



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE A PARTIR DE  
AGUA DE MAR: APROVECHAMIENTO INTEGRAL DEL  
SISTEMA MEDIANTE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
A PARTIR DE MICROALGAS O DE ENERGÍA SOLAR O  
EÓLICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

**ÁNGEL ROMERO RODRÍGUEZ**



MÉXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

Jurado asignado:

Presidente	Prof. Enrique Rodolfo Bazúa Rueda
Vocal	Prof. Reynaldo Sandoval González
Secretario	Prof. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa
1er sup.	Prof. Landy Irene Ramírez Burgos
2do sup.	Prof. Marisela Bernal González

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Laboratorios 301, 302, 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental,  
Edificio E-3, Conjunto E, Facultad de Química, UNAM

Asesor del tema

María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

---

Estudiante

Ángel Romero Rodríguez

---

## Agradecimientos

Primero doy gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradezco también a mis padres, Arturo y Guadalupe, les agradezco su apoyo, su guía, su amor, cariño, comprensión y confianza en la realización de mis sueños. Soy afortunado por contar siempre con su ejemplo. Esta tesis es suya.

A mis hermanos, Arturo, Antonio, Alberto y Carmen; gracias por el apoyo que me han brindado. Se que siempre contaré con ustedes.

Agradezco a los amigos por creer en mí, por su confianza y lealtad.

Agradezco al personal y compañeros de los laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, del edificio E de la Facultad de Química, de la UNAM; por brindarme su apoyo y amistad durante la realización de esta tesis.

A todos los miembros de mi jurado por sus comentarios y observaciones.

A la Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa, por haber aceptado la asesoría de mi tesis, por su colaboración, paciencia, apoyo y ayuda cuando más lo necesitaba. Con admiración y respeto le doy mi más grande y profundo agradecimiento.

## Índice

	Pág.
Índice de figuras y tablas	11
Glosario de términos	17
Resumen / Abstract	21
1. Problemática	23
1.1. Introducción	24
1.1.1. Agua	24
1.1.2. Energía	26
1.1.3. Agua y energía	28
1.2. Demanda y consumo de agua	30
1.2.1. Agua renovable	35
1.2.2. Clasificación de los usos del agua	36
1.3. Historia de la desalinización	43
1.4. Objetivos	53
1.5. Metas	53
2. Revisión bibliográfica	55
2.1. Proceso de desalinización	55
2.2. Procesos tradicionales	56
2.2.1. Proceso multietapas instantáneo tipo "Flash"	56
2.2.2. Proceso de destilación multiefecto	62
2.2.3. Proceso de vapor-compresión	67
2.2.4. Ósmosis inversa	69
2.2.5. Electrodialisis	71
2.3. Sistemas de energía renovable	73
2.3.1. Recolectores solares	73
2.3.2. Estanques solares y sus aplicaciones	74
2.3.3. Procesos fotovoltaicos	78

	Pág.
2.3.4. Tipos de tecnología de celdas fotovoltaicas	80
2.3.5. Paneles fotovoltaicos	81
2.3.6. Aplicaciones de celdas fotovoltaicas	82
2.3.7. Configuración del sistema de celdas fotovoltaicas	83
2.4. Energía eólica	84
2.4.1. Breve introducción histórica a la energía eólica	85
2.4.2. Turbinas de viento	86
2.4.3. Economía	88
2.4.4. Sistema tecnológico de las turbinas de viento	89
2.5. Energía geotérmica	90
2.6. Biocombustibles	91
2.6.1. La biomasa como materia prima múltiple para la bio-refinería	94
2.6.2. Concepto del sistema de bio-refinería	96
2.6.3. Biocombustibles de la primera generación	98
2.6.4. Procesos de conversión para los combustibles de la primera generación	99
2.6.4.1. Transesterificación	99
2.6.4.2. Proceso de conversión del etanol	100
2.6.4.3. Proceso de fermentación	101
2.6.5. Digestión o degradación anaerobia de la biomasa	103
2.6.6. Bio-refinería para toda clase de cultivos	105
2.6.7. Oleoquímicos	106
2.6.8. Pasta desengrasada	107

	Pág.
2.7. Biocombustibles de segunda generación	108
2.7.1. Procesos de conversión para los biocombustibles de segunda generación	109
2.7.2. Conversión física	110
2.7.3. Conversión termoquímica	111
2.8. Hidrotratamiento de aceites vegetales / diesel verde	116
2.9. Biopetróleo	118
2.9.1. Biopetróleo FT o combustible "verde" para motor a partir de biomasa	119
2.9.2. Bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica	119
2.10. Conversión química	122
2.11. Tipos de bio-refinería	124
2.11.1. Bio-refinería verde	124
2.11.2. Bio-refinería basada en materiales forestales y lignocelulósicos	125
2.12. Fuente de energía acuática o bio-refinería a base de algas	126
3. Metodologías propuestas	130
3.1. Recursos energéticos	131
3.1.1. Energía solar	133
3.1.2. Energía eólica	136
3.2. Enfoque de diseño	138
3.2.1. Diseño de la unidad de desalinización-fuente de energía renovable	138
3.3. Sistema de desalinización de agua de mar por destilación multiefecto en combinación con un sistema mecánico de compresión de vapor	139

	Pág.
3.3.1. Ciclo termodinámico y análisis energético del sistema de compresión mecánica de vapor (CMV)	141
3.3.2. Integración del sistema de destilación multiefecto (MED) como fase previa al sistema de compresión mecánica de vapor (CMV)	143
3.3.3. Suministro de energía mediante energías renovables	145
3.3.3.1. Abastecimiento de energía térmica con recolectores solares	145
3.3.3.2. Abastecimiento eléctrico con energía eólica	148
3.4. Sistema de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa alimentado por energía eólica sin el uso de baterías	149
3.4.1. Sistema con respaldo en el suministro de energía (diesel / red eléctrica local)	149
3.4.2. Sistema sin respaldo en el suministro de energía	150
3.4.2.1. Condiciones de operación casi constantes	150
3.4.2.1.1. Dispositivos de almacenamiento	150
3.4.2.1.2. Unidad de conmutación para la planta de ósmosis inversa	151



	Pág.
3.4.2.1.3. Reducción de potencia de la turbina de tiempo	152
3.4.2.2. Condiciones de operación variables	153
3.4.3. Diseño y operación del sistema	153
3.4.3.1. Modelo de simulación Matlab-Simulink	155
3.4.3.2. Sitio de recolección de datos	156
3.4.3.3. Motores, inversores y controlador	156
3.4.3.4. Generador fotoeléctrico	158
3.4.3.5. Calidad del agua de alimentación	159
3.4.3.6. Pre calentamiento del agua de alimentación	160
3.5. Desalinización de agua de mar mediante electrodiálisis propulsada por energía eólica	161
3.5.1. Descripción de la planta	162
3.5.1.1. Descripción del equipo	164
3.5.1.1.1. Dosis química	164
3.5.1.1.2. Sistema hidráulico	164
3.5.1.1.3. Bomba de alimentación y concentrados	165
3.5.1.1.4. Sistema eléctrico	165
3.5.1.1.5. Sistema de control general	165
3.6. Producción de biodiesel a partir de algas marinas	167
3.6.1. Situación actual del biodiesel	167
3.6.2. Fuentes de materia prima	170
3.6.2.1. Las microalgas como materia prima alterna	172

	Pág.
3.6.3. Características relevantes de los cultivos microalgales para la producción de biodiesel	174
3.6.4. Potencial de producción de biodiesel microalgal	176
3.6.5. Contenido lipídico de las microalgas	178
3.6.6. Síntesis de lípidos	181
3.6.7. Condiciones ambientales que afectan la acumulación de lípidos	182
3.6.8. Producción de microalgas	184
3.6.8.1. Sistemas abiertos	185
3.6.8.2. Sistemas cerrados	187
4. Resultados y discusión	192
4.1. Sistema de desalinización de agua de mar por destilación multiefecto en combinación con un sistema mecánico de compresión de vapor	192
4.1.1. Costos e ingresos de las instalaciones	192
4.1.2. Costos de capital	192
4.1.2.1. Planta de destilación multiefecto + planta de compresión mecánica de vapor	192
4.1.2.2. Parque eólico	193
4.1.2.3. Parque solar	194
4.1.2.4. Costos de operación	195
4.1.2.4.1. Costos de personal	195
4.1.2.4.2. Costos de mantenimiento	196
4.1.2.4.3. Costos de consumibles	197
4.1.2.4.4. Costos de energía	197

	Pág.
4.1.3. Ingresos de la venta de sal y energía	198
4.2. Sistema de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa alimentado por energía eólica sin el uso de baterías	201
4.3. Sistema de desalinización de agua de mar por electrodiálisis	202
4.4. Producción de biodiesel a partir de microalgas marinas	203
4.4.1. Producción por hectárea / año (acre/año)	203
5. Análisis final	204
5.1. Proceso de selección	204
5.1.1. Energía solar	207
5.1.2. Energía eólica	208
5.1.3. Conexión entre la planta de desalinización y el sistema de energía renovable	208
5.2. Producción de biodiesel a partir de microalgas	215
5.2.1. Viabilidad económica del biodiesel de microalgas	217
5.3. Recomendaciones finales	221
5.4. Diagrama del proceso propuesto	223
6. Conclusiones y recomendaciones	225
6.1. Conclusiones	225
6.2. Recomendaciones	226
Bibliografía	227

## Índice de figuras y tablas

	Pág.
Figura 1.1. Regiones hidrológicas definidas en México (37) en 13 regiones hidrológico-administrativas (CONAGUA, 2010)	33
Figura 1.2. Regiones hidrológico-administrativas definidas en México (13) (CONAGUA, 2010)	34
Figura 1.3. Regiones de aguas subterráneas definidas en México (653 acuíferos) (CONAGUA, 2010)	35
Figura 1.4. Evolución del volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente, 2001-2008 (miles de millones de metros cúbicos) (CONAGUA, 2010)	38
Figura 1.5. Intensidad de los usos consuntivos del agua por municipio, 2008 (CONAGUA, 2010)	39
Figura 1.6. Volúmenes concesionados para usos consuntivos por Región Hidrológico-Administrativa, 2008 (millones de metros cúbicos) (CONAGUA, 2010)	40
Figura 1.7. Volúmenes concesionados para usos consuntivos por entidad federativa, 2008 (millones de metros cúbicos, $\text{hm}^3$ ) (CONAGUA, 2010)	42
Figura 1.8. Método descrito por Aristóteles en el siglo IV a.C., para evaporar agua impura, condensándola para obtener agua potable.	44

	Pág.
Figura 1.9. Laboratorio de destilación medieval para la producción de extractos herbales, vino y aceites perfumados	45
Figura 1.10. Alambique de Cleopatra	46
Figura 1.11. La primera planta destiladora del mudo, en Las Salinas, Chile	48
Figura 1.12. Estación de la Oficina de Desalación de Agua (OSW, por sus siglas en inglés), en Daytona Beach, Florida (Fotografía de Delyannis)	50
Figura 1.13. Planta solar destiladora de Coober-Pedy, Australia (Foto de Delyannis)	51
Figura 1.14. Planta de destilación solar en la isla de Symi, Grecia	53
Tabla 1.1. Agua renovable per cápita de México, por región hidrológico-administrativa (CONAGUA, 2010)	37
Tabla 1.2. Usos consuntivos, según origen del tipo de fuente de extracción, 2008 (miles de millones de metros cúbicos, km <sup>3</sup> )	38
Tabla 1.3. Volúmenes concesionados para usos consuntivos por Región Hidrológico-Administrativa, 2008 (millones de metros cúbicos) (CONAGUA, 2010)	40
Tabla 1.4. Volúmenes concesionados por usos consuntivos, por Entidad Federativa, 2008 (millones de metros cúbicos) (CONAGUA, 2010)	41

	Pág.
Figura 2.1.	Diagrama esquemático básico del proceso de destilación multietapas instantáneo (Flash) 58
Figura 2.2.	Planta multietapas instantáneo (Flash) 58
Figura 2.3.	Principio de operación de un sistema de destilación multiefecto 63
Figura 2.4.	Planta de destilación multiefecto de tubos largos verticales 64
Figura 2.5.	Sistema de destilación de multiefecto apilado 65
Figura 2.6.	Principio de operación de un sistema vapor-compresión 68
Figura 2.7.	Principio de operación de un sistema de ósmosis inversa 70
Figura 2.8.	Principio de operación de la electrodiálisis. 71
Figura 2.9.	Sección vertical a través de un estanque solar con gradiente salino 75
Figura 2.10.	Fotografía de un sistema de celdas fotovoltaicas de aplicación autónoma 83
Figura 2.11.	Foto de un parque eólico en La Ventosa, Oaxaca (Fotografía de A. Romero) 87
Figura 2.12.	Ciclo del carbono y uso de la biomasa 93
Figura 2.13.	Biomasa como materia renovable de alimentación para las bio-refinerías 95
Figura 2.14.	Digestión o degradación anaerobia 105
Figura 2.15.	Clasificación de las algas 127
Tabla 2.1.	Procesos de desalinización 56
Tabla 2.2.	Recolectores solares disponibles en el mercado 74

	Pág.
Figura 3.1. Radiación solar anual en México de acuerdo con su latitud	135
Figura 3.2. Radiación solar directa para todas las regiones de México	135
Figura 3.3. Mapa de la potencia del viento, anual para Oaxaca	137
Figura 3.4. Diagrama de flujos	140
Figura 3.5. Diseño de la instalación solar	147
Figura 3.6. Ventana de operación de las membranas de ósmosis inversa	152
Figura 3.7. Configuración del sistema	154
Figura 3.8. Diagrama de flujo de la planta de electrodiálisis	162
Figura 3.9. Reacción general de transesterificación, $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ y $R'$ son radicales alquilo. Los catalizadores pueden ser álcalis, ácidos o enzimas (lipasas)	169
Figura 3.10. Esquema conceptual del proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas	184
Figura 3.11. Estanque tipo circuito	185
Figura 3.12. Estanque tipo circuito de carreras en Nature Technologies Ltd (Eliat, Israel), una subsidiaria de Nikken Sohonsa Co.	186
Figura 3.13. Fotobiorreactor más grande del mundo en Klötze, cerca de Wolfsburg, Alemania	188
Tabla 3.1. Radiación solar y velocidad del viento en México	132

	Pág.	
Tabla 3.2.	Consumo de combustibles	133
Tabla 3.3.	Potencial eléctrico del viento en Oaxaca	136
Tabla 3.4.	Comportamiento del sistema MED+CMV para diferentes caudales a la entrada del sistema MED	144
Tabla 3.5.	Datos solares para la región de Murcia (España)	146
Tabla 3.6.	Datos de energía de los colectores solares, CST	147
Tabla 3.7.	Especificaciones de la planta de electrodiálisis	166
Tabla 3.8.	Clasificación de las principales divisiones de las microalgas	173
Tabla 3.9.	Comparación de distintas fuentes de materia prima para la producción de biodiesel en México	176
Tabla 3.10.	Contenido lipídico de algunas microalgas en condiciones autotróficas	179
Tabla 4.1.	Costos e inversión para la planta de destilación multiefecto + la planta de compresión mecánica de vapor	194
Tabla 4.2.	Costos e inversión para el parque eólico	195
Tabla 4.3.	Costos e inversión para el parque solar	196
Tabla 4.4.	Costos globales para la instalación de la planta desalinizadora	198
Tabla 4.5.	Costo total del agua (k€)	200
Tabla 4.6.	Costo total del agua considerando un subsidio del 35% (k€)	201



	Pág.	
Figura 5.1.	Sistema solar fotovoltaico de la planta fotovoltaica-ósmosis inversa en Lampedusa, Italia	212
Figura 5.2.	Unidad de ósmosis inversa que produce 130 L/h en Lavrio, Grecia	213
Figura 5.3.	Sistema de banco de baterías de la planta en Lampedusa, Italia	213
Figura 5.4.	Parque eólico y los domos de desalinización en la isla Gran Canaria	214
Figura 5.5.	Planta de compresión de vapor, plato de intercambio de calor en la isla Gran Canaria	214
Figura 5.6.	Arreglo de 4kWp, 900 W W/T en Lavrio, Grecia	214
Figura 5.7.	Biomasa de microalgas recuperada por filtración del caldo de cultivo, que se mueve a lo largo de una cinta transportadora en Cyanotech Corporation	217
Figura 5.8.	Fotobiorreactor tubular de Algatechnology	220
Figura 5.9.	Esquema de las plantas de producción de biodiesel a partir de microalgas y desalinización de agua de mar	223
Figura 5.10.	Diagrama del proceso de producción de desalinización de agua y producción de biodiesel, propuesto en tierras marginales	224
Tabla 5.1.	Consumo de energía de los sistemas de desalinización	210

	Pág.
Tabla 5.2. Comparación de las plantas desalinizadoras	211
Tabla 5.3. Aplicaciones de desalinización	212
Tabla 5.4. Comparación de algunas fuentes de biodiesel	215
Tabla 5.5. Contenido de aceite de algunas microalgas	216

## Glosario de términos

a	Amortización financiera (Ec. 4.2)
AGME	Ácidos grasos metil-ésteres
ATP	Adenosín-trifosfato
AVBV	Alto valor y bajo volumen
B	Bono (Ec. 4.1)
BVAV	Bajo valor y alto volumen
CA	Corriente eléctrica alterna
CD	Corriente eléctrica directa
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CMNUCC	Convenio Marco de las naciones Unidas sobre el Cambio Climático (del inglés <i>UNFCCC</i> , siglas de <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> )
CMV	Compresión mecánica de vapor
Co-A	Coenzima A
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Comisión Nacional de Población
CRES	Centro de Energías Renovables y el Ahorro (siglas de <i>Center for Renewable Energy Sources and Saving</i> )

CREST	Centro para Sistemas de Tecnología de Energía Renovable (siglas de <i>Centre for Renewable Energy Systems Technology</i> )
CSIRO	Organización de Investigación de la Comunidad Británica Científico Industrial (CSIRO, siglas de <i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization</i> )
CST	Colector solar térmico
CV	Compresión de vapor
DGS	Destilado de granos secos
DLR	Centro Aeroespacial Alemán (siglas de <i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i> )
DME	Destilación multi-efecto
DMI	Destilación multi-efecto instantánea
DOE	Departamento de Energía de los Estados Unidos (siglas de <i>Department of Energy</i> )
DR	Decreto Real
DS	Destilación solar
E	Potencia eléctrica (Tabla 3.5)
E, E <sub>0</sub> , E <sub>1</sub>	Potencia eléctrica
EMTB	Éter metilterbutílico
EP	Pago adicional (Ec. 4.1)
EPA	Agencia de Protección Ambiental (del inglés <i>Environmental Protection Agency</i> )
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación ( <i>FAO</i> , siglas de <i>Food and Agriculture Organization</i> )
FC	Costo financiero (Ec. 4.3)
GEI	Gases de efecto invernadero
H <sub>β</sub>	Energía por metro cuadrado (Tabla 3.5)

I	Capital de inversión (Ec. 4.2)
I	Irradiación media (Tabla 3.5)
i	Tasa de interés (Ec. 4.2)
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas (México)
ITC	Instituto Tecnológico de Canarias
$k_1 k_2$	Constantes de claridad del cielo
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts ( <b>MIT</b> , siglas de <i>Massachusetts Institute of Technology</i> )
NREL	Laboratorio Nacional de Energía Renovable (siglas de <i>National Renewable Energy Laboratory</i> )
OC	Costo de operación (Ec. 4.3)
OI	Ósmosis Inversa
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
OSW	Oficina de Desalación de Agua ( <b>OSW</b> , siglas de <i>Office of Saline Water</i> )
P	Pago en €/kW (Ec.4.1)
PAR	Radiación fotosintéticamente activa (siglas de <i>Photosynthetically Active Radiation</i> )
PLC	Controlador lógico programable (siglas de <i>Programmable Logic Controller</i> )
$P_m$	Precio en el mercado (Ec. 4.1)
PSA	
SOL14	Planta Desalinizadora en Almería, España
Qxt	Producción anual de agua (Ec. 4.3)
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
SDT	Sólidos disueltos totales
SPPM	Seguimiento del punto de potencia máxima
syngas	Gas sintético ( <b>Syngas</b> , abreviatura de <i>Synthetic Gas</i> )

t	Número de años de vida útil de la inversión (20 años) (Ec. 4.2)
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF, siglas de <i>United Nations International Children's Emergency Fund</i> )
USD	Dólares Americanos (siglas de <i>United States Dollars</i> )
USNRDC	Comisión de Investigación de la Defensa Nacional de los Estado Unidos ( <i>USNRDC</i> , siglas de <i>United States National Research Defence Committee</i> )
VCA	Volts de corriente alterna
VFD	Controladores de frecuencia variable (siglas de <i>Variable Frequency Drivers</i> )
YMCA	Asociación Cristiana de Jóvenes (YMCA, siglas de <i>Young Men's Christian Association</i> )
ZBC	Zona de baja convección (Fig. 2.9)
ZCS	Zona convectiva superior (Fig. 2.9)
ZNC	Zona no convectiva (Fig. 2.9)

## Resumen

Los efectos ambientales son uno de los principales problemas de las instalaciones de desalación de agua de modo masivo. Para alcanzar el objetivo ideal de evitar la descarga de salmuera de rechazo en la desalación de agua de mar, la sal debe ser completamente separada del agua, obteniéndola como un producto secundario de valor económico. Además, si no se desean aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub>, la energía necesaria debe extraerse de una combinación de fuentes de energías renovables. El uso continuo de combustibles de origen del petróleo es ahora ampliamente reconocido como insostenible debido al agotamiento de los yacimientos y a la contribución de estos combustibles con gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> principalmente). Los combustibles renovables para transporte, conocidos también como de carbón neutro, son necesarios para la sostenibilidad ambiental y económica. Por desgracia, el biodiesel a partir de cultivos oleaginosos, aceite usado y grasas animales no satisface ni una fracción pequeña de la demanda existente de combustibles de transporte. Las microalgas parecen ser la única fuente de biodiesel renovable que es capaz de satisfacer la demanda mundial de combustibles para el transporte. La productividad de biodiesel de las microalgas supera con creces la productividad de los mejores cultivos oleaginosos, además de poseer la característica de retener (secuestrar) el CO<sub>2</sub> de la atmosfera o atmósfera. En esta investigación se presenta la desalinización de agua de mar con la producción de biodiesel a partir de microalgas, consistente en tres subsistemas secuenciales: una planta productora de biodiesel a partir de microalgas, una planta de destilación multiefecto y un ciclo de evaporación por compresión mecánica de vapor. La energía para su funcionamiento se obtiene por medio de aerogeneradores (turbinas eólicas) y de un campo de recolectores solares,

así como la opción de conectar una planta generadora de electricidad utilizando biodiesel como combustible.

Palabras clave: Producción de agua potable, agua de mar, biodiesel, microalgas, energía solar, energía eólica

### **ABSTRACT**

*Environmental effects are one of the main concerns of massive desalination facilities. To reach the objective of no brine discharge the salt from seawater must be completely separated and obtained as a secondary and valuable product. If no CO<sub>2</sub> emission increase is desired, the power source must be a combination of renewable energy systems. Continued use of petroleum sourced fuels is now widely recognized as unsustainable because of depleting supplies and the contribution of these fuels to accumulation of CO<sub>2</sub> in the environment (greenhouse effect gas). Renewable, neutral carbon, and transport fuels are necessary for environmental and economic sustainability. Unfortunately, biodiesel from oil crops, used oil, and animal fat cannot realistically satisfy even a small fraction of the existing demand for transport fuels. Microalgae appear to be the only feasible source of renewable biodiesel that is capable of meeting the global demand for transport fuels. Oil productivity of microalgae greatly exceeds the oil productivity of the best producing oil crops. Besides, the microalgae have the ability to sequester atmospheric CO<sub>2</sub>. This research presents an integrated desalination of seawater plant with a biodiesel source from an algae plant. The system consists of three sequential systems: A biodiesel plant from algae, a multi-effect distillation plant, and a mechanical vapor compression system based on evaporation equipment. The energy is obtained by several wind turbines and a thermal solar collectors system, as well as an option to connect an electricity production plant using biodiesel as fuel.*

*Key Words: Drinking water production, sea water, biodiesel, microalgae, solar energy, eolic energy*

# CAPÍTULO I

## 1. Problemática

Uno de los temas de mayor preocupación en estos días en México es el agua potable. En el caso de la ciudad de México, debido a la escasez de agua y al hundimiento provocado por la sobre-explotación de los mantos acuíferos, el gobierno federal en el año 2006 declaró al agua como “recurso estratégico para la seguridad nacional”.

Existen aproximadamente 11 millones de mexicanos sin agua potable. Además, solamente un 30% del agua bebible es tratada. La Comisión Nacional del Agua ha estimado una inversión de alrededor de 30 billones de pesos anualmente, durante los próximos 25 años para satisfacer las necesidades de agua y drenaje de la población (McClelland, 2005).

Por otra parte se tiene que, para poder obtener agua potable en gran cantidad y que no dependa de la temporada de lluvias, que recientemente se ha visto deteriorada por los efectos del calentamiento global, existe la desalinización del agua de mar (Al-Karaghoulí et al., 2009; Assimacopoulos, 2001; Bayoud-Rújula y Khalidou-Dia, 2010; BenJemaa et al., 1999; Bouchekima, 2003; Harrison et al., 1996; Houcine et al., 1999; Kalogirou, 2005; Lamei et al., 2008; Loera-Quezada y Olguín, 2010; Martin-Lagardette, 2001; Papapetrou et al., 2005; Scrivani, 2005).

En este último caso, se tiene la siguiente complicación: cualquier proceso de desalinización requiere de gran consumo energético, el cual es suministrado por medio de combustibles fósiles (Kalogirou, 2005 ), lo cual incrementa el calentamiento global debido a la emisión de gases



invernadero y, de acuerdo con el protocolo de Kioto en el cual se establece que los países incluidos en él, se comprometen a cumplir con los compromisos cuantificados de limitación y reducción de sus emisiones antropogénicas agregadas, expresadas como dióxido de carbono equivalente, de los gases que causan un efecto invernadero (ONU, 1998), esto implica que es necesario proponer un proceso de desalinización que utilice recursos de energías renovables o limpias, abatiendo así los índices de contaminación y los costos de operación.

## 1.1. Introducción

### 1.1.1. Agua

El agua es esencial para la vida. La importancia del abastecimiento del agua potable difícilmente puede exagerarse. El agua es uno de los recursos más abundantes en la Tierra, cubriendo tres cuartas partes de la superficie del planeta. Alrededor del 97% del agua en el planeta es agua salada en los océanos y 3% (alrededor de 36 millones km<sup>3</sup>) es agua dulce, contenida en los polos (en forma de hielo), agua subterránea (mantos acuíferos), lagos y ríos, la cual satisface la mayoría de las necesidades humanas y animales. Casi 70% de este pequeño 3% del agua dulce del mundo está congelada en los glaciares, cubiertos por nieves permanentes, hielo y pergelisuelo. El 30% de toda el agua dulce se encuentra bajo tierra, mucha de ella a gran profundidad, en acuíferos difíciles de alcanzar. Lagos y ríos en conjunto representan apenas un 0.25% de toda el agua dulce; los lagos contienen la mayor parte de ésta (Kalogirou, 2005).

La historia de la civilización humana se encuentra entrelazada con la historia de las diferentes formas en las que se han aprendido a manipular

los recursos hídricos. Las primeras comunidades agrícolas surgieron donde las cosechas podían ser cultivadas mediante lluvias confiables y ríos perenes.

Cinco mil años atrás, los asentamientos en el valle del Indo fueron contruidos con un sistema de tuberías para el suministro de agua y diques para aguas residuales. Atenas y Pompeya, como la mayoría de las ciudades greco-romanas de su tiempo, poseían un sofisticado sistema de suministro de agua y drenaje.

Durante la revolución industrial y explosión demográfica de los siglos XIX y XX, la demanda por el agua se incrementó dramáticamente. La construcción sin precedentes de decenas de miles de impresionantes proyectos ingenieriles, diseñados para el control de las inundaciones, para proteger el suministro de agua limpia, para proveer agua de riego y para generación de energía, como las plantas hidroeléctricas, han traído grandes beneficios a cientos de millones de personas. Grandes ciudades, incapaces de sobrevivir con sus propios recursos, han florecido en el desierto con agua traída desde cientos e incluso desde miles de kilómetros de distancia. Casi una quinta parte de la electricidad generada en el mundo es producida por turbinas que son propulsadas por la potencia del agua al caer (Water Industry, 2010).

El abastecimiento de agua dulce en diferentes partes del mundo se ha convertido en una cuestión cada vez más importante. En las zonas áridas el agua potable es muy escasa y los asentamientos humanos en estas áreas dependen fuertemente del agua que pueda estar disponible (Kalogirou, 2005).

El problema ha ido aún más lejos, pues la contaminación con desechos industriales y la descarga de aguas residuales han deteriorado lagos y ríos. A escala global el hombre es el principal causante de la escasez de agua dulce. Este problema del agua no se ha limitado sólo a la escasez, ahora se ha extendido a la calidad del agua y su conversión a usos de no consumo por razones específicas (Raluy et al., 2005).

Es necesario demostrar que los recursos hídricos no deben ser fuente de conflicto, sino un elemento catalizador para la cooperación (INEGI, 2009).

El agua dulce es un recurso esencial limitado y, por ende, escaso, cuya producción no natural, está relacionada estrechamente con la energía, la cual es también un recurso limitado. Está muy claro que ambos recursos deben ser considerados y tratados en una forma integrada para producir agua dulce de una manera más sustentable (Raluy et al., 2005).

