.4 ENERGÍA EÓLICA.

Las primeras máquinas eólicas de las que se tiene noticia aparecieron en las regiones del Tibet y Mongolia poco antes del siglo II a.C., y se usaron con fines religiosos. En la antigua Persia apareció por primera vez el molino de viento para moler granos (Ver figura 3.2). Era un molino diseñado sobre un eje vertical formado por una torre de mampostería con una pared frontal que dirigía el viento sobre las palas del rotor. El rotor estaba formado por seis u ocho palas de madera unidas a un eje que a su vez se conectaba a una muela situada en su base.

Su sistema de regulación era un sistema de compuertas de accionamiento manual que permitía la entrada de un mayor o menor flujo de aire. El diseño de estas maquinas era muy elemental y su fabricación muy tosca.

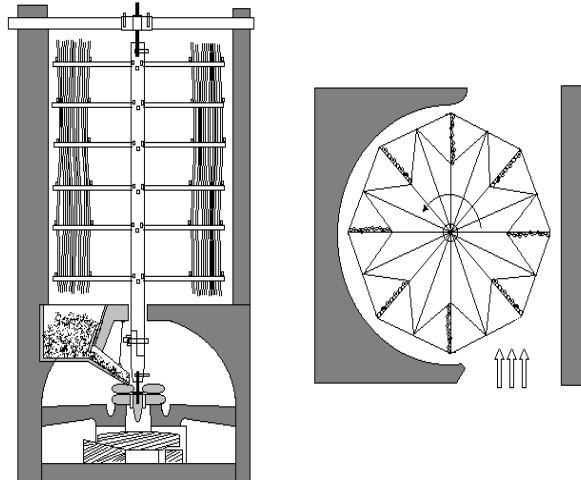


Figura 3.2. - Estructura de antiguo molino persa.

En la antigua China se utilizaron unos molinos de eje vertical denominados “panémonas” y su función era bombear agua. Sus palas estaban constituidas de velas de juncos (Ver figura 3.3).

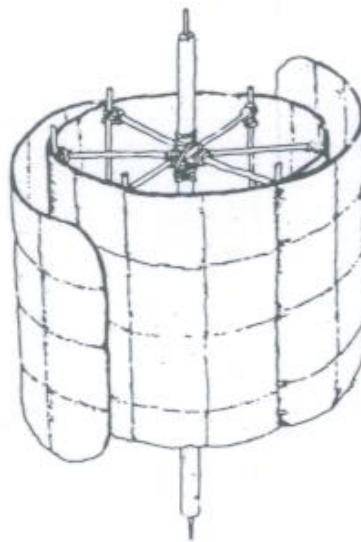


Figura 3.3.- Primeras máquinas eólicas conocidas como ruedas de oración.

La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas. En la actualidad se utiliza, sobre todo, para mover aerogeneradores. En estos la energía eólica mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el

rotor de un generador, normalmente un alternador, que produce energía eléctrica (Ver figura 3.4).

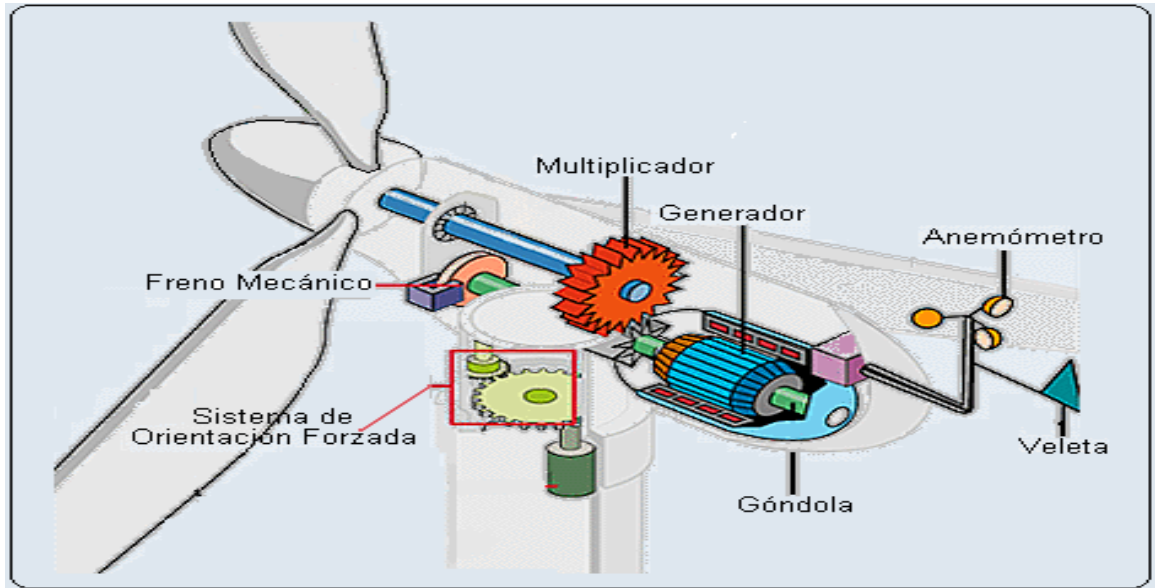


Figura 3.4.- Componentes del aerogenerador.

Durante los últimos años, el desarrollo tecnológico de los aerogeneradores se ha visto fuertemente influenciado por causas económicas, dando lugar a diseños cuyas características se distinguen por la reducción en el costo de los componentes e instalación así como por el aumento en la producción de potencia.



Figura 3.5.- A la izquierda NEG Micon 1,5 MW, al centro Bonus 2 MW, a la derecha Nordex 2,5 MW. Estos modelos debido a su gran capacidad poseen torres con una altura que supera los 80 metros de altura.

La energía eólica es la que se obtiene por medio del viento, es decir mediante la utilización de la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire.

La energía eólica, puede sugerirse como una considerable opción ya que es una alternativa como fuente de suministro energético adaptable para administrar energía eléctrica de todo tipo de potencial (Ver figura 3.6).

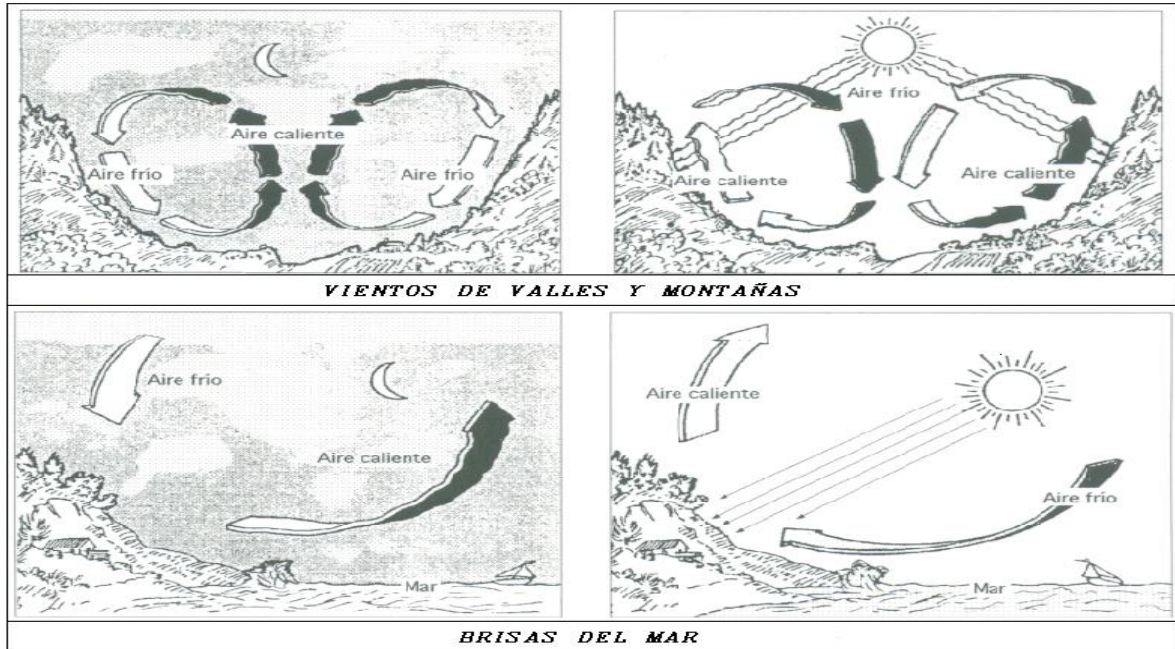


Figura 3.6.- Vientos locales originados por la combinación de efectos térmicos y orográficos.

Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines y ser aprovechados al máximo, por ejemplo, en zonas desérticas, próximas a la costa, en laderas áridas y muy empinadas para ser cultivables, en viviendas, etc. Puede convivir con otros usos del suelo. Dado que los aerogeneradores actuales son de baja velocidad de rotación, de diferentes niveles de potencia, dependiendo de las necesidades y requerimientos son adaptables y algunas veces combinados con otros equipos solares constantemente.

La energía eólica es una fuerte alternativa al cambio climático ya que no produce efecto invernadero y requiere un amplio aprovechamiento del aire sin afectar el medio ambiente. La instalación es rápida, entre 6 meses y un año, lo que indica una implementación de equipo a corto plazo. Su utilización combinada con otros tipos de energía, habitualmente la solar, permite la auto alimentación de viviendas, de sistemas de procesos industriales, y de instituciones, terminando así con la necesidad de conectarse a redes de suministro y dependencias de mas alto coste tanto en su funcionamiento y mantenimiento.

La demanda global de energía sigue creciendo a un ritmo vertiginoso, lo que requerirá una importante inversión en nueva capacidad de generación de energía y la infraestructura de red. Así como la demanda de energía sigue creciendo, los suministros de combustibles fósiles están disminuyendo y los precios van en

aumento constante de crecimiento del mercado de energía eólica está siendo impulsado por una serie de factores, incluyendo el contexto más amplio de la oferta y demanda de energía, el creciente perfil de las cuestiones ambientales, especialmente el cambio climático, y las mejoras impresionantes en la tecnología misma. Estos factores se han combinado en muchas regiones del mundo para fomentar el apoyo político para el desarrollo de la industria.

En muchos sitios, la energía eólica ya es competitiva con las tecnologías convencionales de nueva construcción y en la mayoría de los casos mucho más económica. Por ejemplo, si tenemos en cuenta el precio del carbono, la energía eólica es aún más atractiva.

La creación de empleo y desarrollo económico regional son también factores clave en las consideraciones económicas en torno a la energía eólica. La energía eólica tiene sentido económico sólido. En contraste con otras fuentes de generación, el precio del combustible necesario para la duración total de un aerogenerador es bien conocido: es cero. Esto le quita una parte sustancial de riesgo a la inversión requerida.

La energía eólica es una tecnología limpia, es un sistema de generación de energía libre de emisiones contaminantes. Al igual que todas las fuentes renovables se basa en la captación de la energía de las fuerzas naturales mediante fuentes inagotables y no tiene ninguno de los efectos contaminantes asociados a los «convencionales» combustibles.

No sólo es la energía eólica la tecnología de generación eléctrica, es considerada como alternativa porque puede entregar las fuertes reducciones de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que el mundo necesita para combatir los efectos del cambio climático, sino que también proporciona numerosos beneficios ambientales. Tiene un efecto positivo sobre la contaminación atmosférica al no emitir contaminantes peligrosos del aire como las tecnologías de generación de otros.

Para que su instalación resulte rentable, por ejemplo, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos. Las ventajas de la energía eólica, es que son un tipo de energía renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos debidos a la energía que llega a la Tierra procedente del sol. Por lo tanto es una energía limpia ya que no requiere una combustión que produzca dióxido de carbono (CO₂), y no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes.

3.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

La energía solar fotovoltaica, la cual se basa en la captación de energía solar y su transformación en energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas, se viene usando profusamente para alimentar innumerables aparatos autónomos o

semiautónomos como calculadoras, sensores, transmisores, satélites, aviones tripulados y sin tripular, señales viales. También para abastecer refugios o casas aisladas ayudándose de equipos de acumulación: regulador y baterías. Y más recientemente para producir electricidad para redes de distribución, usando los famosos paneles solares. Hasta el año 2006 estas tecnologías formaban parte del ámbito de investigación, pero en los últimos años se han puesto en marcha instalaciones de gran tamaño suministrando electricidad a la red eléctrica.



Figura 3.7 Celdas fotovoltaicas.

Estudios relacionados a la energía solar fotovoltaica determinan que los materiales semiconductores, para su utilización en celdas fotovoltaicas, han de ser producidos en purzas muy altas, normalmente con estructura cristalina (Ver figura 3.7). La conversión de la energía solar a eléctrica se realiza de manera limpia, directa y elegante.

Estos avances tecnológicos, se han centrado en el desarrollo de distintos materiales y tecnologías de fabricación que permitan obtener niveles crecientes de potencia y eficiencia a partir del tratamiento de materiales semiconductores, principalmente el silicio y actualmente de un nuevo material propuesto llamado grafeno en proyecto de investigación, con el objeto de conseguir la explotación industrial y comercial de esta forma de energía.

Actualmente las celdas fotovoltaicas (FV) individuales tienen una producción eléctrica limitada, la cual puede ser utilizada para operar equipos pequeños tales como juguetes, relojes y calculadoras de bolsillo. Para incrementar la salida (voltaje y amperaje) de una fuente FV, las celdas individuales se unen eléctricamente en diferentes formas. El módulo FV es el conjunto más básico de celdas FV, el cual puede incluir desde menos de una docena hasta cerca de 100 celdas. El panel FV comprende grupos de módulos, mientras que el arreglo FV es la combinación de paneles en arreglos serie y/o paralelo.

Las celdas solares fotovoltaicas son dispositivos que convierten la luz solar directamente en electricidad, sin necesidad de equipos mecánicos. Las celdas solares están hechas de delgadas capas de material semiconductor, usualmente silicio, están unidas a contactos de metal para completar el circuito eléctrico, y encapsuladas en vidrio o plástico. Es posible apreciar el proceso de conversión de energía fotovoltaica. La celda mostrada está compuesta por dos capas de silicio una capa tipo **n** (negativa) y otra capa tipo **p** (positiva), (Ver figura 3.8).

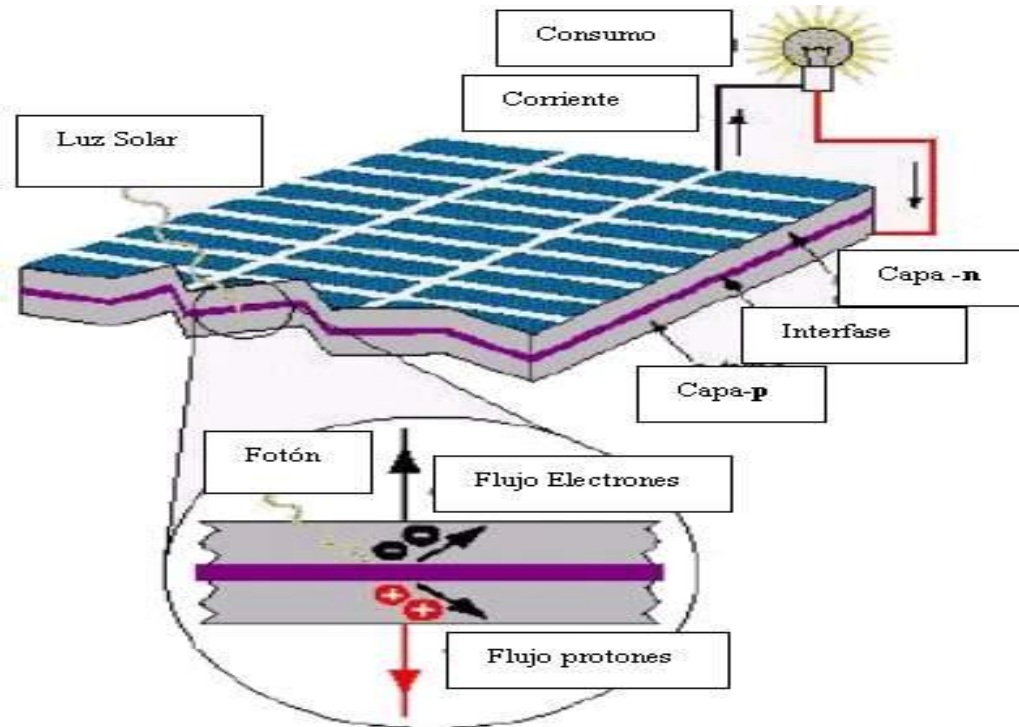


Figura 3.8 Generación de corriente eléctrica mediante placas de Silicio.

Los Sistemas fotovoltaicos convierten directamente parte de la energía de la luz solar en electricidad. Las celdas fotovoltaicas se fabrican principalmente con silicio, el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, el mismo material semiconductor usado en las computadoras.

Cuando el silicio se contamina o dopa con otros materiales de ciertas características, obtiene propiedades eléctricas únicas en presencia de luz solar. Los electrones son excitados por la luz y se mueven a través del silicio; este es conocido como el efecto fotovoltaico y produce una corriente eléctrica directa. Las celdas fotovoltaicas no tienen partes móviles, son virtualmente libres de mantenimiento y tienen una vida útil de entre 20 y 30 años.

Las alternativas a las celdas de silicio monocristalino incluyen celdas de silicio policristalino, una variedad de celdas PV de capa delgada, y colectores concentradores. Las celdas de silicio policristalino, son menos caras para ser manufacturadas porque no requiere construir cristales de gran tamaño.

Desafortunadamente, son menos eficientes que las celdas monocristalinas (15-17%).

En este tipo de celdas, la corriente eléctrica circula entre dos capas de semiconductores al ponerlos en contacto uno con el otro y ser expuestos a la luz. Conectando un número suficiente de estas celdas entre sí, se apreciará que se produce una diferencia de potencial eléctrico útil. A causa de sus propiedades eléctricas, los módulos fotovoltaicos producen corriente continua (C.C.). Un conjunto de dos o más unidades de celdas fotovoltaicas de iguales características constituyen un módulo fotovoltaico dependiendo de la estructura o diseño de implementación.

El efecto fotoeléctrico básicamente consiste en el proceso de conversión de energía electromagnética proveniente de una fuente de luz como el sol, en energía eléctrica representada por un flujo de electrones. A nivel cuántico, el fenómeno corresponde al impacto de un fotón (quantum de energía electromagnética) con un electrón, al cual le transfiere dicha energía, dando como resultado que el electrón con mayor energía se desplaza hacia los niveles cuánticos superiores del átomo convirtiéndose en un electrón libre. Finalmente, la suma total de electrones libres dirigidos en una misma dirección por un campo eléctrico constituye la energía eléctrica resultante.

La forma más popular de arreglo FV está hecha de paneles planos y puede responder a la luz difusa de todo el cielo (esto es, puede producir electricidad aun en días nublados). Los paneles FV planos pueden estar fijos en un soporte o moverse para seguir la trayectoria del sol. No obstante lo anteriormente dicho, la descripción del fenómeno PV a nivel macro es más sencilla, bastando con decir que la incidencia de un rayo de luz sobre la superficie de ciertos materiales, produce pequeñas diferencias de potencial o voltajes, los cuales son posibles de utilizar como pilas o fuentes de voltaje, alimentando, de esta forma, todo tipo de equipos eléctricos o electrónicos, esto depende de la fuente de equipo que se requiere y se implementa la más conveniente en características y requerimientos..

Las capas delgadas (0.001-0.002 mm ancho) de silicio amorfo no cristalino, son otra alternativa. Estas capas delgadas no son caras, y pueden ser fácilmente depositadas en materiales tales como vidrio y metal; esto las hace útiles para la producción en masa.

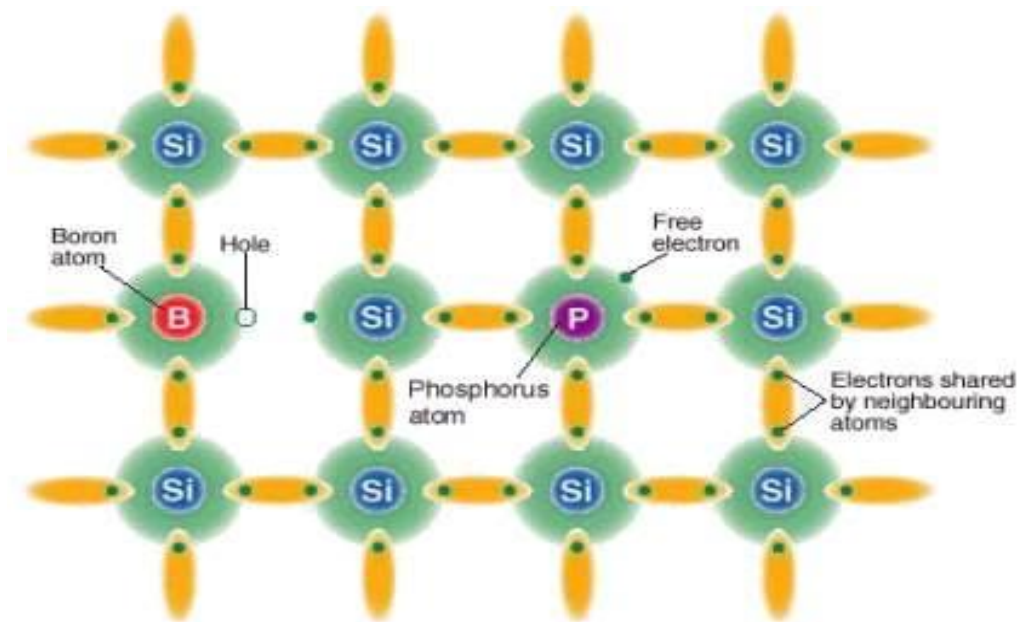


Figura 3.9 Ejemplo de cristal de Silicio contaminado con átomos de Fósforo (liberación de un electrón) y átomos de Boro (absorción de un electrón).

Las diferencias eléctricas entre las dos capas son producidas gracias al tratamiento químico al que fue expuesto el silicio en un proceso de dopado con otros materiales, que le entregan una u otra característica. Este fenómeno de dopaje, se observa en la figura 3.9, en donde aparece una red cristalina de silicio dopada con fósforo.

Se han desarrollado celdas PV de capa delgada hechas de otros materiales con la finalidad de mejorar la ineficiencia y degradación, manteniendo los bajos costos de producción. Galio-arsénico (GaAs), Cobre-Indio-Selenio (CuInSe₂), Cadmio-Telurio (CdTe) y Dióxido de Titanio (TiO₂), han sido utilizados para producir celdas PV de capa delgada, con variadas eficiencias y costos de producción.

El efecto fotovoltaico en una célula solar, es una producción basada en el fenómeno físico denominado "efecto fotovoltaico", que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas a base de silicio puro como se mencionó anteriormente (uno de los elementos más abundantes, componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), y son capaces de generar cada una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente la radiación luminosa.

Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula.

Los paneles solares fotovoltaicos tienen un rendimiento en torno al 15 % y no producen calor que se pueda reaprovechar aunque hay líneas de investigación sobre paneles híbridos que permiten generar energía eléctrica y térmica simultáneamente, son muy apropiados para instalaciones sencillas en azoteas y de autoabastecimiento, proyectos de electrificación rural en zonas que no cuentan con red eléctrica, aunque su precio es todavía alto (Ver figura 3.10).



Figura 3.10.- Panel fotovoltaico.

Existen dos elementos que sustentan la utilización de la energía fotovoltaica: "La necesidad de proteger el medio ambiente y la necesidad de crecer económicamente. La energía solar fotovoltaica se basa en la captación de energía solar y su transformación en energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas. Los sistemas fotovoltaicos pueden agruparse de diferentes formas. Así, pueden distinguirse entre los sistemas aislados, de conexión a red e híbridos. Así como producir electricidad de alto rendimiento y eficiente que se puede considerar para suministrar energía libre de contaminantes.

Consiste en la captación de la energía radiante procedente del sol que es emitida por su superficie a la temperatura de 13 millones de grados (producida por las fusiones de átomos de Hidrógeno para formar Helio). La idea básica de la concentración fotovoltaica es la sustitución de material semiconductor por material reflectante o refractante (más barato). El grado de concentración puede alcanzar un factor de 1000, de tal modo que, dada la pequeña superficie de célula solar empleada, se puede utilizar la tecnología más eficiente (triple unión, por ejemplo).

El uso de seguidores permite aumentar considerablemente la producción, en torno al 30% en lugares de elevada radiación directa. Los seguidores solares a dos ejes son muy comunes en aplicaciones fotovoltaicas. Existen dos variables fundamentales: las pérdidas por sombreado y los costos proporcionales a la superficie ocupada (cableado y costo del terreno), ambos antagonistas. Se puede por tanto definir una distribución óptima de los seguidores.

La sección de cable viene en general determinada por el criterio más restrictivo entre caída de tensión y máxima intensidad admisible. Aumentando las secciones de conductor que se obtienen como resultado de los cálculos teóricos se consigue, en general, amortizar el sobrecosto con un ahorro de energía eléctrica por reducción de las pérdidas por calentamiento de los conductores. Pero cuando se trata de una instalación fotovoltaica la amortización puede ser mucho más rápida, ya que el precio de la energía generada es sensiblemente superior al precio de mercado. Para su dimensionamiento se debe respetar la caída máxima de tensión admisible, así como la intensidad máxima admisible.

3.6 INOVACION DE CELULAS FOTOVOLTAICAS.

La población mundial crece en unos 300 millones de personas cada tres años. El requisito para la energía y la movilidad seguirá siendo una prioridad creciente en las regiones de crecimiento. Según un estudio del Consejo Mundial de Energía, la demanda mundial de energía va a aumentar del 70 al 100 por ciento para 2050, es decir, prácticamente el doble. Esto conducirá a un aumento significativo de los precios de materias primas energéticas y, por tanto la energía misma. La humanidad ya ha extraído casi un 40 por ciento de todos los suministros de crudo desde el suelo.

La demanda de electricidad espera ver un aumento especialmente fuerte en los próximos años y una tasa de crecimiento durante los últimos diez años, siendo el más alto en 50 años de emisiones de dióxido de carbono. El 78% de este aumento se debe a la utilización de combustibles fósiles. Un aumento de la temperatura de hasta 6,4 ° C está previsto para 2100.

Si el actual modelo energético se mantiene a grandes rasgos, se estima que en el año 2030 el consumo mundial de energía será de 17.065.000 ktep, duplicando el consumo del año 2000, y que aumente aún más la dependencia de los combustibles fósiles hasta llegar al 87% de la energía primaria consumida.

También se esperan importantes crecimientos del consumo de energías solar y eólica. Los expertos convienen en que este modelo de desarrollo no es sostenible, puesto que las reservas de petróleo durarán 34 años con la producción equivalente al año 2001, las de gas durarán 77 años al nivel de producción del año 2000 y las reservas de carbón 200 años con la producción del año 2002, siempre y cuando la escasez no eleve los precios y haga rentable la exploración y explotación de nuevos yacimientos.

El sistema actual de energía por tanto, debe someterse a una reconversión sostenible. Las energías renovables jugarán un papel importante en el desarrollo actual de la humanidad, en particular cuando un alto grado de estabilidad de los abastecimientos se puede proporcionar. Plantas térmicas solares son ideales para cumplir con estos requisitos: de almacenamiento térmico o de operaciones híbridas y son capaces de garantizar la generación de energía estable y confiable.

El progreso tecnológico y el medio ambiente ya no son una contradicción de términos. En el nuevo milenio, la humanidad va a tener que conciliar la tecnología y el medio ambiente. Tecnologías inteligentes para un uso eficiente y respetuoso con el medio ambiente y la generación de electricidad rentable se requieren en el nuevo milenio: que puede posiblemente llamarse el Milenio Solar debido a los avances tecnológicos actuales en el desarrollo energético.

Un enfoque prometedor para la fabricación de células solares que son baratas, ligeras y flexibles es el uso de compuestos orgánicos en lugar de silicio altamente purificado. Pero, un problema persistente ha ralentizado el desarrollo de dichas células: los investigadores han tenido dificultades para dar con los materiales apropiados para los electrodos para llevar la corriente desde y hacia las células

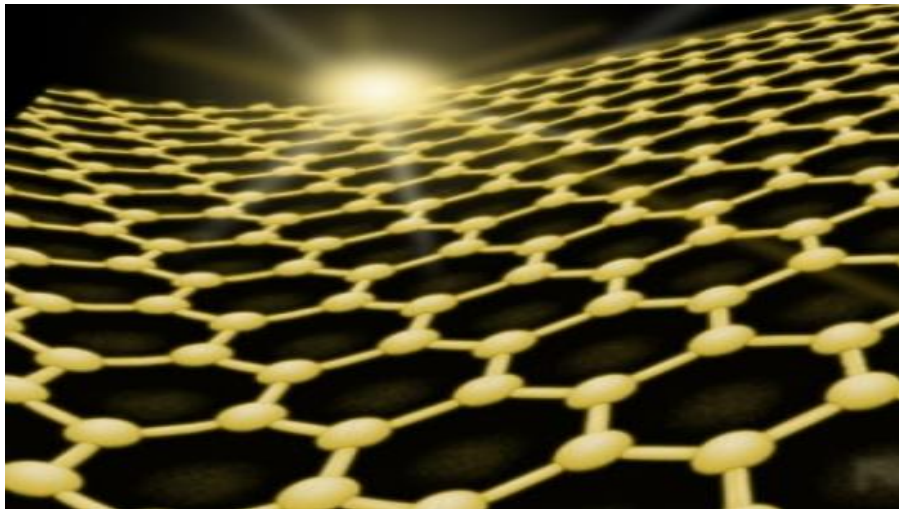


Figura 3.17.- Células fotovoltaicas de grafeno.

El material estándar utilizado hasta ahora para estos electrodos es óxido de estaño e indio (ITO). Pero el indio es caro y relativamente raro, por lo que la búsqueda ha sido para encontrar un reemplazo adecuado. Ahora, un equipo de investigadores del MIT ha ideado una manera práctica de usar un posible sustituto a partir de carbono de bajo costo y ubicuo. El material propuesto es el grafeno, una forma de carbono en la que los átomos forman una hoja plana de un solo átomo de espesor, formando una especie de reja (Ver figura 3.17).

Si bien las características específicas del electrodo de grafeno difieren de las de la ITO que reemplazaría, su desempeño general en una célula solar es muy similar. Y la flexibilidad y el peso ligero de las células solares orgánicas con electrodos de grafeno podrían abrir una variedad de diferentes aplicaciones que no serían posibles con paneles solares basados en silicio convencionales de hoy.

Por ejemplo, debido a su transparencia podrían aplicarse directamente a ventanas sin bloquear la vista, y podrían aplicarse a las superficies irregulares de la pared o

techo (Ver figura 3.18). Además, podrían ser apilados encima de otros paneles solares, aumentando la cantidad de energía generada de una zona determinada. Y hasta podría ser doblado o enrollado para facilitar su transporte.

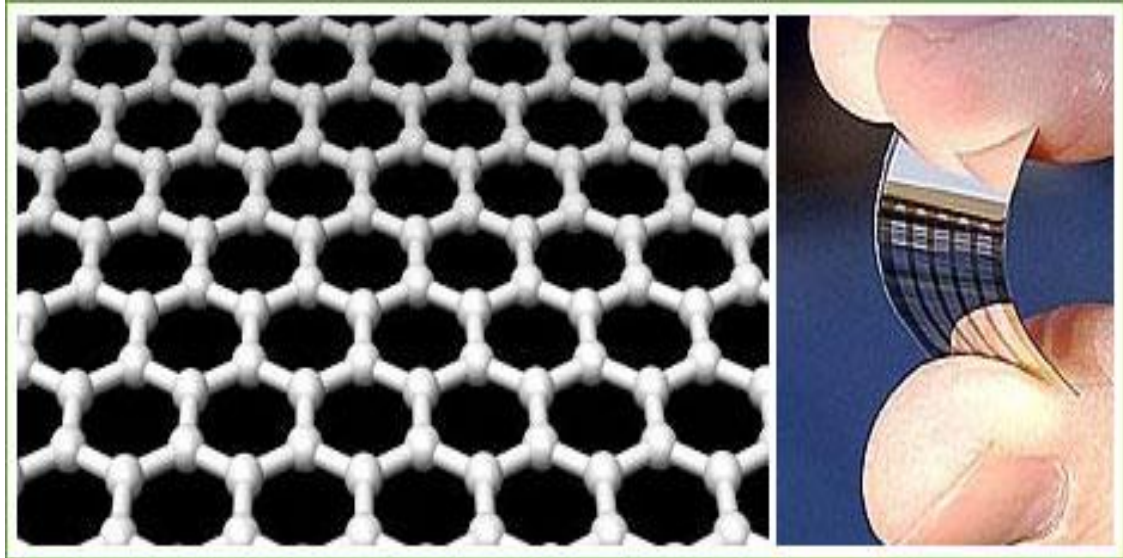


Figura 3.18 Células de grafeno para ventanas.

Los investigadores del MIT creen que el uso de grafeno como electrodo en una célula solar orgánica podría hacerlas más baratas de producir y podría abrir una nueva gama para el uso de esta tecnología. El uso del grafeno tiene muchos beneficios sobre el ITO, principalmente su elasticidad y transparencia (Ver figura 3.19).

Las células solares orgánicas están en constante mejora y tienen un gran potencial, pero algunos problemas todavía las están conteniendo para un gran despegue. La eficiencia de este tipo de células todavía está por debajo de las tradicionales células de silicón, hasta ahora el único material para hacer el electrodo de manera exitosa es el raro y costoso indio-tin-óxido (ITO). Las nuevas células fotovoltaicas orgánicas prometen obtener energía barata debido a su facilidad de producción, su peso ligero y la compatibilidad que ofrecen con sustratos flexibles.

Uno de los aspectos críticos que necesita cualquier dispositivo fotoelectrónico es un electrodo conductor transparente a través del cual la luz pueda llegar a crear electricidad. Las nuevas investigaciones han constatado que el grafeno, tiene un gran potencial para asumir este papel.

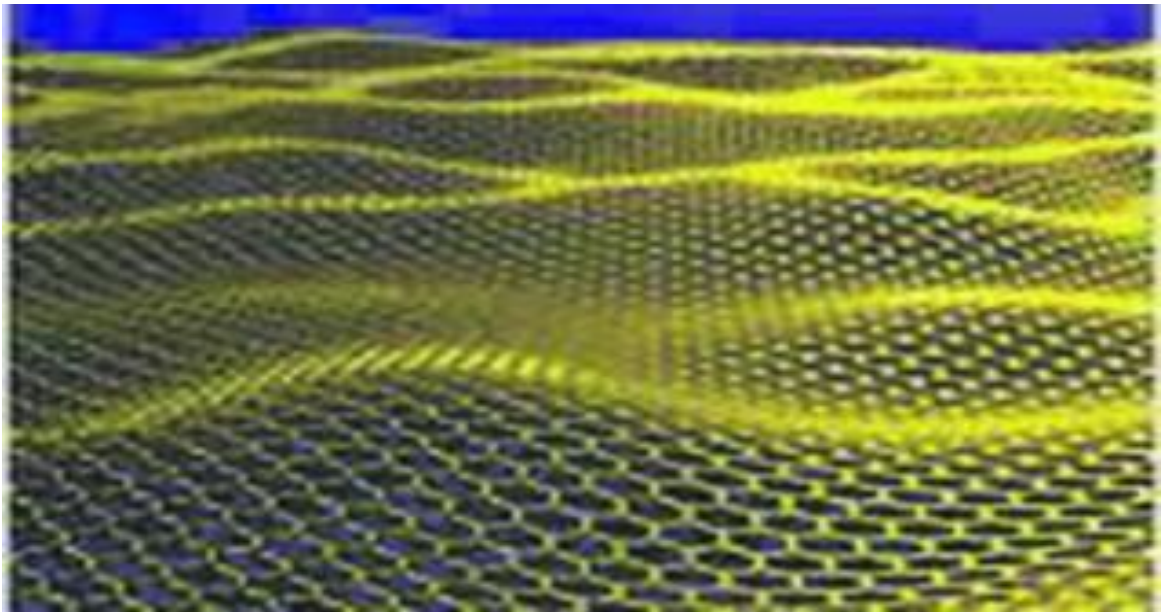


Figura 3.19.- Lamina elástica de grafeno.