Muchos de los países reunidos en Evian en la XXIX Conferencia del Grupo denominado G8 marcaron al año 2015 como fecha límite para conseguir acceso universal a agua en mejores condiciones en todo el mundo (G8, 2003). Incluso si se lograra este difícil objetivo, se calcula que aún quedarían alrededor de 500 millones de personas sin acceso al agua potable y más de mil millones carecerían de un adecuado sistema de saneamiento (Wikipedia, 2010).

### 1.1.2. Energía

Es muy interesante recorrer los caminos de la historia y encontrar que las aplicaciones más modernas han sido, al menos teóricamente, expresadas por los científicos pioneros más brillantes y/o filósofos, quienes analizaron

los fenómenos físicos, pero no poseían la tecnología para desarrollar las aplicaciones prácticas (Delyannis, 2003).

La Revolución Industrial del siglo XVIII, iniciada en Inglaterra, incorporó al proceso productivo la máquina de vapor y la energía del carbón, cuya extracción se aumentó en forma ininterrumpida durante el siglo XIX y aún sigue. Los primeros textos acerca de un probable agotamiento de los recursos de carbón, del físico Rudolf Clausius y del economista Stanley Jevons, aparecieron en la segunda mitad del siglo XIX y a comienzos del siguiente. En 1908, el científico Frederick Soddy presentó una idea que tuvo una enorme difusión, la de la disponibilidad ilimitada de energía barata como elemento clave para el desarrollo de las fuerzas productivas.

En la segunda mitad del siglo XX, por una parte se estableció una relación entre producto bruto y consumo de energía, que parecía confirmar las ideas acerca del papel de la energía en el desarrollo económico. Pero también varios economistas y especialistas en recursos dieron la voz de alarma en cuanto al posible agotamiento de los recursos naturales. El filósofo Herbert Marcuse planteó la problemática de las fuerzas productivas, acerca de la promoción de las necesidades ficticias, dentro de las cuales cabe considerar el ya mencionado auge del automóvil, que consume varias veces los recursos energéticos y de otros tipos, diferentes al transporte público por pasajero transportado-km.

A partir de la elevación de precios del petróleo en 1973, la perspectiva del agotamiento de este recurso pareció real; el derroche de energía y de otros recursos había sido favorecido por la abundante disponibilidad de petróleo barato. A partir de entonces, se desarrolló una batalla política e ideológica en el sentido de que el posible agotamiento de los recursos de

petróleo y gas y los efectos ambientales adversos, como el llamado efecto invernadero.

Se desarrolló la idea de que no hay una solución única al problema de las necesidades energéticas y que su aumento desmedido no necesariamente constituye una medida del bienestar, siendo el problema central el de la protección del ambiente y no la de la carencia de recursos energéticos. Incluso en algunos países desarrollados se señala que es posible disminuir el consumo energético sin afectar o incluso mejorando la calidad de vida.

Esta problemática ha escapado entonces al universo de los especialistas. Se ha percibido que no puede limitarse a los aspectos técnico-económicos, sino que también debe incluir a los ambientales e incluso a la filosofía política, en cuanto a que la visión de una sociedad deseable incluye necesariamente la de sus relaciones con la naturaleza. La discusión del problema energético y sus posibles soluciones interesan, por lo tanto, a las más amplias capas sociales y a todos aquellos preocupados por el futuro de la humanidad (Schoijet, 2002).

### 1.1.3. Agua y energía

Agua y energía son dos elementos inseparables que gobiernan y promueven la civilización en nuestras vidas. Revisando la historia de la humanidad, se encuentra que el agua y las civilizaciones también fueron dos entidades inseparables. No es una coincidencia que todas las grandes civilizaciones se desarrollaron y florecieron cerca de grandes cuerpos de agua. Ríos, mares, oasis y océanos han atraído a la humanidad a sus costas, porque el agua es un recurso necesario para la vida. Abundan los ejemplos que ilustran la importancia del agua para la sustentabilidad de la

vida y el desarrollo de la civilización. Pero el ejemplo más importante de dicha influencia y nacimiento de la civilización es Egipto. El río Nilo provee irrigación y suelos fértiles, los cuales jamás se habían agotado, pues cada año el río proveía una gran cantidad de lodos que fertilizaban los suelos. Los ingenieros egipcios fueron capaces de dominar las aguas del río y Egipto, como una nación agrícola, se convirtió en el principal país exportador de trigo en toda la cuenca del Mediterráneo. Debido a la riqueza del río, astronomía y matemáticas, autoridad y disciplina, leyes y justicia, moneda y policía fueron creados cuando ninguna otra sociedad había desarrollado estos conocimientos. Por otro lado, la energía es tan importante como el agua, para el desarrollo de un buen nivel de vida, pues es la fuerza que pone en funcionamiento todas las actividades humanas. El agua por sí sola es una fuerza generadora de energía. Los primeros intentos confirmados de controlar la energía proveniente del agua, fue hace más de 2 mil años. La energía producida fue utilizada primordialmente para la molienda de granos (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

Los griegos fueron los primeros en expresar ideas filosóficas acerca de la naturaleza del agua y la energía. Tales de Mileto (640-546 A.C.), uno de los siete sabios de la antigüedad, escribió acerca del agua señalando que es fértil y moldeable (puede tomar la forma del recipiente). Él también dijo que el agua es el inmenso mar que cubre la Tierra, que es la madre de toda la vida. Más tarde Empédocles (495-435 A.C.) desarrolló la teoría de los elementos, describiendo que el mundo consiste de cuatro elementos primarios: fuego, aire, agua y tierra. Con el conocimiento actual, estos elementos pueden llamarse como: energía, atmósfera, agua y suelo, los cuales son los cuatro componentes básicos que afectan nuestra calidad de vida. Aristóteles (348-322 A.C.), quien es uno de los grandes filósofos y

científicos de la antigüedad, describió sorprendentemente y de forma correcta el origen y las propiedades de los recursos naturales salobres y el agua de mar. Él describió el ciclo del agua en la naturaleza:

“Ahora el sol en movimiento, como siempre lo hace, establece un proceso de cambio y se transforma en decadencia y por su influencia la más fina y dulce agua es llevada cada día disuelta en vapor, elevándose a las regiones más altas, donde se condensa nuevamente por el frío y es así que regresa a la tierra. Esto es como se ha dicho anteriormente el ciclo natural del agua.” (Belessiotis y Delyannis, 2000; Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

Aún hoy día no hay una mejor explicación para el ciclo natural del agua. En realidad, el ciclo del agua es un enorme destilador solar en un ciclo operacional perpetuo. Para el agua de mar Aristóteles escribió:

“El agua salada cuando se transforma en vapor se vuelve dulce y el vapor no se transforma en agua salada, cuando éste se condensa nuevamente. Esto se conoce por experiencia.” (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

## 1.2. Demanda y consumo de agua

Kofi Annan, Secretario General de las Naciones Unidas señaló: “El acceso al agua potable es una necesidad humana fundamental y, por tanto, un derecho humano básico. El agua contaminada pone en peligro la salud física y social de todas las personas. Es una afrenta a la dignidad humana.” (World Health Organization, 2003).

EL hombre ha sido dependiente de ríos, lagos y mantos freáticos, reservas de agua dulce requeridas en la vida doméstica, agricultura e industria. Sin embargo, el rápido crecimiento industrial y la explosión demográfica en

todo el mundo han dado lugar a una escalada importante en la demanda de agua dulce, tanto para las necesidades en el hogar y los cultivos como para producir cantidades adecuadas de alimentos. Aunado a esto, el problema de contaminación de ríos y lagos por desechos industriales y grandes descargas de aguas residuales a escala mundial, provocado por el hombre, está dañando las fuentes naturales de agua y se está convirtiendo en una de las mayores causas de escasez de agua dulce. Además de esto, se tiene el problema de la distribución desigual. Por ejemplo, Canadá posee una décima parte de la superficie mundial de agua dulce, pero menos del 1% de su población (Kalogirou, 2005).

El agua se ha convertido en un recurso estratégico para el desarrollo económico y la supervivencia de los países, debido a la escasez para consumo humano y a la pérdida de la calidad original. En 2009, según la FAO, la UNICEF y el Programa Conjunto de Seguimiento (“Monitoreo”) del Agua y Saneamiento, 894 millones de personas en el mundo no tienen acceso a agua segura y 2.5 millones no cuentan con saneamiento. Cada año mueren 1.5 millones de niños por malas condiciones de drenaje y saneamiento. Hoy en día muchos países enfrentan problemas de escasez de agua. En algunas zonas, la disponibilidad de agua dulce de buena calidad se ha reducido significativamente debido a la contaminación producida por los desechos generados por la población, la industria y la agricultura (Kalogirou, 2005; Wikipedia, 2010). Desde 1900, la mitad de los humedales en el mundo, principal fuente de agua dulce renovable, se han perdido y el cambio climático tendrá un impacto directo en el suministro de agua dulce en muchas regiones del mundo (INEGI, 2009).

La satisfacción de las necesidades de agua en todos los países en un contexto de escasez es una causa de conflictos transfronterizos. Sin



embargo, la historia ha demostrado que la cooperación ha sido la mejor respuesta frente a esta situación. Durante los últimos 60 años se han concertado más de 300 acuerdos internacionales relacionados con el agua y se han dado 37 conflictos. México es uno de los países que ha firmado acuerdos para compartir aguas fronterizas, pues comparte tres cuencas con los Estados Unidos de América, cuatro con Guatemala y una con Belice. En 1994 firmó un tratado con los Estados Unidos para compartir las aguas de los ríos Bravo, Colorado y Tijuana. En el caso del río Colorado, el tratado especifica que Estados Unidos debe entregar anualmente a México 1,850.2 millones de metros cúbicos de agua (INEGI, 2009).

Cabe mencionar que México llegó a tener una gran deuda de agua con Estados Unidos de acuerdo con el Tratado de Agua de 1944, la cual fue cubierta en 2001. Dicha deuda ascendía aproximadamente a 884 millones de metros cúbicos de agua, la cual se debió a la prolongada sequía que azotó varios años de la década de los 90 del siglo XX a la región norte del país (Roman, 2005; Tompson, 2005).

Anualmente, México recibe alrededor de 1,488 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación, 72% se evapotranspira por medio de los seres vivos y se evapora directamente y regresa a la atmósfera, 25.4% escurre por los ríos y arroyos y 2.1% se infiltra al subsuelo y recarga los mantos acuíferos. En 2007, el país tenía una disponibilidad natural media de 458 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable, también denominada disponibilidad natural media. Con la finalidad de organizar la administración y preservar las aguas nacionales, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) ha organizado las 37 regiones hidrológicas definidas en el país, en 13 regiones hidrológico-administrativas, ver Figura 1.1 (INEGI, 2009).

La región Frontera Sur (XI) tiene la mayor disponibilidad natural media de agua de todas las regiones hidrológico-administrativas, debido a que presenta los valores más altos de escurrimiento y recarga media total. En 2007 registró una disponibilidad media total de poco más de 157 millones de metros cúbicos de agua y un escurrimiento cercano a 140 mil millones de metros cúbicos anualmente (Figura 1.2). En esta región se han construido las dos obras de ingeniería hidráulica más importantes del país:

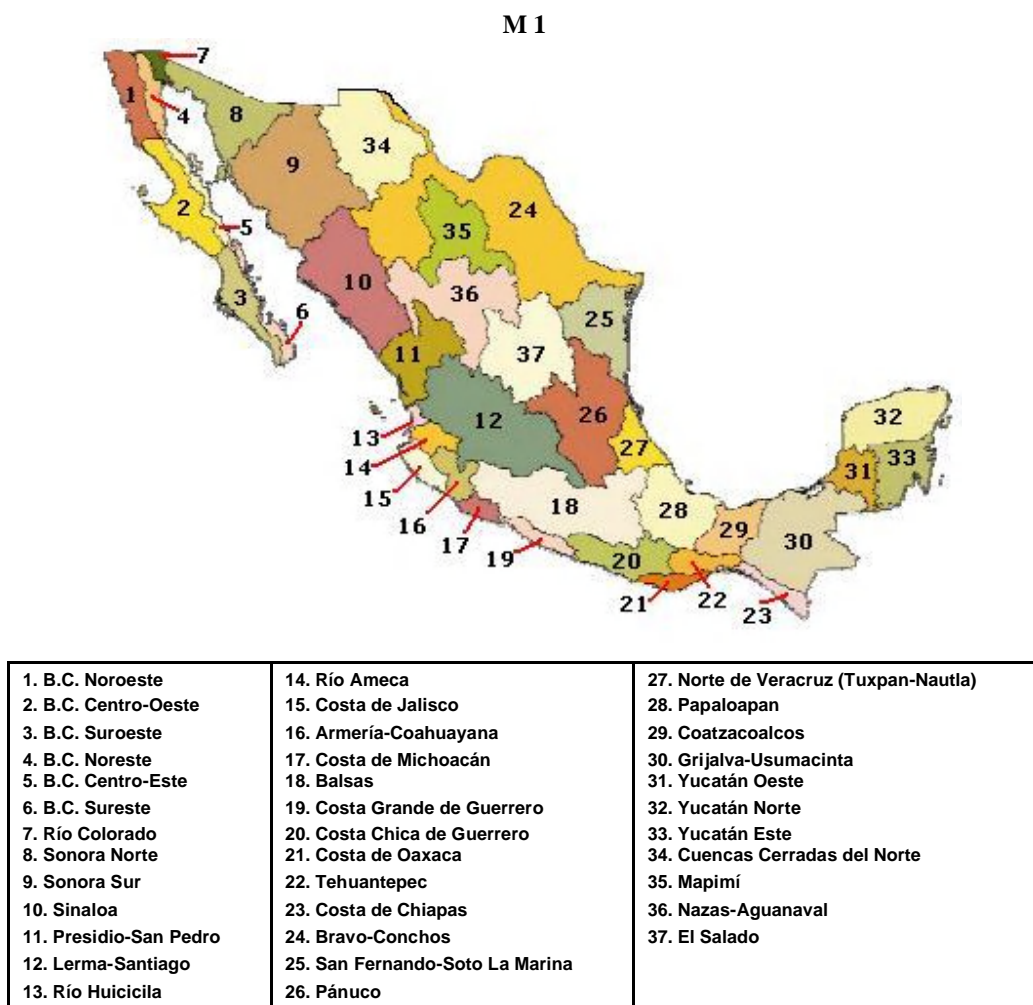


Figura 1.1. Regiones hidrológicas definidas en México (37) en 13 regiones hidrológico-administrativas (CONAGUA, 2010)

La Angostura y Malpaso, con una capacidad de almacenamiento de casi 20 mil millones de metros cúbicos de agua, entre ambas (INEGI, 2009).

M 2



FUENTE: CONAGUA. Subdirección General de Programación. Elaborado a partir del Reglamento Interior de la CONAGUA y con base en el Acuerdo de Circunscripción Territorial de los Organismos de Cuenca de la Comisión Nacional del Agua publicado en el DOF el 12 de diciembre de 2007. [97]

Figura 1.2. Regiones hidrológico-administrativas definidas en México (13)  
(CONAGUA, 2010)

En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos, conforme a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de diciembre de 2001, cuyos límites se presentan en el mapa M1.1.4.3 (Figura 1.3), de acuerdo con las coordenadas de las poligonales

simplificadas del Diario Oficial de la Federación del 13 de agosto del 2007, 3 de enero del 2008 y 28 de agosto del 2009.

M 3



Figura 1.3. Regiones de aguas subterráneas definidas en México (653 acuíferos) (CONAGUA, 2010)

### 1.2.1. Agua renovable

Los recursos de agua renovable de una región o país se refieren a la cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente, es decir, la cantidad de agua que es renovada por la lluvia y por el agua proveniente de otras regiones o países (importaciones). El agua renovable se calcula como el escurrimiento natural medio superficial interno anual, más la recarga total anual de los acuíferos, más las importaciones de agua de otras regiones o países, menos las exportaciones de agua a otras regiones

o países. En el caso de México, para el escurrimiento natural medio superficial interno anual y la recarga de los acuíferos se utilizan los valores medios determinados a partir de los estudios que se hayan hecho en la región. La cantidad de agua renovable anual dividida por el número de habitantes en la región o país da como resultado el agua renovable per cápita. Se considera que un país o región vive en estado de estrés hídrico si su agua renovable es de 1,700 m<sup>3</sup>/hab/año o menos (SEMARNAT, 2010).

En la Tabla 1.1 se presentan datos para México de agua renovable.

#### 1.2.2. Clasificación de los usos del agua

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios. En el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), se tienen registrados los volúmenes concesionados (o asignados, en el caso de volúmenes destinados al uso público urbano o doméstico) a los usuarios de aguas nacionales. En dicho registro se tienen clasificados los cuatro de ellos que corresponden a usos consuntivos, es decir el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas y, por último, el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo.

En la Figura 1.4 se muestra la evolución del volumen concesionado para usos consuntivos. Como puede apreciarse, el 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos). En el periodo reportado, el agua concesionada superficial

creció 14%, en tanto que la subterránea se incrementó en 19% (SEMARNAT, 2010).

Tabla 1.1. Agua renovable per cápita de México, por región hidrológico-administrativa (CONAGUA, 2010)

No	Región Hidrológico Administrativa	Agua renovable (hm <sup>3</sup> /año)	Población a diciembre de 2008 Mill. hab	Agua renovable per cápita 2008 (m <sup>3</sup> /hab/año)	Escorrentamiento natural medio superficial total <sup>a</sup> (hm <sup>3</sup> /año)	Recarga media total de acuíferos (hm <sup>3</sup> /año)
I	Península de Baja California	4 626	3.68	1 257	3 367	1 259
II	Noroeste	8 323	2.59	3 208	5 074	3 250
III	Pacífico Norte	25 627	3.96	6 471	22 364	3 263
IV	Balsas	21 680	10.58	2 049	17 057	4 623
V	Pacífico Sur	32 794	4.12	7 955	30 800	1 994
VI	Río Bravo	11 937	10.84	1 101	6 857	5 080
VII	Cuencas Centrales del Norte	7 884	4.15	1 898	5 506	2 378
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	34 160	20.80	1 642	26 431	7 728
IX	Golfo Norte	25 543	4.96	5 155	24 227	1 316
X	Golfo Centro	95 866	9.62	9 969	91 606	4 260
XI	Frontera Sur	157 754	6.56	24 043	139 739	18 015
XII	Península de Yucatán	29 645	3.98	7 442	4 329	25 316
XIII	Aguas del Valle de México	3 514	21.26	165	1 174 <sup>b</sup>	2 340
<b>TOTAL NACIONAL</b>		<b>459 351</b>	<b>107.12</b>	<b>4 288</b>	<b>378 530</b>	<b>80 822</b>

NOTA: Las cantidades expresadas en esta tabla son de carácter indicativo y para fines de planeación; no pueden ser utilizadas por sí solas para realizar concesiones de agua o determinar la factibilidad de un proyecto.  
 Los cálculos de agua renovable se refieren a valores históricos de acuerdo con la disponibilidad de estudios hidrológicos.  
<sup>a</sup>Se conforma por el escorrentamiento natural medio superficial interno más las importaciones, menos las exportaciones procedentes de otros países.  
<sup>b</sup>Se consideran las aguas residuales de la Ciudad de México.  
 FUENTE: CONAGUA. Subdirección General de Programación. Elaborado con base en datos de: CONAGUA. Subdirección General Técnica. CONAPO. *Proyecciones de la Población de México 2005-2050*. México, 2008.

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde a las actividades agrícolas, como puede observarse en la Tabla 1.2. En este caso, se está considerando principalmente el agua empleada para riego. Cabe destacar que México es uno de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo. En lo que respecta a las centrales hidroeléctricas, que representan uso no consuntivo del recurso, se utilizaron en el país 150.7 miles de millones de metros cúbicos de agua en 2008. Debe aclararse que para este uso la misma agua se pasa a

través de una turbina y se contabiliza varias veces, en todas las presas del país (SEMARNAT, 2009).

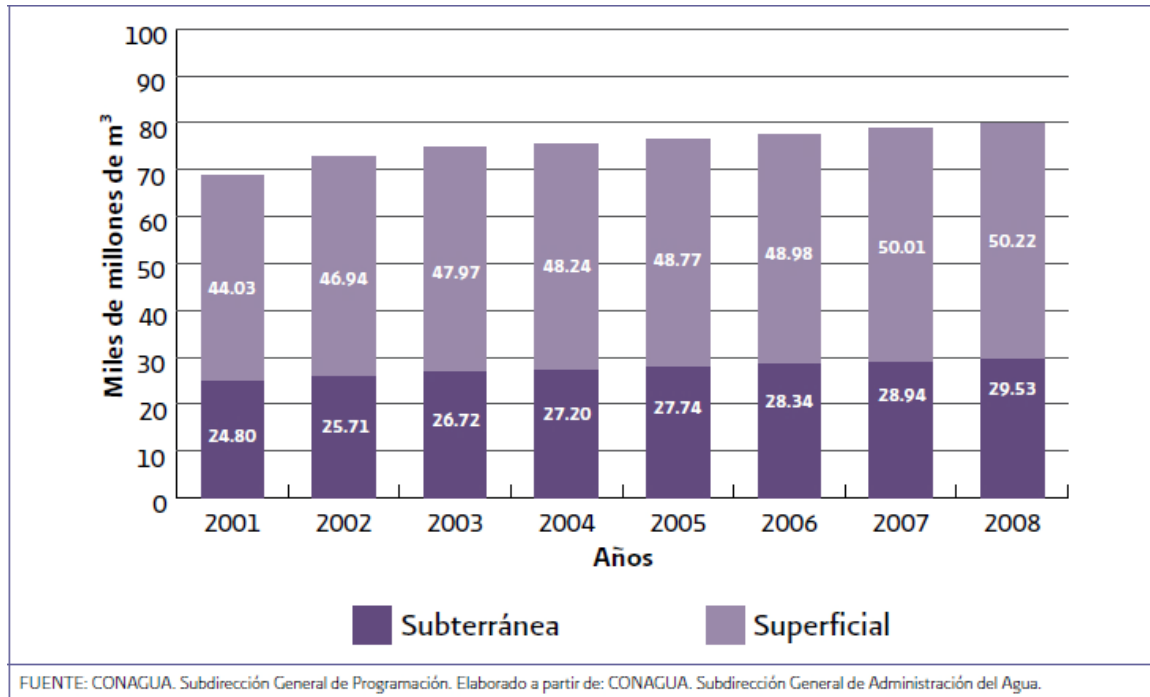


Figura 1.4. Evolución del volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente, 2001-2008 (miles de millones de metros cúbicos) (CONAGUA, 2010)

Tabla 1.2. Usos consuntivos, según origen del tipo de fuente de extracción, 2008 (miles de millones de metros cúbicos, km<sup>3</sup>) (CONAGUA, 2010)

Uso	Origen		Volumen total	Porcentaje de extracción
	Superficial	Subterráneo		
Agrícola	40.7	20.5	61.2	76.8
Abastecimiento public	4.2	7.0	11.2	14.0
Industria autoabastecida	1.6	1.6	3.3	4.1
Termoeléctricas	3.6	0.4	4.1	5.1
<b>TOTAL</b>	<b>50.2</b>	<b>29.5</b>	<b>79.8</b>	<b>100.0</b>

NOTA: 1 km<sup>3</sup> - 1,000 hm<sup>3</sup> - mil millones de m<sup>3</sup>  
 Los datos corresponden a volúmenes concesionados al 32 de diciembre de 2008.  
 a Incluye los rubros agrícola, pecuario, acuacultura, múltiples y otros de la clasificación del REPDA. Incluye asimismo 1.30 km<sup>3</sup> de agua correspondientes a distritos de riego pendientes de inscripción.  
 b Incluye los rubros públicos urbano y doméstico de la clasificación del REPDA.  
 c Incluye los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio de la clasificación REPDA.  
 Fuente: CONAGUA. Subdirección General de Administración del Agua.



En el mapa M4 (Figura 1.5) se presentan los volúmenes concesionados para usos consuntivos per cápita en el año 2008 por municipio. La gráfica G2 (Figura 1.6) y la Tabla 1.3 muestran la forma en la que se han concesionado los volúmenes de agua para usos consuntivos en el país.

Se puede observar que las Regiones Hidrológico-Administrativas que tienen concesionado un mayor volumen de agua son: VIII Lerma-Santiago-Pacífico, IV Balsas, III Pacífico Norte y VI Bravo. Cabe destacar que el uso agrícola supera el 80% de las concesiones totales en dichas regiones, a excepción de la región IV Balsas, en donde la termoeléctrica de Petacalco, ubicada cerca de la desembocadura del río Balsas, ocupa un importante volumen de agua (SEMARNAT, 2009).

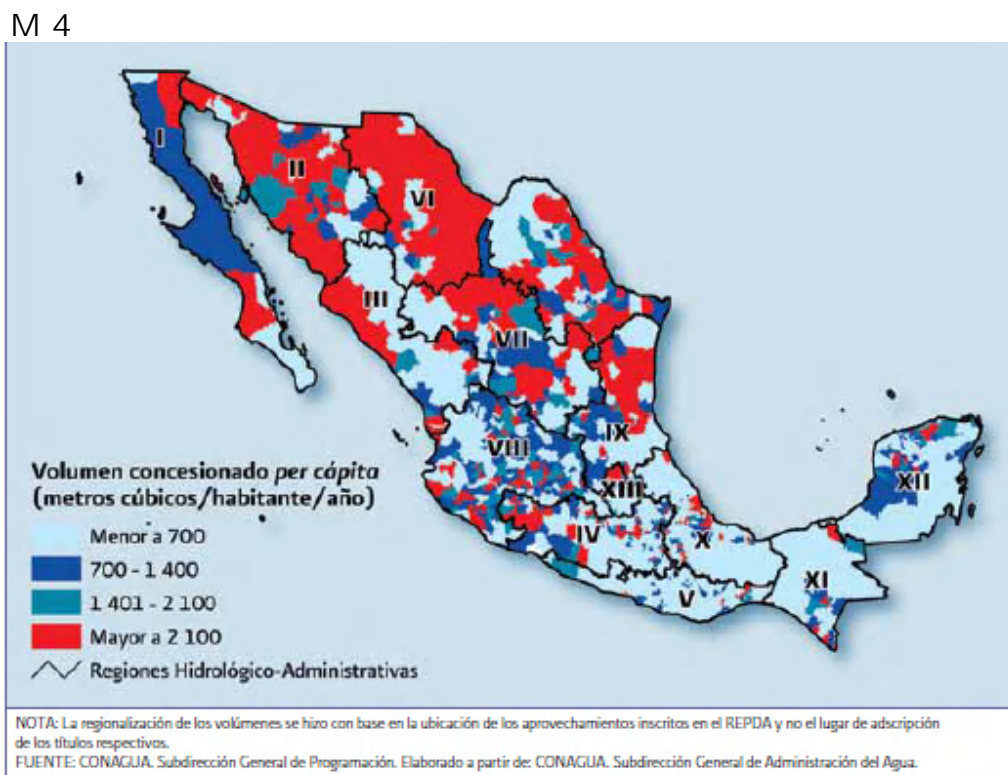
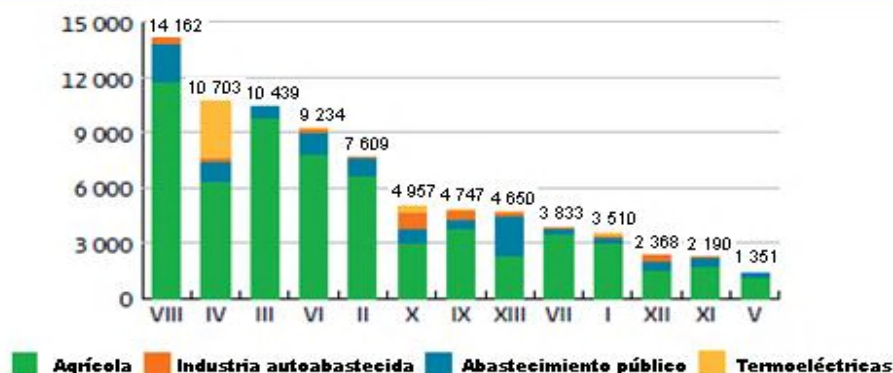


Figura 1.5. Intensidad de los usos consuntivos del agua por municipio, 2008 (CONAGUA, 2010)

La Tabla 1.4 y la gráfica (Figura 1.7) muestran la información sobre volúmenes concesionados del agua por entidad federativa, entre las que destacan Sinaloa y Sonora, donde existen grandes superficies bajo riego.





Nota: La regionalización de los volúmenes se hizo con base en la ubicación de los aprovechamientos inscritos en el REPDA y no en el lugar de adscripción de los títulos respectivos.

Fuente: CONAGUA, Subdirección General de Programación. Elaborado a partir de: CONAGUA, Subdirección General de Administración del Agua. Volúmenes inscritos en el REPDA al 31 de diciembre de 2008

Figura 1.6. Volúmenes concesionados para usos consuntivos por Región Hidrológico-Administrativa, 2008 (millones de metros cúbicos) (CONAGUA, 2010)

Tabla 1.3. Volúmenes concesionados para usos consuntivos por Región Hidrológico-Administrativa, 2008 (millones de metros cúbicos) (CONAGUA, 2010)

No	Región Hidrológico Administrativa	Volumen total concesionado	Agrícola <sup>a</sup>	Abastecimiento público <sup>b</sup>	Industria autoabastecida sin termoeléctricas	Termoeléctricas
I	Península de Baja California	3,510.3	2,892.7	327.5	91.1	199.0
II	Noroeste	7,608.8	6,526.8	983.6	91.4	7.0
III	Pacífico Norte	10,439.0	9,741.7	639.3	58.0	0.0
IV	Balsas	10,702.6	6,307.7	997.5	227.1	3,170.2
V	Pacífico Sur	1,351.5	1,000.0	333.1	18.4	0.0
VI	Río Bravo	9,234.3	7,735.1	1,182.5	205.0	111.6
VII	Cuencas Centrales del Norte	3,832.5	3,371.8	371.1	61.2	28.3
VIII	Lerma Santiago Pacífico	14,162.0	11,668.6	2,057.5	411.4	24.5
IX	Golfo Norte	4,746.8	3,688.0	526.6	466.6	65.6
X	Golfo Centro	4,956.6	2,960.0	744.0	875.7	377.0
XI	Frontera Sur	2,190.1	1,630.5	456.9	102.7	0.0
XII	Península de Yucatán	2,368.2	1,443.3	471.0	444.5	9.4
XII	Valle de México	4,649.6	2,248.7	2,106.8	211.5	82.6
<b>TOTAL NACIONAL</b>		<b>79,752.3</b>	<b>61,214.9</b>	<b>11,197.5</b>	<b>3,264.6</b>	<b>4,075.2</b>

NOTAS: Las sumas pueden no coincidir por el redondeo de las cifras.

Los volúmenes son al 31 de diciembre de 2008.

La regionalización de los volúmenes se hizo con base en la ubicación de los aprovechamientos inscritos en el REPDA y no en el lugar de adscripción de los títulos respectivos.

a Incluye los rubros agrícola pecuario, acuacultura múltiples y otros de la clasificación del REPDA.

b Incluye los rubros público, urbano y doméstico de la clasificación del REPDA.

c Incluye los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio de la clasificación del REPDA.

d Incluye el volumen total concesionado para generación de energía eléctrica sin contar hidroelectricidad.

Fuente CONAGUA. Subdirección General de Programación. Elaborado a partir de:

CONAGUA. Subdirección General de Administración del Agua. Volúmenes inscritos en el REPDA al 31 de diciembre de 2008.

Tabla 1.4. Volúmenes concesionados por usos consuntivos, por Entidad Federativa, 2008 (millones de metros cúbicos) (CONAGUA, 2010)

No	Estado	Volumen concesionado	Agrícola <sup>a</sup>	Abastecimiento público <sup>b</sup>	Industria autoabastecida sin termoeléctricas <sup>c</sup>	Termoeléctricas <sup>d</sup>
1	Aguascalientes	619.5	488.7	119.1	11.7	0.0
2	Baja California	3,109.1	2,566.3	266.0	81.6	195.2
3	Baja California Sur	401.2	326.3	61.5	9.5	3.9
4	Campeche	657.4	512.0	127.8	17.6	0.0
5	Coahuila de Zaragoza	1,959.2	1,624.6	186.5	73.2	74.9
6	Colima	1,656.2	1,565.8	62.2	24.4	3.8
7	Chiapas	1,708.6	1,402.2	271.8	34.6	0.0
8	Chihuahua	5,142.7	4,587.6	476.4	51.1	27.6
9	Distrito Federal	1,122.4	1.3	1,089.8	31.4	0.0
10	Durango	1,559.8	1,376.5	152.7	19.1	11.5
11	Guanajuato	4,133.5	3,433.0	619.7	60.3	20.5
12	Guerrero	4,272.3	847.1	288.5	14.6	3,122.1
13	Hidalgo	2,347.7	2,028.6	169.6	67.0	82.6
14	Jalisco	3,843.5	2,983.8	719.5	140.1	0.1
15	México	2,702.2	1,257.5	1,275.7	169.0	0.0
16	Michoacán de Ocampo	5,120.8	4,618.3	310.7	143.7	48.2
17	Morelos	1,239.2	921.5	260.6	57.1	0.0
18	Nayarit	1,201.8	1,048.0	105.8	48.0	0.0
19	Nuevo León	2,047.1	1,452.6	511.8	81.9	0.8
20	Oaxaca	1,103.1	866.6	201.8	34.8	0.0
21	Puebla	2,469.4	2,008.7	381.7	72.5	6.5
22	Querétaro	1,017.9	657.3	292.4	62.5	5.7
23	Quintana Roo	611.7	114.6	98.3	398.9	0.0
24	San Luis Potosí	1,337.2	1,105.4	171.2	29.6	31.0
25	Sinaloa	9,206.9	8,656.0	508.3	42.6	0.0
26	Sonora	7,430.2	6,371.2	961.5	90.5	7.0
27	Tabasco	414.0	169.0	183.3	61.8	0.0
28	Tamaulipas	3,800.3	3,319.0	318.2	109.1	54.0
29	Tlaxcala	235.7	137.4	78.7	19.6	0.0
30	Veracruz de Ignacio de la Llave	4,684.4	2,595.3	568.6	1,149.9	370.5
31	Yucatán	1,156.1	866.9	245.4	34.3	9.4
32	Zacatecas	1,441.2	1,306.0	112.5	22.7	0.0
<b>TOTAL</b>		<b>79,752.3</b>	<b>61,214.9</b>	<b>11,197.5</b>	<b>3,264.6</b>	<b>4,075.2</b>

NOTAS: Las sumas pueden no coincidir por el redondeo de las cifras.

Los volúmenes son al 31 de diciembre de 2008.

La regionalización de los volúmenes se hizo con base en la ubicación de los aprovechamientos inscritos en el REPDA y no en el lugar de adscripción de los títulos respectivos.

Debido al redondeo de las cifras, los valores del total nacional pueden diferir de la suma de los valores por Entidad Federativa.

a Incluye los rubros agrícola, pecuario, acuacultura, múltiples y otros de la clasificación del REPDA. b Incluye los rubros público, urbano y doméstico de la clasificación del REPDA. c Incluye los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio de la clasificación del REPDA. d Se incluye el volumen total concesionado para generación de energía eléctrica sin contar hidroelectricidad.

FUENTE: CONAGUA. Subdirección General de Administración del Agua.

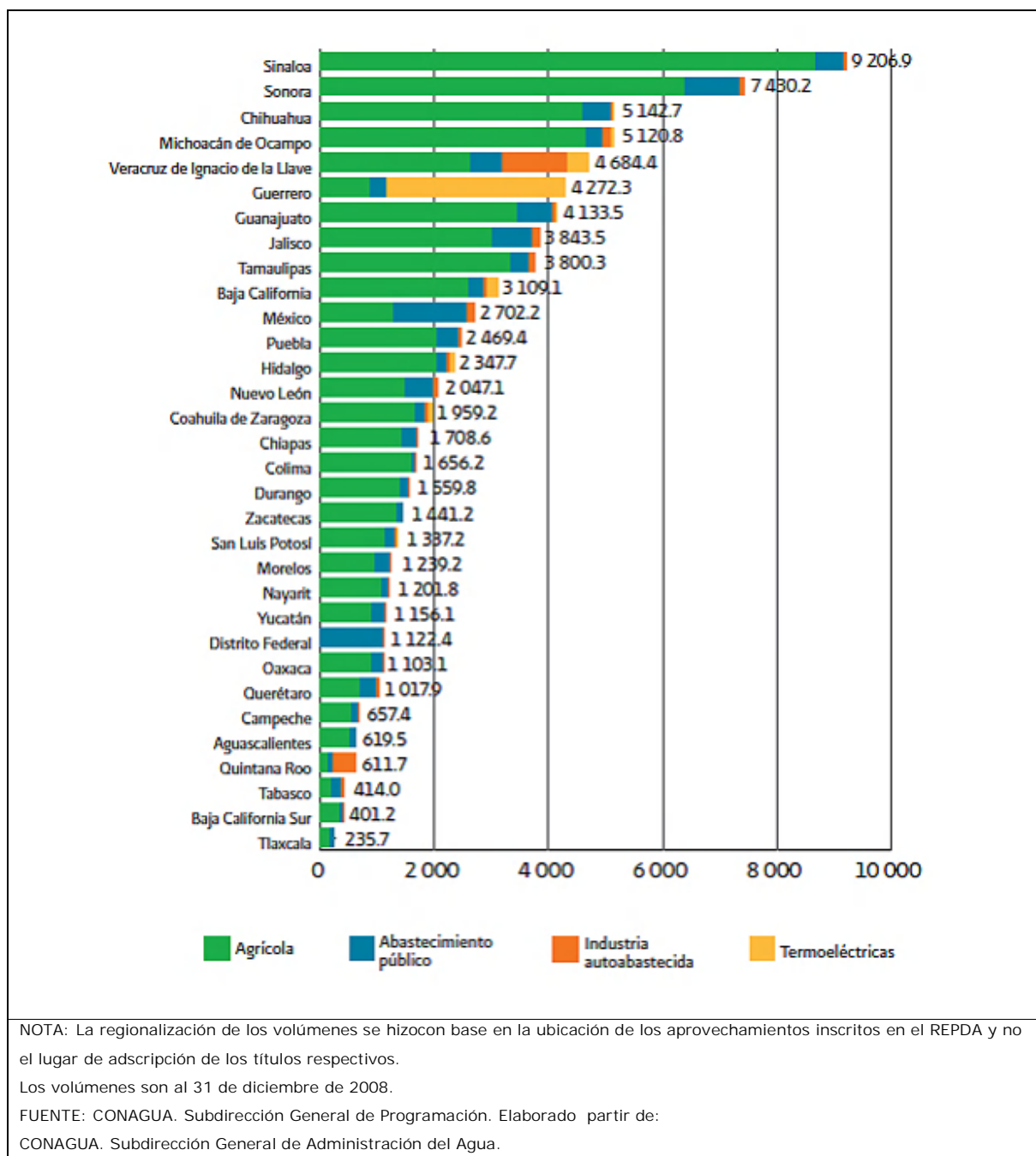


Figura 1.7. Volúmenes concesionados para usos consuntivos por entidad federativa, 2008 (millones de metros cúbicos, hm<sup>3</sup>) (CONAGUA, 2010)

### 1.3. Historia de la desalinización

La primera descripción escrita de la desalinización se encuentra en el viejo testamento (Vetus, M.Dc. XXVIII), en el Éxodo (alrededor de 1500 a.C.).

22 Moisés hizo partir a los israelitas del Mar Rojo y fueron al desierto de Sur. Allí anduvieron tres días por el desierto sin encontrar agua.

23 Llegaron a Mará, pero no pudieron beber agua porque eran amargas. Por esto se llamó aquel lugar Mará, esto es, Amargura.

24 El pueblo murmuró en contra de Moisés, diciendo: ¿Qué beberemos?

25 Y como Moisés lloró a Dios. Y Dios le mostró cierto madero; Moisés lo echó en las aguas y se endulzaron.

Es concebible pensar que la madera antes mencionada poseía propiedades de intercambio iónico (Delyannis, 2003).

Ya en el siglo IV a.C., Aristóteles describió un método para evaporar agua impura, la cual después se condensaba para obtener agua potable. Sin embargo, históricamente, probablemente una de las primeras aplicaciones de la desalinización del agua de mar por destilación se presenta en el dibujo de la Figura 1.8.

La necesidad de producir agua dulce a bordo, surgió en el momento de que los viajes de larga distancia fuesen posibles. El dibujo ilustra un relato de Alejandro de Afrodísias en el año 200 d.c., quien dijo que los marineros en altamar hervían agua de mar, colocando una esponja en la boca de una vasija de bronce para absorber el agua evaporada (Kalogirou, 2005).



Figura 1.8. Método descrito por Aristóteles en el siglo IV a.C., para evaporar agua impura, condensándola para obtener agua potable (Kalogirou, 2005)

Hasta la edad media no se desarrollaron ideas o aplicaciones importantes de la desalinización utilizando energía solar pero, durante este periodo, la energía solar se utilizó para encender los alambiques que se usaban para concentrar disoluciones diluidas de alcohol o extractos de hierbas para uso médico. También se utilizaron para la producción de vino y aceites perfumados (Figura 1.9) (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

Los alambiques fueron descubiertos en Alejandría, Egipto, durante el periodo helénico. Cleopatra el sabio, un griego alquimista inventó muchos alambiques de este tipo. A la cabeza de la olla se le conocía como ambrix, que en griego significa "la cabeza del alambique", pero esta palabra fue aplicada muy a menudo a todo el alambique (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005). La Figura 1.10 presenta uno de estos aparatos.

Los árabes quienes dominaron la ciencia y especialmente la alquimia alrededor del siglo VII, llamaron a los destiladores Al-Ambiq, del cual más tarde derivó el nombre a alambique (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).



Figura 1.9. Laboratorio de destilación medieval para la producción de extractos herbales, vino y aceites perfumados (Delyannis, 2003)

Mouchot, un científico francés quien experimentó con energía solar, mencionó en uno de sus numerosos libros del siglo XV, que árabes alquimistas utilizaron espejos cóncavos pulidos de Damasco, para concentrar radiación solar en los recipientes de cristal que contenían agua de mar, con el fin de producir agua dulce. Informó acerca de sus propios experimentos con la energía solar usada para destilar alcohol y de un aparato que él desarrolló con un espejo metálico con enfoque lineal en el

cual había una caldera localizada a lo largo de ese enfoque lineal (Belessiotis, 2000; Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

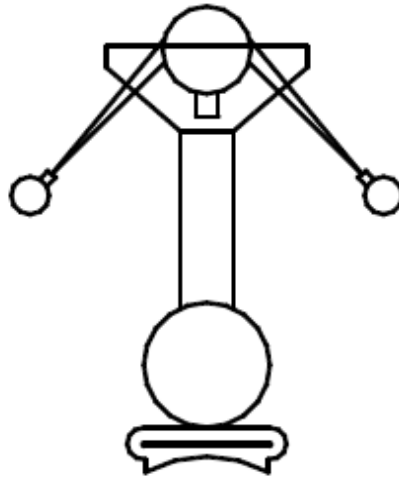


Figura 1.10. Alambique de Cleopatra (Kalogirou, 2005)

Más tarde, durante el Renacimiento, Giovanni Batista Della Porta (1535-1615), uno de los científicos más importantes de su tiempo, escribió muchos libros que fueron traducidos al francés, italiano y alemán. Uno de ellos, *Magiae Naturalis*, el cual apareció en 1558, menciona tres métodos de desalinización. En 1589 se emitió la segunda edición, donde en el volumen de destilación él menciona siete métodos de desalinización, pero la referencia más importante se encuentra en el volumen 19, en donde él describe un aparato de destilación solar, que convierte agua salobre en agua dulce. En este aparato se utilizaban dos grandes ollas de barro, expuestas al intenso calor de los rayos del sol, para evaporar el agua, para después recolectar los condensados en dos recipientes de cristal colocados por debajo. Él también describe, en el segundo capítulo del volumen 20, un método para obtener agua dulce del aire (hoy en día llamado método de humidificación-deshumidificación) (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

El gran químico francés Lavoisier alrededor de 1774 utilizó unos lentes grandes, montados sobre una elaborada estructura de soporte, para concentrar la energía solar en el contenido de matraces de destilación (Kalogirou, 2005).

Desde entonces hasta el siglo XIX, no hubo importantes aplicaciones de la destilación solar. En 1870, la primera patente americana para un destilador solar fue otorgada a Wheeler y Evans. La patente, se basa en trabajo experimental, el cual fue muy detallado. Casi todo lo que se conoce acerca de la operación básica de los destiladores solares y los problemas de corrosión fueron descritos en esta patente. Los científicos describieron el efecto invernadero, analizaron a detalle la condensación de la cubierta y la re-evaporación, hablaron de la absorción de una superficie oscura y de los posibles problemas de corrosión. Mencionaron las altas temperaturas de operación, así como los medios de rotación del destilador de manera que siguiera la incidencia de la radiación solar (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

Dos años más tarde, en 1872, un ingeniero sueco, Carlos Wilson, diseñó y construyó la primera gran planta de desalinización solar, en "Las Salinas", Chile (Figura 1.11). Este destilador solar fue el primero en utilizarse a gran escala para destilar agua. La planta fue construida para proveer de agua dulce a los trabajadores y sus familias de una mina de sal y una mina de plata cercana. Se utilizaron los efluentes de la mina de sal de una alta concentración salina (140,000 ppm), como agua de alimentación para los destiladores. La planta fue construida con madera, los bastidores fueron recubiertos con una hoja de vidrio. La planta consistía de 64 bahías, proporcionando así una superficie total de  $4450\text{m}^2$  y una superficie total de construcción de  $7896\text{m}^2$ . La planta producía  $22.70\text{m}^3$  de agua dulce por



día (alrededor de 4.9 L/m<sup>2</sup>). Los destiladores funcionaron durante 40 años hasta que fue abandonada, debido a la instalación de una red hidráulica de agua potable, que abastecía agua dulce proveniente de las montañas (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).



Figura 1.11. La primera planta destiladora del mundo en Las Salinas, Chile (Delyannis, 2003)

El uso de concentradores solares, en destilación solar fue reportado por Pasteur en 1928, quien usó el concentrador para enfocar los rayos solares sobre una caldera de cobre que contenía agua. El vapor generado de la caldera era conducido por un tubo a través de un condensador convencional refrigerado por agua, en el cual el agua destilada era acumulada.

La renovación del interés por la destilación solar ocurrió después de la Primera Guerra Mundial. Para ese entonces ya se habían desarrollado varios dispositivos tales como: tipo de techo, ala inclinada, bandeja inclinada y destiladores inflables (Kalogirou, 2005).

Hasta la Segunda Guerra Mundial existían unos cuantos sistemas de destilación solar. Uno de ellos diseñado por Abbot, el cual era un sistema

de destilación solar muy parecido al de Mouchot. Al mismo tiempo, algunas investigaciones sobre destilación solar se llevaron a cabo en la extinta Unión Soviética. Durante los años de 1930 a 1940, la sequía que azotó a California, inició un interés en la desalinización del agua de mar. Algunos proyectos fueron iniciados, pero la depresión económica de aquellos tiempos no permitió ninguna investigación o aplicación. El interés se hizo más fuerte durante la Segunda Guerra Mundial, cuando cientos de tropas aliadas sufrieron la falta de agua potable, mientras se encontraban en el norte de África, en las islas del Océano Pacífico y otros lugares aislados. Fue entonces que un equipo del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), dirigido por María Telkes, comenzó a experimentar con destiladores solares. Al mismo tiempo, la Comisión de Investigación de la Defensa Nacional de los Estados Unidos (USNRDC), patrocinó la investigación para desarrollar desalinizadores solares para uso militar en altamar. Muchas patentes fueron concedidas para pequeños aparatos individuales de destilación solar, fabricados en plástico, los cuales fueron producidos para utilizarlos en botes salvavidas o balsas. Dichos aparatos fueron diseñados para flotar en el mar, cuando se inflaban y se utilizaron ampliamente por la Marina de los Estados Unidos durante la guerra. Telkes continuó con la investigación de varias configuraciones de destiladores solares, incluidos los destiladores solares de vaso cubierto y de múltiple efecto (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

La explosión demográfica urbana y la tremenda expansión industrial después de la Segunda Guerra Mundial trajeron nuevamente el problema de agua de buena calidad. En julio de 1952, se estableció en los Estados Unidos la Oficina de Desalación de Agua (OSW, por sus siglas en inglés), cuyo principal propósito era financiar la investigación de la desalinización. La OSW promovió la aplicación de la desalación a través de la

investigación. Cinco plantas de demostración fueron construidas y entre ellas estaba una de destilación solar en Daytona Beach, Florida, donde se probaron muchos tipos y configuraciones de destiladores solares (norteamericanos y extranjeros) (Figura 1.12). Loef, un consultor de la OSW en los cincuentas, también realizó experimentos con los destiladores, tales como los destiladores tipo cuenca, destiladores de evaporación solar con condensador externo y destiladores de múltiple efecto, en la estación experimental de la OSW en Daytona Beach (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

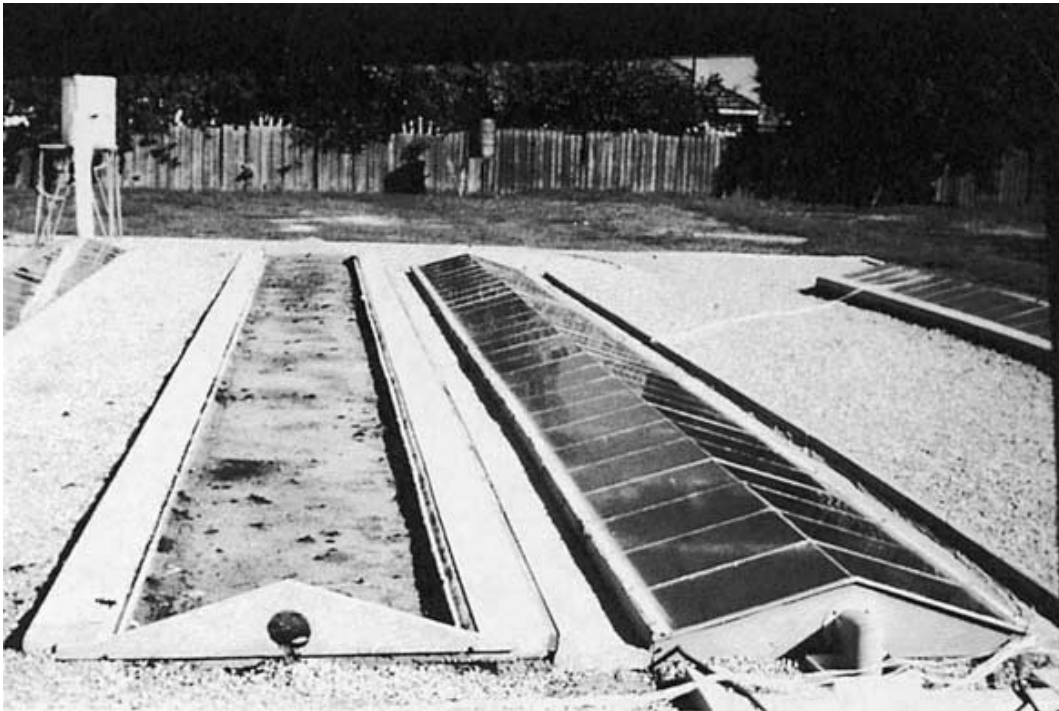


Figura 1.12. Estación de la Oficina de Desalación de Agua (OSW, por sus siglas en inglés), en Daytona Beach, Florida (Fotografía de Delyannis) (Delyannis, 2003)

En los años siguientes se construyeron muchas plantas de destilación de pequeña capacidad para algunas islas del Caribe por investigadores de la Universidad McGill Canadá. Howe fue otro pionero en los destiladores solares. Él y sus colaboradores del Laboratorio de Conversión de Agua de Mar de la Universidad de California, Berkeley, llevaron a cabo muchos

estudios sobre destilación solar. Los trabajos de experimentación en destilación solar fueron realizados también en el Laboratorio Nacional de Física en Nueva Delhi, India y en el Instituto Central de Investigaciones Químicas y Sal Marina en Bhavnagar, India. El Instituto Conmemorativo Batelle en Columbus, Ohio, EEUU, informó acerca de todos los destiladores solares y plantas de destilación solar experimentales y/o construidas hasta 1970. En Australia, la Organización de Investigación de la Comunidad Científico-Industrial (CSIRO, por sus siglas en inglés), en Melbourne, llevó a cabo numerosos estudios sobre destilación solar. En 1963, desarrollaron una bahía prototipo tipo destilador, cubierta con vidrio y forrada con una lámina de polietileno negro. Utilizando este destilador prototipo, se construyeron plantas de destilación solar en el desierto australiano, abasteciendo de agua dulce a partir de agua salobre de pozos a personas y ganado (Figura 1.13). La más grande de estas plantas destilación solar fue instalada en Coober Pedy (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

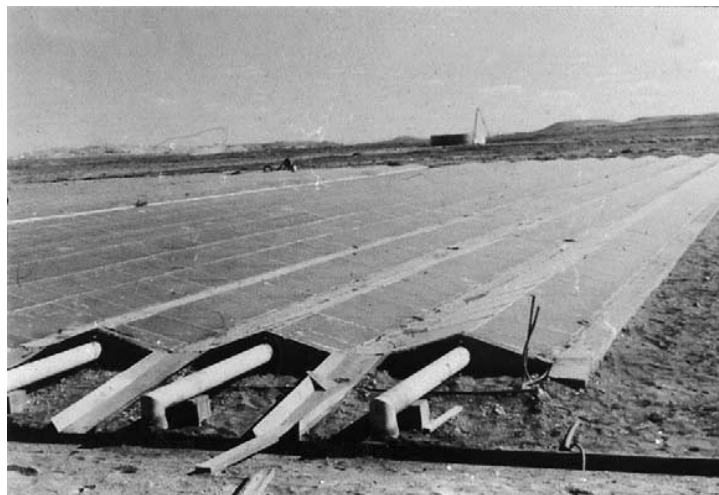


Figura 1.13. Planta solar destiladora de Coober-Pedy, Australia (Fotografía de Delyannis)(Delyannis, 2003)

Al mismo tiempo, Baum en la extinta Unión Soviética realizó experimentos con destiladores solares. Otras instituciones en la Unión Soviética que realizaron experimentos con destiladores solares, tales como el

Laboratorio de Energía Solar del Instituto de Energía Krzhizhanovsky de Moscú, el Instituto de Ingeniería y Física y la Academia de Ciencias en RSS Turkmenia. En Ashkabad, Turkmenia, se construyó una planta destiladora para proveer de agua dulce para ovejas de las conocidas como de Caracuel, España. La planta fue alimentada con agua salobre proveniente de pozos. Un generador fotovoltaico experimental proporcionó 300 – 400 W para bombear el agua salobre a los destiladores. Entre los años 1965 y 1970, se construyeron plantas destiladoras solares en cuatro islas griegas, para proveer de agua dulce a sus pequeñas comunidades. El diseño de los destiladores se realizó en la Universidad Técnica de Atenas y eran del tipo invernadero de cubierta asimétrica de vidrio con estructura de aluminio. El destilador se alimentaba con agua de mar y estaba cubierto por vidrio (Figura 1.14). Su capacidad estaba dentro del rango de 2044 a 8640 m<sup>3</sup>/día. De hecho, la planta instalada en la isla de Patmos es la planta de destilación solar más grande jamás construida. En las otras tres islas se construyeron otras tres plantas de destilación solar. Éstas fueron construidas, con cubiertas de plástico en los destiladores (con un material conocido como tedlar, basado en fluoruro de polivinilo) con capacidades de producción de 2886, 388 y 377 m<sup>3</sup>/día, que satisficieron las necesidades de las instalaciones o campus de la YMCA (siglas en inglés para la Asociación Cristiana de Jóvenes) en ese verano (Delyannis, 2003; Kalogirou, 2005).

También se construyeron plantas de destilación solar en las islas de Porto Santo, Madeira, en Portugal y en la India, de las cuales no se tiene información detallada. Hoy, la mayoría de estas plantas destiladoras no están operando. Aunque mucha de la investigación sobre los destiladores solares se está llevando a cabo, solamente se han construido en los años recientes plantas de baja capacidad (Kalogirou, 2005).

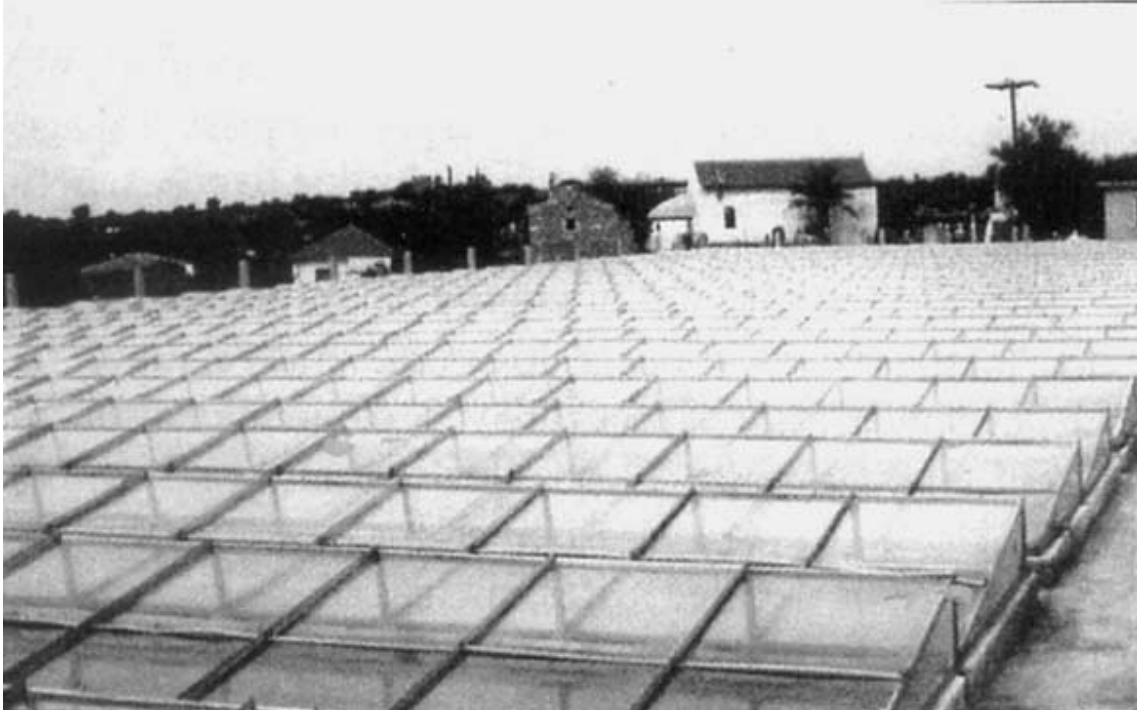


Figura 1.14. Planta de destilación solar en la isla de Symi, Grecia (Delyannis, 2003)

### 1.3. Objetivo

El objetivo de esta investigación es el de estudiar el mejor método para eliminar sales del agua de mar empleando biomasa algal como fuente de energía.