El grafeno también es flexible, el ITO es rígido. Algo muy importante es que el desempeño del grafeno es muy similar al ITO, por lo que no se pierde eficiencia, lo que lo hace un excelente repuesto.

3.7 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.

La energía solar térmica y fotovoltaica se caracteriza por ser de alimentación más ecológica y sostenible, así como proporcionar estabilidad debido a su combinación energética diversificada y reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. La energía solar es una fuente natural renovable de: 1,080,000,000 horas teravatios de poder que recibe la Tierra desde el Sol cada año; 60.000 veces las necesidades de electricidad del mundo. La energía solar de los países soleados puede ser transportada a las regiones menos soleadas como una alternativa aceptable.

Considerando aspectos relacionados con el consumo energético mediante energías renovables nos referimos a las centrales solares térmicas las cuales utilizan el calor de la radiación solar convertida para generar electricidad. Al igual que los paneles solares, inicialmente la captación de energía de calor a través de la absorción de la radiación solar y como las células fotovoltaicas, que generan electricidad a partir de la luz solar. En pocas palabras: ellos representan el medio más eficaz de utilizar la energía solar.

Por el contrario, las centrales termosolares son capaces de generar energía solar en grandes cantidades en una forma económicamente rentable. La distinción se hace entre los sistemas de concentración, que centralizan la luz solar mediante reflectores, tales como colectores cilindro-parabólicos, centrales Fresnel reflector, plantas de torre de energía, o platos solares. Además de sistemas de concentración,

también hay de no concentrar los sistemas que no utilizan reflectores, como plantas solares de energía chimenea o receptores.

Las Centrales por Colectores Parabólicos son la única tecnología para la utilización de la energía solar en las grandes centrales térmicas que se han demostrado ser comerciales durante varios años (Ver figura 3.11).

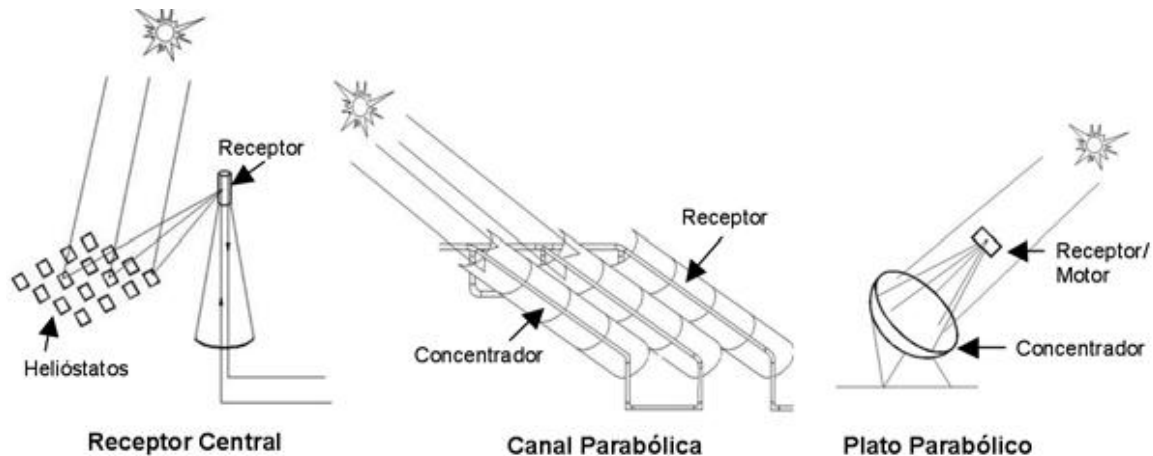


Figura 3.11.- Sistemas de concentración.

Con los sistemas de concentración, la energía térmica capturada se alimenta, generalmente, un ciclo de vapor a temperaturas significativamente mayores de 100° C. La radiación solar es capturada y concentrada por largas hileras de espejos parabólicos, el calor generado de esta manera es suficiente para producir el vapor requerido.

Un sistema de generación térmica puede estar constituido por uno o mas tipos de concentradores (captadores, colectores, receptores, etc.) de radiación solar que calientan un fluido, el cual transfiere el calor a un segundo fluido que se almacena en un acumulador.

Los Colectores parabólicos han estado en operación comercial con éxito en California desde 1985. Ellos ya han generado más de doce millones de kilovatios hora de electricidad solar, lo que equivale a proporcionar a unos 12 millones de personas, electricidad durante un año. Al igual que con las plantas de energía convencional alimentada, incluidas las centrales nucleares, la electricidad en colectores cilindro-parabólicos se genera mediante una turbina de vapor conectada a un generador. Sin embargo, el vapor requerido no es producido por la quema de combustibles fósiles, sino a través del uso de la energía solar.

En el Campo Solar, el agua de alimentación es precalentada, evaporada y convertida en vapor sobrecalentado conforme circula por los tubos absorbedores de una fila de colectores cilindro-parabólicos con una superficie de captación solar (Ver figura 3.12). El campo solar de una planta de energía a través de parabólica se

compone de muchas filas de colectores cilindro-parabólicos en torno a seis metros de altura y varios cientos de metros de largo.

A pesar de su enorme tamaño, estos dispositivos ópticos de alta precisión están alineados con una precisión milimétrica. Las filas corren en dirección norte-sur y la posición del sol de este a oeste en el transcurso del día. Componentes especiales se utilizan para los colectores. Más del 98% de la radiación solar que llega a los espejos se refleja en el tubo absorbedor en la línea focal de los colectores.

Los tubos absorbedores, también conocido como receptores, consisten en un tubo metálico que contiene el fluido calórico portador, rodeado por un tubo de vidrio. Entre los dos tubos hay un vacío que aísla la tubería de metal, reduciendo así la pérdida de calor. La pipa de cristal se compone de materiales especiales y recubrimientos para que la radiación solar pueda pasar y ser absorbida por el tubo de metal en lugar de ser reflejada. Los tubos absorbedores contienen un medio de transferencia térmica que se calienta a unos 400 °C según la luz solar concentrada.



Figura 3.12.- Campo solar con colectores cilíndrico-parabólicos de seguimiento solar.

Este tipo de instalaciones en su conjunto posee un alto grado de flexibilidad de operación, pudiendo trabajar hasta 100 bar de presión en función de las necesidades, y con cualquiera de los tres procesos básicos de generación directa de vapor: Recirculación, Inyección y Un-Solo-Paso, o combinación de ellos. (Habitualmente se trabaja en tres niveles diferentes de presión, 30, 60 y 100 bar.)

Además, está dotada de una completa gama de instrumentos que permiten una total monitorización del sistema.

Una instalación de captadores solares estáticos cuenta con tres circuitos hidráulicos independientes. En la actualidad, este lazo se conecta mediante tuberías a la instalación, desde donde se le suministra vapor de origen solar a diferentes regímenes de presión y temperatura con el fin de realizar ensayos en tres regímenes de trabajo diferentes: precalentamiento, evaporación y sobrecalentamiento (Ver figura 3.13).



Figura 3.13.- Campo solar con captadores solares estáticos (Fig. izquierda), lazo de conexión de colector de demostración Fresnel lineal MAN en Almería. (Fig.derecha).

Por lo tanto el sistema óptico introduce un factor de pérdidas que hace recuperar menos radiación que la fotovoltaica plana. Esto, unido a la elevada precisión de los sistemas de seguimiento, constituye la principal barrera a resolver por la tecnología de concentración. Algunos ejemplos de concentradores son los que se muestran en la tabla 3.2:

Características	Canal parabólico	Receptor central	Plato parabólico
Potencia (MW)	10-200	10-200	5-25 (kW)
Temperatura de operación (°C)	395	250-1000	750
Factor de planta anual (%)	23	24	25
Eficiencia pico, solar-eléctrica (%)	22	23	30
Eficiencia neta anual (%)	11-16	7-20	12-25
Estado comercial	11 plantas en operación	Primera planta comercial en operación	Prototipos demostrativos
Riesgo tecnológico	Bajo	Medio	Alto

Almacenamiento disponible	Sí	Sí	Sí
Diseños híbridos	Sí	Sí	Sí

Tabla 3.2 Características y especificaciones de funcionamiento de concentradores solares

En el caso de la generación termoeléctrica de torre, una serie de espejos reflejan y concentran la radiación solar sobre una zona en la parte alta de la torre, por la que circula un fluido que se calienta y se conduce a una turbina que se une mecánicamente a un generador eléctrico. El rendimiento energético de los captadores solares depende, evidentemente, de la radiación solar recibida.

3.8 DESALACIÓN DE AGUA UTILIZANDO ENERGÍAS RENOVABLES.

Existen diversos factores que hacen de la desalación de agua de mar una aplicación atractiva para las energías renovables. Por una parte, muchas zonas con escasez de agua dulce tienen recursos de energía primaria de tipo renovable, generalmente proveniente de energía eólica o solar (Ver figura 3.14). Además, se suele producir la simultaneidad estacional en la demanda de agua potable y la disponibilidad de los recursos energéticos renovables.



Figura 3.14.- Energías renovables (solar y eólica).

En los sistemas de procesos de desalación de agua de mar o salobre se requieren de grandes cantidades de energía. Este sistema de proceso puede ser alimentado mediante una fuente de energía renovable opcional ó combinada, que producirán una separación de moléculas de sal del agua y como resultado la obtención de agua dulce mediante distintos procedimientos previos y posteriores.

Para que este procedimiento tenga un aprovechamiento satisfactorio con respecto a sus diversos usos, es necesario especificar las alternativas posibles para su producción. La mezcla de agua dulce procedente de los ríos con el agua salada del océano libera altas cantidades de energía. Sin embargo, la energía está ahí y cualquiera que haya intentado separar la sal del agua del mar sabrá que se necesita gran cantidad de energía.

Es importante y necesario tener un aprovechamiento de generación de energías renovables cuando en determinadas estaciones del año un recurso renovable de la naturaleza incide en el medio ambiente al máximo, esto determina una alta disponibilidad por ejemplo de energía eólica y solar que es mayor en primavera y verano y así mismo su aprovechamiento, coincidiendo con una mayor demanda de agua potable por el incremento de la población turística y cubriendo las expectativas de alta demanda.

Hay que distinguir dos situaciones a la hora de enfocar este tema. La primera la constituyen las zonas aisladas o remotas, en las cuales la necesidad de agua dulce, unida a la inexistencia de una red de energía eléctrica, justifica la construcción de un sistema autónomo de generación de energía, en el que el coste del kilovatio hora obtenido pasa a ser un factor secundario frente a la necesidad requerida de agua.

Otro caso muy distinto son las zonas conectadas a la red eléctrica, en las que los costos se convierten en un factor primordial para la toma de decisiones sobre la inversión. Como se ha señalado, el coste del agua desalada tiene dos componentes muy importantes, que son los derivados del capital o inversión (amortización, coste de oportunidad y coste de financiación) y el coste energético.

El empleo de energía renovable como fuente de energía en zonas no aisladas tiene un interés si se logra un coste energético menor que el precio actual de adquisición en el mercado. Asimismo, no todas las fuentes de energía primaria renovable son igualmente adecuadas para los procesos de desalación donde depende de la demanda.

Algunos procesos utilizan energía térmica o vapor (MSF, MED, CV), mientras que otros usan electricidad (OI, CV, MSF y MED) y algunos pueden emplear energía mecánica (OI, CV). Por lo tanto, hay que seleccionar la fuente energética en función del proceso de desalación. La energía eólica puede generar energía mecánica o electricidad, mientras que la solar fotovoltaica y termoeléctrica generan electricidad, y la solar térmica, calor.

Para la desalación de agua de mar por ósmosis inversa con energía eléctrica de origen renovable se han realizado proyectos que utilizan energía fotovoltaica para capacidades de hasta 50 m³/día y energía eólica para capacidades de desalación de hasta 250 m³/día. En el caso de desalación de agua de mar con un proceso de evaporación MED se ha utilizado energía solar térmica de baja temperatura. Otra integración de proceso ha sido energía eólica con compresión de vapor. El suministro de energía renovable a instalaciones de gran capacidad es un caso diferente, del que no hay experiencia.



Figura 3.15.- Planta desaladora de Ósmosis inversa en Singapur, para agua de mar.

El tamaño de la planta de desalación condiciona el tamaño de la planta de generación energética que necesita y el tipo de energía más viable. Una planta de ósmosis inversa para desalación de agua de mar (que es la tecnología de menor consumo energético) con capacidad para 30.000 m³/día de agua dulce requiere una potencia de 5 MW para funcionar a plena carga (Ver figura 3.15). Esta potencia se puede conseguir con cinco aerogeneradores eólicos de 1 MW o con 90,000 m² de paneles solares fotovoltaicos.

Estos datos descartan, a día de hoy, la energía fotovoltaica para suministro de energía con potencias medias, además de por su coste más elevado, dejando a la energía eólica como la alternativa tecnológica más viable. Por otra parte, conviene destacar el hecho del funcionamiento aislado de la planta (2.000 horas efectivas de funcionamiento al año para un aerogenerador y 1.500 horas efectivas para un parque fotovoltaico), que sólo permitiría aprovechar el 25% de su capacidad productiva si utiliza energía eólica, o el 15% si emplea energía solar fotovoltaica.

Esta opción de funcionamiento aislado no está exenta de incertidumbres tecnológicas, pues la alimentación de energía a una planta de desalación a través de fuentes no estables puede causar problemas de operación. Para la desalación de agua en zonas aisladas y remotas empleando energías renovables, es posible marcar tres estrategias para conseguir una potencia constante:

- Combinar fuentes energéticas de distinta naturaleza, renovables o no, reduciendo la probabilidad de fallo de suministro de cada una por separado.
- Ajustar la cantidad de agua desalada a la potencia generada en cada momento, realizando instalaciones modulares que se puedan desconectar fácilmente, y con diseños robustos para funcionar fuera del punto de consigna.

- Sobredimensionar el generador, ajustando la potencia a un valor constante inferior, que será el de la planta de desalación.

Por otra parte, la interconexión de grandes cargas a la red, que demanden energía con un comportamiento variable o fluctuante, puede ocasionar problemas en redes eléctricas débiles. La coincidencia geográfica de algunas regiones con abundantes recursos solares y eólicos, presentan un déficit de agua dulce ofrecen interesantes oportunidades de desarrollo a la desalación solar y eólica. Las zonas de mayor interés para la aplicación de la desalación solar abarcan también a muchos países en desarrollo, con pequeñas comunidades poco tecnificadas con difícil acceso a una fuente de energía convencional.

Los procesos más eficientes son los procesos industriales de destilación multiefecto, acoplados o no a termocompresores (Ver figura 3.16), y los de destilación flash multietapa.

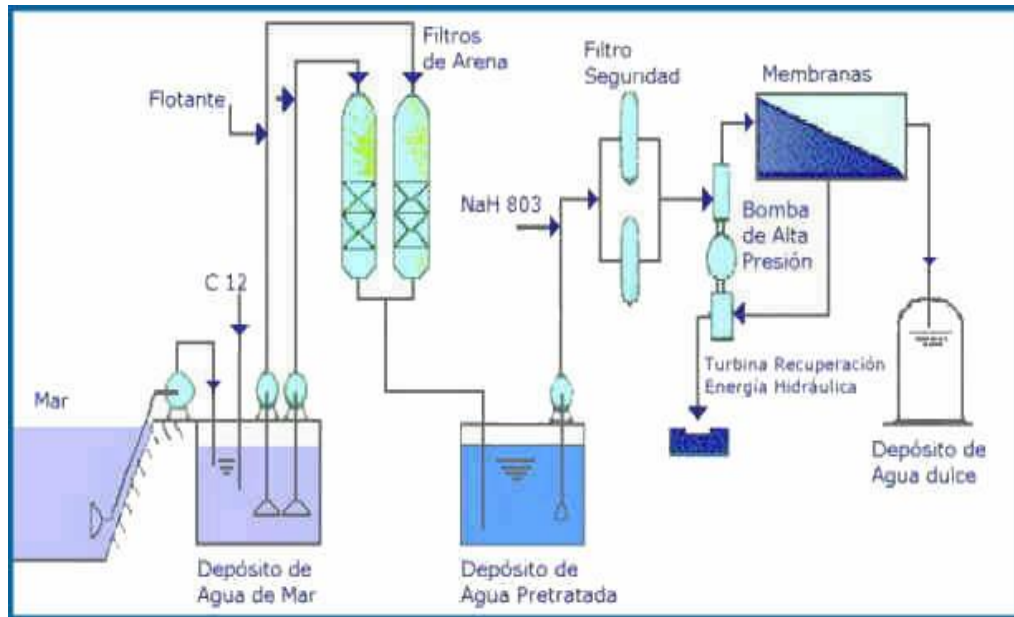


Figura 3.16 Termocompresor MED.

Este último proceso es menos eficiente por su mayor consumo eléctrico auxiliar y por presentar mayores consumos de energía térmica que un proceso MED – TC o MED a igual temperatura máxima. Consumos típicos de plantas modernas MED o MED-TC son: consumo térmico entre 170 kJ/kg. y 230 kJ/kg y consumo eléctrico auxiliar, mayor que 1.8. Este alto consumo auxiliar es hoy día la principal limitación de las tecnologías de destilación.

En el caso de los procesos que consumen energía eléctrica o mecánica producida por un ciclo de potencia calentado solarmente el más eficiente es el de ósmosis inversa. Se puede establecer que las tecnologías de desalación con energías renovables más desarrolladas son de tipo de destilación solar y los sistemas de

Ósmosis inversa fotovoltaicas o eólicas. Dentro de las energías renovables, las opciones más económicas son la geotérmica y la eólica.

Sin embargo, los avances tecnológicos presentan en el campo un desarrollo en aplicaciones de sistemas de procesos de desalación y de implementación de equipo como fuente suministro, la principal limitación es coincidir en la misma localización la disponibilidad del recurso eólico o solar y la demanda de agua salada. Por tanto, en muchos casos, la aplicación de la energía solar es la única opción óptima más conveniente y rentable.

Con respecto a los sistemas de desalación mediante energía solar, en zonas con abundantes recursos solares, la destilación solar y la ósmosis inversa fotovoltaica son las opciones más razonables debido a su amplio desarrollo y gestión. Sin embargo, ambas tecnologías presentan costos similares a partir de cierta capacidad de desalación. Además, estos costos continúan siendo demasiado altos frente a los sistemas de desalación convencionales.