### 1.4. Metas

- Revisión bibliográfica para definir las mejores opciones de obtención de agua potable a partir de agua de mar.
- Evaluación de la biomasa algal para la obtención de energéticos tipo biodiesel.

- Evaluación de otras fuentes no convencionales de energía (solar y eólica).
- Evaluación conceptual del proceso propuesto.

## CAPÍTULO II

### 2. Revisión de los avances tecnológicos

#### 2.1. Proceso de desalinización

Los procesos comerciales o de tecnologías convencionales de desalinización para el tratamiento de las aguas salobres consisten en la separación del agua dulce del agua salada, y su desinfección con cloro o yodo (Eltawil et al., 2009).

La desalinización del agua de mar se puede lograr mediante el uso de una serie de técnicas. Las tecnologías industriales de desalinización pueden utilizar cambios de fase o emplear membranas semipermeables para separar el disolvente o algunos de los solutos. Estas técnicas de desalinización pueden ser clasificadas en las siguientes categorías:

- a. Proceso térmico o cambio de fase; y
- b. Proceso de una sola fase o membrana.

Todos los procesos requieren de un pre-tratamiento químico en la corriente de agua de mar para evitar las incrustaciones, la formación de espuma, la corrosión, el desarrollo microbiológico, entre otros, así como de un post-tratamiento químico del agua procesada (Eltawil et al., 2009; Kalogirou, 2005). La Tabla 2.1 muestra listadas las tecnologías más importantes en uso (Kalogirou, 2005).

En el proceso de cambio de fase o térmico, la destilación del agua de mar se logra utilizando una fuente de energía térmica. La energía térmica puede obtenerse de una fuente convencional a partir de combustibles



fósiles o energía nuclear o a partir de fuentes no convencionales, como la energía solar o geotérmica o eólica. En el proceso de membrana, la electricidad se emplea tanto para el funcionamiento de las bombas a alta presión como para la ionización de las sales contenidas en el agua de mar (Kalogirou, 2005).

Tabla 2.1. Procesos de desalinización (Kalogirou, 2005)

Procesos de cambio de fase	Procesos de membrana
1. Destilación multietapas flash	1. Ósmosis inversa
2. Destilación múltiple efecto	-Ósmosis inversa sin recuperación de energía
3. Compresión de vapor	-Ósmosis inversa con recuperación de energía
4. Congelamiento	2. Electrodiálisis
5. Humidificación / deshumidificación	
6. Destiladores solares	
-Destiladores convencionales	
-Destiladores especiales	
-Destiladores solares tipo cascada	
-Destiladores tipo ala	
Destiladores tipo múltiple ala	

## 2.2. Procesos tradicionales

### 2.2.1. Proceso multietapas instantáneo tipo "Flash"

Alrededor del 80% de la capacidad mundial de desalinización es abastecida por dos tecnologías: Multietapas tipo "Flash" y ósmosis inversa. Las plantas multietapas "Flash" han sido ampliamente utilizadas en el Medio Oriente (particularmente en Arabia Saudita, Los Emiratos Árabes Unidos y

Kuwait) y representan más del 40% de la capacidad de desalinización mundial (Eltawil et al., 2009).

El proceso de destilación multietapas "Flash", se basa en el principio de la evaporación instantánea o "flash". En los procesos de destilación multietapas "Flash", el agua es evaporada por la reducción de la presión, opuesta al incremento de la temperatura. La economía de la tecnología de los sistemas de destilación multietapas "Flash" se logra gracias al calentamiento regenerativo, cuando el agua de mar se evapora instantáneamente en cada etapa, dando algo de su calor al agua de mar que pasa a través del proceso "flash" (Khawaji et al., 2008).

El proceso multietapas "Flash" se compone de una serie de elementos llamados etapas. En cada etapa, se utiliza vapor de condensación para precalentar el agua de mar alimentada; sucesivamente, la temperatura y presión decrecen. El proceso multietapas "Flash" se basa en la generación de vapor a partir del agua de mar o salmuera, debido a una repentina reducción de la presión, cuando el agua de mar entra a una cámara (etapa) a vacío. El proceso se repite etapa por etapa con una sucesiva reducción de presión. La operación de este sistema requiere de gradientes de presión en la planta, por lo que este proceso necesita un suministro externo de vapor, normalmente a una temperatura de alrededor de 100°C. La temperatura máxima es limitada por la concentración de sal para evitar las incrustaciones y el máximo desempeño del proceso. Una de las características clave del proceso es la ebullición de grandes cantidades de líquido. Esto resuelve los problemas de incrustaciones en los tubos de transferencia de calor. Hoy en día las instalaciones comerciales están diseñadas de 10 a 30 etapas (La caída de la temperatura entre etapas es

de 2°C). EL principio de operación se muestra en la Figura 2.1 (Eltawil et al., 2009; Kalogirou, 2005; Khawaji et al., 2008).

### Evaporación instantánea y recuperación de calor

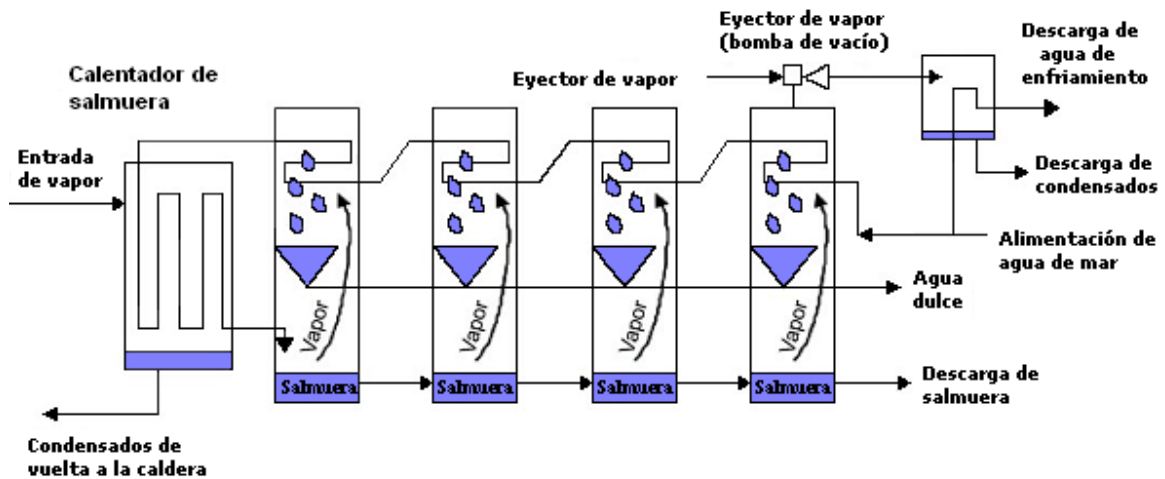


Figura 2.1. Diagrama esquemático básico del proceso de destilación multietapas "Flash" (Eltawil et al., 2009)

El sistema se encuentra dividido en dos secciones, una de recuperación de calor y la otra de expulsión de calor. El agua de mar es alimentada por la sección de expulsión de calor, la cual expulsa la energía térmica de la planta y la salmuera a la temperatura más baja posible (Figura 2.2).

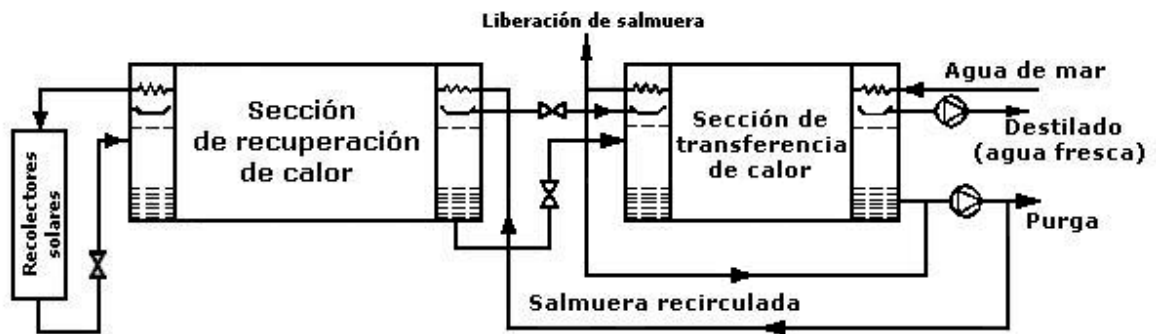


Figura 2.2. Planta multietapas Flash (Kalogirou, 2005)

El agua alimentada es entonces mezclada con una gran masa de agua, la cual es recirculada alrededor de la planta. Esta agua pasa a través de una serie de intercambiadores de calor para elevar su temperatura. El agua entra en un calentador convencional de salmuera para aumentar su temperatura muy cerca de su temperatura de saturación a la máxima presión del sistema. Es entonces que el agua entra a la primera etapa a través de un orificio y es así que disminuye su presión. Y como el agua estaba a su temperatura de saturación para una presión alta, el agua se sobrecalienta y súbitamente se transforma en vapor. El vapor producido pasa a través de una malla de alambre (antivaho) para eliminar toda gota de salmuera arrastrada y de ahí al intercambiador de calor, donde se condensa y gotea en una charola de destilado. Este proceso se repite a través de la planta, tanto como las corrientes de ambos, salmuera y destilado flash entren a las subsecuentes etapas, las cuales están sucesivamente a presiones más bajas. En este proceso, el número de etapas no está delimitado rígidamente por el índice de eficiencia requerido para la planta. En la práctica, el mínimo de etapas debe ser ligeramente mayor que el índice de eficiencia, mientras que el máximo está limitado por la elevación del punto de ebullición. El mínimo de la caída de temperatura entre etapas debe exceder la elevación del punto de ebullición para que ocurra la evaporación instantánea o "flash" a una velocidad finita. Esto es ventajoso porque como el número de etapas se incrementa, la diferencia de temperatura final a través de los intercambiadores de calor aumenta y el área de transferencia de calor que se requiere, por lo tanto, es menor con un evidente ahorro en el costo de la planta (Kalogirou, 2005; Khawaji et al., 2008).

Cada etapa del evaporador está equipada con eliminadores de gotitas de concentrado. Se conocen con el nombre de "demisters" en inglés (mallas

antivaho), para evitar el arrastre de las gotas de agua salada con el destilado. El evaporador cuenta con un descarbonatador (si es que se utiliza ácido para el control de las incrustaciones) y un sistema de vacío desaireador para eliminar los gases disueltos en la salmuera (eliminador de gases incondensables). El agotamiento del descarbonatador y del desaireador es básicamente provocado por el aire y el vapor generado instantáneamente o "flasheado", respectivamente. El descarbonatador es empleado para eliminar el  $\text{CO}_2$  convertido del bicarbonato en el agua de mar por un ácido como el ácido sulfúrico. El bicarbonato presente en el agua de mar es la principal especie que forma las incrustaciones alcalinas. El vacío en la etapa del destilador es estabilizado y sostenido mediante un sistema eyector de chorro de vapor. El sistema se completa con un respiradero de los condensadores, tanto previo como posterior, etc. El sistema extrae los gases no condensables, tales como el  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  y el  $\text{CO}_2$  liberados durante el proceso "flash".

El flujo hacia abajo es necesario, para evitar la saturación de salmuera en el proceso "flash", lo cual podría incrementar el punto de ebullición, concentrándose más y más como resultado de las sucesivas evaporaciones de la salmuera en las multietapas, lo cual incrementa a su vez la tendencia a las incrustaciones y a la corrosión (Khawaji et al., 2008).

El proceso multietapas "Flash" es el proceso de desalinización más ampliamente utilizado en términos de capacidad. Esto se debe a la simplicidad del proceso, las características de rendimiento y al control de las incrustaciones. Una desventaja del proceso multietapas "Flash" es que son necesarios niveles exactos de precisión en las distintas etapas y, por lo tanto, se requiere de un tiempo de transición para establecer el funcionamiento normal de operación de la planta. Esta característica hace

al proceso multietapas "Flash" relativamente poco adecuado para aplicaciones de energía solar a menos que se utilice un tanque de almacenamiento como amortiguador térmico (Kalogirou, 2005; Khawaji et al., 2008).

El sistema hidráulico para alimentar de agua de mar para desalinización y enfriamiento consiste en un canal abierto de alimentación o tubería submarina, una casa de bombas, generadores de hipoclorito de sodio y una red de distribución o canal. La casa de bombas está equipada con rastrillos para remover basura y bandas transportadoras para eliminar residuos. La salmuera caliente procedente de la sección de rechazo de calor se descarga al canal de desagüe, el cual se extiende hacia el mar. Esta última operación es ambientalmente inaceptable.

El agua producida en un destilador multietapas "Flash" contiene típicamente de 2 a 10 ppm de sólidos disueltos. Es por ello que es remineralizada durante el proceso de potabilización (o post-tratamiento).

Las plantas de destilación multietapas "Flash" han sido construidas desde los años 50 del siglo XX. En 1953, la Marina de los Estados Unidos construyó una de 189 m<sup>3</sup>/d, la cual constaba de 5 etapas y, en 1957, una de 4 etapas con una capacidad de 2271 m<sup>3</sup>/d, las cuales fueron instaladas en Kuwait. La Corporación Conversión de Agua Salina posee la planta Al-Jubail en Arabia Saudita, la cual es la planta más grande del mundo con una capacidad de 815,120 m<sup>3</sup>/d. La segunda planta más grande con una capacidad de 75,700 m<sup>3</sup>/d, es la planta de Shuweita, localizada en los Emiratos Árabes Unidos (Khawaji et al., 2008).

### 2.2.2. Proceso de destilación multiefecto

La destilación de múltiple efecto es el método de desalinización más viejo y termodinámicamente es muy eficiente (Khawaji et al., 2008).

En la destilación multiefecto, el vapor es generado debido a la absorción de la energía térmica por el agua de mar. El vapor generado en una de las etapas o efectos es capaz de calentar la solución salina en la siguiente etapa, porque la siguiente etapa se encuentra a menor temperatura y presión, con respecto a la anterior (Eltawil et al., 2009). El vapor generado pasa a través del siguiente efecto, en donde, mientras se condensa, éste provoca que parte de la otra solución se evapore y así sucesivamente. Mediante este procedimiento es posible el calentamiento del efecto que deberá mantenerse a una presión más baja que la del efecto donde fue producido el vapor. Los condensados de todos los efectos son utilizados para precalentar el agua de alimentación. En este proceso, el vapor es generado por evaporación instantánea o "flasheo" y por ebullición, pero la mayoría del destilado es producido por la ebullición. A diferencia de la destilación multietapas "Flash", la destilación multiefecto normalmente funciona como una sola etapa a través del sistema, sin una gran masa de salmuera recirculada alrededor de la planta. Este diseño reduce los requerimientos de bombeo y las tendencias de incrustaciones. Al igual que en la planta de destilación multietapas "Flash", en la planta de destilación multiefecto, la salmuera entra al proceso por una serie de calentadores, pero antes de entrar al calentador de salmuera, es alimentada al efecto superior, donde el vapor de calentamiento eleva su temperatura a la temperatura de saturación debido a la presión en el efecto. Nuevas cantidades de vapor, ya sean de una caldera convencional o de un sistema que utilice energías renovables, son utilizadas para producir la evaporación

en este efecto. Entonces el vapor, por una parte calienta el agua de mar alimentada y, por otra, provee el calor para el siguiente efecto, el cual se encuentra a baja presión y es alimentado con la salmuera del primer efecto. Este proceso se repite a lo largo de toda la planta (hacia abajo). El destilado también pasa hacia abajo a través de la planta. Tanto la salmuera como el destilado pasan hacia abajo debido a la reducción progresiva de la presión (Kalogirou, 2005).

La eficiencia del proceso es proporcional al número de etapas o efectos. Una planta de destilación multiefecto normalmente usa vapor externo suministrado a baja temperatura, alrededor de 70°C. La baja temperatura en la destilación multiefecto está ganando más aceptación en las plantas de destilación con pequeñas y medianas capacidades de destilación, debido a las siguientes ventajas (Figura 2.3):

- i. Bajo consumo energético;
- ii. Coeficiente de transferencia de calor alto;
- iii. Compactas;
- iv. Alta calidad del agua producida y
- v. Un pretratamiento reducido (Eltawil et al., 2009).

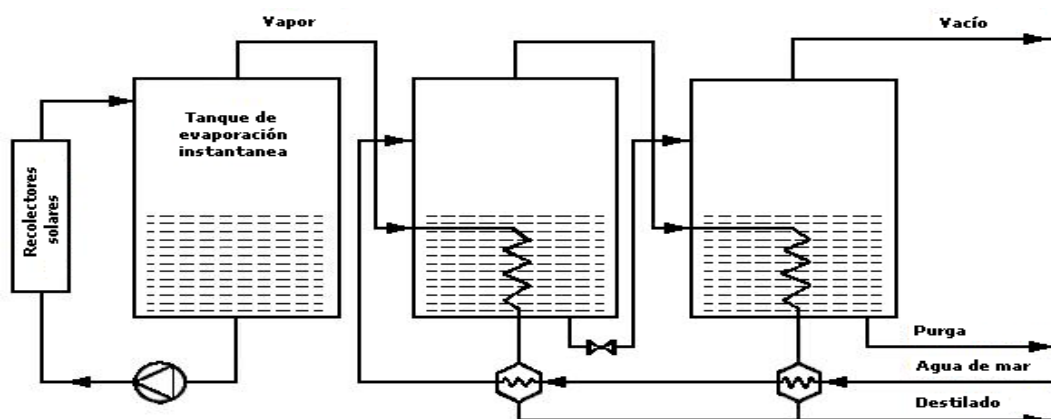


Figura 2.3. Principio de operación de un sistema de destilación multiefecto (Kalogirou, 2005)



Existen muchas variaciones posibles de una planta de destilación multiefecto, las cuales dependen de las combinaciones de la configuración de la transferencia de calor y el diagrama de flujo a utilizar. Las primeras plantas fueron del tipo de tubos sumergidos y sólo utilizaban dos o tres efectos. En las plantas actuales, el problema de la poca evaporación ha sido resuelto haciendo uso de los diseños de capa fina, con el líquido alimentado, distribuido en la superficie del calentador, formando una delgada capa en lugar de un profundo pozo de agua. Tales plantas pueden tener tubos verticales u horizontales. Los diseños de tubos verticales son de dos tipos: película ascendente, de circulación natural y forzada o de tubo largo, vertical, recto del tipo de caída de película (Figura 2.4), donde la salmuera hierve dentro de los tubos y el vapor se condensa afuera (Kalogirou, 2005).

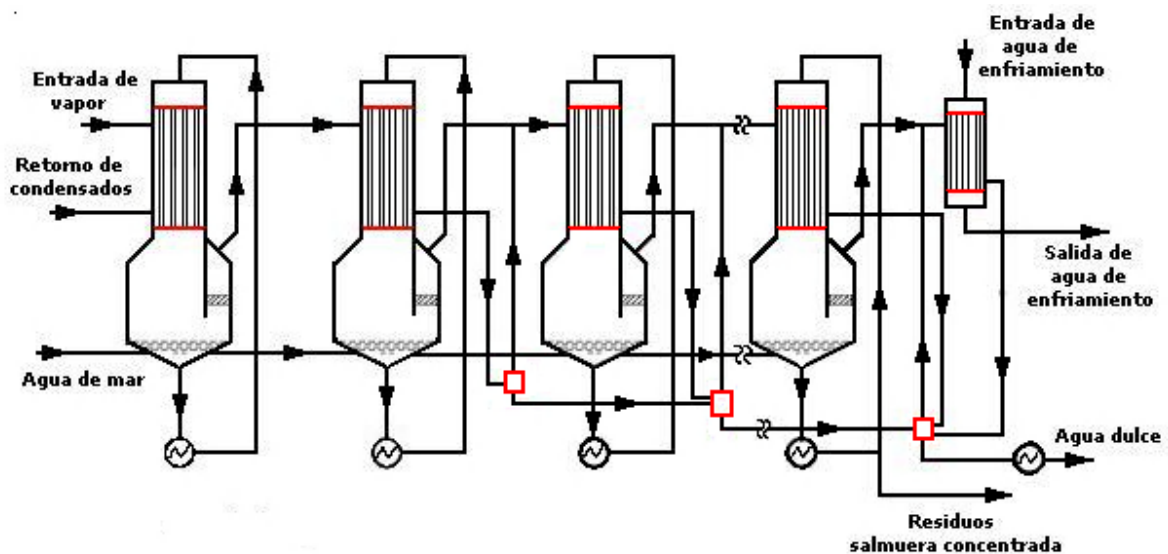


Figura 2.4. Planta de destilación multiefecto de tubos largos verticales (Kalogirou, 2005)

Otro tipo de planta de destilación multiefecto es la planta multiefecto tipo apilada. Ésta es el tipo más apropiado para la aplicación de energía solar (Kalogirou, 2005).

Tiene una serie de ventajas, de las cuales la más importante es su estabilidad de operación, entre prácticamente 0 y 100% de producción, incluso cuando se producen cambios repentinos y su habilidad de continuar con variaciones de suministro de vapor sin verse interrumpido su funcionamiento.

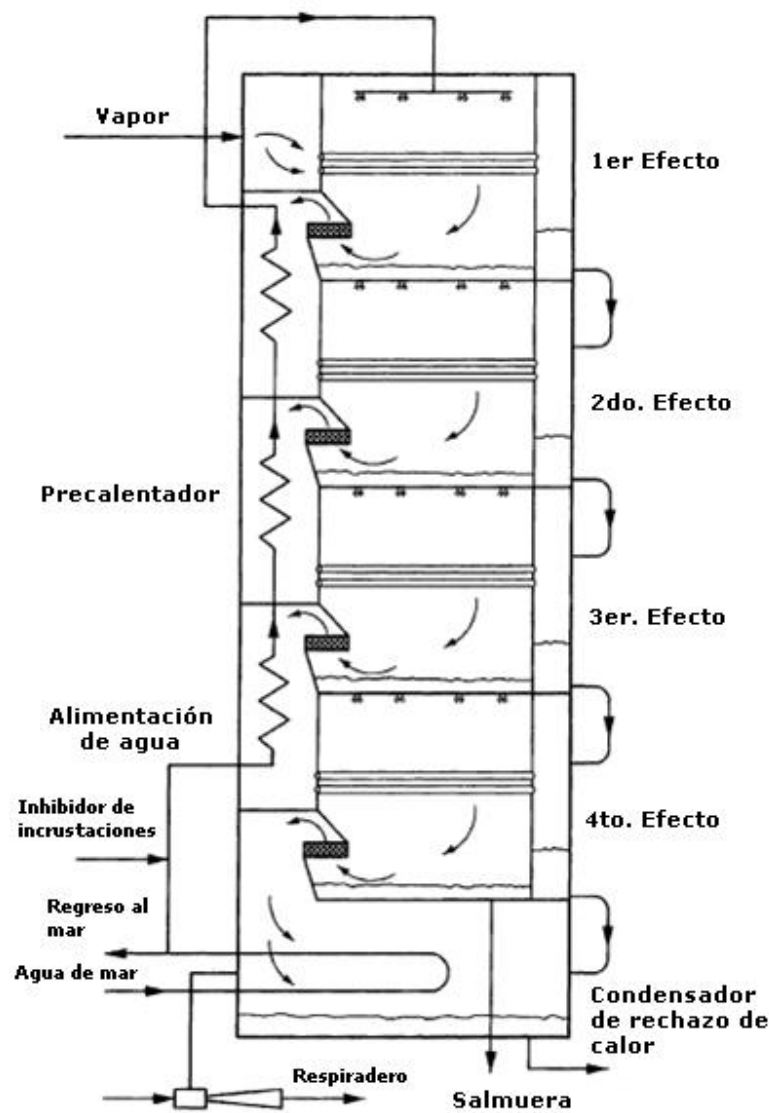


Figura 2.5 Sistema de destilación multiefecto apilado

La Figura 2.5 muestra un destilador multiefecto apilado de cuatro efectos. En el sistema el agua de mar es rociada en la parte superior del destilador y desciende como una película fina sobre el arreglo horizontal de tubos en cada efecto.

Debido a la baja presión creada en la planta por el sistema de ventilador-eyector, la delgada película de agua de mar hierve simultáneamente en el exterior de los tubos. Por lo tanto, se

genera nuevo vapor a una temperatura inferior a la del vapor de condensación. El agua de mar que cae al fondo del primer efecto es enfriada por la evaporación súbita ("flasheo") a través de unas boquillas

que lo conducen al segundo efecto, el cual se encuentra a una presión menor. El vapor generado en el primer efecto es canalizado hacia el interior de los tubos del segundo efecto, donde éste se condensa para formar parte del producto. Por otra parte, el vapor de la condensación caliente provoca el enfriado de la película de agua de mar a hervir a una presión reducida. El proceso de evaporación-condensación se repite de un efecto a otro en la planta, creando una cantidad de producto, casi igual dentro de los tubos de cada efecto. El vapor generado en el último efecto es condensado por fuera de un haz de tubos enfriados por agua de mar. La mayor parte del agua caliente es regresada al mar, pero una pequeña parte es utilizada como agua de alimentación para la planta. Después de haber sido tratada con ácido para descomponer los compuestos formadores de incrustaciones, el agua de alimentación pasa arriba a la pila a través de una serie de pre-calentadores que utilizan un poco del vapor de cada efecto para aumentar la temperatura gradualmente, antes de ser atomizada en la parte alta de la planta. El agua producida en cada efecto, es "flasheada" en cascada por la planta, de modo que puede ser retirada fría, en la parte inferior de la pila. La salmuera concentrada, también es retirada en la parte inferior de la pila.

La destilación multiefecto apilada es un proceso de operación estable y de ajuste automático a los cambios de condiciones de vapor, aún si se aplican repentinamente, por lo que es adecuada para las siguientes aplicaciones de carga. Es un proceso de un solo paso, que minimiza los riesgos de formación de incrustaciones, sin incurrir en una dosificación elevada de compuestos químicos anti-incrustaciones y, por consiguiente, un incremento de costos. La pureza típica del agua producida es por debajo de 5 ppm SDT (sólidos disueltos totales) y esto no se deteriora con la edad de la planta. Por lo tanto, el proceso de destilación multiefecto en un

arreglo de pila parece ser el más recomendado para su uso con energía solar (Kalogirou, 2005).

### 2.2.3. Proceso de vapor-compresión

En una planta de vapor-compresión, la recuperación de calor se basa en incrementar la presión del vapor de una etapa, utilizando un compresor. La temperatura de condensación es pues incrementada y el vapor puede ser utilizado para proveer energía a la misma etapa de la que provenía o a otras etapas. Al igual que en un sistema convencional de destilación multiefecto, el vapor producido en el primer efecto se utiliza como entrada de calor al segundo efecto, el cual se encuentra a una presión más baja. El vapor producido en el último efecto se pasa al compresor de vapor, donde se comprime y su temperatura de saturación se eleva antes de que se devuelva al primer efecto. El compresor representa la fuente de energía más importante para el sistema y ya que el calor latente es reciclado a través de la planta, el proceso tiene el potencial para entregar altas tasas de rendimiento. Se han llevado a cabo estimaciones paramétricas de costos y diseños de los procesos y demuestran que este tipo de planta no es particularmente conveniente, a menos que se combine con un sistema de destilación multiefecto. Además, parece que las necesidades de energía mecánica tienen que contar con una unidad principal, como un motor diesel, el radiador y la refrigeración del motor constituyen un ejemplo más del calor suficiente para las necesidades térmicas del proceso, haciendo el sistema de colectores solares redundante (Figura 2.6). Por lo tanto, el sistema de vapor-compresión se puede utilizar en conjunto con el sistema de destilación multiefecto siendo operado en los períodos de baja radiación solar o por la noche (Kalogirou, 2005).

El sistema de vapor-compresión se subdivide en dos categorías: Compresión de vapor mecánica y compresión de vapor térmica. El sistema de compresión de vapor mecánica utiliza un compresor mecánico para comprimir el vapor, mientras que el térmico utiliza un compresor a chorro de vapor. Los principales problemas son:

- i. El vapor conteniendo salmuera es llevado dentro del compresor y provoca la corrosión del compresor.
- ii. Existen limitaciones del tamaño de la planta, porque las capacidades de los compresores son limitadas.