La utilización de baterías en la Ósmosis inversa fotovoltaica ocasiona residuos tóxicos y algunos problemas de diferentes líneas de investigación en la desalación solar: No obstante, las plantas de Ósmosis Inversa tienen importantes ventajas frente a las de destilación: son más económicas, especialmente para pequeñas capacidades. Y además, al ser sistemas modulares, son más fáciles de ampliar en caso de futuros incrementos de la demanda de agua dulce. A pesar de ello, mientras que todas las opciones de destilación solar han sido estudiadas con cierta profundidad al menos a nivel de plantas piloto, no ocurre lo mismo con los sistemas solares de ósmosis inversa.

Algunos posibles criterios para las plantas de desalación de ósmosis inversa, serían los siguientes:

Potencia del orden de MW. Para potencias demandadas del orden de MW, deberían usarse plantas termoeléctricas como primera opción a las que se acoplaría la unidad de ósmosis inversa y como siguiente de tipo de energía eólica debido al acoplamiento de los dos sistemas y a la practicidad de los mismos. La primera sería la tecnología de desalación solar más eficiente con amplias diferencias respecto a las restantes.

Potencia del orden de cientos de kW. En demandas de potencias del orden de cientos de kW, la tecnología anterior no será adecuada. En este caso, sería mejor usar discos solares paraboloídes con motores Stirling, captadores solares estáticos o de concentración en un eje o estanques solares de concentración mediante ciclos de Rankine orgánicos, de energía fotovoltaica, o bien aerogeneradores eólicos, tomando en cuenta un estudio predeterminado de los requerimientos de proyecto para alto, medio, o bajo nivel de potencia y en base a la demanda determinar el potencial para realizar el estudio de costos y lograr así la opción óptima.

Potencias de decenas de kW. En zonas poco tecnificadas o aisladas determinadas como descentralizadas. En general sería recomendable entonces especificar y decidir una aplicación de equipo solar térmica o fotovoltaica para alimentar un

sistema de ósmosis inversa, debido a la accesibilidad de adquisición de equipo y de poco mantenimiento por mencionar algunos beneficios.

Por tanto, la tecnología de ósmosis inversa mediante energía solar térmica precisa un importante esfuerzo de análisis para poder establecer una comparación más precisa con la destilación solar y la ósmosis fotovoltaica. En primer lugar, la comparación con los procesos de destilación se establece en base a valores de radiación solar para un día y una hora concretos. En ella se comparan los consumos de la ósmosis inversa alimentada mediante ciclos solares de Rankine orgánicos frente a otras tecnologías de destilación solar.

Las tecnologías de desalación consideradas que se muestran en la tabla 3.3 son las siguientes:

Procesos de desalación	Tecnologías de aplicación
OI	Captadores cilíndrico parabólicos mediante un ciclo Rankine solar orgánico.
MED avanzado	Una unidad MED acoplada a una bomba de calor de adsorción de doble efecto.
MED	Alimentada mediante captadores cilíndrico parabólicos
MED	Utilizando captadores de tubos de vacío.
MED	Alimentada por concentradores parabólicos compuestos

Tabla 3.3 Aplicación de tecnologías en procesos de desalación

La tecnología más eficiente de destilación solar corresponde a los sistemas MED con bomba de calor de absorción de doble efecto; sin embargo, esta tecnología aún no está comercialmente disponible. Por otra parte, se obtiene la tecnología de ósmosis inversa alimentada por captadores solares cilíndrico parabólicos podría ofrecer un consumo de tan sólo el 12% de la mejor tecnología de destilación solar disponible actualmente, los sistemas MED acoplados a captadores cilíndrico parabólicos.

El desarrollo de la tecnología solar térmica de ósmosis inversa está motivado por sus interesantes perspectivas:

- Por una parte la eficiencia de los sistemas de OI con respecto al rendimiento de estos sistemas acoplados con la implementación de estos equipos
- Los costos en los sistemas de ósmosis inversa que son mucho más económicos que los de destilación, especialmente con capacidades reducidas. En el campo de captadores solares tendríamos un significativo ahorro de inversión. La amplia reducción de costos en los principales componentes supone un considerable potencial de ahorro de inversión que debe compensar ampliamente los costos de los equipos adicionales necesarios en el caso de sistemas solares térmicos de OI.

- Por otra parte, un nivel de costos similar tanto para la destilación solar como para los sistemas fotovoltaicos, quedan justificadas las buenas perspectivas económicas de la tecnología analizada frente a las tecnologías competidoras. Se espera por tanto que como resultado del desarrollo de la tecnología, se acorten significativamente las diferencias de costos del agua desalada con energía solar frente al uso de la energía convencional.

- Los análisis de ciclo de vida comparativos sobre sistemas de desalación, sitúan a los sistemas de OI como los de menor impacto medioambiental. Esto, unido al hecho de que los sistemas analizados no utilizan baterías, proporciona una perspectiva muy favorable de minimización de impactos medioambientales.

De la comparación de los sistemas solares térmicos de Ósmosis inversa respecto a los de destilación solar, se concluye que aún con el uso de captadores solares estáticos la tecnología de ósmosis inversa mediante solar térmica presenta mayores eficiencias que las tecnologías de destilación.

Actualmente la ósmosis inversa solar térmica a medida que mejora la tecnología, se han presentado avances de modificación de membranas, de tal manera que se están utilizando membranas cerámicas inorgánicas las cuales dependiendo de las características de muestra de agua sometidas a este proceso presenten mejores resultados que los anteriores y por consecuencia reducir aun mas los porcentajes de desalinización para obtener agua de mejor calidad, aunado a una mejora constante de recuperación energética en los sistemas de desalación.

Es imprescindible tomar en cuenta algunos aspectos que de acuerdo a los estudios realizados pueden producir resultados de optimización en los sistemas de procesos de desalación, y algunas sugerencias respectivas propuestas son las siguientes:

a).- Realizar diseños específicos de captadores cilíndrico parabólicos dados los elevados rendimientos alcanzables.

b).- En el caso anterior, deben desarrollarse diseños distintos para optimizar la tecnología en países desarrollados y en países en vías de desarrollo. Por ejemplo, en el primer caso utilizando tecnología de producción solar directas de vapor, y en el segundo, tecnología de aceite.

c).- Realizar búsquedas más exhaustivas de fluidos de trabajo.

Según los órdenes de magnitud de las potencias eléctricas o mecánicas requeridas para satisfacer las demandas se establecen las siguientes recomendaciones:

- **Potencia del orden de MW.** Para potencias demandadas del orden de MW, deberían utilizarse plantas solares de generación de electricidad a las que se acoplaría la unidad de ósmosis inversa, que sería la tecnología solar de desalación más eficiente, con amplias diferencias frente a la destilación. Sería muy favorable utilizar un esquema de cogeneración agua-electricidad.

- **Potencias de cientos de kW:** distinguiremos el caso de zonas tecnificadas o no. En demandas de potencias del orden de cientos de kW, la tecnología anterior no será adecuada porque los rendimientos de las turbinas de vapor se reducen al decrecer la potencia. Sería razonable en este caso utilizar como alimentación de sistema de ósmosis inversa discos paraboloídes con motores Stirling, captadores solares de concentración en un eje mediante ciclos Rankine orgánicos.

- **Potencias de decenas de kW** en zonas poco tecnificadas o aisladas. Para intervalos de potencias de decenas de kW y dado el estado actual de las tecnologías, se recomienda prescindir de la opción solar térmica frente a la fotovoltaica para alimentar un sistema de ósmosis inversa.

3.9 COSTOS DE ENERGIA RENOVABLE EOLICA Y FOTOVOLTAICA.

El costo de las energías renovables está bajando y aumenta su competitividad como energías alternativas. Se observa un sólido mercado para las energías renovables y en las últimas dos décadas estas tecnologías han visto tasas de crecimiento anuales de 20% a 30% en los mercados.

Con respecto al tema para todas estas tecnologías los mercados se ven robustos, sólidos, consolidados y apoyados no sólo por inversiones federales sino también por políticas estatales y regionales que incluyen normas de cartera renovables. Donde se requiere que un porcentaje de la generación eléctrica provenga de renovables. Se proponen leyes o metas fijadas en este sentido con claras políticas de apoyo y un sólido entorno de negocios que se pueden determinar o establecer en su debido caso. El año pasado la inversión total en activos que van de capital de riesgo a fusiones sobre adquisiciones y financiamiento de desarrollo de productos son metas altas y fijas en muchos países.

México requiere entre ocho mil y diez mil millones de dólares para instalar fuentes alternas de energía eléctrica y dejar la dependencia del petróleo que ante la declinación de las reservas petroleras el país debe construir plantas generadoras de energía eólica, solar entre otras de tipo renovable. Son viables las alternativas organizadas por la red mexicana de energía, la UNAM y el Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM), indicó que para evitar la injerencia de transnacionales, los recursos para construir estas nuevas plantas podrían venir de inversionistas mexicanos.

Además, que podrían recortarse los subsidios federales que se otorgan a diversos sectores de la población porque muchos de éstos tienen las posibilidades de pagar el servicio de energía eléctrica. Se observa que las nuevas fuentes de energía alternas permitirían generar en el corto plazo hasta 35 por ciento de la energía eléctrica que el país requiere.

Las necesidades de energía requieren de soluciones óptimas de consumo energético provenientes de energías renovables en algunos casos como también de

energías existentes tal como están por cuestiones de reducción de costos. Los cuales se verán influenciados de ser reemplazados por nuevas tecnologías para cumplir con políticas de seguridad y financieras, como también un nuevo sistema de transmisión, con los que se pueden desarrollar proyectos renovables los cuales requieren de financiamiento e inversiones disponibles.

El otro enfoque es usar la energía donde se produce, evitando la necesidad de transmisión, lo cual no necesariamente puede ser una opción para algunos países o regiones, ya que las aplicaciones de implementación de uso de consumo de energía y suministro son adaptables para cubrir las necesidades que se requieran. Se considera en este proyecto una planificación de más largo plazo para ver el potencial de generar una estimación de porcentaje de la energía eólica y de energía fotovoltaica adaptada a la región en estudio de este proyecto. El enfoque aplicado apunta a optimizar el uso las energías generadas y usarlas donde se está generando, ya que es la mejor forma de reducir costos.

La producción de electricidad a partir de células fotovoltaicas en 1997 es aún seis veces más cara que la obtenida en centrales de carbón, pero hace tan sólo una década era dieciocho veces más, lo que permite que el empleo de células fotovoltaicas para producir electricidad en lugares alejados de las redes de distribución cumpla con las alternativas existentes. En los próximos 5 años se espera reducir el coste del kWh a 12 centavos de dólar, a 10 para antes del año 2010 y a 4 centavos para el 2030. A lo largo de toda la década el mercado fotovoltaico creció a ritmos anuales superiores al 40%; entre 1971 y 1996 se han instalado en el mundo 700 megavatios de células fotovoltaicas donde la superficie ocupada no plantea problemas.

Los esfuerzos en investigación van dirigidos por una parte a la reducción de costos de los materiales utilizados: La reducción de los espesores de materiales utilizados, utilización de otros materiales que aunque en principio menos eficientes tienen un coste de fabricación inferior (silicio amorfo, micro y policristalino, telururo de cadmio, seleniuros de indio y cobre, arseniuro de galeno, etc.) y por último células de tercera generación basadas en polímeros, nanocristales y en materiales electroquímicos.

El costo de la unidad de energía producida en instalaciones eólicas se deduce de un cálculo bastante complejo. Para su evaluación se deben tener en cuenta diversos factores, entre los cuales cabe destacar: El costo inicial o inversión inicial, el costo del aerogenerador, que incide en aproximadamente el 60 a 70%. Debe considerarse la vida útil de la instalación (aproximadamente 20 años) y la amortización de este costo.

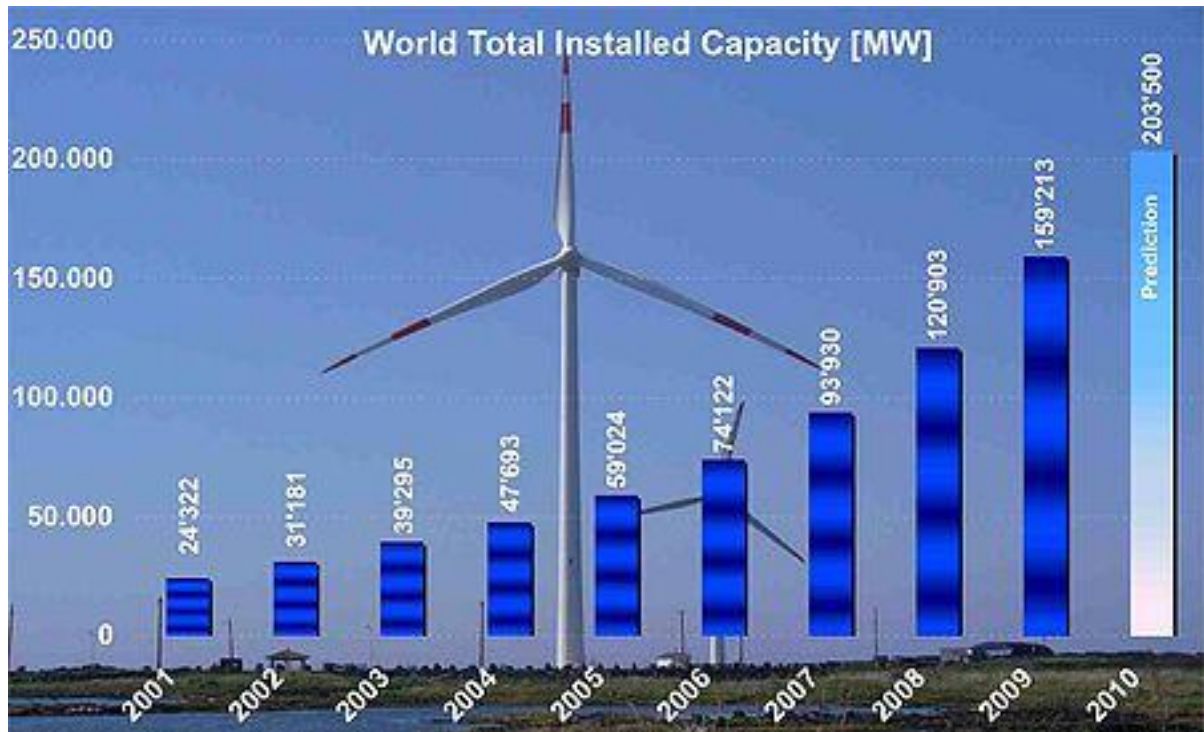


Figura.- Capacidad eólica mundial total instalada 2001-2010 [MW].

3.10 COSTOS DE MANTENIMIENTO DE MODULOS FOTOVOLTAICOS Y AEROGENERADORES.

Una de las grandes ventajas de los sistemas de producción fotovoltaicos es que necesitan un mantenimiento sencillo. Son auto-limpiantes debido a la propia inclinación que el módulo debe tener además de admitir cualquier tipo de variación climática. De cualquier forma, en los lugares donde sea posible, será conveniente simplemente limpiar la parte frontal de los módulos con agua mezclada con detergente (ver figura 4.10).

La vida útil promedio a máximo rendimiento de los paneles fotovoltaicos se sitúa en torno a los 25-30 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye. Esta tecnología es la que habitualmente se utiliza en la producción comercial de módulos solares o paneles fotovoltaicos. Gracias a los avances tecnológicos que aumentan día a día la eficiencia de las celdas solares y de los paneles fotovoltaicos, así como a las economías de escala de un mercado que crece un 40% anualmente, unido al incremento en los precios de los combustibles fósiles, hacen que cada día se le dé más importancia a los paneles solares o fotovoltaicos como productores de electricidad mediante su conexión a red.



Figura 4.10.- Limpieza de paneles.

El mantenimiento de aerogeneradores es un mantenimiento preventivo, que implica metodología en todo el aspecto industrial, por sus buenos resultados, que mediante la medida, análisis y control de niveles de vibración y otros parámetros, permite reducir drásticamente los costos de mantenimiento, el número de averías imprevistas y aumentar la disponibilidad de los equipos y/o planta.

La correcta aplicación de esta metodología del mantenimiento preventivo a los aerogeneradores está permitiendo, mediante la consecución de los tres objetivos básicos reseñados anteriormente, garantizar una explotación óptima de los parques eólicos. El potencial de esta técnica ha permitido, durante la recepción y período de garantía de los parques, identificar precozmente averías debidas a defectos de diseño en componentes esenciales de los aerogeneradores.

Ello ha supuesto, desde el punto de vista del usuario argumentación técnica, frente al suministrador, para introducir mejoras y/o modificaciones en los diseños originales y extensión de períodos de garantía. La experiencia ha demostrado, en este tipo de unidades, que si bien el análisis y control de aceites, que tiene entidad suficiente, puede ser una técnica complementaria de confirmación de diagnóstico, el enorme potencial que actualmente ofrece el control de vibraciones, mediante la obtención de niveles, espectros en frecuencia y análisis de frecuencias ultrasónicas: HDF, SPIKE Energy, etc..., es suficiente para la precoz identificación de defectos en los componentes de los aerogeneradores.

El mantenimiento preventivo, responde adecuadamente. Respecto a la correcta aplicación del mantenimiento preventivo ante averías imprevistas y la identificación y seguimiento de defectos hasta su reparación en tiempos muertos, ausencia de viento, permiten un aumento de disponibilidad y una reducción significativa de los costos de mantenimiento. Si a esto se le añade que, dependiendo de la modalidad

de implantación del mantenimiento preventivo: servicio externo de especialistas o servicio combinado, su costo justifica la ventaja de esta aplicación.

Esta tecnología muestra que las actuaciones técnicas que permiten asegurar la idoneidad del diseño en aerogeneradores y en consecuencia el futuro de la inversión, son recepción de unidades aplicando las técnicas de mantenimiento preventivo y caracterización de medidas experimentales de cargas reales en componentes y estudios de ciclos de fatiga (rainflow). La potencialidad del mantenimiento preventivo, mediante la aplicación de sus técnicas en la fase de recepción de los aerogeneradores, está permitiendo la identificación temprana, antes del vencimiento de los plazos de garantía, de defectos de diseño que se traducen en mejoras ó modificaciones por parte del suministrador.

En algunos casos estos defectos ó mejoras, imputables al vertiginoso desarrollo de componentes y/o elementos para su adecuación a la alta demanda, imponen ligeros cambios como mejoras en la lubricación de componentes, aumento de capacidades de carga de rodamientos, etc. que no afectan al diseño global. Es por ello recomendable ejecutar en la fase inicial, incluso en prototipo, las técnicas de mantenimiento preventivo y caracterización o determinación de cargas reales, con el objeto de garantizar los objetivos técnico-económicos de cada instalación.

El mantenimiento, en su vertiente especializada de Mantenimiento Predictivo de Averías, se ha revelado como una eficaz herramienta, no sólo para optimizar condiciones de explotación de las instalaciones, sino como medio de identificación precoz de fallos o defectos de diseño.

CAPÍTULO 4

PLANTAS DESALADORAS EN MEXICO

4.1 PLANTAS DESALADORAS.

El recurso máspreciado y de los mas necesarios del mundo es el hídrico y también de los más estudiados por el sector científico. En México, se ha manifestado constantemente la preocupación por esa situación y, sobre todo para proponer soluciones que ayuden a optimizar el abasto y su manejo sustentable en distintas regiones.

Las soluciones propuestas por diversas universidades e instituciones del país van desde un manejo responsable del recurso, la optimización de los esquemas tarifarios, el reciclaje del líquido, hasta la forma de aprovechar el agua salada, la cuál representa el 97% del total del recurso existente en el planeta y que actualmente requiere de un máximo aprovechamiento siendo en grandes cantidades un recurso natural que representa una posible alternativa.

La creciente necesidad de lograr el equilibrio hidrológico que asegure el abasto suficiente de agua a la población se logrará armonizando la disponibilidad natural con las extracciones del recurso desde una utilización adecuada del mismo hasta el reciclaje correcto mediante el uso eficiente del agua. México obtiene el agua que consume la población de fuentes tales como ríos, arroyos y acuíferos del subsuelo. Estos acuíferos se recargan de forma natural en época de lluvias. Sin embargo, la época de lluvias tiene una duración promedio de aproximadamente cuatro meses lo que propicia una escasa captación. Aunado a esto, del total de agua captada por lluvias, aproximadamente el 70% se evapora.

Existen algunas zonas geográficas tradicionalmente afectadas por la escasez del recurso hídrico a las que no se puede dar una solución aceptable para sus problemas si no es la mayor y mejor disponibilidad de este recurso, que no poseen, puesto que tanto las aguas subterráneas como la reutilización y, en su caso, la desalación se han aplicado hasta determinados límites, y que, por tanto, debería de ampliarse mas a futuro la aplicación de estas alternativas para ser suministrado por la aportación externa de agua o la modificación de sus estructuras productivas.

La desproporción que existe entre la cantidad de agua que se capta por escurrimiento y las extensiones territoriales que comprenden en conjunto con la corta temporada de lluvias hace que la disponibilidad del agua sea cada vez menor. La escasez de agua en muchas zonas del mundo y de algunos países se ha visto forzados a obtener agua de fuentes alternas como el mar, lagunas o pozos salobres. De esta manera, la utilización de técnicas de desalación, tanto de recursos salobres como de agua de mar, constituye en determinadas circunstancias una solución a esta escasez sistemática de recursos hídricos en las zonas áridas y semiáridas del país. Hace treinta años la desalación de agua de mar era una técnica poco viable desde un punto de vista económico y técnico. Sin embargo, la tecnología actual para la desalación del agua de mar permite obtener agua apta para el consumo humano en un margen competitivo.

Como sector al alza en todo el Globo, la desalación de agua cuenta con más de 17,000 plantas en 130 países que se destinan a más de 150 millones de personas.

La expansión de estas infraestructuras desaladoras, con proyectos en curso en el norte de África, Estados Unidos o China, obedece al progreso tecnológico experimentado por esta técnica en los últimos 10 años. El total de agua desalada es de 193,771.2 m³/d y el sistema más utilizado es la ósmosis inversa, la mayoría de las plantas desalinizadoras se encuentran operando para el sector hotelero.

Para conocer las condiciones de operación de las plantas desalinizadoras y determinar las especificaciones que deben cumplir éstas y que tratan tanto aguas marinas y salobres, se realizaron 3 reuniones con expertos nacionales e internacionales. La primera reunión se realizó en mayo del 2007 en Guaymas, Sonora. La segunda reunión se realizó en Almería, España, en octubre de 2007, consistió en visitar tres grandes plantas desalinizadoras de Andalucía, España. Las plantas visitadas fueron Carboneras y Rambla de Morales para irrigación y Almería para producción de agua potable. En estas visitas se obtuvo información valiosa sobre los diagramas de flujo del proceso de desalación, además de información técnica sobre datos de equipos, así como la capacidad de producción,

Por otra parte las visitas permitieron conocer a fabricantes de plantas desaladoras con gran experiencia y capacidades de producción de agua desalada mayores a los 100,000 m³/d. La tercera reunión con expertos se realizó a finales de octubre de 2007 en Gran Canaria, España, durante el Congreso Mundial de Desalación y Rehusó del Agua, mismo que conjuntó a más de 1000 expertos en el tema y la exposición de tecnología de vanguardia por más de 200 empresas de las más importantes del mundo. Se realizaron reuniones privadas con directivos de varias empresas como las de Inima y Veolia de España, IDE de Israel, Doosan de Korea, así como ERI y GE de Estados Unidos de Norteamérica.

En México los resultados del muestreo de calidad del agua realizados en Sonora y Baja California Sur permitieron caracterizar el agua de alimentación, producción y desecho. Se encontró la mayor salinidad con una conductividad eléctrica de 44,656 µS/cm en Maquillas Tetakawi y con menor en el CET del Mar con 41,785 µS/cm en la zona de La Paz, San José del Cabo y Cabo San Lucas.

En México existen cerca de 653 cuerpos de agua, de estos 96 están sometidos a sobreexplotación y abastecen el 50 % del agua necesaria para los diversos usos del país. Con base en lo anterior, la reserva subterránea está disminuyendo a un ritmo cercano a los 8 kilómetros cúbicos por año (8x10⁹ m³/año).

La sobreexplotación ha provocado problemas de intrusión salina en 17 acuíferos ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nuevo León, Coahuila, Colima y Veracruz. La figura 4.1 muestra los acuíferos existentes en México.



Figura 4.1.- Cuerpos de aguas subterráneas sobre explotados, con intrusión salina y ambos.

El 52% de la superficie de México es árida y semiárida, 13% es trópico seco, 20% templado y 15% trópico húmedo. El desequilibrio hidráulico en México es notable y sus asentamientos humanos no corresponden a las disponibilidades de agua: la disponibilidad media anual en el país es de 471,891 millones de m³, en el altiplano y la mesa del norte habita el 60% de la población (60 millones de habitantes), que sólo cuenta con el 12% del agua (56,626 millones m³/año). Lo anterior significa que cada habitante dispone de 944 m³/año, lo que implica un estrés hídrico que puede impedir el desarrollo.

México cuenta con más de 11 mil kilómetros de litorales, alrededor del 68% de estos corresponde a las costas e islas del océano Pacífico y Golfo de California, y 32% a las costas, islas y cayos del Golfo de México y mar Caribe. Además la zona marítima mexicana cuenta con 500 mil kilómetros cuadrados de plataforma continental; 16 mil kilómetros cuadrados de superficie de estuarios y cerca de 12,500 km² de lagunas costeras. Lo anterior, junto a derechos sobre amplias zonas marítimas, le asegura a México una riqueza potencial que tienen pocos países en el mundo.

En agua salada y/o salobre en el área se estima en poco más de 2 millones de hectáreas; de éstas, hay 450 mil propicias para el cultivo del camarón y 1.6 millones para otras especies. Se debe considerar el potencial aprovechamiento de los

acuíferos salobres intercontinentales (superficiales y subterráneos) para producir agua potable. La desalación se refiere al proceso de tratamiento para remover las sales del agua, ésta puede realizarse por varias vías, el objetivo es obtener agua potable a partir de agua salobre o de mar.

4.2 LA DESALACIÓN EN MÉXICO.

Se estima para los próximos años nuestro país tendrá una baja disponibilidad de agua dulce (entre 1,000 y 5,000 m³ anuales por persona, es decir, aproximadamente de 3 a 15 m³ diarios), de ahí que el conocimiento y la puesta en marcha de técnicas para desalar agua de mar resulten de particular importancia. Sin embargo, el problema no se resuelve únicamente con importar grandes y costosos equipos del extranjero, sino que resulta imprescindible la capacitación del personal idóneo a diferentes niveles de organización.

A pesar de que en diversos estados funcionan plantas desaladoras, algunas prácticamente están abandonadas, ya sea por falta de refacciones o porque realmente nunca falta agua en las comunidades donde se instalaron.

Con base en los cuestionarios aplicados en el ámbito nacional para conocer el número de plantas desaladoras, la tabla 4.1 presenta los resultados obtenidos a diciembre de 2001.

Estado	Plantas desaladoras	% Nacional	Opera		Capacidad Instalada m3/d	Capacidad que opera m3/d
			Si	No		
Baja California	10	5.8%	7	3	9,540	8,040
BCS	38	22.2%	32	6	8,979	3,346
Campeche	2	1.2%	2	0	3,120	2,132
Coahuila	7	4.1%	2	5	78	31
Durango	24	14.0%	9	15	650	374
Guerrero	4	2.3%	2	2	2,000	900
Nuevo León	2	1.2%	2	0	325	325
Oaxaca	1	0.6%	1	0	13,478	13,478
Q. Roo	76	44.4%	57	19	17,058	23,266
SLP	1	0.6%	1	0	60	5
Sonora	5	2.9%	4	1	471	80
Tamaulipas	1	0.6%	1	0	1,728	363
Total Nacional	171	100%	118	53	67,487	52,340

Tabla 4.1.- Inventario de plantas Desaladoras por estado, capacidad instalada y estado de operación.

México cuenta con una capacidad instalada de 67,487 m³/d (781.1L/s), el 22 % no opera, por los altos costos de mantenimiento, refacciones de importación y personal calificado. El estado que cuenta con la mayor capacidad instalada y el número de plantas es Quintana Roo representando el 44 % del total nacional. La tabla 4.2 muestra la distribución de plantas desaladoras por proceso.

Estado	Plantas desaladoras	Proceso				Solar Experimental
		OI	CV	MSF	Solar	
Baja California	10	3	4	1	2	0
BCS	38	32	3	0	2	1
Campeche	2	2	0	0	0	0
Coahuila	7	7	0	0	0	0
Durango	24	24	0	0	0	0
Guerrero	4	4	0	0	0	0
Nuevo León	2	2	0	0	0	0
Oaxaca	1	1	0	0	0	0
Q. Roo	76	75	1	0	0	0
San Luis Potosí	1	1	0	0	0	0
Sonora	5	4	0	0	1	0
Tamaulipas	1	1	0	0	0	0
Total Nacional	171	156	8	1	5	1

Tabla 4.2.- Plantas desaladoras por proceso y por estado.

El 53 % de las plantas desaladoras (90) son utilizadas para fines turísticos, con una capacidad instalada de 26,942 m³/d (311.81 L/s), 12 % (20) son para uso industrial con una capacidad instalada de 22,143 m³/d (256.3 L/s), 35% para uso municipal (61) con una capacidad instalada de 18,403 m³/d (213 m³/d).

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua con el 65%, no sólo porque la superficie irrigada en el mundo ha tenido que quintuplicarse sino porque no se cuenta con un sistema de riego eficiente, razón principal que provocan pérdidas. Le siguen el sector industrial que requiere del 25% y el consumo doméstico, comercial y de otros servicios urbanos municipales que requieren el 10%. El país cuenta con una capacidad comprobada para desalar agua de 67,487 m³/d (781 L/s). El 65.5 % del total de plantas desaladoras pertenecen a particulares. Los estados que presentan un crecimiento importante en la instalación de desaladoras son Quintana Roo y Baja California Sur, por los nuevos desarrollos turísticos proyectados.

Población	Estado	Habitantes	Motivo
Las Lechugas	Guerrero	450	La calidad del agua de los pozos artesanales es salobre.
Punta Maldonado	Guerrero	1100	No cuentan con agua potable, la fuente mas cercana está a 32 km.
Akumal	Q. Roo	1088	Problemas de intrusión salina constante del agua potable por la alta permeabilidad de los mantos.
Nuevo Campechito	Campeche	400	Actualmente se abastece de los excedentes de una desaladora, no cuenta con fuentes cercanas de agua dulce.
Xpujil	Campeche		Representa el 16% de la superficie de Campeche y es el 7.3% de la zona hidrológica de la península de Yucatán, la calidad de agua es salobre y representa una fuente de abastecimiento no explotada.

Tabla 4.3.- Sitios recomendados para instalar una planta desaladora.

La tabla 4.3 muestra las comunidades seleccionadas para instalar una planta desaladora con base en las visitas de campo realizadas en los estados de Oaxaca, Guerrero, Mérida, Campeche y Quintana Roo.

La zona de Xpujil en Campeche con una superficie de cerca de 10,000 km², se ubica en la porción central al sur de la península de Yucatán, es una zona factible para instalar desaladoras y explotar su acuífero. La condición geohidrológica es de subexplotación, al superar notoriamente el volumen de recarga (estimado en casi 42 mil millones de m³/año) a los volúmenes de extracción (que se estiman del orden de mil millones de m³). Sin embargo, esta zona se caracteriza por tener agua subterránea a grandes profundidades y con alto contenido de sales disueltas (STD > 3000 mg/l) principalmente sulfatos.

En el estado de Oaxaca no se detectaron zonas con problemas de intrusión salina en los mantos acuíferos, únicamente se detectó problemas de distribución del vital líquido. Actualmente el IMTA cuenta con el inventario nacional de desaladoras actualizado. Existen en México 320 sitios donde están instaladas desaladoras, y en éstos hay 435 plantas. Esta infraestructura se halla distribuida en todo el país-

Podemos preguntarnos qué se obtiene como resultado de este proceso, y qué se hace con los desechos o residuos que quedan después de la desalación. Pues bien: tanto de los procesos térmicos como de los de membrana se obtienen dos productos: el agua destilada o baja en sales, a la que es necesario darle un pos tratamiento para que sea apta para consumo humano y no provoque problemas de corrosión en las redes de distribución, y la salmuera, que es el concentrado de sales de estos procesos y es de tal modo un desperdicio con una concentración doble de sales, la cual debe ser desechada adecuadamente (figura 4.2).

Lo anterior quiere decir que si tengo agua de mar, cuya concentración es de 35,000 ppm de sal, al desalarla voy a tener un agua baja en sales, menor a 100 ppm, y que tendremos además el rechazo o salmuera, con una concentración de 70 000 miligramos por litro.



Figura 4.2.- Descarga de salmuera al mar, desde una desaladora.

Los residuos de las plantas desaladoras se desechan en dos formas: si existe terreno suficiente, se llevan a lagunas de secado, donde el agua se evapora; la sal que queda es confinada, ya que tiene químicos (antincrustantes) que no permiten su utilización para el consumo humano. El método de disposición de salmuera más común es su depósito en el océano, por medio de difusores ubicados mar adentro.

El mar diluye en segundos las altas concentraciones de sal que por ese medio se le agregan. Es necesario no hacer estas descargas de salmuera en sitios muy frágiles bióticamente, como los bancos de coral. Un dato curioso es que la sal que hay ya en los mares del mundo es tanta, que si la extrajéramos en su totalidad cubriríamos con ella todos los continentes con una capa de 1.5 m de alto.

En México (IMTA) se trabaja en varios aspectos de la desalación:

- En primer lugar, cada dos años se actualiza el inventario de plantas del país, información que no es fácil de obtenerse.
- Se investiga sobre energías alternativas de desalación, pensando en comunidades alejadas con problemas de aguas salobres y que no cuentan con agua potable.
- Se experimenta el uso de materiales de desecho para la elaboración de destiladores solares.
- Asimismo, se estudia un sistema de bajo mantenimiento, que consiste en la sustitución de los destiladores cada dos años. El costo de la sustitución es de 250 pesos. El costo del sistema es de 5 000 pesos, e incluye:
 - a) Tinaco de 450 litros (depósito de agua salobre).
 - b) Estructura metálica para los destiladores, calentador solar.
 - c) 40 destiladores solares tubulares, instalación hidráulica, y
 - d) Recolector de destilado .
- El sistema produce en promedio diez litros de agua fresca por día, y ocupa no más de seis metros cuadrados.

Otra línea de trabajo que se explora en México (IMTA) es el uso de plantas acuáticas para desalar. En este sentido, se está trabajando con *Najas marina*, una hidrófita enraizada sumergida que se encuentra en el lago de Tequesquitengo. Una línea de trabajo más es la elaboración de lineamientos adecuados para las plantas desaladoras, que nos indicará qué debe cuidarse con miras a su instalación.

Por otra parte, actualmente se está construyendo, para inaugurarse el próximo año, el laboratorio de membranas más grande de Latinoamérica. Contemplará los siguientes procesos:

- a) Ósmosis inversa para agua de mar y agua salobre.
- b) Nanofiltración, Ultrafiltración y Microfiltración.
- c) Filtración con arena.
- d) Desinfección con ozono.

4.3 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.

Las actuales aplicaciones tecnológicas comerciales para desalación de agua tal y como se muestra en la tabla 4.4 ejemplifica algunos sistemas de procesos de desalación que determina algunas características dentro de sus aplicaciones y especificaciones en el desarrollo de sus respectivos procesos. Cabe mencionar que a estos se les puede acoplar algún otro tipo de fuente suministro para su operación y producción de desalación de agua, el cual se puede determinar como una fuente proveniente de energía solar o eólica.

A continuación se muestran las ventajas y desventajas de las tecnologías comerciales, para desalar agua.