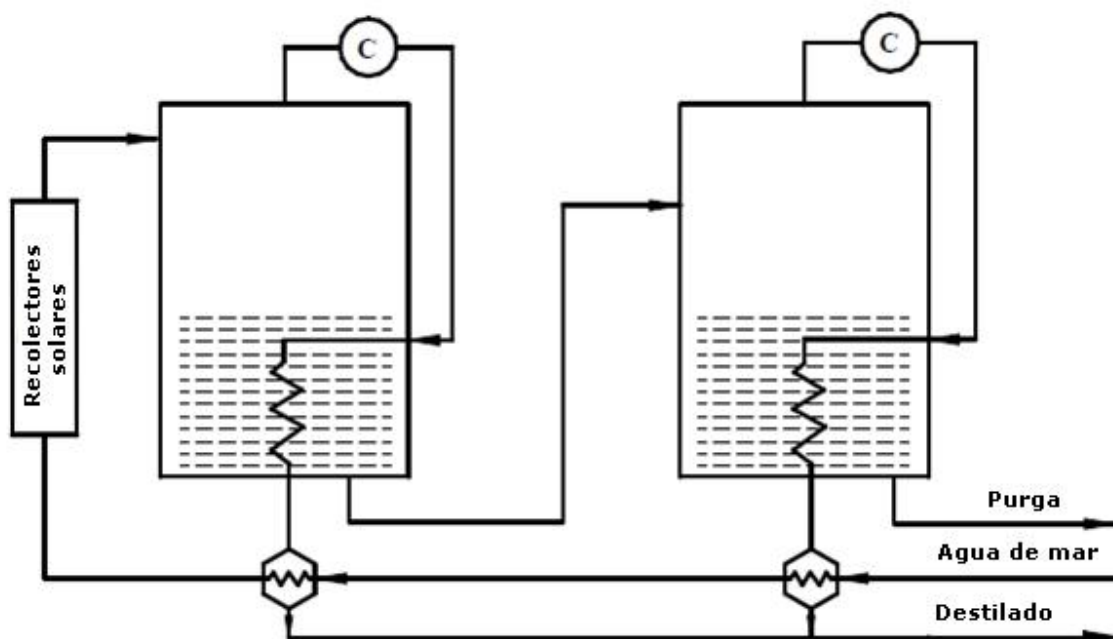


Figura 2.6. Principio de operación de un sistema vapor-compresión (Kalogirou, 2005)

Las instalaciones de compresión de vapor térmico están diseñadas para los proyectos donde el vapor está disponible. La presión necesaria es de entre 2 y 10 bar y, debido al relativo alto costo del vapor, un gran número de

pasos de evaporación-condensación para recuperación de calor son normalmente justificados (Kalogirou, 2005).

#### 2.2.4. Ósmosis inversa

El sistema de ósmosis inversa depende de las propiedades semipermeables de las membranas, las cuales cuando son utilizadas para separar agua de soluciones salinas, deja que el agua dulce pase del compartimento de la salmuera bajo la influencia de la presión. Si se aplica a la solución salina una presión en exceso, por arriba de ésta, el agua dulce pasará de la salmuera hacia el compartimento del agua dulce. Teóricamente, la única energía requerida es la de la bomba que alimenta el agua a una presión por arriba de la presión osmótica. En la práctica, se deben usar presiones altas, de alrededor de 50-80 atm, de manera que se tenga suficiente cantidad de agua, que pase a través de una unidad de superficie de la membrana. En este sistema, la alimentación es presurizada mediante una bomba de alta presión, la cual hace fluir esta alimentación a través de la superficie de la membrana. Parte de esta alimentación pasa a través de la membrana, donde la mayoría de los sólidos disueltos son removidos. El agua remanente, junto con las sales remanentes son eliminados a alta presión (Figura 2.7). En plantas más grandes es económicamente recomendable recobrar la energía de la salmuera eliminada, usando una turbina de salmuera. Estos sistemas son llamados "Sistemas de recuperación de ósmosis inversa" (Kalogirou, 2005).

La energía solar puede ser usada en los sistemas de ósmosis inversa como una fuente primaria de energía para los motores que impulsan las bombas, con la producción directa de electricidad a través de paneles fotovoltaicos.

La energía eólica también puede ser utilizada como fuente motriz primaria. Como el costo unitario de la electricidad generada por celdas fotovoltaicas es elevado, las plantas de ósmosis inversa están equipadas con turbinas de recuperación de energía que alimentan a las celdas fotovoltaicas.

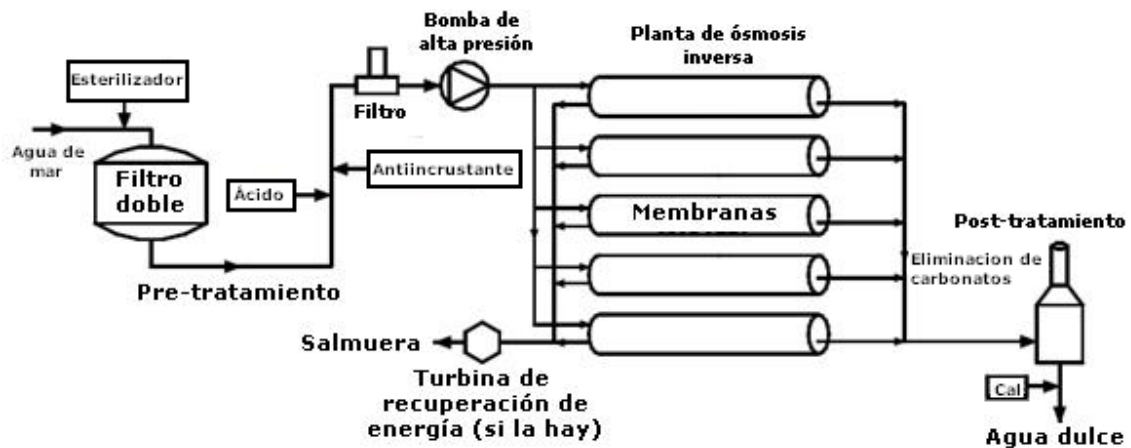


Figura 2.7. Principio de operación de un sistema de ósmosis inversa (Kalogirou, 2005)

La producción de las plantas de ósmosis inversa es de alrededor de 500-1500 litros por día por metro cuadrado de membrana, dependiendo de la cantidad de sales en el flujo de agua y de las condiciones de la membrana. Las membranas son, en efecto, unos filtros muy finos y muy sensibles a incrustaciones biológicas y no biológicas. Para evitar las incrustaciones, es necesario un pre-tratamiento cuidadoso en la alimentación, antes de que se tenga contacto con la superficie de la membrana. Un método usado recientemente para el tratamiento previo del agua de mar, antes de que la salmuera se ponga en contacto con los módulos de la ósmosis inversa es la nano-filtración. La nano-filtración se ha desarrollado como una membrana suavizante, proceso que ha ofrecido una alternativa al ablandamiento químico. Los objetivos principales de la nano-filtración son:

- a) Reducir al mínimo la contaminación con partículas químicas y microbianas de las membranas en la ósmosis inversa, mediante la remoción de bacterias y turbiedad.
- b) Evitar las incrustaciones mediante la eliminación de los iones de dureza.
- c) Disminución de la presión de operación en los procesos de ósmosis inversa, mediante la reducción de la concentración de los sólidos disueltos totales en el agua de alimentación (Kalogirou, 2005; Thomson e Infield, 2002).

### 2.2.5. Electrodialisis

Este sistema, que se muestra esquemáticamente en la Figura 2.8, trabaja reduciendo la salinidad del agua de mar, mediante la transferencia de iones del agua de mar en el compartimento de alimentación, a través de membranas, bajo la influencia de una diferencia de potencial eléctrico. Este proceso utiliza un campo eléctrico de corriente directa para remover los iones de sal del agua salobre.

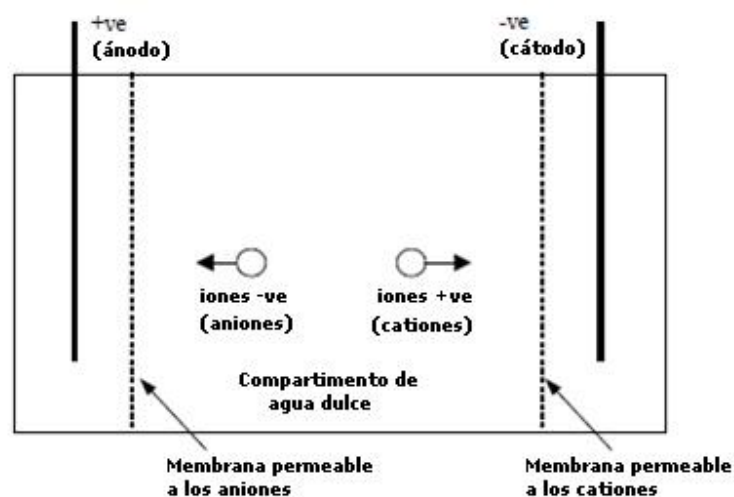


Figura 2.8. Principio de operación de la electrodiálisis (Kalogirou, 2005)



El agua salina alimentada contiene sales disueltas y, considerando solamente al NaCl, separadas en iones con carga positiva de sodio y con iones de carga negativa de cloro.

Estos iones se moverán a un electrodo cargado opuestamente, inmerso en la disolución, es decir, los iones positivos (cationes), se moverán hacia el electrodo negativo (cátodo) y los iones negativos (aniones), se moverán hacia el electrodo positivo (ánodo). Si alternativamente se utilizan membranas especiales, catión-permeables y anión-permeables, el espacio central entre estas membranas quedará libre de sales.

En los procesos actuales, un gran número alternado de membranas anión-cación son apiladas juntas, separadas por espaciadores de flujo de plástico, que permiten el paso del agua. Las corrientes de los separadores de flujo alternados, son una secuencia de agua diluida y agua concentrada, que fluyen en paralelo, la una de la otra. Para prevenir las incrustaciones, se utilizan inversores, para invertir la polaridad del campo eléctrico, aproximadamente cada 20 minutos.

Como las necesidades de energía del sistema son proporcionales a la salinidad del agua, la electrodiálisis es más factible cuando la salinidad del agua alimentada no es mayor de 6000 ppm de sólidos disueltos. Del mismo modo, debido a la baja conductividad, lo cual incrementa los requerimientos de energía de un agua muy pura, el proceso no es adecuado para agua con menos de 400 ppm de sólidos disueltos. Dado que el proceso opera con corriente directa, la energía solar puede usarse con la electrodiálisis, produciendo directamente la diferencia de voltaje requerido mediante paneles fotovoltaicos (Kalogirou, 2005).

## 2.3. Sistemas de energía renovable

Los sistemas de energía renovable ofrecen una solución alternativa para disminuir la dependencia hacia el uso de los combustibles fósiles. El total mundial de instalaciones que emplean energía renovable para desalinización del agua es de menos del 1% con respecto al total de plantas de desalinización convencionales que emplean combustibles fósiles. Esto es debido al gran capital y alto costo de mantenimiento requerido para las plantas operadas con energía renovable, haciendo de estas plantas de desalinización no-competitivas con las plantas convencionales que operan a base de combustibles fósiles (Kalogirou, 2005).

### 2.3.1. Recolectores<sup>1</sup> solares

Los recolectores de energía solar son un tipo especial de intercambiadores de calor, que transforman la radiación solar en energía interna del medio de transporte. El componente más importante de cualquier sistema solar, es el recolector solar. Éste es un aparato, que absorbe la radiación solar entrante, convirtiéndola en calor y transfiriendo este calor a un fluido (normalmente aire, agua o aceite) pasando a través del recolector. La energía solar recolectada de esta manera es transportada desde el fluido que circula, directamente al agua caliente o al equipo de acondicionamiento o a un tanque de almacenamiento de energía térmica del cual puede extraerse para uso nocturno y/o en los días nublados.

---

<sup>1</sup> **Recolectar:** Juntar personas o cosas dispersas versus **colectar:** recaudar, cobrar o percibir dinero; asegurar, poner o tener en custodia, guardar; alcanzar, conseguir con instancias o súplicas lo que se desea

Existen básicamente dos tipos de recolectores solares: no concentradores o estacionarios y concentradores. Un recolector no concentrador tiene la misma área para interceptar y para absorber la radiación solar, mientras que en un recolector solar, de seguimiento solar, normalmente tiene un reflector de superficie cóncava, que intercepta y enfoca el haz de radiación solar, a una superficie de recepción pequeña, lo que aumenta el flujo de radiación. Un gran número de recolectores solares se encuentran disponibles en el mercado. A continuación se muestra una lista completa en la Tabla 2.2. (Kalogirou, 2005).

Tabla 2.2. Recolectores solares disponibles en el mercado (Kalogirou, 2005)

Mecanismo	Tipo de recolector	Absorbente tipo	Coefficiente de concentración	Rango de temperatura (°C)
Estacionario	Recolector de plato plano	Plano	1	30-80
	Tubo recolector a vacío	Plano	1	50-200
	Recolector parabólico compuesto	Tubular	1 – 5	60-240
Movimiento en un solo eje	Recolector parabólico compuesto	Tubular	5 – 15	60-300
	Reflector lineal Fresnel	Tubular	10 – 40	60-250
	Recolector cilindro-parabólico	Tubular	15 – 45	60-300
	Recolector cilindro-cilíndrico	Tubular	10 – 50	60-300
Movimiento en dos ejes	Reflector de plato parabólico	Puntual	100 – 1000	100-500
	Recolector de campo de Helióstato	Puntual	100 – 1500	150-2000

Nota: El coeficiente de concentración se define como la superficie de la abertura, dividido por el área del receptor/absorbente del recolector

### 2.3.2. Estanques solares y sus aplicaciones

Un concepto básico de un estanque solar es calentar un estanque grande de agua, de tal forma que se suprimen las pérdidas de calor, que pueden ocurrir si el agua calentada menos densa, se le permite subir a la superficie del estanque y pierde energía, donándola al medio ambiente en

forma de radiación o por convección. Como se muestra en la Figura 2.9, este objetivo puede ser alcanzado, si se crea un estancamiento de gran transparencia, como zona de aislamiento en la parte superior del estanque para contener el líquido caliente en la parte inferior del estanque. En un estanque solar no convencional, parte de la radiación solar incidente es absorbida y convertida en calor, la cual es almacenada en las regiones bajas del estanque.

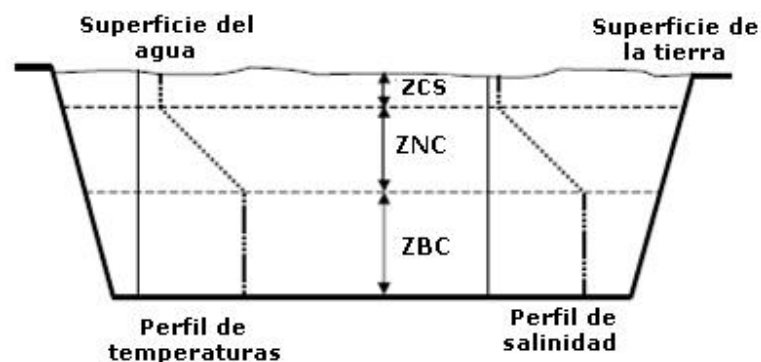


Figura 2.9. Sección vertical a través de un estanque solar con gradiente salino (Kalogirou, 2005)

Los estanques solares son ambas cosas, recolectores de energía solar y acumuladores térmicos. Lagos con gradiente salino, los cuales muestran un incremento en la temperatura de acuerdo con la profundidad, se producen naturalmente. Un estanque solar, con gradiente salino, sin convección, se compone de tres zonas:

- 1) La zona convectiva superior (ZCS), con una salinidad baja, casi constante y de una temperatura cercana a la temperatura ambiente. La ZCS, por lo general de 0.3m de espesor, que es resultado de la evaporación, inducida por el viento mezclando y lavando así la superficie. Esta zona es mantenida tan delgada como sea posible,

utilizando mallas supresoras de onda y rompe vientos, colocados cerca del estanque

- 2) La zona no convectiva (ZNC), en la cual, ambas salinidad y temperatura, se incrementan con la profundidad. El gradiente vertical de concentración de sal en la ZNC inhibe la convección y esto propicia el aislamiento térmico. El gradiente de temperatura se debe a la absorción de la radiación solar en el fondo del estanque.
- 3) La zona de baja convección (ZBC) es casi constante, con una casi relativa alta concentración salina (generalmente 20% masa) a alta temperatura. El calor es almacenado en la ZBC la cual es dimensionada para abastecer de energía continuamente durante el año. Mientras la profundidad aumenta, la capacidad térmica también se incrementa y las variaciones de la temperatura decrecen anualmente. Sin embargo, grandes profundidades incrementan el capital de inversión inicial y se requiere de tiempos más largos para la puesta en marcha.

Se han considerado muchas técnicas con el fin de suprimir la convección natural para crear un estanque solar. El método común más usado es la estratificación salina. La salinidad se incrementa con la profundidad en la ZNC hasta que la ZBC es alcanzada (ver Figura 2.9). Es aquí que la radiación solar calienta al agua con mayor concentración salina, pero a causa de esto, existe una mayor densidad, así que esta agua salada caliente no puede elevarse entre las capas de baja salinidad. Así, el calor es almacenado y es inhibido de ser transferido por convección. Se pueden utilizar sales químicamente estables, como cualquier salmuera de origen natural, para construir un estanque solar. La sal seleccionada debe de ser segura, para ser manipulada, no tóxica, barata y fácilmente disponible. No debe reducir significativamente las características de transmisión de la radiación solar del agua y su solubilidad debe ser dependiente de la

temperatura. Para la aplicación de los estanques solares, se deben considerar una serie de factores:

- Como los estanques solares son recolectores horizontales, los sitios deben de ser de baja a moderada latitud, norte y sur, por ejemplo  $\pm 40^\circ$ .
- El nivel freático debe estar por lo menos unos pocos metros por debajo del fondo del estanque, para minimizar las pérdidas de calor, ya que la conductividad térmica del suelo se aumenta en gran medida con el contenido de humedad.
- No debe contaminar los acuíferos y cualquier fuga continua de agua caliente, disminuirá la capacidad de almacenamiento térmico y su efectividad.
- Debe seleccionarse el revestimiento del estanque. Hoy en día todos los estanques utilizan uno construido en polímero reforzado de 0.75-1.25 mm de espesor, para evitar cualquier fuga térmica y/o problemas de contaminación del medio ambiente.
- Debe reducirse la velocidad del viento sobre la superficie del agua, utilizando rompe vientos (tubos de plástico, sémola de plástico, anillos independientes, etc.), minimizando así las cantidades de agua evaporadas.

Los estanques solares pueden ser usados para proveer energía para una gran variedad de aplicaciones. Los estanques más pequeños se han usado para el calentamiento del agua, mientras que los estanques más grandes, son propuestos para procesos de calentamiento industrial, generación de energía eléctrica y desalinización.

Aunque se han hecho muchos estudios sobre la factibilidad de la generación de energía eléctrica a partir de estanques solares, el único sistema operacional se encuentra en Israel. Este sistema posee un estanque de 1500m<sup>2</sup>, usado para operar una turbina-generator tipo Rankine de 6kW y otro estanque de 7000m<sup>2</sup>, que produce 150 kW de potencia pico. Ambos estanques operan a una temperatura de 90°C (Kalogirou, 2005).

Otro uso de la salida de un estanque solar con gradiente salino es la operación a baja temperatura de una unidad de destilación para desalar agua de mar. Este concepto tiene su aplicación en áreas desérticas, cercanas a los océanos. El estanque solar acoplado a la desalinización involucra el uso de la salmuera caliente del estanque, como fuente térmica para la evaporación del agua que va a ser desalada a baja presión en un evaporador de múltiple efecto. Esto representa otra solución para la salmuera de desecho a la entrada de plantas de electrodiálisis, como una fuente de energía térmica, para calentar la alimentación de la planta de electrodiálisis, lo cual puede incrementar su rendimiento (Kalogirou, 2005).

### 2.3.3. Procesos fotovoltaicos

Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico en selenio en 1839. La eficiencia de conversión de las "nuevas" celdas de silicio descubiertas en 1958 fue de 11%, aunque el costo era altamente prohibitivo (\$1000 USD/W). La primera aplicación práctica de estas celdas solares fue en el espacio, donde los costos no fueron una barrera, ya que ninguna otra fuente de potencia estaba disponible. Los procesos fotovoltaicos convierten la luz solar, la fuente de energía más abundante en el planeta, directamente en

electricidad. Los equipos fotovoltaicos no poseen partes móviles y como resultado de esto, requieren de un mantenimiento mínimo, además de una larga vida. Generan electricidad, sin la emisión de gases invernadero o cualquier otro gas y su operación es virtualmente silenciosa.

Una celda fotovoltaica está hecha por dos o más capas delgadas de material semiconductor, mayormente silicio. Cuando el silicio es expuesto a la luz, se generan cargas eléctricas y éstas son conducidas lejos a través de los contactos metálicos, como corriente directa (CD). La potencia eléctrica de una sola celda es pequeña, por lo que múltiples celdas son conectadas entre sí y encapsuladas (por lo general cubiertas por vidrio) para formar un módulo (también llamado panel). El panel fotovoltaico puede ser interconectado con cualquier número de paneles para obtener la potencia eléctrica de salida necesaria. Las celdas fotovoltaicas están fabricadas en varios materiales semiconductores, los cuales son moderadamente conductores de la electricidad. Los materiales más comúnmente usados son el silicio (Si), compuestos de sulfuro de cadmio (CdS), sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y arseniuro de galio (GaAs). Todas estas celdas están empaquetadas en módulos, los cuales producen un voltaje y corriente específicos, cuando son iluminadas. Estos módulos pueden ser conectados en serie o en paralelo, para producir voltajes o corrientes más grandes. Los sistemas fotovoltaicos pueden ser utilizados independientemente o en conjunto con otras fuentes de energía eléctrica. Aplicaciones alimentadas por sistemas fotovoltaicos son: comunicaciones (tanto en la tierra, como en el espacio), energía a distancia, seguimiento ("monitoreo") a distancia, iluminación, bombeo de agua y recarga de baterías. La capacidad mundial instalada de celdas fotovoltaicas hasta finales del año 2002 era de 2 GW (Kalogirou, 2005).



#### 2.3.4. Tipos de tecnología de celdas fotovoltaicas

Celdas de silicio mono-cristalino. Estas celdas están hechas de mono-cristales de silicio muy puro. El silicio tiene un cristal único y continuo, de estructura reticular, casi sin defectos o impurezas. La principal ventaja de las celdas hechas con mono-cristales, es su alta eficiencia, generalmente alrededor del 15%, aunque la fabricación para producir mono-cristales de silicio, requiere de un proceso complicado, resultando con un costo ligeramente superior a las otras tecnologías.

Celdas de silicio policristalino. Se producen utilizando numerosos granos de silicio mono-cristalino. En el proceso de fabricación, el silicio policristalino se funde en lingotes; estos lingotes entonces se cortan en finas obleas y se ensamblan en celdas completas. Debido al proceso de fabricación tan simple, las celdas policristalinas son más baratas de producir que las mono-cristalinas. Sin embargo, en promedio tienden a ser menos eficientes, alrededor del 12%.

Celdas de silicio amorfo. Estas celdas se componen de átomos de silicio en una delgada capa líquida y no en una estructura cristalina. El silicio amorfo absorbe luz de una manera más eficiente que el cristal de silicio, por lo que las celdas pueden ser más delgadas. Por esta razón, el silicio amorfo es también conocido como tecnología fotovoltaica de "película delgada". El silicio amorfo puede ser depositado en un amplio rango de sustratos, tanto rígidos como flexibles, lo que lo hace ideal para superficies curvas y módulos plegables. Las celdas de silicio amorfo, sin embargo, son menos eficientes que las celdas cristalinas. Generalmente, su eficiencia está alrededor de 6%, pero son fáciles de fabricar y, por lo tanto, más

baratas. Su bajo costo las hace ideales para muchas aplicaciones donde la eficiencia no es necesaria y el bajo costo es importante.

Otras películas delgadas. Un número de otros materiales promisorios, como el telurio de cadmio (CdTe) y el diseleniuro de cobre e indio (CuInSe<sub>2</sub>), están siendo utilizados para los paneles fotovoltaicos. Lo atractivo de estas tecnologías es que pueden ser fabricadas en procesos industriales relativamente baratos, en comparación del silicio cristalino; sin embargo, se caracterizan por ofrecer una mayor eficiencia que el silicio amorfo (Kalogirou, 2005).

#### 2.3.5. Paneles fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos han sido diseñados para su uso exterior en condiciones ambientales tan duras como: marinas, tropicales, ártico y desierto. La elección del material fotovoltaico activo puede tener efectos importantes en el diseño y rendimiento del sistema. Influyen tanto la composición del material como su estructura atómica. La estructura atómica de las celdas fotovoltaicas pueden ser de mono-cristal, policristal o amorfo. El material más común para los paneles fotovoltaicos es silicio cristalino, ya sea policristalino o mono-cristalino. Las celdas fotovoltaicas pueden ser frágiles y susceptibles a la corrosión por humedad o por huellas dactilares y pueden tener cables conductores delicados. Además el voltaje de servicio de una celda fotovoltaica es menor a 1 V, lo que la hace muy útil para varias aplicaciones. Dependiendo de los materiales de construcción, los módulos poseen diferentes apariencias y características de rendimiento. Además, los módulos pueden ser diseñados para situaciones específicas, tales como climas cálidos y húmedos. Hoy en día,

los paneles vienen con una variedad de figuras, como tejas para el techo, hechas con celdas fotovoltaicas de silicio amorfo.

Normalmente, las celdas son conectadas en serie a otras celdas, para producir un voltaje operacional de 14 a 16 V. Estas cadenas de células son encapsuladas con un polímero, con una cubierta frontal de cristal. Además se adjunta una caja de conexiones en la parte trasera del módulo, para el cableado cómodo con otros módulos u otro equipo eléctrico (Kalogirou, 2005).

#### 2.3.6. Aplicaciones de celdas fotovoltaicas

Los sistemas fotovoltaicos de aplicaciones autónomas (Stand-Alone, en inglés), se utilizan en áreas de difícil acceso o que no cuentan con acceso a redes eléctricas. Un sistema autónomo es independiente de las redes eléctricas, con la energía producida almacenada en baterías. Un sistema típico autónomo consiste de un módulo de celdas fotovoltaicas o módulos, baterías y un controlador de carga. Un inversor de corriente puede ser incluido en el sistema, para convertir la corriente directa (CD), generada por los módulos fotovoltaicos, a la corriente alterna (CA), requerida por las aplicaciones normales. Una fotografía de un sistema autónomo se muestra en la Figura 2.10.

Sistemas de conexión a red. Hoy en día, es de uso común el conectar sistemas de celdas fotovoltaicas, conectadas a la red eléctrica local. Esto significa que durante el día, la electricidad generada por el sistema de celdas fotovoltaicas puede ser utilizada de inmediato (lo cual es normal para los sistemas instalados en las oficinas, edificios comerciales y de otras aplicaciones industriales) o se puede vender a las empresas

suministradoras de electricidad (que es más común para sistemas domésticos, donde el ocupante puede estar fuera, durante el día).

Por la noche, cuando el sistema solar no es capaz de proveer la electricidad requerida, la electricidad puede ser readquirida de la red local. En efecto, la red actúa como un sistema de almacenamiento de energía, lo cual significa que el sistema de celdas fotovoltaicas no necesita incluir una batería de almacenamiento (Kalogirou, 2005).

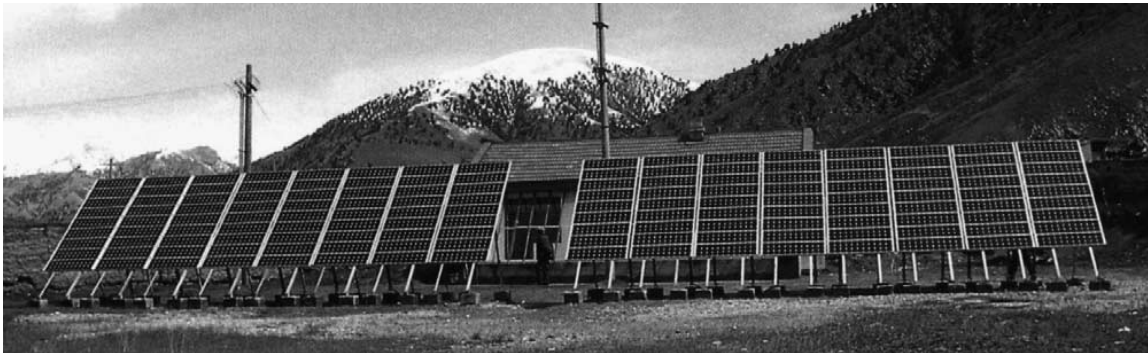


Figura 2.10. Fotografía de un sistema de celdas fotovoltaicas de aplicación autónoma (Kalogirou, 2005)

### 2.3.7. Configuración del sistema de celdas fotovoltaicas

El arreglo de un sistema de celdas fotovoltaicas consiste en un número individual de módulos fotovoltaicos, conectados entre sí, para proporcionar una salida de corriente y un voltaje adecuados. Los módulos comunes de alimentación tienen una potencia nominal de 50 a 80 W cada uno.

Como ejemplo, se tiene un sistema pequeño de 1.5 a 2 kW, el cual debe usar de 20 a 30 módulos, en un área 15 a 25 m<sup>2</sup>, dependiendo de la tecnología usada y de la orientación del arreglo, con respecto al sol. La mayoría de los módulos entregan corriente directa (CD) a unos 12 V,

mientras que la mayoría de los aparatos comunes en casa y en los procesos industriales, operan con corriente alterna a 240 o 415 V (120 V en México y los Estados Unidos). Por lo tanto, se utiliza un inversor, para convertir la corriente continúa o directa de un voltaje bajo a una corriente alterna de alto voltaje (Kalogirou, 2005).

#### 2.4. Energía eólica

El viento es generado por diferencias de presión atmosférica, producidas por la energía solar. Del total de 173,000 TW de la energía solar que alcanza la tierra, alrededor de 1200 TW (0.7%) es utilizada para impulsar el sistema de presión atmosférico. Este poder genera un reservorio de energía cinética de 750 EJ, con un tiempo de rotación de 7.4 días.

Este proceso se lleva a cabo en las capas superiores de la atmósfera, a una altura de 12 km (donde son producidas las corrientes de chorro). Si se supone que alrededor del 1% de la energía cinética se encuentra disponible en los estratos inferiores de la atmosfera o atmósfera, el potencial del viento del mundo es del orden de 10 TW. Por lo tanto, se puede concluir que, exclusivamente sobre una base teórica y sin tomar en cuenta la falta de correspondencia entre la oferta y la demanda, el viento podría proveer una cantidad de energía eléctrica igual a la demanda de electricidad del mundo actual.

Como consecuencia de la relación lineal entre la velocidad del viento y la potencia (y, por lo tanto, la energía) del viento, se debe ser cuidadoso en el uso de los datos de la velocidad media del viento (m/s), para obtener los datos de la energía eólica ( $W/m^2$ ). Circunstancias geográficas locales pueden dar lugar a vientos de meso-escala, los cuales tienen un contenido

energético muy superior, al que se podría calcular, utilizando el teorema más comúnmente utilizado de la distribución de frecuencias de velocidad (Raleigh). Haciendo concesiones para la velocidad del viento con respecto a la altura, se tiene que la energía disponible, por ejemplo, a 25 m, varía de 1.2 MWh/m<sup>2</sup>/año a 5 MWh/m<sup>2</sup>/a, en las regiones más ventosas. Es posible alcanzar altos niveles energéticos si los sitios en las colinas son utilizados o si se tienen "embudos de topografía local" atravesados por vientos hacia los valles (Kalogirou, 2005).

#### 2.4.1. Breve introducción histórica a la energía eólica

Después de la energía solar, la energía eólica es la más ampliamente usada como fuente de energía, para plantas de desalinización de pequeña capacidad de producción, principalmente a las plantas del tipo de ósmosis inversa. Existen muchas granjas que producen electricidad y algunas están conectadas a plantas de desalinización. La energía eólica es, de hecho, producida indirectamente por el sol. Su uso como energía va tan atrás como 4000 años, durante los albores de los tiempos históricos, cuando el sol también fue adorado como un Dios. Para los griegos, el viento fue el Dios Eolo, el "hombre volador". En un principio, hace 4000 años, la energía eólica fue empleada para impulsar los barcos. En la antigüedad ésta era la única energía disponible para impulsar los barcos en la cuenca del Mediterráneo y otros mares e incluso hoy en día es empleada para la navegación de pequeñas naves, por placer. Alrededor del mismo periodo aparecieron los molinos de viento, los cuales fueron utilizados principalmente para moler diversos cultivos.

Los primeros y muy primitivos molinos de viento se encontraron en Neh, al este de Irán, cerca de la frontera con Afganistán. Muchos molinos de

viento se han encontrado en Persia, India, Sumatra y Bactria. Se cree que muchos de estos molinos de viento fueron construidos por griegos, quienes inmigraron a Asia con las tropas de Alejandro Magno.

El primer documento escrito que se conoce sobre la energía eólica, está en un libro hindú llamado Arthasastra de Kautilya, escrito cerca del año 400 a.C., en el cual se sugiere el uso de molinos de viento para bombear agua. En el oeste de Europa, los molinos de viento llegaron más tarde, durante el siglo XII. La primera referencia escrita está entre los años 1040 y 1180 d.C.

El famoso matemático suizo Euler desarrolló la teoría de la rueda de viento y sus ecuaciones relacionadas, las cuales incluso hoy día, son los principios más importantes para los turbogeneradores. Los ancestros de las turbinas de eje vertical de hoy fueron desarrollados por Darrieus, pero tomó alrededor de 50 años comercializarlos, en los años 70 del siglo XX. Científicos daneses fueron los primeros en instalar las turbinas de viento, durante la segunda guerra mundial, para incrementar la capacidad eléctrica de su red. Instalaban molinos turbinas Gedser de 200 kW, las cuales estuvieron en operación hasta los años 60 del siglo XX. Granjas de viento o generadores de viento individuales son usados hoy día para producir electricidad, para unidades de desalinización por ósmosis inversa, para proveer agua potable a pequeñas comunidades, en lugares remotos o aislados, que poseen suficiente energía eólica (Kalogirou, 2005).

#### 2.4.2. Turbinas de viento

La eficiencia de conversión teórica aerodinámica máxima de la turbina de viento a partir de la energía eólica a la energía mecánica es de 59%. Sin

embargo, las propiedades fundamentales de las secciones de perfil aerodinámico moderno, más eficientes, utilizados para las hojas de las turbinas eólicas de mediano y gran tamaño, limitan la eficiencia alcanzable pico, a aproximadamente el 48% (Figura 2.11).



Figura 2.11. Foto de un parque eólico en La Ventosa, Oaxaca (Fotografía Arturo Romero-Rodríguez)

En la práctica, la necesidad de economizar en los costos de las hojas de las turbinas, tiende a conducir a la construcción de turbinas de hojas delgadas, cuando en dichas turbinas, el viento sopla rápido, los picos de eficiencia de éstas, está un poco por debajo del óptimo, en un 45%. El promedio de eficiencia anual de la mayoría de las turbinas es de la mitad de esta cifra. Esto se debe a la necesidad de apagar la turbina de viento en condiciones de vientos de baja o alta velocidad y de limitar la potencia



una vez alcanzado el nivel nominal. Por otra parte, la reducción de la eficiencia media es causada por las pérdidas en el generador (caja de cambios) y por el hecho de que la máquina no siempre funciona en su punto óptimo de trabajo.

Las turbinas de viento representan una tecnología madura para la producción de energía y se encuentran comercialmente disponibles en un amplio rango de potencia nominal (Kalogirou, 2005).

#### 2.4.3. Economía

En muchos países, la energía eólica ya es competitiva con la energía de combustibles fósiles y nucleares, cuando los costos externos/sociales son incluidos. La desventaja frecuentemente percibida de la energía eólica (y la solar) es que, al ser una fuente de energía intermitente (estocásticamente variable), no representa ningún crédito de capacidad, que hace que el recurso sea de un valor incierto de producción a gran escala de electricidad, lo cual no es verdad. Estudios de utilidad han mostrado que la energía eólica representa una cierta capacidad de crédito, a través de un factor entre 2 y 3, tan bajo como el valor para plantas de combustibles fósiles y nucleares incendiadas. Así, la energía eólica reemplaza combustibles fósiles y ahorra capacidad de otras plantas generadoras. El crecimiento de la energía eólica instalada se ve obstaculizado por una serie de barreras. Éstas son la aceptación pública, necesidad de terrenos, impacto visual, ruido, la interferencia de las telecomunicaciones y los diferentes impactos en el medio ambiente y la fauna silvestre. La mayoría de estos problemas, sin embargo, se resuelven al instalar parques eólicos marinos (Kalogirou, 2005).

#### 2.4.4. Sistema tecnológico de las turbinas de viento

La energía eólica puede competir con energía procedente de otras fuentes (carbón, petróleo y nuclear) solamente bajo condiciones favorables de viento. Además, la disminución de costos ampliará considerablemente el potencial de mercado para los sistemas de turbinas de viento.

La disminución de costos de la energía eólica puede lograrse reduciendo los gastos de inversión, introduciendo métodos de diseño fiables y la explotación de los mejores sitios de viento disponibles. La explotación de la energía eólica, hoy, usa un amplio rango de tamaño de máquinas y tipos, dando a su vez un amplio rango de diferentes resultados económicos. Existen máquinas pequeñas de hasta 300 kW y las de gran capacidad, que están en el rango de los MW. Una fotografía de un parque eólico se mostró ya en la Figura 2.12. La tecnología de las turbinas generadoras de viento, actualmente en uso, es de 25 años y la inversión hasta el momento ha sido más bien modesta, en comparación con otras fuentes de energía.

La capacidad eólica instalada en todo el mundo a finales de 2003 fue de 30.6 GW, con un incremento de alrededor del 30% al año. Casi todas las turbinas de viento fabricadas por la industria son del tipo de eje horizontal y la mayoría de ellas tienen un rotor de tres palas. Sin embargo, desde hace algunos años, se han construido máquinas con dos palas para reducir los costos y prolongar la vida útil de las mismas, haciéndolas más ligeras y más flexibles, reduciendo el número de componentes de alta tecnología (Kalogirou, 2005).

## 2.5. Energía geotérmica

Las mediciones muestran que la temperatura del suelo por debajo de una cierta profundidad, se mantiene relativamente constante durante todo el año. Esto se debe al hecho de que las fluctuaciones de la temperatura del suelo en la superficie disminuyen, a medida que la profundidad del suelo aumenta, debido a la alta inercia térmica del suelo. Propiel, un investigador polaco, presentó la medición de la distribución de las temperaturas en el suelo, para un periodo de verano de 1999 a primavera de 2001. La investigación fue llevada a cabo en Polonia. Desde el punto de vista de la distribución de las temperaturas, identificaron tres zonas de suelo:

1. Zona superficial que alcanza una profundidad de alrededor de 1 m, en la cual la temperatura del suelo es muy sensible a corto plazo, pues depende de las condiciones meteorológicas.
2. Zona poco profunda que se extiende desde la profundidad de alrededor de 1.8 m (para suelos secos y ligeros) y de 20 m (para suelos arenosos húmedos pesados), donde la temperatura del suelo es casi constante y cerca de la temperatura media del aire anual; en esta zona las distribuciones de la temperatura del suelo depende principalmente de las condiciones del ciclo del clima estacional.
3. Zona profunda, por debajo de la zona poco profunda, donde la temperatura del suelo es prácticamente constante (y muy lentamente se incrementa con la profundidad de acuerdo al gradiente geotérmico).

Existen diferentes fuentes de energía geotérmica, las cuales se pueden clasificar en función de la temperatura medida, como baja ( $<100^{\circ}\text{C}$ ), media ( $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$ ) y alta temperatura ( $>150^{\circ}\text{C}$ ). El gradiente térmico en la Tierra varía entre  $15$  y  $75^{\circ}\text{C}$  por kilómetro de profundidad. Sin embargo, el flujo de calor es anormal en las diferentes áreas continentales. Por otra parte, existen centros de calor locales, entre  $6$  y  $10$  km de profundidad, creados por la desintegración de elementos radiactivos. El costo de la energía eléctrica es generalmente competitivo, de  $0.6\text{--}2.8$  US¢/MJ ( $2\text{--}10$  US¢/kWh) y, en el año 2000, el  $0.3\%$ , es decir,  $177.5 \times 10^9$  MJ/año ( $49.3 \times 10^9$  kWh/año), de la energía eléctrica total mundial fue generada por fuentes geotérmicas. La energía geotérmica puede ser utilizada como energía de entrada para la desalinización. La energía geotérmica normalmente es extraída con intercambiadores de calor del suelo. Están fabricados de materiales de extraordinaria durabilidad, pero permiten el paso del calor a través de ellos, eficientemente. Los fabricantes de los intercambiadores de calor de suelo normalmente usan polietileno de alta densidad, el cual es un plástico duro, con juntas térmico-fusibles. Este material es garantizado hasta por 50 años. El fluido en el circuito cerrado es agua o una disolución anticongelante ambientalmente segura. Otro tipo de intercambiadores de calor utilizan tubería de cobre colocada subterráneamente. El largo del circuito depende de una serie de factores, tales como el tipo de configuración del circuito, la carga térmica, las condiciones del suelo, el clima local y muchas otras (Kalogirou, 2005).

## 2.6. Biocombustibles

En el siglo XX el énfasis importante de la investigación fue para el desarrollo del petróleo, carbón y gas natural, basado en la refinería, para la explotación barata del material fósil almacenado. Estos yacimientos son

utilizados para la producción de varios productos como el combustible, productos químicos, productos farmacéuticos, detergentes, fibras sintéticas, plásticos, plaguicidas, lubricantes, disolventes, ceras, coque, asfalto, etc., para satisfacer la demanda creciente de la población. En la actualidad, los recursos fósiles no son considerados como sustentables y son cuestionables desde el punto de vista económico, ecológico y ambiental. La quema de combustibles fósiles es un gran contribuyente al aumento del nivel de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, lo cual está directamente asociado con el calentamiento global observado en las recientes décadas. Los efectos adversos de la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) en el medio ambiente, conjuntamente con el declive de las reservas de petróleo, se han hecho realidad. Por lo tanto, la búsqueda de fuentes de energías sostenibles y ecológicamente benignas para nuestras economías industriales y las sociedades de consumo, ha adquirido un carácter urgente en los últimos años. Por consiguiente, se ha renovado el interés en la producción y uso de combustibles a partir de plantas y desperdicios orgánicos (Chisti, 2008; Garibay-Hernández et al., 2009; Naik et al., 2010).

Como respuesta a esta problemática del cambio global en los últimos años, las políticas ambientales han favorecido un incremento en el uso de biocombustibles a nivel mundial, principalmente para sustituir los combustibles fósiles utilizados en el transporte vehicular (Chisti, 2008; Garibay-Hernández et al., 2009; Loera-Quezada y Olguín, 2010).

Los biocombustibles producidos a partir de fuentes renovables, pueden ayudar a minimizar la quema de combustibles fósiles y a la producción de CO<sub>2</sub>. Los biocombustibles producidos a partir de biomasa, como plantas o desechos orgánicos podrían ayudar a reducir, tanto la dependencia del

petróleo, como la producción de  $\text{CO}_2$  a nivel mundial. Estos biocombustibles tienen el potencial de eliminar las emisiones de  $\text{CO}_2$ , debido a que las plantas están hechas de  $\text{CO}_2$  a medida que crecen (Figura 2.12). Los biocombustibles y bioproductos generados a partir de biomasa vegetal, pueden mitigar el calentamiento global. Esto es posible debido a que el  $\text{CO}_2$  liberado en la combustión es igual al  $\text{CO}_2$  secuestrado por la planta durante la fotosíntesis y, por lo tanto, no incrementa la cantidad de  $\text{CO}_2$  neto en la atmósfera (Naik et al., 2010).

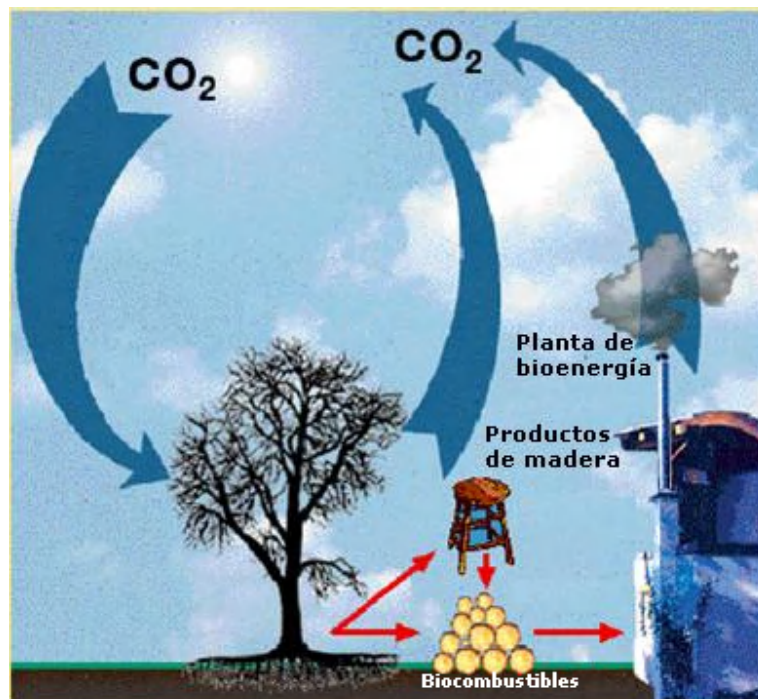


Figura 2.12. Ciclo del carbono y uso de la biomasa (Joanneum Research, 1998)

Además, la producción de biocombustibles, junto con los bioproductos puede proporcionar nuevos ingresos y oportunidades de empleo en zonas rurales. En el siglo XXI se está buscando un cambio para alternar las materias primas industriales y producir estos productos químicos mediante

procesos verdes, a partir de recursos de biomasa renovable (Naik et al., 2010).

Desde la firma del Convenio Marco de la ONU sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en Río de Janeiro en 1992, ha habido una intensificación del interés. Entre estas fuentes de energía renovable basados en la energía solar, la energía a partir de la biomasa se considera una de las más prometedoras para sustituir algunos de los combustibles fósiles cuya combustión es, por mucho, la principal fuente de gases de tipo invernadero de origen antropogénicos, especialmente el CO<sub>2</sub> (Joanneum Research, 1998).

La inclusión de las fuentes biológicas y los sumideros biológicos para el conteo de las emisiones nacionales de los GEI (Artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo de Kioto) ha señalado otro papel potencial de la biomasa en la mitigación de los GEI, el almacenamiento a largo plazo del carbono en los bosques, en otras tierras y en productos de madera. Aunque muchos sistemas de contabilización no han sido especificados, se ha dejado claro que la biomasa puede contribuir sustancialmente a la mitigación de los GEI, a través de la reducción de emisiones de carbón fósil y del almacenamiento a largo plazo del carbón en la biomasa (Joanneum Research, 1998; Ortiz et al., 2006).

#### 2.6.1. La biomasa como materia prima múltiple para la bio-refinería

La biomasa procedente de árboles, residuos agroforestales, pastos, vegetales, plantas acuáticas y cultivos, son versátiles e importantes

materiales de alimentación renovables para la industria química, como se muestra en la Figura 2.13.

A través del proceso de la fotosíntesis, las plantas convierten el dióxido de carbono y el agua en metabolitos bioquímicos, primario y secundario. Ambos son sustancias químicas importantes industrialmente. Los metabolitos primarios son los hidratos de carbono o carbohidratos como se les conoce coloquialmente (azúcar simple, celulosa, hemicelulosa, almidón, etc.) y lignina, también llamada lignocelulosa, en altos volúmenes de la biomasa.

La biomasa lignocelulosa, se puede convertir en biocombustible. Los metabolitos secundarios son productos bioquímicos de gran valor, tales como gomas, resinas, caucho, ceras terpenos, esteroides, triglicéridos, taninos, ácidos vegetales, alcaloides, etc., que están presentes en las plantas en bajos volúmenes.

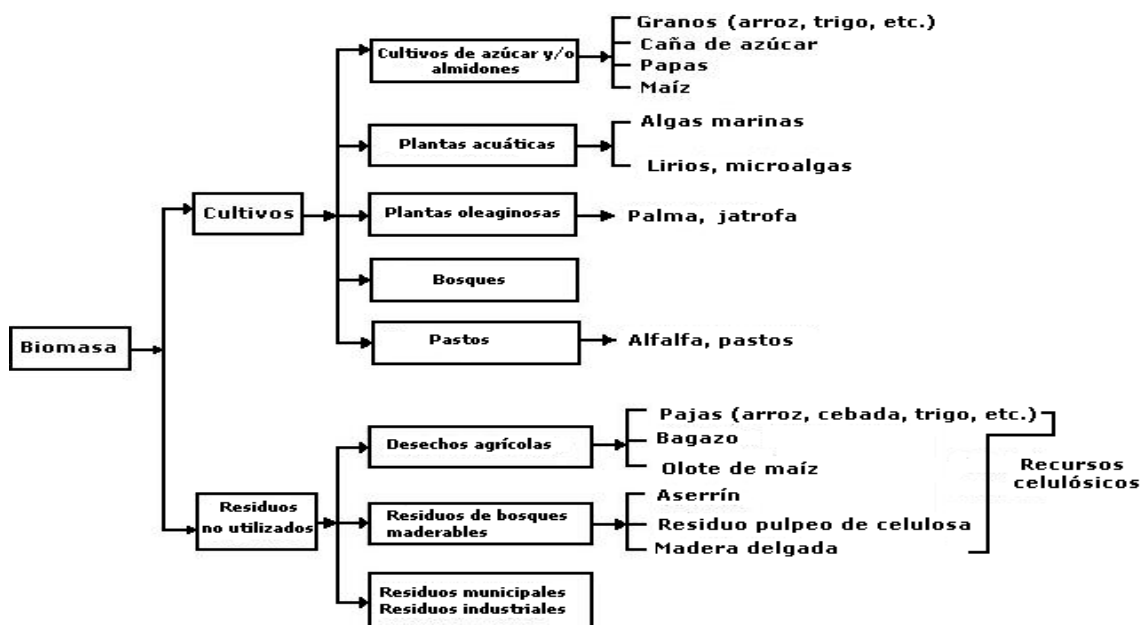


Figura 2.13. Biomasa como materia renovable de alimentación para las bio-refinerías (Naik et al., 2010)



Los metabolitos secundarios pueden ser utilizados para la producción de productos químicos de alto valor, tales como saborizantes, forrajes, productos farmacéuticos, cosmetológicos y nutriólogicos, utilizando una técnica de procesamiento integrado.

La mejora del uso de la biomasa requiere de un esfuerzo tremendo para desarrollar nuevos sistemas para la producción, conversión y utilización de los productos de base biológica, llevada a cabo de manera eficaz y en armonía con la naturaleza. Sin embargo, el éxito depende de hasta qué punto es posible cambiar gradualmente la producción actual de bienes y servicios a partir de materias primas fósiles a materias primas biológicas.

Los biocombustibles de segunda generación, procedentes de semillas oleaginosas no comestibles, tales como *Jatropha curcas*, mostaza con alto contenido erúcico, haya índico (*Pongamia pinnata*), semillas de canola verde y micro-algas, etc., pueden ser utilizadas para la producción de biocombustibles incluyendo el diesel verde y que, por su biomasa acuática, pueden ser utilizados para la producción de bioetanol y biodiesel (Naik et al., 2010).

#### 2.6.2. Concepto del sistema de bio-refinería

De acuerdo con el Laboratorio Nacional de Energía Renovable, una bio-refinería es un proceso que facilita e integra la conversión de la biomasa y equipos para producir biocombustibles, productos químicos y energía a partir de la biomasa. La meta de la bio-refinería es transformar toda la biomasa en productos útiles, empleando tecnologías adecuadas. La conversión de la biomasa requiere de un profundo entendimiento para las

tecnologías de producción, de química, de tecnologías para la conversión de la biomasa, que sean económicos y que minimicen todos los problemas ambientales relacionados con esa producción.

Los primeros documentos clasifican tres tipos de bio-refinerías, basadas en los materiales alimentados, flexibilidades de proceso y productos:

1. El primer tipo tiene capacidades de proceso fijas y utiliza granos secos, como materia de alimentación para producir etanol, destilado de la fermentación de los azúcares producidos a partir de los almidones de los granos secos (DGS), generando productos secundarios y dióxido de carbono.
2. El segundo tipo de bio-refinería utiliza la misma materia prima como alimentación, pero tiene más flexibilidad en su proceso, en comparación con el primer tipo. Este tipo produce almidón, jarabe de fructosa, etanol (DGS), dióxido de carbono y aceite de maíz.
3. El tercer tipo de bio-refinería es más avanzado y puede utilizar una mezcla de biomasa como materia prima alimentada y producir diferentes productos, utilizando una combinación de tecnologías. Éstas se basan en ambos principios de producción, obtención de productos de alto valor y bajo volumen (AVBV) y productos de bajo valor y alto volumen (BVAV). Las refinerías del tercer tipo a su vez se encuentran clasificadas en tres categorías, debido a la clase de biomasa empleada y son: todos los cultivos verdes y lignocelulósicos.

El desarrollo de las bio-refinerías, sin embargo, no es en el sentido de copiar a una refinería petrolera. Es necesario producir una extensa variedad de bioproductos, con una eficiente serie de sistemas. Cada bio-

refinería refina y convierte su materia prima biológica correspondiente, en una gran cantidad de productos valiosos (Naik et al., 2010).

### 2.6.3. Biocombustibles de la primera generación

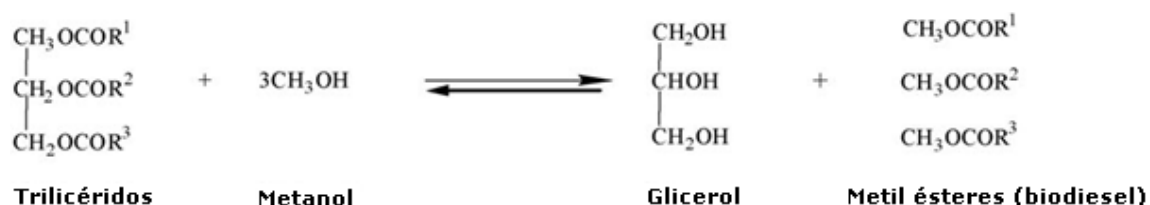
La dramática alza de precios del petróleo vista en la última década también ha permitido que los biocombustibles líquidos comiencen a ser competitivos de acuerdo con el costo con los combustibles a base de petróleo incluyendo su transporte y esto ha contribuido a una oleada de investigación y producción alrededor del mundo. Los tres principales tipos de biocombustibles de la primera generación usados comercialmente son biodiesel (bio-ésteres), etanol y biogás, del cual se ha producido grandes cantidades en todo el mundo y del cual el proceso de producción es considerado "tecnología establecida". El biodiesel es un sustituto del diesel y es producido mediante la transesterificación de aceites vegetales, aceites residuales y grasas, con modificaciones mínimas a los motores; el cual puede utilizarse como sustituto total también. El bioetanol es un sustituto de la gasolina y es un sustituto total de la gasolina en los vehículos llamados "de combustible flexible". El bioetanol es derivado del azúcar o almidón a través de la fermentación. El bioetanol puede utilizarse también como materia prima para producir éter metilterbutílico (EMTB) el cual se mezcla más fácilmente con la gasolina. El biogás o biometano es un combustible que puede ser usado en vehículos a gasolina con pequeñas modificaciones. Puede ser producido mediante la digestión o degradación anaerobia de estiércol líquido u otros materiales digeribles. En la actualidad, biodiesel, bioetanol y biogás son producidos a partir de productos básicos, que también son utilizados para alimentos. La demanda de aceites comestibles ha presentado un incremento lo cual dificulta el uso de los cultivos comestibles para la producción de biocombustibles. Existen

algunos cultivos con gran potencial para la producción de biodiesel, los cuales pueden tomarse como cultivos industriales, utilizando tierras no productivas. En ese respecto, un ejemplo es el uso de *Jatropha* en la India, intentando contribuir a la sustentabilidad de la producción de biodiesel y, paralelamente, el uso de sus residuos sólidos, para la producción de otros compuestos químicos valiosos y la utilización de su biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles de segunda generación (Naik et al., 2010).

#### 2.6.4. Procesos de conversión para los combustibles de la primera generación

##### 2.6.4.1. Transesterificación

Los aceites vegetales a base de metil-ésteres (AGME) de ácidos grasos, popularmente conocido como biodiesel, está ganando importancia como un combustible sustituto ecológico del diesel. El biodiesel es un diesel alternativo, hecho a partir de fuentes biológicas renovables, tales como aceites vegetales y grasas animales, por la reacción química del aceite o grasa con alcohol, en la presencia de catalizadores homogéneos y heterogéneos. El producto de dicha reacción es una mezcla de metil ésteres, los cuales son conocidos como biodiesel. Otro producto es el glicerol, el cual es un co-producto de alto valor:



Ecuación 2-1. Proceso de transesterificación (alcohólisis) (Naik et al., 2010)

#### 2.6.4.2. Proceso de conversión del etanol

Una amplia variedad de materias primas conteniendo carbohidratos cuyo monómero es la glucosa han sido usados para la producción de etanol por el proceso de fermentación. Esta materia prima se ha clasificado en tres categorías:

- a) Cultivos con altos contenidos de azúcares: Azúcar de caña, betabel, frutas, jugo de palma, etc.
- b) Cultivos con altos contenidos de almidón (polímero de glucosa): Semillas como el trigo, cebada, arroz, sorgo dulce, maíz, etc., raíces de plantas como la papa, el camote, la tapioca, etc.
- c) Biomasa de celulosa: Madera y desperdicios de madera, cedro, pino, etc., residuos o esquilmos agrícolas, fibras.

El alcohol producido a partir de cultivos comestibles, tales como el maíz, trigo, cebada, sorgo dulce, es llamado alcohol de grano, mientras que el etanol producido a partir de residuos agrícolas como la biomasa de lignocelulosa (paja de arroz, paja de trigo), pastos (pasto aguja), es conocido como etanol de biomasa o bioetanol. Ambos tipos de alcohol son producidos a través de un proceso bioquímico, la fermentación.

La estructura química del almidón, consiste de una cadena larga polimérica de glucosa. El almidón macromolecular no puede ser fermentado directamente a etanol por la tecnología convencional de fermentación. La estructura macromolecular debe ser rota primero en una cadena simple y pequeña de glucosa. En este proceso, el almidón alimentado es molido y mezclado con agua, para producir un puré, el cual contiene frecuentemente de 15 a 20% de almidón. El puré es cocinado a su punto

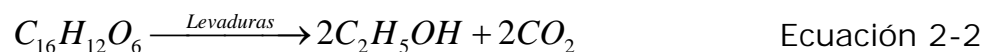
de ebullición o por encima de éste. Posteriormente, es tratado con dos enzimas. La primera enzima hidroliza las moléculas de almidón a cadenas cortas de glucosa. La primera enzima se conoce como amilasa. La amilasa libera oligosacáridos por un proceso de licuefacción. Los oligosacáridos son hidrolizados por una segunda enzima, como la pululanasa o la glucoamilasa, en un proceso conocido como sacarificación. La sacarificación convierte todos los oligosacáridos a glucosa, maltosa e isomaltosa. El puré se enfría a 30°C y se adicionan las levaduras para que realicen la fermentación (Naik et al., 2010).

#### 2.6.4.3. Proceso de fermentación

El término de fermentación fue definido por Louis Pasteur como el proceso metabólico en el cual la glucosa es transformada por *Saccharomyces cerevisiae*, la levadura cervecera, en etanol y CO<sub>2</sub>, debido a la actividad de enzimas secretadas (Ecuación 2-2). Posteriormente, por extensión muchos ingenieros denominaron a las biorreacciones fermentaciones, de manera poco correcta. Incluso, plantearon que esas biorreacciones aerobias y anaerobias eran fermentaciones, lo cual es totalmente incorrecto porque la fermentación que produce etanol DEBE SER anaerobia. Por ello, actualmente, los ingenieros bioquímicos denominan a estas transformaciones biorreacciones no fermentaciones. Pueden depender de la presencia del oxígeno molecular y entonces se les denomina biorreacciones aerobias o de compuestos químicos que sustituyan al oxígeno molecular, como los nitratos, sulfatos, etc., denominándolas anaerobias o anóxicas. Existen cientos de microorganismos en la naturaleza capaces de proveer cambios bioquímicos. Solamente las levaduras son capaces de producir etanol a partir de glucosa.