Característica	MSF	MED-TVC	CV	OI	ED
Tipo de energía	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo energético primario (KJ/kg)	Alto > 200	Alto/medio 150-200	Medio 100-150	Bajo < 80	Bajo <30
Consumo de energía eléctrica kWh/m ³	3.5-4.0	1.5-2.0	9.0-11.0	2.4-4.5	1-2
Costo de instalaciones	Alta	Alto/medio	Alto	Medio	Medio
Capacidad producción m ³ /d	Alta >50,000	Media < 20,000	Baja < 5,000	Alta > 50,000	Media < 30,000
Posibilidad ampliación	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil
Desalación agua de mar	Si	Si	Si	Si	No
Calidad de agua desalada ppm	Alta < 50	Alta < 50	Alta < 50	Media 300-500	Media <300
Superficie terreno requerida de instalación	Mucha	Media	Poca	Poca	Poca
Costo USD /m ³ tratado	1.14-1.68	0.83-1.115	0.63-0.86	0.32-0.61	0.17-0.32*
Costo USD/m ³ plantas pequeñas		1.28-2.16		1.1-1.8	

Tabla 4.4 Valoración de las diferentes alternativas comerciales de desalación.

Los costos de electricidad, operación y mantenimiento, aditivos y reposición de membranas y filtros de arena, para los procesos de ósmosis inversa van de 0.15 a 0.33 USD/m³ en México. Para los procesos térmicos (MSF, MED, CV) van de 0.11 a 0.51 USD/m³. Los beneficios de la desalación de agua en cuanto a los usos que de ella pueden hacerse ya en esa condición, son infinitos, así como su disponibilidad. Uno de los beneficios más impactantes es lograr el desarrollo de ciudades o poblaciones donde no hay agua potable, como en este caso proporcionar una solución a los frecuentes problemas hídricos en México presentando una alternativa sustentable.

En ciertos casos, la desalación podrá resolver algunos problemas hidrológicos pero, además del alto coste que comporta, su utilización puesto que se sustituyen los recursos renovables haciendo una comparación por otros que demandan un elevado consumo energético (muchas veces de origen fósil).

Es conveniente introducir el volumen de agua realmente consumido como factor para distribuir los costos de la misma entre los usuarios, resolviendo lógicamente los problemas de control que se plantean, puesto que esta medida incentivaría el ahorro energético y de costos. Es imprescindible revisar los criterios de asignación del agua, especialmente en lo que respecta a las actividades económicas.

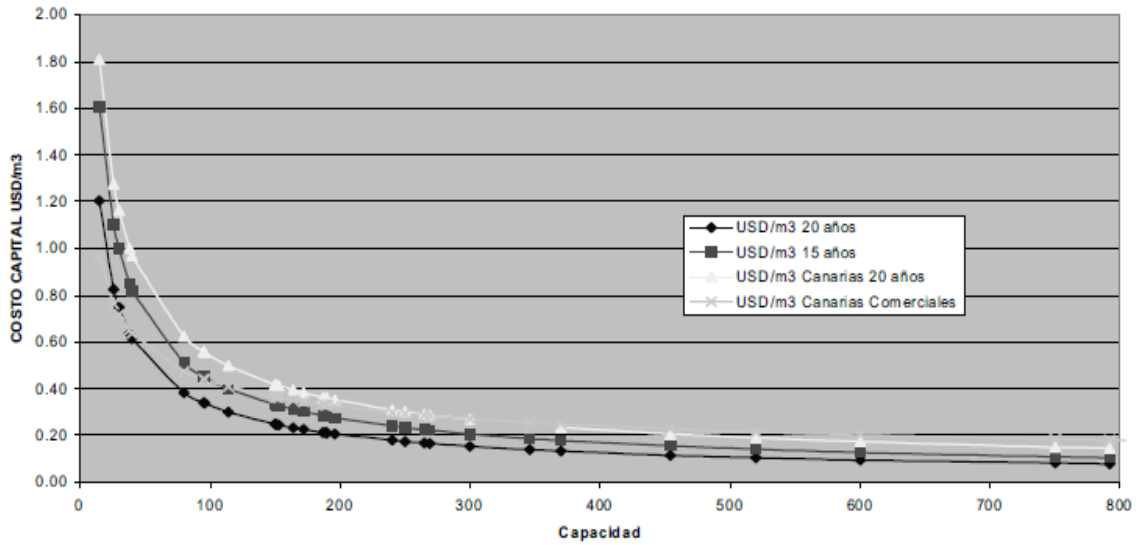
Cualquier demanda de nuevas disponibilidades de agua para usos económicos debe someterse a un riguroso análisis costo-beneficio, bien entendido que por la movilidad del recurso y la amplitud de sus funciones habrán de considerarse todos los costos y todos los beneficios. En conjunto, los costos vinculados al gasto energético en producción de agua desalada se han reducido a la mitad, algo que adquirirá una mayor relevancia con el uso futuro de energías renovables.

El estudio técnico y económico de los procesos evaluados muestra que la ósmosis inversa es la opción más económica para desalar agua de mar y salobre, debido a las nuevas técnicas de ahorro de energía y al material de las membranas utilizadas entre ellas las más recientes que son a base de materiales cerámicos modificados a fin de optimizar la remoción de las sales y minerales, obteniéndose costos cada vez más bajos.

Es necesario considerar varios aspectos antes de inclinarse por esta alternativa, entre los más importantes están: alto costo de inversión inicial, se requiere de personal capacitado, no todos los sistemas de ósmosis inversa que están en el mercado son los más eficientes, costos de membranas, mantenimiento y mejora del servicio para el perfecto funcionamiento, utilización de los recursos y la implementación del diseño productivo, así como el uso de suministros energéticos, eléctricos y renovables.

De igual manera, es relevante la contribución de estas fuentes al desarrollo social en áreas donde la energía convencional es económicamente inviable. Estudios previos indican que México posee un gran potencial para generar energía a través de fuentes renovables. Los sistemas de desalación por energías no convencionales, para el caso de México, los costos son altos e inclusive los acoplados a los sistemas convencionales de desalación. Los rendimientos de la destilación solar están alrededor de 10 L/ m² de destilador solar, por lo que estos sistemas se recomiendan para comunidades pequeñas e inclusive familiares.

Con base en la información obtenida en el inventario nacional, se calcularon los costos de inversión para las plantas de osmosis inversa de acuerdo al volumen a tratar. La grafica 4.1 muestra las líneas de tendencia, considerando periodos de amortización de 15 y 20 años y se realizó una comparación con un modelo desarrollado por una empresa española que se dedica a la venta de plantas desaladoras.

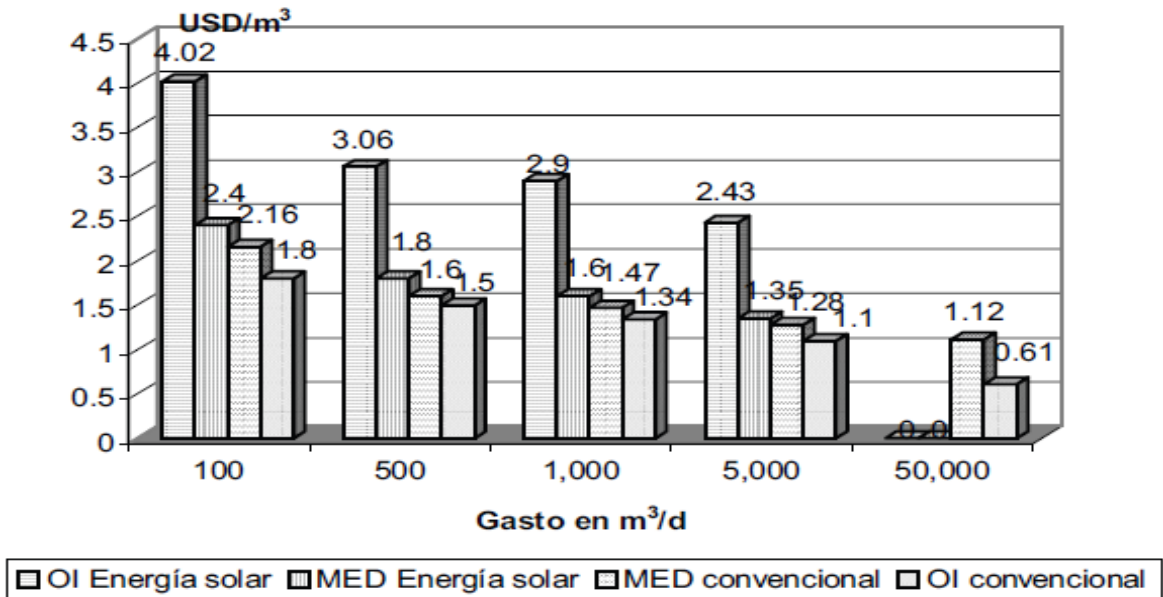


Grafica 4.1.- Costos de Inversión para plantas de osmosis inversa

Los costos de inversión se calcularon con base en la ecuación 1:

$$Ci = \frac{\text{Costo de la planta desaladora USD}}{\text{Gasto (m}^3/\text{d)} \times \text{eficiencia operación} \times \text{días de operación / año} \times \text{años amortización}} \quad \text{ecuación (1)}$$

La curva muestra que a partir de un gasto de 450 m³/día el costo de capital se mantiene casi constante. La grafica 4.2 muestra la comparación de costos de inversión para plantas desaladoras que utilizan energía no convencional contra las que utilizan diesel, electricidad u otro combustible.



Grafica 4.2.- Comparación de costos de diferentes alternativas de desalación de agua de mar, utilizando energía convencional y no convencional

Se observa que los costos para los procesos de desalación térmicos (MED, MSF) son muy similares entre los procesos convencionales y los que utilizan energías alternativas como la solar o la eólica, esto no es el caso para los procesos de ósmosis inversa, donde la diferencia de costos de inversión entre una y otra es grande.

4.4 IMPACTO ECONÓMICO DE ENERGIAS RENOVABLES APLICADAS A PLANTAS DESALADORAS.

Las energías renovables se basan en los flujos y ciclos implícitos en la naturaleza. Son aquellas que se regeneran y se espera que perduren por cientos o miles de años. Además, se distribuyen en amplias zonas y su adecuada utilización tiene un impacto ambiental favorable en el entorno, elemento que hoy se convierte en una herramienta de gran importancia, ante la necesidad de disminuir significativamente la emisión de gases de efecto invernadero libres de bióxido de carbono a nivel mundial.

Ciertamente los combustibles fósiles han sido una base para el desarrollo nacional en México. Los pronósticos indican que seguirán ocupando una participación destacada como fuente primaria de energía para las próximas décadas; sin embargo, hoy es necesario iniciar las acciones que nos permitan, en un futuro no muy lejano, diversificar las fuentes de energía para atender las necesidades de los consumidores.

Para el año 2015 el uso industrial alcanzará el 34% a costa de reducir al 58% los volúmenes destinados para riego y al 8% los destinados para otros usos. El consumo total de agua se ha triplicado desde 1950 sobrepasando los 4,300 km³/año, cifra que equivale al 30% de la dotación renovable del mundo.

Las energías renovables representan una respuesta importante a la demanda de la sociedad de contar con un modelo sustentable que, además de mitigar los efectos negativos de las actividades que se tienen en el sector energético, contribuyen a reducir los riesgos asociados con la volatilidad de precios y diversificar el portafolio energético.

Los equipos desarrollados para producir agua potable por medio de destiladores solares aún no compiten económicamente, ni eficientemente con los sistemas comerciales de desalación en México. Los sistemas más eficientes obtienen alrededor de 10 L de agua desalada por m² de destilador, por lo que se requerían de grandes superficies para atender necesidades de una población mediana. Por lo que estos sistemas se recomiendan para poblaciones rurales e inclusive podría emplearse a nivel familiar, donde no hay servicio energía eléctrica. La calidad de agua obtenida con estos sistemas es tan buena como los sistemas convencionales de tratamiento.

Las consideraciones principales antes de decidir instalar una desaladora son las siguientes: alto costo de inversión inicial, requiere de personal capacitado, llevar a cabo un análisis económico (en el caso de abastecer un municipio, con el fin de conocer si el costo de inversión de una desaladora es menor que traer el agua potable de distancias lejanas o perforando de pozos), condicionantes ambientales y sociales.

El sistema de ósmosis inversa es la opción más económica para desalar agua salobre y de mar, los costos de inversión de estos procesos para agua de mar van de 0.32 a 0.61 USD/m³ para plantas que producen en promedio más de 10,000 m³/d y de 0.41 a 0.43 USD/m³ para plantas que producen menos de 5,000 m³/d. Para agua salobre el costo de inversión se reduce de 0.146 a 0.30 USD/m³, esto se debe a que los costos de membrana se reducen respecto a las utilizadas para agua de mar.

Si se seleccionó un sistema de ósmosis inversa, es importante que la empresa que instale ésta: cuente con personal capacitado, experiencia y ofrezca servicio rápido en caso de alguna falla del sistema, por lo cual proponemos un acoplamiento de sistemas interactuando. Es necesario considerar que el equipo que se va a adquirir cuente con el mejor y más eficiente sistema de ahorro de energía.

Los equipos más eficientes gastan alrededor de 2.4 kWh/m³, lo anterior se reflejará en ahorros significativos en el consumo de energía. Hay que considerar los gastos de operación, reactivos, cambios de membranas y filtros, que dependiendo del tipo de agua pueden impactar los costos finales. Estos son en promedio de 0.15 a 0.33 USD/m³ para ósmosis inversa. Entre otros muchos usos, los paneles fotovoltaicos se pueden destinar a múltiples aplicaciones. La venta de paneles fotovoltaicos ha crecido en el mundo al ritmo anual del 20% durante los últimos años.

CAPÍTULO 5

EJEMPLO DE APLICACIÓN

5.1 UBICACIÓN DE EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Con respecto a las investigaciones realizadas es factible desarrollar un ejemplo donde se puede implementar un sistema que tiene como suministro energías renovables. Para ello es necesario determinar aspectos relevantes que es imprescindible especificar de acuerdo a las siguientes consideraciones que analizaremos relativamente en este capítulo.

Estos equipos que tienen como suministro fuentes de energía renovable, funcionan a la perfección al considerar la región donde pueden implementarse, así como los recursos necesarios para la infraestructura de los medios para obtener óptimos resultados. Por ello seleccionamos en este proyecto una planta desaladora existente ubicada en la región del Istmo de Tehuantepec que se encuentra en el estado de Oaxaca.

De acuerdo a la investigación realizada anteriormente en la pág. 72 del capítulo 4, en la tabla 4.1, se encuentra el inventario de plantas desaladoras, así como su capacidad instalada y estado de operación, tabla de la cual se tomó la planta desaladora situada en el Estado de Oaxaca con una capacidad y operación de 13,478 m³/d, y que a su vez se mantiene actualmente en funcionamiento presentando un proceso implementado de osmosis inversa, el cual está determinado en la tabla 4.2 que muestra la distribución de plantas desaladoras por proceso. La planta desaladora que tomaremos como ejemplo se encuentra situada en el Puerto de Salina Cruz.

Para emplear este sistema tomamos en cuenta la ubicación de la planta desaladora y otras variables climáticas necesarias para el desarrollo adecuado y adaptación de equipos para el óptimo funcionamiento, recursos necesarios y estimación de costos respectivamente en este capítulo.

El istmo de Tehuantepec es una región comprendida entre los estados de Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Veracruz. Se trata de la zona más angosta entre los dos océanos (océano Pacífico y océano Atlántico) que posee nuestro país. Los principales centros de población del istmo de Tehuantepec son Coatzacoalcos, Minatitlán y Acayucan en Veracruz; y Juchitán de Zaragoza, Matías Romero Salina Cruz y Santo Domingo Tehuantepec, en el estado de Oaxaca (ver figura 5.1).

El istmo de Tehuantepec es la región en donde los océanos Atlántico y Pacífico se localizan a una menor distancia motivo por el cual decidimos tomarlo como estudio de nuestro proyecto, es la frontera natural entre Norteamérica y Centroamérica. Aproximadamente corresponde a las regiones Olmeca, del estado de Veracruz; y a los distritos de Tehuantepec y Juchitán, que conforman la región del Istmo de Tehuantepec en el estado de Oaxaca.



Figura 5.1.- Relieve del istmo de Tehuantepec.

La costa pacífica del istmo concentra otra importante proporción de la población regional. En ella se localizan Matías Romero, Juchitán de Zaragoza, Santo Domingo Tehuantepec y Salina Cruz; éstas son algunas de las principales ciudades de Oaxaca, esta ciudad cuenta con el Parque Eólico La Venta (ver figura 5.2) en la cual podemos apreciar equipos instalados en esta región que funcionan perfectamente.



Figura 5.2.- Parque Eólico La Venta ubicado en Oaxaca, México.

La propia geografía del istmo de Tehuantepec le ha convertido en una zona estratégica para el paso comercial. Posee dos importantes puertos: el de Coatzacoalcos en el Golfo de México, y el de Salina Cruz, en el Golfo de Tehuantepec. También alberga importantes instalaciones relacionadas con la industria petrolera, como las refinerías de Salina Cruz y la de Minatitlán.

5.2 EVALUACIÓN DEL SISTEMA EÓLICO FOTOVOLTAICO.

Tomando como referencia los datos de la tabla 4.1 del inventario de plantas desaladoras se determina lo siguiente en la Tabla 5.1.

Estado	Planta desaladora	% Nacional	Opera		Capacidad instalada	Capacidad que opera
			Si	No		
Oaxaca	1	0.6%	1	0	13,748	13,748

Tabla 5.1 Planta de Ejemplo de Aplicación y su Capacidad.

Es relevante determinar el procedimiento que se debe seguir y que se requiere para la implementación de equipos sugeridos como alternativa para cubrir la demanda en cuestión, si optamos por la aplicación de la sub contratación (out sourcing), podemos adquirir los equipos y estructurar el balance de costos aproximado de inversión. La estimación es imprescindible ya que solicita una inversión correcta para el proyecto.

Al mismo tiempo una vez realizados los estudios al respecto, se identificarán las dimensiones de la ubicación del lote para especificar claramente mediante un mapa geográfico y el respectivo diagrama de equilibrio, con el objetivo de ilustrar la distribución de la planta y el aprovechamiento de áreas y departamentos al máximo para obtener un resultado eficaz de este recurso y contemplar todos los factores y variables que intervienen en la estructura de la distribución de planta.