Los microorganismos empleados para la producción de etanol dependiendo de la materia prima, se clasifican en tres categorías: Las levaduras (especies *saccharomyces*), algunas bacterias (especie *zymomonas*) y algunos mohos (*micelium*) que empleando otra fuente carbonosa pueden producirlo.

Estos microorganismos se encuentran en la naturaleza y son muy selectivos en sus características biodegradativas. Algunos de ellos degradan específicamente hexosas o pentosas o una mezcla de ambas. Se han hecho esfuerzos por parte de varios investigadores para producir el microorganismo ideal, que sea capaz de producir etanol a partir de cualquier compuesto carbonoso sin éxito hasta el momento.



El almidón es un polímero de la glucosa, el cual no puede ser degradado directamente para transformarlo en etanol, por medio de la tecnología convencional de la fermentación. Las cadenas de almidón deben ser rotas y transformadas en moléculas de glucosa que, una vez tratadas con levaduras, como las especies *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces uvarum*, *Saccharomyces pombe* y *Kluyveromyces*. Bajo condiciones anaerobias, las levaduras metabolizan la glucosa a etanol. Teóricamente la eficiencia máxima de conversión de la glucosa a etanol es de 51% en base másica, la cual viene del cálculo estequiométrico de 2 x (masa<sup>2</sup> molecular

---

<sup>2</sup> El peso, en física, es la medida de la fuerza que ejerce la gravedad sobre la masa de un cuerpo. Normalmente, se considera respecto de la fuerza de gravedad terrestre. El peso depende de la intensidad del campo gravitatorio, de la posición relativa de los cuerpos y de la masa de los mismos. La masa es una propiedad característica de los cuerpos: la cantidad de materia y no depende de la intensidad del campo gravitatorio, ni de su posición en el espacio. Por ejemplo, una persona de 60 kg de masa, pesa 60 kg-fuerza en la superficie de la Tierra; pero, la misma persona, en la superficie de la Luna pesaría sólo unos 10 kg-fuerza; sin embargo, su masa seguirá siendo de 60 kg. Las unidades de peso y masa tienen una larga historia compartida, en parte porque su

del etanol)/(masa molecular de la glucosa) x100 =  $(2 \times 46)/(180) \times 100 = 51$ . No obstante, algo de la glucosa es usado por las levaduras para producir masa celular y metabolizar otros productos además del etanol, lo cual reduce la eficiencia de conversión, de su máximo teórico. En la práctica, sólo se convierte entre el 40 y 48% de la glucosa a etanol, con un 46% de eficiencia de fermentación. Por ejemplo, de 1000 kg de azúcar fermentable (glucosa), se pueden producir 583 litros de etanol puro (con una densidad específica a 20°C de 0.789 g/mL) (Naik et al., 2010).

#### 2.6.5. Digestión o degradación anaerobia de la biomasa

La digestión o degradación anaerobia de desperdicios sólidos es un proceso muy similar al utilizado en la producción de biogás. Bacterias anaerobias en ausencia de oxígeno molecular se utilizan para romper la materia carbonosa de la biomasa, dando como resultado una mezcla de gases, especialmente de metano y dióxido de carbono. La mezcla típica es entre 60 y 70% de metano y 30% de dióxido de carbono. El gas posee un valor calorífico de 24200-28000 kJ/m<sup>3</sup> (650–750 BTU/ft<sup>3</sup>). Debido al incremento en el costo de la energía, la digestión o degradación anaerobia es una alternativa atractiva para la producción de combustibles y biofertilizantes para el cultivo orgánico. Los digestores o reactores anaerobios en los que puede degradarse la basura biodegradable son una fuente potencial en la producción de metano a partir de desechos sólidos (Hernández-Cano, 2004). La digestión de la parte biodegradable de los desechos sólidos municipales (compuestos mayormente por biomasa y desechos biológicos) produce metano y dióxido de carbono, en la misma cantidad aproximadamente. Estos dos componentes principales, junto con

---

diferencia no fue bien entendida cuando dichas unidades comenzaron a utilizarse. Cotidianamente, el término "peso" se utiliza a menudo erróneamente como sinónimo de masa. La unidad de masa del [SI](#) es el kilogramo, kg



el nitrógeno atmosférico, oxígeno y trazas de compuestos orgánicos son conocidos como “gas de tiradero” y es el causante de muchos incendios y explosiones de estos sitios de disposición de residuos. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (*EPA, Environmental Protection Agency*, por sus siglas en inglés), por cada kg de basura orgánica biodegradable se producen 0.52 a 0.62 m<sup>3</sup> (cada libra produce de 10 a 12 ft<sup>3</sup> de gas). El gas proveniente de los tiraderos de basura es muy similar al gas natural de baja calidad, el cual requiere la remoción de los compuestos orgánicos volátiles y del CO<sub>2</sub> para obtener un gas con valor comercial (Figura 2.14). Para remover los contaminantes tóxicos y otros del gas de tiraderos se requiere de una tecnología de separación eficiente para el uso de este sustituto del gas natural. Los contaminantes más comunes son el compuesto altamente tóxico cloruro de vinilo y el ácido sulfhídrico.

El uso convencional de gas de tiraderos, como energético incluye la generación de electricidad, utilizando un motor de combustión interna, una turbina, una microturbina, su uso directo en un calentador, secador, horno, invernadero y en co-generación. La investigación reciente sobre gas de tiradero, se centra en la generación de combustibles líquidos, en lugar de los combustibles gaseosos, provenientes de los digestores, debido al alto costo asociado a la purificación del metano y su recolección. La producción de metanol líquido tiene muchas ventajas. La primera es que su contenido de azufre es bajo, tan bajo como el requerido para su uso comercial. La segunda es que los combustibles líquidos son mucho más fáciles de manipular, almacenar y transportar que los gaseosos. Utilizando desechos separados de biomasa lignocelulósica, a través del proceso de digestión, se producirán combustibles líquidos y biofertilizantes para la producción agrícola (evitando que se contaminen con residuos metálicos, por ejemplo) (Naik et al., 2010).

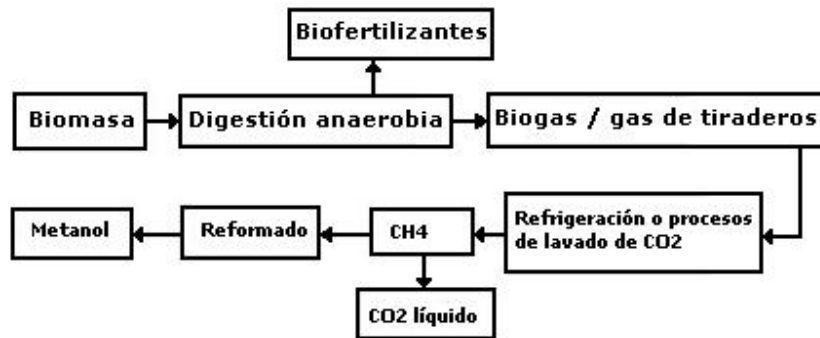


Figura 2.14. Digestión o degradación anaerobia (Naik et al., 2010)

#### 2.6.6. Bio-refinería para toda clase de cultivos

Una bio-refinería para todo tipo de cultivos, procesa y consume todo el cultivo para obtener productos útiles. Los materiales de alimentación, tales como semillas oleaginosas, pueden ser utilizadas como alimentación para las operaciones unitarias de una bio-refinería para todo tipo de cultivos. EL proceso de conversión de la biomasa en energía se inicia por la separación de la biomasa en sus diferentes componentes, los cuales son tratados separadamente. El aceite extraído actúa como el material inicial para la elaboración de biodiesel o puede ir bajo tratamiento químico y modificarlo, para producir productos oleoquímicos, mientras que los residuos del aceite, después de la purificación, pueden ser utilizados como materiales de alimentación para la síntesis de productos químicos valiosos o para gasificación. La biomasa de lignocelulosa, producida durante el proceso de refinación, puede actuar como material inicial para la bio-refinación de la lignocelulosa, para la producción de gas de síntesis, mientras que el gas de síntesis, puede ser utilizado como materia prima en la producción de combustibles y metanol usando el método de Fischer-Tropsh (Manahan et al., 2007; Naik et al., 2010).

### 2.6.7. Oleoquímicos

Se refieren como oleoquímicos a todos los productos químicos derivados de aceites naturales y grasas, tanto de plantas como de animales. Básicamente, se refieren como oleoquímicos a los ácidos grasos y a los derivados del glicerol, a partir de la ruptura de las estructuras de triglicéridos de aceites y grasas. Además, también incluye a todos los derivados de la subsiguiente modificación del grupo ácido carboxilo o de los ácidos grasos, ya sea por medios químicos o biológicos y otros compuestos obtenidos, como resultado de las reacciones de estos derivados. Los oleoquímicos son comúnmente categorizados en oleoquímicos básicos, tales como los ácidos grasos, metil-ésteres grasos, alcoholes grasos, aminas grasas y glicerol. De hecho, hasta la década de los años 80 del siglo XX, casi el 95% de los aceites naturales fueron usados en alimentos y solamente un pequeño porcentaje fue usado en aplicaciones que no eran alimentos, tales como la elaboración de jabones y aceites secantes.

Fue solamente hasta después de los años 80 del siglo XX, que los oleoquímicos encontraron un uso más amplio en ambas industrias, de alimentos y no alimentarias o aplicaciones técnicas, que previamente fueron dominio de los "químicos sintéticos" derivados del petróleo, mejor conocidos como petroquímicos. En este momento, los oleoquímicos son utilizados en la producción de alimentos y, especialmente las grasas, de jabones y detergentes, cosméticos y productos del cuidado personal, lubricantes y grasas, aceite de cocina, revestimientos de superficies y polímeros y biocombustibles. En teoría, los oleoquímicos, pueden reemplazar a los petroquímicos, en todas sus aplicaciones ¿Por qué oleoquímicos? La razón es simple, primeramente los oleoquímicos se

derivan de recursos renovables, comparados con los petroquímicos, que son obtenidos a partir del agotable o no renovable petróleo. Segundo, los productos derivados de los oleoquímicos son más fácilmente biodegradables y, por lo tanto, no son una amenaza para el medio ambiente. Tercero, los productos derivados del petróleo usan más energía y producen más emisiones de contaminantes tales como NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO e hidrocarburos (Naik et al., 2010).

#### 2.6.8. Pasta desengrasada

La biomasa utilizada para la producción de biodiesel, puede generar millones de toneladas de pasta desengrasada (que puede llegar a contener cantidades importantes de proteína residual). El uso de las proteínas con aplicaciones no alimenticias es actualmente más que limitada, comparada con la utilización de los ácidos grasos derivados. Las proteínas comestibles pueden ser utilizadas para producción de amino-ácidos esenciales para la alimentación animal y para consumo humano.

Algunas de las semillas no comestibles, como la *Jatropha*, el "neem" (o nim, *Azadirachta indica*, es un árbol originario de la India, que se encuentra verde durante todo el año), la "karanja" (*Pongamia Glabra*, otro árbol de la India ampliamente distribuido por el Asia tropical. El árbol es resistente a la sequía y otros problemas. Crece a una altura de 1 m. El aceite de "Karanja" o "Pongam" se usa en farmacia y en la agricultura. Como el aceite de nim, es excelente para la piel, el cabello y para producir jabones, cremas, lociones y otros productos para la piel y el cabello), etc., podrían ser utilizadas para la producción de bioplaguicidas y amino-ácidos para uso no comestible (Naik et al., 2010).

## 2.7. Biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles de segunda generación son producidos a partir de biomasa en una manera más sustentable, en términos de su impacto en concentraciones de CO<sub>2</sub>. En el contexto de la producción de biocombustibles, el término "biomasa de planta", se refiere principalmente a los materiales lignocelulósicos, ya que la mayoría de estos materiales son baratos, abundantes y provienen de plantas no alimenticias. En la actualidad, la producción de tales combustibles no tienen un costo efectivo, porque existen una serie de barreras tecnológicas, que es preciso superar antes de que su potencial pueda ser aprovechado. La biomasa representa uno de los recursos biológicos más abundantes y subutilizados en el planeta y es visto como muy prometedor, como fuente de materiales para la producción de combustibles y otras materias primas. En su forma básica, la biomasa vegetal, simplemente se puede quemar para producir calor o electricidad. Sin embargo, hay un gran potencial en el uso de biomasa, para la producción de biocombustibles líquidos. La biomasa se compone principalmente de las paredes celulares vegetales, las cuales se componen normalmente de 75% de polisacáridos. Estos polisacáridos representan un potencial y valioso grupo de azúcares e incluso en los cultivos comestibles tradicionales, como el trigo (*Triticum aestivum*) hay tanta azúcar invertida en los tallos, como en el almidón de los granos.

Hasta la fecha, el potencial de los residuos de muchos cultivos, como la paja y virutas de madera, para abastecer la producción de biocombustibles no se ha aprovechado. Sin embargo, la producción de biocombustibles a partir de subproductos agrícolas, sólo podría satisfacer una parte de la creciente demanda de combustibles líquidos. Esto ha generado gran

interés en hacer uso de la biomasa de cultivos, como materia prima para la producción de biocombustibles.

Los materiales lignocelulósicos son un conjunto de materias primas para su uso en la producción de biocombustibles avanzados, los cuales se pueden obtener ya sea a través de la hidrólisis y la fermentación (es decir bioetanol) o a través de la gasificación (es decir biodiesel por el método Fischer-Tropsch, Bio-DME y bio-SNG). Los recursos típicos, para la producción de estos combustibles son los cultivos forestales de rotación corta (álamos, sauces y eucaliptos), las hierbas perenes (Miscanthus, pasto aguja y caña de alpiste) y residuos de la industria maderera, la silvicultura y la agricultura. Los biocombustibles avanzados, también son conocidos como biocombustibles de segunda generación, son combustibles basados en carbono, que se obtienen mediante procesos innovadores, utilizando principalmente materiales lignocelulósicos, para los que su utilización comercial aún está en desarrollo. El bioetanol (avanzado) es un sustituto de la gasolina. Como ya se mencionó, es un sustituto total de la gasolina en los vehículos llamados "Flexi-fuel" (Naik et al., 2010).

#### 2.7.1. Procesos de conversión para los biocombustibles de segunda generación

Hay dos rutas disponibles para la producción de biocombustibles líquidos a partir de la biomasa; una implica un proceso termoquímico y la otra un proceso bioquímico. El proceso termoquímico se define como la conversión de la biomasa, en una gama de productos, mediante el deterioro térmico y una transformación química que esencialmente consiste en calentar la biomasa en presencia de diferentes concentraciones de oxígeno. La clara ventaja de la transformación termoquímica es que, básicamente, puede

convertir todos los componentes orgánicos de la biomasa en comparación con el proceso bioquímico que se centra principalmente en los polisacáridos (Naik et al., 2010).

### 2.7.2. Conversión física

Extracción mecánica. Los aceites vegetales crudos son recuperados de las semillas oleaginosas, mediante la aplicación de presión mecánica, con una prensa de tornillo. La prensa de tornillo se puede utilizar de dos formas: Pre-prensado y prensado completo. En el pre-prensado, sólo una parte del aceite es recuperado quedando una pasta o torta parcialmente desengrasada (torta con 18-20% de aceite). Ésta es tratada más adelante con una extracción con disolventes. La combinación de pre-prensado y extracción con disolventes es comúnmente aplicada a las semillas oleaginosas, con un alto contenido de aceite (30-40%). El prensado completo requiere de 95000 kPa, para exprimir tanto aceite como sea posible, preferentemente hasta 3-5% de grasa residual en la pasta que puede emplearse para materiales de uso animal. El prensado completo también puede llevarse a cabo en una pre-prensa y una prensa final.

Briquetas de biomasa. Los residuos agrícolas, forestales y otros materiales de desperdicio de la biomasa son a menudo difíciles de utilizar como biocombustibles, porque son voluminosos y de características diferentes. Esto puede solucionarse al densificar dichos residuos, en formas compactas y regulares. Durante la densificación, la biomasa es colocada en cámaras de compresión con prensas. Hay dos métodos principales para aumentar la densidad; es decir, presionando y macerando. En algún momento estos dos procesos se combinan. Al presionar existe una estrecha correlación entre el incremento de la

densidad y el incremento de la presión aplicada en la etapa inicial de la compresión. La velocidad del incremento de la densidad cae rápidamente, a medida que la densidad del material prensado se acerca a la densidad del agua. No existe una correlación tan estrecha de los cambios de densidad y el grado de maceración, como pueden ser las operaciones unitarias de picar, moler y pulverizar. Un corte grueso de algunos materiales, puede ser tan efectivo como un molido ultrafino. Por ejemplo, las ramas de los árboles sometidas a una reducción excesiva de volumen, cuando son reducidas a astillas, pero con una molienda fina proporciona poca o ninguna reducción adicional del volumen.

Destilación. Es el método más importante para la extracción de aceites esenciales y se basa en la evaporación de los compuestos más volátiles de una mezcla, para separarlos de la parte no volátil. Las plantas son trituradas para fomentar la liberación de sus aceites. Los vapores son capturados y se permite posteriormente su condensación. Un proceso de tecnología química más elevado es la destilación molecular. Se utiliza en la producción de fragancias, que no pueden ser destiladas por métodos convencionales (Naik et al., 2010).

### 2.7.3. Conversión termoquímica

La biomasa puede ser convertida en energía, principalmente por dos procesos: Termoquímico o biológico. El proceso de conversión termoquímica incluye la combustión directa, gasificación, licuefacción y pirólisis. Cuando la biomasa es calentada, en condiciones deficientes de oxígeno, se genera el gas de síntesis, el cual consiste primordialmente en hidrógeno y monóxido de carbono. Este gas, conocido por su acrónimo en inglés como "syngas", puede ser quemado directamente o procesado



posteriormente, para producir otros productos gaseosos o líquidos. En este sentido, la conversión térmica o química de la biomasa es muy similar a la del carbón (Manahan et al., 2007).

Combustión directa. La combustión es la reacción química entre un combustible y el oxígeno, la cual generalmente es llevada a cabo en el aire y es más comúnmente conocida como la "quemada". Los productos son el dióxido de carbono y agua, con la liberación de calor. Cuando la combustión directa de biomasa se lleva a cabo en un área bien ventilada, la biomasa quemada es utilizada para estufas y calderas domésticas, puede ser un sustituto de la combustión de combustibles fósiles convencionales. Las emisiones de azufre (0.05-0.2% en masa) son mucho más bajas y la formación de partículas puede ser controlada en la fuente.

Gasificación. En general, la gasificación no es una nueva tecnología. Sin embargo, su uso para la conversión de la biomasa en un combustible viable sólo ha sido investigado por los últimos treinta años. El "syngas" puede ser producido a partir de biomasa por dos vías, catalítica y no catalítica. El proceso no catalítico requiere una temperatura de operación muy alta, tan alta como 1300°C, mientras que en el proceso catalítico se utilizan temperaturas de operación sustancialmente más bajas. Con más avances en la catálisis, los requerimientos de temperatura se esperan por debajo de los valores actuales de 900°C. El paso para la gasificación implica hacer reaccionar la biomasa con el aire, oxígeno y/o vapor, para producir una mezcla gaseosa de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>, bien conocida como productora de gas de síntesis o "*syngas*", en función de las proporciones relativas de los gases componentes. La mezcla productora de gas es primeramente útil como combustible para la generación de energía estacionaria, mientras que el gas de síntesis puede ser y es en la

actualidad usado para fabricar una gama de combustibles y productos químicos intermedios (Manahan et al., 2007). Para los combustibles de transporte, las principales rutas derivadas del "syngas", para la producción de combustibles son: el hidrógeno por la reacción agua-gas-con modificaciones, los hidrocarburos por la síntesis de Fischer-Tropsch o la síntesis de metanol, seguida por una reacción para producir hidrocarburos oxigenados o combustibles líquidos. La reacción agua-gas con modificaciones utiliza CO y H<sub>2</sub>O para producir H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Este último puede ser utilizado para mejorar la producción de gas de síntesis, enriqueciendo el contenido de H<sub>2</sub> o para producir H<sub>2</sub> como producto final en sí mismo. La síntesis de Fischer-Tropsch ha sido utilizada desde los años 30 del siglo XX para producir hidrocarburos combustibles a partir de "syngas". La producción de metanol a partir de "syngas", se ha practicado desde los años 20 del siglo XX (Naik et al., 2010).

Licuefacción. La licuefacción de la biomasa ha sido investigada en presencia de soluciones alcalinas, glicerina, propanol, butanol o licuefacción directa. La licuefacción normalmente produce aceites insolubles en agua, de alta viscosidad y por lo general requieren disolventes, reducción de gases como el CO o H<sub>2</sub> y/o la presencia de catalizadores agregados a la biomasa. En el campo de la conversión termoquímica de la biomasa, los materiales lignocelulósicos se pueden convertir directamente en líquidos similares a los aceites combustibles pesados, por la reacción con el gas de síntesis en la presencia de catalizadores adecuados. La licuefacción acuosa de la lignocelulosa implica la segregación de la ultraestructura de madera, seguido por la polimerización parcial de los compuestos constitutivos. En la licuefacción alcalina, la desoxigenación ocurre a través de la descarboxilación del éster formado, por el grupo hidroxilo y el ion formado derivado del carbonato.

Sales alcalinas como el carbonato de sodio y el carbonato de potasio, pueden actuar como catalizadores, para la hidrólisis de las macromoléculas como la celulosa y la hemicelulosa, en fragmentos más pequeños. El aceite pesado obtenido del proceso de licuefacción, es una masa viscosa alquitranada, que a veces causa problemas en el manejo. Por esta razón, es necesario añadir algunos disolventes orgánicos (propanol, butanol, acetona, metil-etil cetona, acetato de etilo) al sistema de reacción. Todos estos disolventes, con excepción del acetato de etilo, se pueden producir a partir de la madera durante la licuefacción. Esto sugiere que el disolvente puede ser recuperado para su reutilización. El rendimiento de la producción de hidrocarburos reportado es mayor en la licuefacción acuosa catalítica que con la licuefacción acuosa no catalítica. El rendimiento promedio de la producción de hidrocarburos es de alrededor de 31% en el proceso no catalítico y de 63% en el proceso catalítico. En el proceso de licuefacción, la cantidad de residuos sólidos, se incrementa en proporción al contenido de lignina. La lignina es una macromolécula constituida por alquifenoles y tiene una estructura compleja tridimensional. Es generalmente aceptado que los radicales libres son fenoxilos, formados por la descomposición térmica de la lignina, por arriba de los 525 K y los radicales tienen una tendencia al azar, para formar residuos sólidos a través de la condensación y polimerización (Morton et al., 1996). El bio-aceite obtenido de la madera secada al aire, debido a la licuefacción a alta presión, forma una mezcla compleja de compuestos orgánicos volátiles ácidos, alcoholes, aldehídos, éteres, ésteres, cetonas y compuestos no volátiles. Estos aceites se pueden mejorar catalíticamente para producir un producto destilado orgánico, el cual sea rico en hidrocarburos y productos químicos útiles. En comparación con el bio-aceite obtenido por el método de la pirólisis rápida, su rendimiento frente a los procesos de licuefacción a alta presión, es mucho menor y altamente viscosa.

Pirólisis. La pirólisis es una degradación térmica de la biomasa, por calor en la ausencia de oxígeno, lo cual produce carbón de leña (sólido), bioaceite (líquido) y combustibles gaseosos. La pirólisis de la biomasa se ha estudiado con el fin de recuperar biocombustibles con poder calorífico medio-bajo. Dependiendo de las condiciones de operación, el proceso de pirólisis se puede dividir en tres subclases: a) Pirólisis convencional, b) Pirólisis rápida y c) Pirólisis instantánea o "flash":

a) Pirólisis convencional. La pirólisis convencional se produce a una velocidad de calentamiento baja (0.1-1 K/s), a un tiempo de residencia de 45-550 s y a una cantidad masiva de piezas de madera. En la primera etapa de descomposición de la biomasa, la cual se ocurre entre 550 y 950 K, se le denomina pre-pirólisis. Durante esta etapa, algunos reajustes internos se llevan a cabo, como la eliminación de agua, la aparición de radicales libres y la formación de los grupos carbonilo, carboxilo e hidroperóxido. La segunda etapa de la descomposición de sólidos corresponde al proceso principal de la pirólisis. Éste continúa a un régimen alto y conduce a la formación de productos de pirólisis. Durante la tercera etapa, la descomposición del carbón vegetal se realiza a una velocidad muy lenta y se forman residuos sólidos ricos en carbono.

b) Pirólisis rápida. Ésta se produce en un intervalo de altas temperatura de 850-1250 K, con una velocidad de calentamiento rápida (10-200 K/s), con un tiempo de residencia de sólidos corto (0.5-10 s) y tamaños de partícula finos (<1 mm). La pirólisis rápida es recomendada para la producción de productos líquidos y/o gaseosos. En la pirólisis rápida la biomasa se descompone generando vapores, aerosoles y carbón, como el carbón de leña.

Después del enfriamiento y la condensación de vapores y aerosoles, se forma un líquido oscuro marrón, el cual dispone de la mitad del valor de calentamiento del combustible convencional. La pirólisis rápida produce de 60-75% de bio-aceite, 15-25% de sólidos de carbón y 10-20% los gases no condensados en función de la materia prima.

c) Pirólisis instantánea o "flash". Se diferencia fuertemente de la pirólisis convencional, porque se realiza lentamente con piezas macizas de madera. Ésta se lleva a cabo en el rango de temperaturas de 1050-1300 K, con una velocidad de calentamiento rápida ( $>1000$  K/s), corto tiempo de residencia ( $<0.5$  s) y partículas de tamaño muy fino ( $<0.2$  mm). La producción de bio-aceite por medio de la pirólisis de biomasa, suele realizarse a través de la pirólisis "flash", el aceite producido puede ser mezclado con el carbón para producir "biolodos". Estos "biolodos" pueden ser más fáciles de alimentar al gasificador (condiciones del gasificador: 26 bar; 927-1227 K), para una conversión eficiente a gas de síntesis. La conversión de biomasa a "biopetróleo" crudo puede alcanzar una eficiencia de hasta un 70%, para el proceso de pirólisis "flash". El llamado bio-crudo puede ser usado en motores y turbinas. Su uso como materia prima para las refinerías, también se está considerando (Naik et al., 2010).

## 2.8. Hidrotratamiento de aceites vegetales / diesel verde

Los aceites vegetales son materias primas renovables, actualmente en uso para la producción de biocombustibles, a partir de recursos de biomasa sostenibles. La tecnología existente para la producción de diesel a partir de

aceites vegetales como soya, colza, canola y aceite de palma están, en gran parte, centradas en la transesterificación de los aceites con metanol, para producir ésteres metílicos de ácidos grasos o biodiesel. La futura proliferación de los biocombustibles depende del desarrollo de nuevas tecnologías de proceso, para producir combustibles de alta calidad para el transporte, a partir de materias primas derivadas biológicamente. Estos nuevos biocombustibles tienen que ser compatibles con el combustible existente y la infraestructura de transporte, para ser económicamente viables.

El diesel tipo isoparafina-rica, conocido como "diesel verde", se produce a partir de materias primas renovables, que contienen triglicéridos y ácidos grasos, por el proceso de saturación catalítico, hidrodeseoxigenación, descarboxilación e hidroisomerización. Esta tecnología puede ser ampliamente utilizada con cualquier tipo de materia prima para producir isoparafina-rica sustituta del diesel. Este producto, denominado diesel verde, es un combustible libre de aromáticos y azufre, con un valor de cetano de fusión muy alto. Las propiedades de flujo del combustible frío, pueden ser ajustadas en el proceso para cumplir con las especificaciones de punto de nube, en cualquiera de los combustibles, puro o mezclado. El diesel verde posee un valor de cetano alto y buenas propiedades de flujo en frío. También posee una excelente estabilidad de almacenaje y es completamente compatible para mezclarlo con una mezcla estándar de diesel derivado del petróleo. En comparación con los ácidos grasos metil-ésteres, las propiedades del diesel verde no dependen del origen de la materia prima y ni de la configuración del proceso. Además, la completa desoxigenación del biocombustible permite su fácil mezclado con el combustible diesel (Naik et al., 2010).

## 2.9. Biopetróleo

El biopetróleo es producido por un proceso de pirólisis rápida. En este proceso, la clase de compuestos orgánicos, tales como la celulosa, hemicelulosa y lignina, se descomponen térmicamente a una temperatura moderada (400-600°C) en ausencia de oxígeno, para producir los productos líquidos, biopetróleo (60-70%) y carbón (13-25%) y gases como el CO, H<sub>2</sub>, hidrocarburos ligeros (13-25%). El rendimiento y la composición del biopetróleo, depende de la materia prima alimentada y el estado del proceso: tamaño de las partículas (2-5 mm), tiempo de residencia (0.1-2 s) y el tipo de reactor. En general, los tipos de reactor, que se utilizan actualmente son: reactor de lecho fluidificado, lecho fluido circulante, lecho fluidificado rápido, etc. El biopetróleo es viscoso de color marrón oscuro, corrosivo y ácido, con olor característico a humo, utilizado como combustible para calderas, turbinas de gas, motores diesel, muflas y motores estacionarios. El biopetróleo tiene una composición química compleja, posee productos de biomasa de lignocelulosa, como alcoholes alifáticos / aldehídos, furánicos, piránicos, bencénicos, ácidos grasos e hidrocarburos de alta masa molecular, etc. Estos componentes se encuentran mezclados con agua (25-45%), la cual se forma en el proceso de la pirólisis, para formar una emulsión de componentes orgánicos. Por lo tanto, una amplia gama de productos "químicos verdes" pueden ser extraídos del biopetróleo, por extracción con disolventes. La extracción mediante el uso de fluidos supercríticos, como el CO<sub>2</sub>, de los productos químicos que puede ser extraídos selectivamente, le da valor agregado al biopetróleo. Estos compuestos químicos pueden ser utilizados para elaborar resinas naturales, saborizantes de alimentos, preservadores de madera, abono de liberación lenta, productos farmacéuticos, etc. (Naik et al., 2010).