Con respecto al consumo de energía, dependiendo del lote, es necesario un diseño óptimo para trazar la ruta adecuada, ya que existen alternativas que pueden beneficiar bastante la instalación en cuanto a costos, tiempo y almacenamiento dependiendo de la disponibilidad de recursos para proporcionar un procedimiento que nos permita una instalación de calidad efectiva.

Considerando las variables ambientales y de recursos, se determina un acoplamiento de activación de sistemas alternados, ya que una vez instalados los equipos y funcionando correctamente, se puede determinar lo siguiente:

- Para el sistema energético que implica el funcionamiento de módulos fotovoltaicos de acuerdo a la investigación tienen un rendimiento perfecto diurno, por lo cual es relevante que se utilice en un horario de visibilidad que permita aprovechar este recurso correctamente en horarios estimables de mañana al

atardecer, haciendo este sistema de funcionamiento de calidad eficiente con respecto a su rendimiento.

- Para el sistema eólico el mejor aprovechamiento de aerogeneradores es el del atardecer a la mañana siguiente, es decir, nocturno ya que el recurso de los vientos se aprovechan perfectamente en este horario, considerando en este caso que la planta opera las 24 hrs y cubre la capacidad energética.

Tomando en cuenta que, dependiendo de cuánto tiempo queremos que este en operación la planta, todo es cuestión de lo que se necesite ya que hay alternativas de operación como lo son algunas variables que se contemplan con los estudios previos, ya que el aerogenerador funciona correctamente las 24 hrs del día, y el panel es perfecto para ser aprovechado de día con la visibilidad si a esto le aplicamos un mantenimiento preventivo de operación de mejora no se tendrán inconvenientes imprevistos.

Una vez activándose así un acoplamiento eólico fotovoltaico donde determinan los cambios de funcionamiento, rendimiento y de aprovechamiento máximo de recursos, estos sistemas son innovación en el mercado y son vanguardistas pues en otros países ya son muy comerciables. Los hace prácticos la tecnología actual al alcance del usuario, por eso los países desarrollados lo adquieren por el beneficio de costos y recursos.

Estos sistemas cuentan con características de calidad necesarias para ser adquiridos y cuentan con un nivel de funcionamiento óptimo, además nos permiten por medio de la competitividad (benchmarking) estar a la vanguardia en temas de aplicación de calidad a nivel internacional.

La inversión estimada en el balance de costos deberá ser planificada con los factores y variables que identifiquen todo lo que pueda requerir gastos, con el fin de distinguir una aproximación exacta al respecto, ya que a partir del tiempo previsto la inversión se recupera y a partir de ese plazo en adelante se verá el beneficio de la inversión.

El cálculo determinara clara mente las ventajas de inversión del funcionamiento de los ciclos realizados por estos sistemas realizando una comparación de costos. Se estima un tiempo de funcionamiento y el resto de comparación, lo cual determina muy buenos resultados, y por lo tanto una muy buena alternativa que puede cubrir este tipo de capacidades de consumo energético.

Estos sistemas funcionan perfectamente y son muy eficientes para suministrar la planta desaladora. Es decir se adaptara a la instalación eléctrica ya hecha que serán reutilizadas en esta conexión lo que cambia específicamente es la fuente de alimentación energética.

La nueva fuente suministro contara con ventajas aceptables provenientes de recursos inagotables que caracterizan el Istmo de Tehuantepec necesarios para efectuar este proyecto para obtener una elevada productividad.

La estructura de planta presentada respectivamente la componen dispositivos adicionales que pueden proporcionar al sistema un óptimo funcionamiento y mantenerlo en perfectas condiciones, además de ayudar a problemas medio ambientales, fomentan soluciones y alternativas a nivel mundial.

5.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA EÓLICO FOTOVOLTAICO.

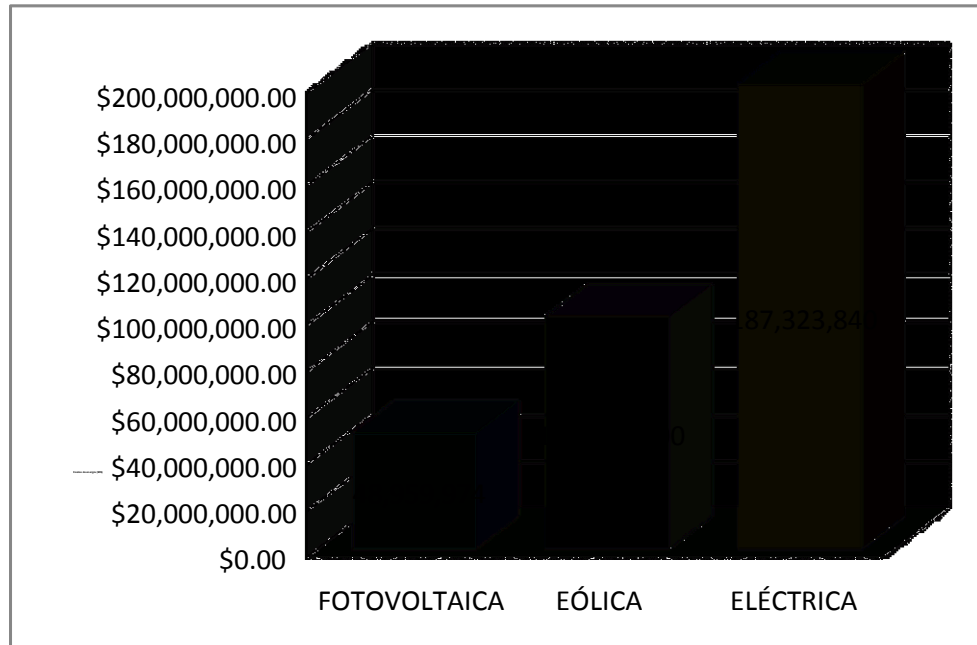
En la tabla 5.2 se muestra la estimación de costos que se refiere específicamente a la demanda de capacidad energética que requiere la planta desaladora, ya que los estudios hechos al respecto permiten hacer un cálculo aproximado de inversión para obtener resultados reales siempre dirigidos al factible suministro de energía como solución opcional.

Costos Estimados de Suministro de Energía	
Costo de Energía Eléctrica Anual	\$187,323,840
Costo de Panel Fotovoltaico	\$48,959,974
Costo de Aerogeneradores	\$109,600,000

Tabla 5.2.- Datos de consumo energético de planta desaladora.

Tomando como valor de consumo de energía para desalar agua de 0.88 Kwh/m³ en un sistema donde se aprovecha al máximo y especificando el menor consumo de energía, con la ubicación geográfica de la región y asignando una salinidad de 33600 – 35000, se determinaron los anteriores resultados para supuesta planta desaladora (tabla 5.2).

En la gráfica 5.1 posteriormente se realiza la comparación de los costos de suministro de energía que se necesitarían para realizar dicha desalación en nuestra planta. Al respecto cabe mencionar que es relevante especificar que existe una variedad de estimación de costos ya que hay distintos tipos de diseños que en algunos casos el costo es más alto dependiendo de las membranas de osmosis, el diseño del proceso, pre tratamiento al que es sometido el agua de mar o salobre y otra variables que intervienen en el mismo.



Grafica 5.1.- Costos estimados de suministro de energía.

Con respecto al sistema de instalación de paneles fotovoltaicos se elabora un diseño de instalación determinando específicamente un área disponible para la óptima instalación de los módulos fotovoltaicos adaptando un diseño que permita orientar y aprovechar de la mejor manera el recurso, en este caso tome el diseño de velas como óptima solución.

Por lo tanto, una vela instalada en un determinado perímetro puede estar compuesta por un número específico de paneles fotovoltaicos, mi opción fue de 10 por cada vela por ejemplo que equivale a una instalación con una corriente de 3500 watts, tomadas del panel fotovoltaico siguiente: Modulo solar Kyocera Kd 185g h – 2 pU, 185w € 710. Equivalente a un valor aproximado de \$10,650, y de inversores que elevan la potencia de cada panel a 3.5kw, de inversores fotovoltaicos a 235.70 €/u. De acuerdo a las anteriores especificaciones y considerando el valor del € a 16 \$.

Es relevante mencionar que este tipo de proyectos requieren de logística de equipos donde intervienen variables como el transporte de equipos, el peso, tiempo de entrega, almacenamiento, distribución etc., tomando en cuenta lo necesario para la factible realización de la implementación correcta, que por supuesto requiere de una contemplación de estudio profundo de los detalles e inconvenientes opcionales, por lo cual podemos deducir una inversión donde se puede estimar el coste total del proyecto.

Con respecto a la energía si sumamos todas las funciones y operaciones antes mencionadas se elevaran los costos notablemente, y aun así, en comparación con el consumo que normalmente se hace y el pago a la Comisión Federal de Electricidad por ejemplo es directamente notable lo que hace de esto un proyecto rentable. Para los paneles fotovoltaicos la logística no es complicada, los considero

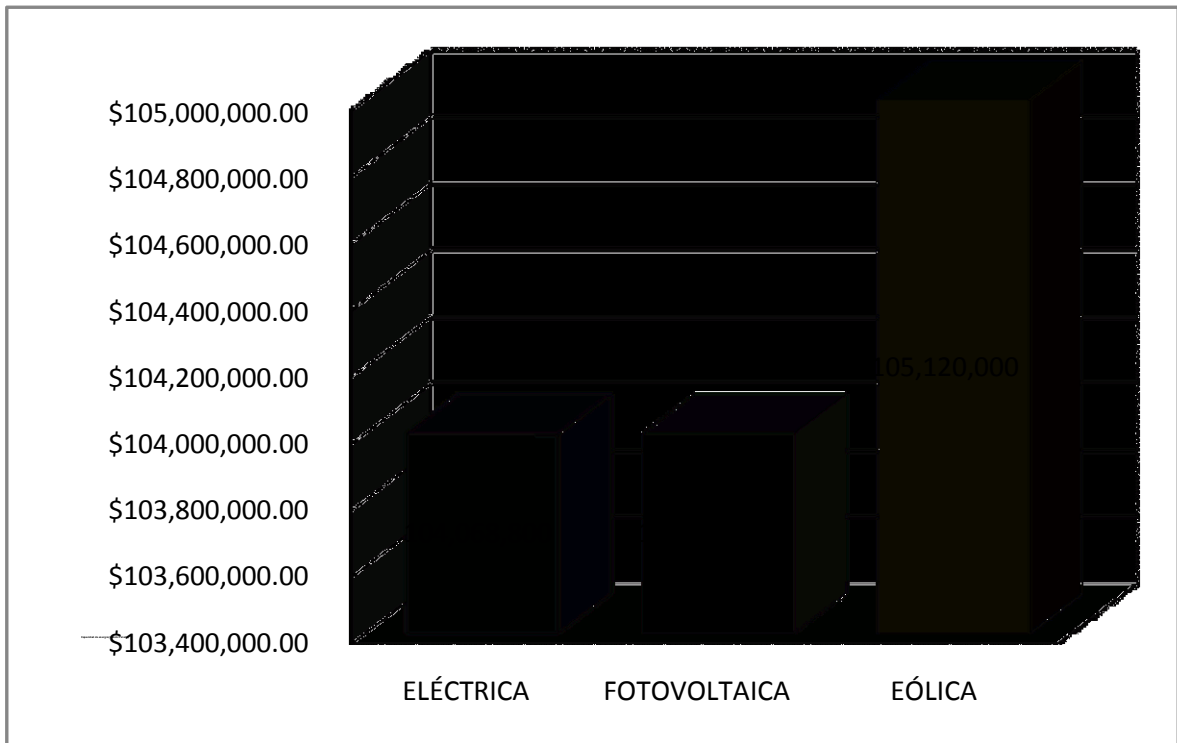
muy prácticos inclusive en su almacenamiento tienen bastantes características que los hacen una de las mejores opciones con respecto a su performance y aplicaciones de calidad, además de poco mantenimiento.

Los Aerogeneradores son equipos más comerciables puesto que ya existen proyectos en México reconocidos y realizados, por ejemplo los parques eólicos que actualmente funcionan y empresas que permiten hacer una cotización exacta de inversión. Los precios tomados son de la empresa Remanufactured Wind Turbines, Repowering. De donde obtuve el precio de Aerogenerador y que proporciona el equipo en México. En este tipo de equipos de implementación de energía suministro si interviene todos los elementos de inversión como lo son torre, mantenimiento, logística, etc., la empresa se encarga de todo, pero cabe mencionar que el precio del aerogenerador es muy específico lo demás puede ser opcional se realizaría con respecto a lo demás una cotización opcional y practica dependiendo del proyecto por ejemplo la ruta de traslado, mantenimiento etc. Haciendo una comparación de consumo energético anual, se puede obtener una estimación de capacidades aproximadas que se muestran en la tabla 5.3, de paneles, aerogeneradores y energía eléctrica.

Costo Anual de Energía	
Costo de Energía Eléctrica	104,068,800 Kwh/m3 al año
Costo de Energía Fotovoltaica	104,090,730 Kwh/m3 al año
Costo de Energía Eólica	105,120,000Kwh/m3 al año

Tabla 5.3.- Capacidad de paneles, aerogeneradores y energía eléctrica.

En la gráfica 5.2 se muestran los costos y la capacidad de energía del sistema propuesto.



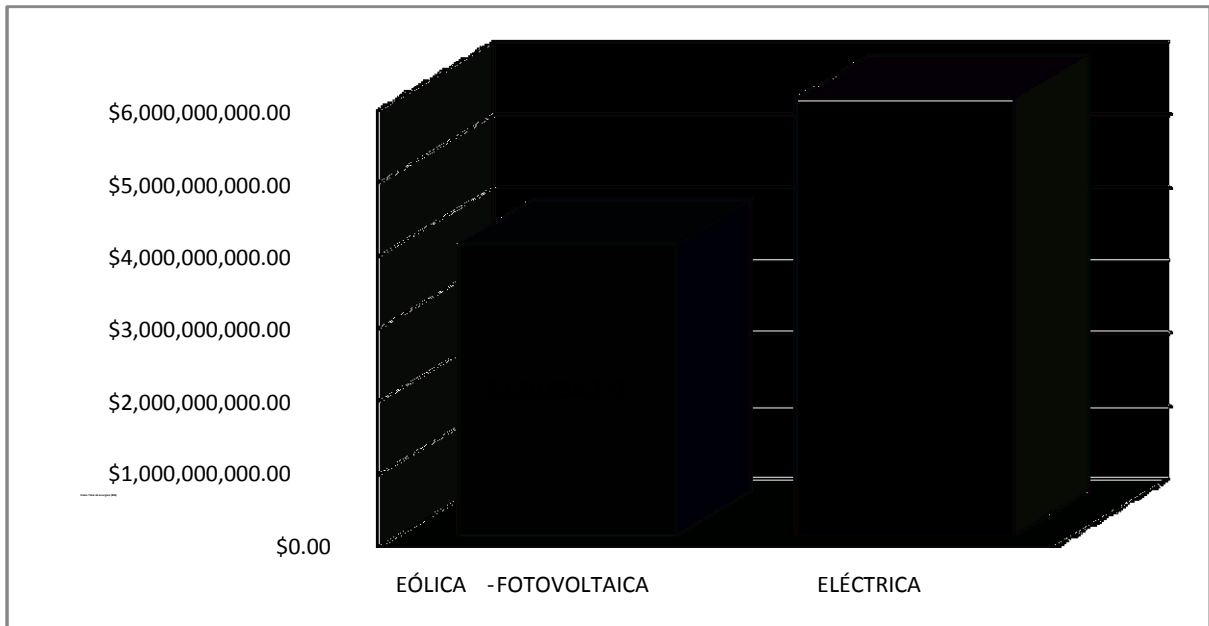
Grafica 5.2.- Costos anual de energía Eléctrica, Fotovoltaica y Eólica.

En la tabla 5.4, se puede distinguir el coste de consumo energético proveniente de energía verde, es evidente que reduce el costo inclusive si se intenta contratar y hacer pagos a una planta eólica o fotovoltaica, razón por la cual se propone esta alternativa.

Costo Estimado de Energía para 30 años	
Energía suministro	Costo por 30 años
Energía Eléctrica	5,609,625,200/24hrs
Energía Fotovoltaica	858,738,272 / 12hrs
Energía Eólica	2,712,096,000 /12hrs
Energía Eólica-Fotovoltaica	3,570,834,272 /24hrs

Tabla 5.4.- Costo Estimado de Energía para 30 años.

En la gráfica 5.3 se pueden observar los costos de los sistemas de energía que se están analizando con respecto a la tabla 5.4.



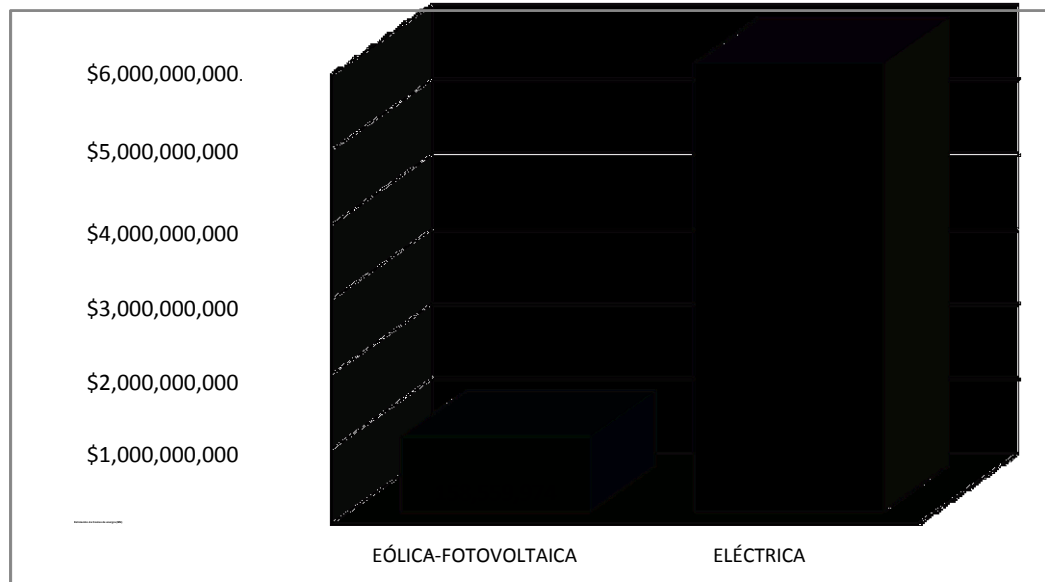
Grafica 5.3.- Costos estimado de energía para 30 años.

En la tabla 5.5, mostramos el costo de la planta desaladora planteada suministrando el mínimo de energía.

Costos de Planta Desaladora (O I - 0.88 kwh/m3)			
	Costo anual Eléctrico	Costo de Equipo	Costo por 30 años
Planta desaladora	\$220,624,560		\$5,619,625,200
Planta desaladora Fotovoltaica		\$48,959,974	\$48,959,974
Planta desaladora Eolica		\$109,600,000	\$109,600,000
Planta desaladora Eolica-Fotovoltaica			\$158,559,974

Tabla 5.5.- Costo de Planta desaladora suministrando el mínimo de energía ideal (O I – 0.88 kwh/m3).

En la gráfica 5.4 se realiza la estimación de costos de energía para cada sistema de la planta desaladora.



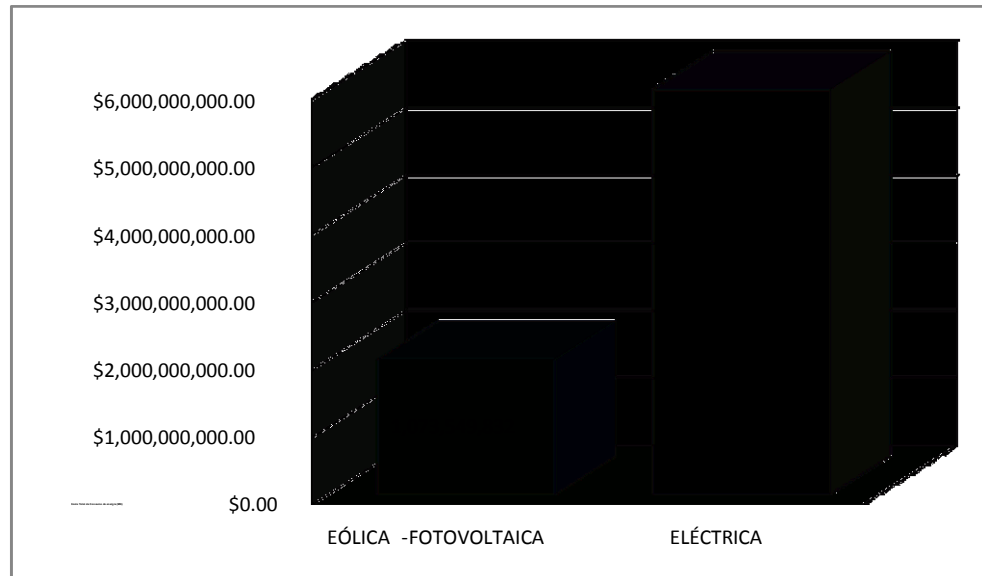
Grafica 5.4.- Costo de planta desaladora

La tecnología actual sólo permite desalar a un coste energético al menos cinco veces mayor al mínimo para cada concentración (existen rozamientos, fricciones, flujos de calor que no son convertibles totalmente en trabajo, etc), con lo que el desarrollo futuro al menos es esperanzador, ya que realmente el coste mínimo hace que el coste energético asociado a la desalación sea menor que el coste de amortización o de mantenimiento de una instalación desaladora. En la tabla 5.6 se hace un análisis de consumo de energía eólica-fotovoltaica de la planta desaladora suministrando otro valor de energía.

Costo del Consumo de Energía Eólica-Fotovoltaica (0 l – 6 kwh/m3)			
Desalación de Agua de mar de 33600ppm a 35000ppm			
Capacidad	81,000 kwh/m3	Capacidad	81,000 kwh/m3
Kwh/m3 al año	21,286,800,000	Kwh/m3 al año	21,286,800,000
Kwh/m3 por 30 años	638,604,000,000.	Kwh/m3 por 30 años	638,604,000,000.
No de paneles necesarios	23143 de 3.5 kw	No de aerogeneradores necesarios	54 Aerogeneradores de 1500 kw
Potencia que producen	81000.5 kwh/m3	Potencia que producen	81,000 Kwh/m3
Costo de Paneles	246,,472,950 \$	Costo de Aerogeneradores	739,800,000
Costo de inversores	87,256,882. \$	Costo Total	739,800,000
Costo total	333,749,832. \$		
Energía	Coste total por 30 años RECUP INV DESDE 6 AÑOS		
Eléctrica	5,619,625,200 \$		
Eólica/Fotovoltaica	1,073,549,832 \$		

Tabla 5.6.- Costo del Consumo de Energía Eólica -Fotovoltaica para un sistema de suministro energético de (0 l - 6 kwh/m3).

En la gráfica 5.5 se muestra el costo del consumo de energía eólica-fotovoltaica para un mínimo de trabajo de desalación.



Gráfica 5.5.- Costo del consumo de energía eólica-fotovoltaica para un sistema de desalación con un mínimo de energía de (O I - 6 kWh/m³).

El consumo eléctrico específico de una instalación de ósmosis inversa es el menor de los estudiados hasta ahora (6-8 kWh/m³), pero se puede aprovechar la energía contenida en la salmuera rechazada a alta presión para rebajar esa cifra hasta por debajo de 3 kW·h/m³. Ello supone un costo económico menor de 25 ptas/m³, considerando un coste de la electricidad de 8 ptas/kWh.

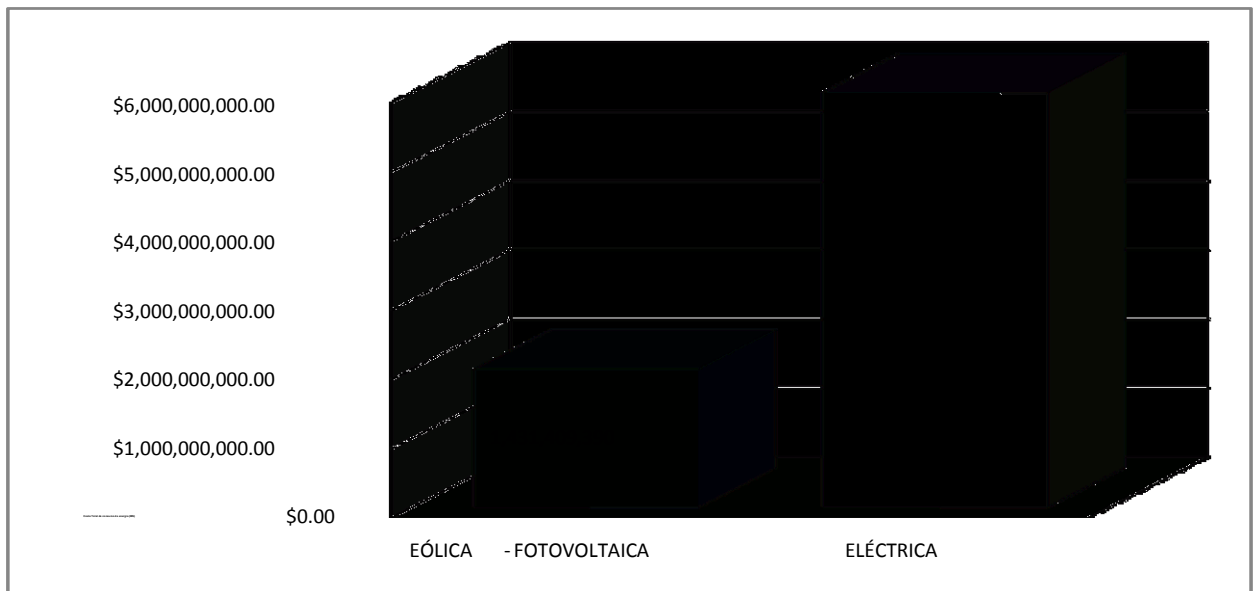
Tomando los datos anteriores calculamos la inversión de costos siguiente tabla 5.7 de Consumo de energía. Al ser un proceso de filtración, el coste energético depende de la concentración del agua bruta. Permite una adaptabilidad mayor que otras plantas a una ampliación de su capacidad si la demanda es creciente en la zona.

Los costos de inversión de una instalación de OI están por debajo de otras tecnologías de destilación.

Costo Total de Consumo de Energías Alternativas (OI – 8 kwh/m3)			
Desalación de Agua de mar de 33600ppm a 35000ppm			
Capacidad	108,000 kwh/m3	Capacidad	108,000 kwh/m3
Kwh/m3 al año	28,832,400,000	Kwh/m3 al año	28,832,400,000
Kwh/m3 por 30 años	851,472,000,000	Kwh/m3 por 30 años	851,472,000,000
No de paneles necesarios	30,858 paneles de 3.5 kw	No de aerogeneradores necesarios	72 Aerogeneradores de 1500 kw
Potencia que producen	108,003 kw	Potencia que producen	108,000 kwh/m3
Costo de Paneles	328,637,700 \$	Costo de Aerogeneradores	986,400,000 \$
Costo de inversores	116,371,690 \$	Costo Total	986,400,000 \$
Costo total	445,009,390 \$		
Energía	Costo total por 30 años	RECUP INV 8 AÑOS	
Eléctrica	5,619,625,200 \$		
Eólica/Fotovoltaica	1,431,409,390 \$		

Tabla 5.7.- Costo Total de Consumo de Energías Alternativas (OI – 8kwh/m3).

En la gráfica 5.6 se observa un ejemplo de los costos totales de energía que se están suministrando a la planta en una cantidad más elevada y también conveniente.



Grafica 5.6.- Costo Total de Consumo de Energías Alternativas (OI – 8kwh/m3).

Es una estimación aproximada de costos de inversión que en comparación con el costo de energía eléctrica es considerable y la diferencia resulta bastante aceptable, ya que los aerogeneradores pueden adquirirse en México de manera accesible y

estos equipos incluyen logística, mantenimiento, instalación, etc., además de especificar variación de costos dependiendo de la distancia.

Se definen el consumo físico ideal y el consumo mínimo industrial y se comparan con los consumos registrados en funcionamiento real en plantas desaladoras de agua de mar instaladas. Finalmente se examinan los márgenes para reducir los consumos energéticos en este proceso y las tendencias actuales en materia de eficiencia energética en el sector. Con una presión de trabajo de 70 atm y un índice de conversión del 45%, el consumo físico ideal alcanza 1,97 kWh/m³.

En un contexto de la mejor tecnología actualmente disponible, con ensamblaje y operación ideales, el consumo mínimo industrial aplicando el proceso de O I. Los consumos óptimos calculados para plantas con se encuentran por arriba de lo que actualmente se aplica en operación reales de hasta 2,9 a 3,1 kWh/m³.

Del análisis realizado se concluye que los márgenes disponibles para disminuir los consumos energéticos son ya bastante reducidos, dado que las principales plantas superan los consumos óptimos calculados en la fase de ósmosis en un margen que varía entre un 9% y un 14%. A corto plazo se contempla la posibilidad de innovaciones energéticas, junto con una pequeña reducción de la presión de trabajo, y ciertos perfeccionamientos en la arquitectura de las plantas desaladoras.

CONCLUSIONES.

Con respecto a las investigaciones y antecedentes de las energías renovables y su factible aplicación suministrada a los procesos de desalación, se puede determinar que las crisis que preocupan a la humanidad en la actualidad requieren de nuevos proyectos de innovación y de ser necesario de reingeniería que optimicen los sistemas y su funcionamiento suministrando energía renovable con bases sustentables.

En los múltiples procesos de desalación, los que se utilizan con mayor relevancia resultan ser implementados dependiendo de las necesidades requeridas, los resultados de los procesos aplicables, han en momentos críticos de escasez de agua solucionado de manera eficaz los problemas hídricos presentando agua con características y niveles de aceptación para la vida humana. Se dice que los procesos de desalación requieren de grandes cantidades de energía y una excelente Gestión de Calidad, sin embargo cada día los avances y progresos tecnológicos nos permiten utilizar procesos con materiales menos costosos y contaminantes, el cual es otro factor que necesariamente requiere de estrategias aplicadas a la evaluación del proyecto.

La implementación de energías renovables a sistemas de procesos de desalación son eficientes y sustentables. Los equipos utilizados son provenientes de productos de empresas de calidad, que se distinguen inclusive por que pueden dar forma a la estructura de los diseños permitiendo adaptarlos al proceso o sistema que se desee suministrar de estas energías inagotables libres de emisiones de bióxido de carbono, y que deben aprovecharse al máximo y ser tomados en cuenta por muchas buenas razones como opción a la crisis de energía proveniente de fuentes de energía primaria como lo son no renovables o convencionales (petróleo, gas natural, carbón, energía nuclear) que cada día se agotan más y que son elevadamente costosas además de incrementar sus precios constantemente.

Se determinaron sistemas de retroalimentación eólica y fotovoltaica por considerarse de óptimo funcionamiento para producir potencias necesarias para la desalación de agua de mar al menor costo, así mismo, por ser de mínimo mantenimiento donde se pretende una mejora continua aplicada a todo el sistema que este en operación, el que nuestro país sea productivo y competitivo, es uno de sus principales objetivos que se deben efectuar, ya que su desarrollo depende mucho de las recientes innovaciones tecnológicas que puedan intervenir en su infraestructura en general.

En el presente proyecto de investigación se propuso desarrollar una planta para desalar agua de mar aprovechando esa gran fuente de energía inagotable que son las energías renovables localizadas en este caso en la región del Istmo de Tehuantepec. Se hicieron investigaciones de sistemas de desalación utilizando la energía eléctrica convencional generada tradicionalmente y la generada con los respectivos sistemas diseñados, los cuales utilizan tanto la energía Eólica como la Fotovoltaica, y nos dimos cuenta que utilizando estas últimas, se aprovechaban al

máximo para este tipo de proyecto de desalación. Además de que se realizó un análisis de costos y rentabilidad para obtener una estimación del costo de inversión.

La desalación de agua de mar utilizando tecnología de Ósmosis Inversa con respecto a la producción por metro cubico es bastante aceptable. Y debido a que en la zona sureste de la República Mexicana existen problemas de escasez de agua, la desalación por este tipo de tecnología constituye una alternativa para abastecer de agua potable a esa zona. El costo del metro cúbico desalado de la planta desaladora por Ósmosis Inversa utilizando Energía Eólica y Fotovoltaica resultó bastante bajo en comparación con los publicados hasta la fecha, por lo que ésta podría ser un nuevo diseño que produzca agua potable a un menor costo por metro cúbico desalado. Si en la zona donde hay agua de mar en el Istmo de Tehuantepec se utilizaran las energías renovables y se instalaran estas plantas desaladoras, se podría abastecer a un alto porcentaje de la población de dicha zona, a bajo costo y con bajo consumo de energía.

Un aspecto muy importante y sobresaliente en nuestra investigación, es la utilización e innovación de equipos de energía renovable en las Costas Mexicanas, donde éstas pueden ser competitivas con las tradicionales. Para ello hay que especificar la disponibilidad de esas energías para su mejor aprovechamiento. La desalación añade diversidad y, por lo tanto, asegura un sistema de abastecimiento de agua, ya que es fundamentalmente diferente a las fuentes convencionales de agua, y las puede complementar.

Las nuevas mejoras en la tecnología de los procesos de desalación continuarán y la reducción de costos conducirá aún más el crecimiento de la desalación como solución para el abastecimiento de agua.

Para continuar con esta investigación y ampliar la información, se requiere de ensayos y trabajo de campo, con el objeto de obtener datos más precisos de cómo están constituidas la regiones y los recursos para desalar el agua de mar y en base a ello hacer nuevamente las comparaciones entre estos sistemas y observar cual es el más conveniente para tener un diseño más exacto y confiable.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Al-Gobaisi, D. M. K. (1997). *Sustainable augmentation of fresh water resources through appropriate energy and desalination technologies*. IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. Madrid, España.
2. Andrews, T., Shumway, S. A. (1999). *Design Study of a 20,000 m³/day Seawater Reverse Ósmosis Work Exchanger Energy Recovery System*. IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. San Diego, USA.
3. Bullock, D.C., Andrews, W.T. (1991). *Deep Sea Reverse Ósmosis: The Final Quantum Jum*. Caribbean Water & Waste Water Association. www.desalco.bm
4. Buros, O. K., (2000) *The ABCs of Desalting* Published by International Desalination Association. Second Edition. Mássachusetts USA. www.ida.bm
5. De la Cruz C. (2006) *La desalinización de agua de mar mediante el empleo de energías renovables*. Documento de trabajo 88/2006. España
6. Fuentes Diaz M. (2002) *Desalación del agua, una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la Republica Mexicana*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002.
7. Herbert, L., (2001). *Proyecto de conservación de material cerámico subacuático colección "the well"*. Correo del restaurador nueva época. Numero 5 / material cerámico. www.inah.mx.
8. Huang Francis F. (1994). *Ingeniería Termodinámica. Fundamentos y Aplicaciones*. Editorial CECSA. Segunda Edición.
9. Inalsa (1996). Insular de aguas de Lanzarote S.A.. www.cabildo.com/inalsa. España
10. Mironova L. I., Khamizov R. Kh. (1993). Patente de la Federación Rusa No. 2.006.476
11. Siqueiros, J., Holland, F.A. (2000). *Water desalination using heat pump*. Energy 25, August, pp. 717-729.
12. Santoyo, S., Siqueiros, J., Heard, C., Santoyo, E. (1996). *Bomba de calor por absorción integrada a un sistema de purificación de efluentes*. Boletín IIE, septiembre-octubre. México
13. Shumway, S.A., (1999) *The Work Exchanger for SWRO Energy Recovery*. International Desalination & Water Reuse Quarterly. February/March. Vol 8/4
14. Solis Tellez A. (2002) *Potabilización de agua salada utilizando la energía residual de una turbina de gas*. Tesis de Maestría ESIME Instituto Politécnico Nacional. México
15. Valero, A., Uche, J., Serra, L.. (2001) *La desalación como alternativa al Plan Hidrológico Nacional*. Informe técnico realizado por el Centro de Investigaciones de Recursos y Consumos Energéticos de la Universidad de Zaragoza, España.