### 2.9.1. Biopetróleo FT o combustible "verde" para motor a partir de biomasa

Franz Fischer y Hans Tropsch estudiaron por primera vez la conversión de gas de síntesis ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), para un gran número de compuestos orgánicos útiles en el año 1923. El gas de síntesis producido por la gasificación de biomasa se puede convertir en gran número de compuestos orgánicos. El proceso de conversión de  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ , en una mezcla de combustibles líquidos o hidrocarburos, con metales de transición como catalizadores, se conoce como petróleo de Fischer-Tropsch o "combustible verde" para motor. La gasificación de la biomasa produce gas de síntesis, que contiene productos degradados de la biomasa, como los hidrocarburos (celulosa, hemicelulosa) y lignina. Las mezclas de gases contiene monóxido de carbono (28-36%), dióxido de carbono (22-32%), hidrógeno (21-30%), metano (8-11%), benceno / tolueno o xileno (0.84-0.96%), etano (0.16-0.22%), alquitrán (0.15-0.24%). La distribución de los productos depende del catalizador y de las condiciones del proceso, tales como temperatura, presión y tiempo de residencia (Naik et al., 2010).

### 2.9.2. Bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica

Las tecnologías de conversión biológica, se basan en procesos enzimáticos y microbianos para la producción de azúcares, a partir de biomasa, tales como lignocelulósicos, almidón, celulosa. Los azúcares luego pueden ser convertidos en alcohol y otros disolventes de interés, para los combustibles y productos químicos. Por ejemplo, la fermentación a base de levaduras, ha mostrado un buen rendimiento para el etanol a partir de cultivos de azúcar o almidón. La producción de etanol de maíz y de caña de azúcar por medios bioquímicos ya se ha establecido comercialmente. Es



esencial hidrolizar a la lignocelulosa, para la conversión biológica. La hidrólisis enzimática de la biomasa lignocelulósica requiere de algunos trabajos de investigación y desarrollo para incrementar la producción de alcohol. La conversión de la biomasa en combustibles líquidos, como el etanol, requiere de una serie de operaciones unitarias básicas, que incluyen pre-tratamiento, producción enzimática, hidrólisis, fermentación y recuperación de etanol (Bazúa y Wilke, 1977).

Los residuos agrícolas y forestales, post-cosecha y procesamiento de los cultivos alimenticios industriales generan desperdicios lignocelulósicos, que contienen enormes cantidades de carbohidratos. Esta biomasa lignocelulósica consiste de tres unidades estructurales principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es un polímero de glucosa cristalino. La hemicelulosa es un conjunto polímeros amorfos de xilosa, arabinosa. La lignina es un compuesto largo policíclico aromático. La conversión de biomasa lignocelulósica a alcohol es más difícil en comparación con el almidón de las materias primas base. La conversión de la biomasa lignocelulósica a alcohol, es un proceso que requiere de tres etapas: pre-tratamiento de la biomasa, es decir hidrólisis ácida o enzimática y fermentación / destilación. El proceso de pre tratamiento separa la xilosa y la lignina de la celulosa cristalina.

El proceso de explosión de vapor es un método eficaz de tratamiento previo para la conversión de la biomasa lignocelulósica. En este proceso la biomasa se coloca en un recipiente presurizado (es decir, el digestor), el cual se vaporiza con vapor saturado por un corto tiempo (de 20 s hasta 20 min) a una temperatura de 473-543 K y a alta presión (14-16 bar). La presión en el digestor se deja caer rápidamente, abriendo la válvula del vapor y dejando el material expuesto a la presión atmosférica, lo cual

genera una explosión interna y como consecuencia la biomasa lignocelulósica es desintegrada. Diferentes tipos de dispositivos para la explosión de vapor están disponibles. La explosión de vapor hace que la hemicelulosa y la lignina de la madera se descompongan convirtiéndolas en fracciones de baja masa molecular, que pueden ser extraídas fácilmente. Por lo tanto, la mayoría de la fracción soluble en agua de la hemicelulosa puede ser removida por extracción de agua. Al mismo tiempo, una parte de la fracción de baja masa molecular de la lignina también es extraída. La xilosa puede ser transformada en etanol y la lignina puede ser procesada para producir otros combustibles. La celulosa cristalina se mantiene sólida después del pre tratamiento y posteriormente se descompone en glucosa por el método de hidrólisis enzimática.

La glucosa es fermentada para producir alcohol y la fracción de hemicelulosa es convertida en xilosa. La conversión de la xilosa en etanol es un proceso difícil y, por lo tanto, el pre tratamiento es necesario, para reducir la cristalinidad de la celulosa, para disminuir la polimerización de la celulosa y hemicelulosa-lignina, que rodean a la celulosa; para incrementar el área superficial disponible para que la enzima ataque.

El etanol puede ser mezclado con gasolina para producir un combustible oxigenado, con una menor emisión de hidrocarburos y gases de efecto invernadero. Los automóviles pueden funcionar con una mezcla de etanol / gasolina del 5% al 25%, sin ningún tipo de alteraciones o ajuste en los equipos de motor. El mayor problema de los motores que operan con combustibles mezclados con alcohol son la calidad del combustible, la volatilidad, el octanaje, el arranque en frío, el funcionamiento en caliente y el consumo del combustible (Naik et al., 2010).

## 2.10. Conversión química

Hidrólisis química. Los factores específicos importantes en la hidrólisis química son la superficie en relación con el volumen, la concentración del ácido, la temperatura y el tiempo. La superficie en relación con el volumen es especialmente importante, ya que también determina la magnitud de la producción de glucosa. Por lo tanto, mientras menor sea el tamaño de partícula, mayor será la hidrólisis, en función de la magnitud y velocidad de reacción. Con respecto a la relación de líquido a sólido, a partículas grandes más rápida es la reacción.

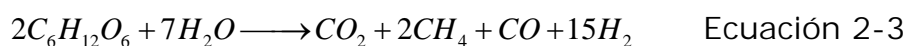
Extracción por disolvente. La extracción por disolvente implica operaciones unitarias diferentes: la extracción del aceite de las semillas oleaginosas, utilizando hexano como disolvente; la evaporación del disolvente, destilación de la mezcla aceite-hexano y el tostado de la harina desengrasada. En casos especiales, se pueden utilizar otros disolventes: disolventes halogenados (en su mayoría diclorometano), acetona, etanol o isopropanol. La extracción supercrítica mejorada también se puede utilizar empleando CO<sub>2</sub>.

La extracción se refiere a un proceso en el que la sustancia deseada es removida selectivamente de la materia prima, al permitir que se disuelva en el disolvente y posteriormente recuperando la sustancia del disolvente. Para remover la sustancia en particular de la biomasa, la extracción y separación son esenciales. Por lo general la biomasa (madera, paja de trigo, hierbas aromáticas, etc.) contiene grandes cantidades de compuestos macromoleculares (polisacáridos, celulosa, hemicelulosa y lignina) llamados metabolitos primarios. El otro volumen bajo y alto valor de moléculas bioquímicas como terpenoides, ceras, resinas, esteroides y

alcaloides, son conocidos como metabolitos secundarios o la biomasa de extracción. En el proceso de biorrefinería, estos productos químicos son inicialmente extraídos de la biomasa, mediante la extracción con disolventes o extracción con fluido supercrítico. La extracción con fluido supercrítico puede ser utilizado para la extracción de maderas aromáticas (cedro, sadal, pino) para aislar compuestos extractivos. La biomasa lignocelulósica extraída es usada más tarde para la hidrólisis y biodegradación para la producción de biocombustibles. Se pueden utilizar otros disolventes como etanol, acetona, metanol o agua para aislar compuestos extractivos de la biomasa.

Conversión supercrítica en agua de la biomasa. Se define como un fluido supercrítico a una sustancia que se encuentra en condiciones de presión y temperatura que están por encima de su punto crítico (para el agua es de 644 K y 22 MPa, para el CO<sub>2</sub> es de 304 K y 7.4 MPa). En condiciones supercríticas, un fluido no es líquido ni gas, ya que no se puede hacer hervir al disminuir la presión a temperatura constante y no se condensaría por enfriamiento a presión constante. El procesamiento de biomasa por el método de fluido supercrítico representa un camino alternativo para la hidrólisis ácida y la hidrólisis enzimática de la celulosa en azúcares. Con la hidrólisis ácida, la recuperación del ácido es un problema costoso y contaminante. La sacarificación enzimática necesita pre-tratamiento de la biomasa lignocelulósica. El agua en condiciones supercríticas puede rápidamente convertir la celulosa en azúcares y convertir a la biomasa en una mezcla de aceites, ácidos grasos, alcohol y metano. En condiciones supercríticas (es decir, 300-644 K; presión 200-250 bar) y cerca del estado crítico (523-573 K) los componentes ácido (H<sup>+</sup>) y base (OH<sup>-</sup>) del agua se encuentran separados y disueltos en la biomasa. La disolución de agua en condiciones supercríticas rompe los

enlaces de la celulosa y la hemicelulosa rápidamente, para producir pequeñas moléculas de azúcar, glucosa, xilosa y oligosacáridos. Estas propiedades hacen que el agua en condiciones supercríticas, sea un medio muy prometedor, sin utilizar ningún catalizador para la conversión de biomasa en productos de valor agregado. La tecnología de gasificación con agua en condiciones supercríticas ha sido demostrada para la conversión de la celulosa en glucosa en el rango de 10-20 s y por encima de 45 s al comenzar la pirólisis. A medida que aumenta a 873 K, el agua comienza a ser un oxidante fuerte y da lugar a la desintegración total de la estructura del sustrato, mediante la transferencia de oxígeno del agua a los átomos de carbono del sustrato. El átomo de hidrógeno del agua se libera y se forma el hidrógeno molecular. El agua en condiciones supercríticas también rompe las uniones de la celulosa y también se forman productos gaseosos. La reacción típica de la biomasa en general es la siguiente (Naik et al., 2010):



## 2.11. Tipos de bio-refinería

### 2.11.1. Bio-refinería verde

Una bio-refinería verde es un sistema de multiproductos, que se ocupa de sus cortes de la refinería, de sus fracciones y productos, de acuerdo con la fisiología de la planta y sus materiales. Una bio-refinería verde utiliza materias primas húmedas, derivadas de los productos no tratados, tales como césped, plantas verdes o cultivos verdes como insumos, los cuales son producidos en grande cantidades, en las plantas verdes. El primer paso de la refinería es para el tratamiento de las sustancias de la biomasa

verde en su forma natural, mediante el fraccionamiento en húmedo, para producir una torta rica en fibra y un jugo rico en nutrientes. La torta de prensado contiene celulosa, almidón, pigmentos valiosos, drogas crudas y otros compuestos orgánicos, mientras que el jugo verde incluye las proteínas, amino ácidos libres, ácidos orgánicos, colorantes, enzimas, hormonas u otras sustancias orgánicas y minerales. La torta de prensado puede ser utilizada también para la producción de “pellets”<sup>3</sup> de forraje verde, como materia prima para la producción de productos químicos, tales como el ácido levulínico y para la conversión a gas de síntesis y de los biocombustibles (Naik et al., 2010).

#### 2.11.2. Bio-refinería basada en materiales forestales y lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos contienen dos tipos de polisacáridos, celulosa y hemicelulosa, unidos por un tercer componente, la lignina. Consisten de tres fracciones químicas básicas, (i) de hemicelulosa, molécula cuyo monómero es un azúcar, principalmente pentosa, (ii) de celulosa, un polímero de glucosa, (iii) la lignina, polímero de fenoles. Este tipo de bio-refinería se utiliza principalmente para materiales vegetales duros, fibrosos generados por la madera o los residuos municipales. En el paso inicial, el material vegetal es limpiado y se divide en tres fracciones (hemicelulosa, celulosa y lignina) mediante digestión química o hidrólisis enzimática. La hemicelulosa y la celulosa pueden ser producidas por un álcali (sosa caústica) y sulfitos (ácido, bisulfito, alcalino, etc.). Los polímeros del azúcar (celulosa y hemicelulosa) se convierten en sus respectivos azúcares a través de la hidrólisis. La hemicelulosa consiste en cadenas ramificadas, cortas y largas de azúcares. Éste contiene azúcares

---

<sup>3</sup> Pellet es un anglicismo que viene del latín pila, pelota o bola.

de cinco carbonos, generalmente D-xilosa y arabinosa, azúcares de seis carbonos y ácido urónico. La hidrólisis de la celulosa a glucosa, puede ser llevada a cabo por el procesamiento enzimático o por tratamiento químico, que producen productos útiles como el etanol, ácido acético, acetona, butanol y otros productos de las diferentes biorreacciones. A pesar de que las fracciones de la hemicelulosa y la celulosa tienen numerosos usos, no es aún el caso de la lignina. Sin embargo, todavía hay algunas partes insatisfactorias en la bio-refinería basada en materiales lignocelulósicos, tales como el uso de la lignina como combustible, adhesivo o aglutinante. Es insuficiente porque la fracción de la lignina contiene cantidades considerables de hidrocarburos monoaromáticos, los cuales si son aislados de manera económica, podrían añadir un valor significativo a los procesos primarios. Debido a que las tecnologías primarias generarían productos químicos primarios, a partir de los cuales la industria podría producir una gama amplia de combustibles, productos químicos, materiales y energía. Es por lo que se recomiendan cinco etapas para este tipo de bio-refinerías: fase de azúcares, termoquímica o fase de gas de síntesis, fase de biogás, cadenas ricas en carbono y bioproductos (Naik et al., 2010).

## 2.12. Fuente de energía acuática o bio-refinería a base de algas

Las algas son microorganismos fotosintéticos, que transforman la luz solar, el agua y el dióxido de carbono en lípidos o triacilglicerol. Los lípidos pueden incluir lípidos neutros, lípidos polares, ésteres de cera, esteroides y derivados de hidrocarburos, así como los feniltocofenoles, carotenoides, terpenos, quinonas y derivados tipo pirroles fenilados como clorofilas. Las algas tienen alta tasa de crecimiento y tolerancia a las diversas condiciones ambientales. Pueden sobrevivir y reproducirse en aguas de baja calidad y agua salina. Esta característica ha permitido que las algas

sean utilizadas en las plantas de tratamiento de aguas residuales para el tratamiento con “lodos” biológicos. Además, ya que retienen altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, su capacidad de aprovecharlas para la fijación de CO<sub>2</sub>, permite utilizarlas para reducir las altas emisiones de dióxido de carbono. Las algas o cianobacterias se pueden utilizar en biorreactores para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de las centrales eléctricas usando la biomasa de las algas para la extracción de biopetróleo y la producción de biodiesel. Hay más de 40000 especies de algas identificadas y muchas más todavía por identificarse. Las algas se clasifican en varios grupos principales (Figura 2.15).

Las algas sintetizan ácidos grasos principalmente para la esterificación del glicerol, que son los lípidos base de las membranas, que constituyen alrededor del 5-20% de la masa seca de sus células. Los ácidos grasos incluyen a los de cadena media (C<sub>10</sub> – C<sub>14</sub>), cadena larga (C<sub>16</sub> – C<sub>18</sub>) y de cadena muy larga (≥C<sub>20</sub>), que son especies derivadas de ácidos grasos.

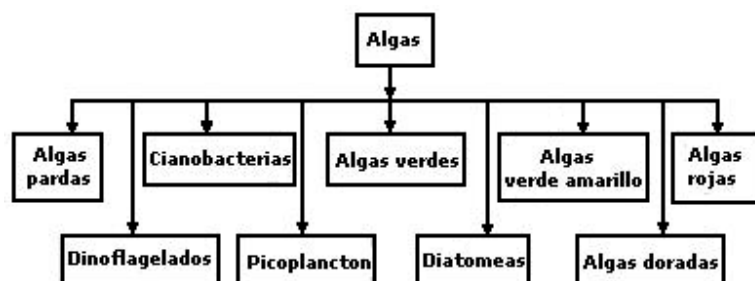


Figura 2.15. Clasificación de las algas (Naik et al., 2010)

Los hidrocarburos y otros tipos de lípidos neutros, se encuentran en las algas en cantidades inferiores al 5%. La especie *Bortyococcus braunii* ha demostrado que produce grandes cantidades de hidrocarburos de cadena muy larga (C<sub>23</sub> – C<sub>20</sub>) (hasta un 80% de su masa seca celular), similares a los encontrados en el petróleo y, por lo tanto, explorados como materias primas para producir biocombustibles y biomateriales. El contenido de



biopetróleo de algunas especies de algas supera el 80% de su masa seca. Cultivos agrícolas, como el aceite de soya, colza y palma de aceite, son ampliamente utilizados para producir biodiesel. Por ejemplo, el aceite de palma, uno de los cultivos oleaginosos más productivos, sólo produce 6000 L de aceite por hectárea, mientras que el rendimiento de aceite por hectárea de las microalgas es de alrededor de 58700 L/ha. Las ventajas potenciales de las algas como materia prima (para biocombustibles y biomateriales) para la bio-refinería son las siguientes:

- 1) Las algas sintetizan y acumulan grandes cantidades de lípidos/aceite neutros (20-50% masa seca celular).
- 2) Altas tasas de reproducción (1-3 tiempo de duplicación celular / día).
- 3) Prosperan en solución salina o agua salobre / agua de mar costera.
- 4) Las algas toleran las tierras marginales (por ejemplo, desierto y tierras áridas o semiáridas) que no son aptas para la agricultura convencional.
- 5) Utilizan nutrientes para su crecimiento como nitrógeno y fósforo de las aguas residuales de diversas fuentes (por ejemplo, la escorrentía agrícola, industrial y de aguas residuales municipales).
- 6) Secuestran al CO<sub>2</sub> de los gases de combustión emitidos por la utilización de combustibles fósiles en centrales eléctricas y otras fuentes, mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero más importantes.
- 7) El valor agregado de los co-productos o los productos (por ejemplo, biopolímeros, proteínas, polisacáridos, pigmentos, alimentos para animales, fertilizantes e H<sub>2</sub>).

- 8) Las algas pueden ser cultivadas en vasos de cultivo (fotobiorreactor) durante el año con una producción anual de biomasa dada.

A partir de esos conocimientos abiertos en la literatura, se plantea en el siguiente capítulo un abanico de opciones de las cuales se tomará una como caso de ejemplo. Se abordarán desde el punto de vista de la formación de que brinda la ingeniería química considerando su factibilidad para condiciones topográficas y ambientales poco viables para la agricultura tradicional (Naik et al., 2010).

## CAPÍTULO III

### 3. Metodologías propuestas

El aumento de la población, junto con el aumento de las actividades industriales y agrícolas, ha llevado a la explotación excesiva de los recursos hídricos disponibles y a la contaminación de los recursos de agua dulce.

Hay muchas maneras de resolver el problema de la escasez de agua, dependiendo de la ubicación, la transportación del agua entre las distintas áreas, la reutilización de aguas residuales en la industria y la agricultura, así como mejorar la gestión de los recursos hídricos.

La desalinización del agua de mar o aguas salobres, se ha convertido en una de las fuentes "no convencionales" de agua potable, cada vez más importante en muchas partes del mundo, y juega ya un papel importante en la solución de la escasez de agua potable en zonas donde otras alternativas de abastecimiento de agua no están disponibles, especialmente en las regiones costeras. Algunas veces, la desalinización de agua de mar es la mejor opción en muchas situaciones.

Frente a un agotamiento de las fuentes de energía fósil y a una contaminación progresiva del medio ambiente, así como la emisión de gases de efecto invernadero, se busca la respuesta al problema de la escasez de agua, con el uso abundante y disponible de las fuentes disponibles de energía alternativa, como una manera limpia y segura, para la provisión de agua dulce por medio de la desalinización de agua de mar (He y Yan, 2009).

México es un país con alto índice de radiación solar, aproximadamente 2,259 kWh/m<sup>2</sup> al año para el caso de Puerto Escondido Oaxaca (NASA, 2010). El problema esencial del proceso de desarrollo en estas regiones es la falta de búsqueda de técnicas, con las cuales se incrementen las potencialidades del agua potable. La tecnología de la desalinización es la alternativa más recomendable para obtener agua potable, aplicando criterios técnicos, económicos y ambientales y empleando una fuente de energía renovable para la instrumentación de la tecnología de desalinización del agua de mar y su consumo (Bayod-Rújula y Khalidou-Dia, 2010).

La Tabla 3.1, muestra la radiación solar y velocidad del viento anual, de algunas ciudades de la República Mexicana (NASA, 2010).

### 3.1 Recursos energéticos

Los recursos energéticos son particularmente favorables en México. Hoy en día, la mayoría de la electricidad proviene de la quema de gas y/o derivados del petróleo crudo. El consumo total de combustible empleado para el periodo 1999–2010 se encuentra en la Tabla 3.2. (Secretaría de Energía, 2010).

Las energías renovables ofrecen una solución alternativa para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Las formas de energía renovable disponibles son la solar en todo el territorio y la eólica, ambas a lo largo de sus 11,122 km de sus costas continentales, repartidos en dos vertientes: al occidente, el Océano Pacífico y el Golfo de California y al este, el Golfo de México y el Mar Caribe, que forman parte de la cuenca del Océano Atlántico (Wikipedia, 2010).

Tabla 3.1. Radiación solar y velocidad del viento en México (NASA, 2010)

Población	Radiación solar horizontal (kWh/m <sup>2</sup> /a)	Velocidad del viento a 10 m* (m/s)
<b>Costa del Pacífico</b>		
Tijuana, B.C.	1,850.55	4.7
Ensenada, B.C.	1,854.20	4.1
Lázaro Cardenas, B.C.	1,919.90	3.8
Guerrero Negro, B.C.S.	2,076.85	4.6
La Paz, B.C.S.	2,040.35	3.5
Pto. Peñasco, Son.	1,872.45	3.7
Pto. Libertad, Son.	2,153.50	3.5
Bahía Kino, Son.	2,142.55	3.5
Guaymas, Son.	2,230.15	3.5
La Cruz, Sin.	2,168.10	3.3
Mazatlán, Sin	2,168.10	3.3
Pto. Vallarta, Jal.	2,190.00	2.6
Manzanillo, Col.	2,124.30	2.7
Lázaro Cardenas, Mich.	2,200.95	2.7
Zihuatanejo, Gro.	2,208.25	2.7
Acapulco, Gro.	2,241.10	3.7
Pto. Escondido, Oax.	2,259.35	3.1
Crucesita, Oax.	2,149.85	3.2
Salina Cruz, Oax.	1,938.15	2.7
Pto. de Sn. Benito, Chis.	2,252.05	4.7
<b>Costa del Caribe</b>		
Pto. Progreso, Yuc.	2,193.65	4.6
Cancún, Q Roo.	2,076.85	5.1
Playa del Carmen, Q Roo.	1,828.65	4.0
Chetumal, Q Roo.	1,817.70	3.5
<b>Costa del Golfo de México</b>		
Tampico, Tamps.	1,788.50	3.7
Veracruz, Ver.	1,679.00	3.8
Alvarado, Ver.	1,759.30	3.1
Coatzacoalcos, Ver.	1,825.00	3.2
Cd. del Carmen, Camp.	2,054.95	2.8
Champotón, Camp.	2,131.60	3.2
Campeche, Camp.	2,131.60	3.2

\*De acuerdo con el IIE, que es la entidad que ha desarrollado un mayor trabajo en este campo en México, las lecturas deben realizarse como mínimo a una altura de 10 m, por un período mínimo de un año. De hecho, no es posible extrapolar los datos para un aerogenerador de 42 m de radio, ya que se recomienda que las mediciones se hagan a la altura del centro del rotor de los aerogeneradores a utilizar y de preferencia, con otras mediciones de apoyo a diferentes alturas y direcciones. Para un rotor de 42m de radio, sería necesario hacer mediciones como mínimo a 50 m de altura, con valores adicionales que permitan determinar el perfil del viento (NASA, 2010)

### 3.1.1. Energía solar

México posee niveles altos de radiación solar en el mundo, haciéndolo un lugar ideal para la producción de energía solar. La radiación solar sobre la superficie horizontal varía entre 1800 y 2400 kWh/m<sup>2</sup>año, ver Figura 3.1. La irradiación directa normal recibida se encuentra entre 1400 kWh/m<sup>2</sup>año en zonas del sureste y 2700 kWh/m<sup>2</sup>año en regiones del noroeste (NASA, 2010). Ver Figura 3.2.

Tabla 3.2. Consumo de Combustibles (Secretaría de Energía, 2010)

#### SECTOR ELÉCTRICO NACIONAL CONSUMO DE COMBUSTIBLES

Años	Combustóleo (Miles de Barriles)	Diesel (Miles de Barriles)	Carbón (Miles de Toneladas)	Gas Natural (Millones de Pies <sup>3</sup> ) 1_ /
1999	133,900	2,851	9,468	269,388
2000	144,017	4,087	9,630	322,058
2001	138,072	2,845	11,398	366,791
2002	118,818	2,262	12,179	350,657
2003	102,637	4,151	13,881	335,592
2004	95,919	2,362	11,489	310,857
2005	94,255	2,185	14,917	281,928
2006	75,668	2,354	14,697	307,520
2007	71,998	1,356	14,762	321,113
2008	66,781	1,697	10,837	345,593
2009	60,826	2,553	13,682	370,387
Enero	4,026	44	1,169	24,199
Febrero	3,377	69	942	22,893
Marzo	3,671	122	1,169	28,769
Abril	4,581	160	1,024	29,648
Mayo	5,560	220	1,148	33,156
Junio	5,856	232	1,183	31,755
Julio	6,066	384	1,326	34,998
Agosto	6,867	314	1,313	37,287
Septiembre	5,896	388	1,052	33,824
Octubre	5,958	343	1,091	32,674
Noviembre	4,734	155	1,014	29,618
Diciembre	4,234	123	1,248	31,565

Años	Combustóleo (Miles de Barriles)	Diesel (Miles de Barriles)	Carbón (Miles de Toneladas)	Gas Natural (Millones de Pies <sup>3</sup> ) 1_/
2010	17,712	543	5,238	120,330
Enero	4,318	98	1,327	30,608
Febrero	3,171	51	1,356	26,790
Marzo	4,667	168	1,368	29,714
Abril	5,556	225	1,187	33,218
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Variación Respecto al Mismo Periodo del Año Anterior (%)				
2000	7.6	43.4	1.7	19.6
2001	(4.1)	(30.4)	18.4	13.9
2002	(13.9)	(20.5)	6.9	(4.4)
2003	(13.6)	83.5	14.0	(4.3)
2004	(6.5)	(43.1)	(17.2)	(7.4)
2005	(1.7)	(7.5)	29.8	(9.3)
2006	(19.7)	7.7	(1.5)	9.1
2007	(4.9)	(42.4)	0.4	4.4
2008	(7.2)	25.1	(26.6)	7.6
2009	(8.9)	50.5	26.3	7.2
2010				
Enero	7.2	121.8	13.5	26.5
Febrero	(6.1)	(25.2)	43.9	17.0
Marzo	27.1	38.2	17.0	3.3
Abril	21.3	40.6	15.9	12.0
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				

1\_/ no incluye el consumo de gas natural de los productores externos de energía. Fuente: NASA, 2010.

Radiation on Equator-pointed tilted surfaces (Tilt angle = latitude)  
Annual Averaged from Jul 1983 – Jun 2005

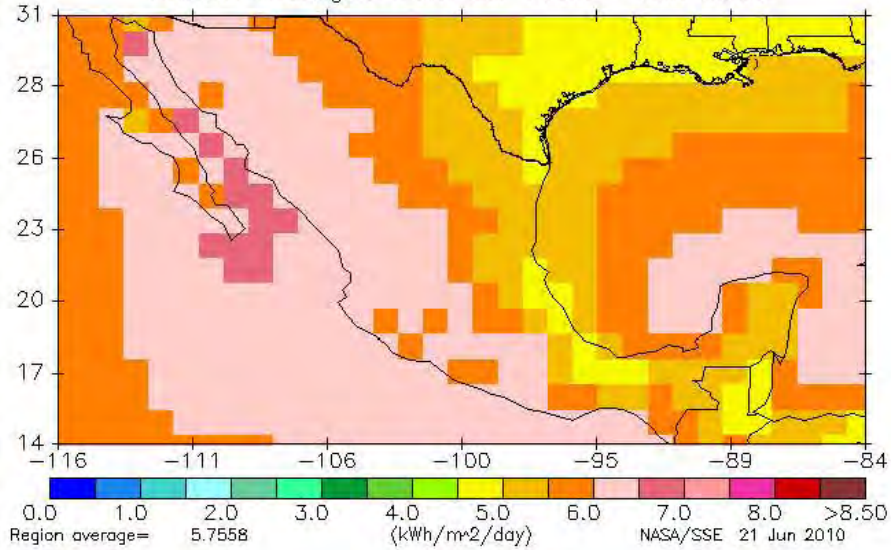


Figura 3.1. Radiación solar anual en México de acuerdo a su latitud (NASA, 2010)

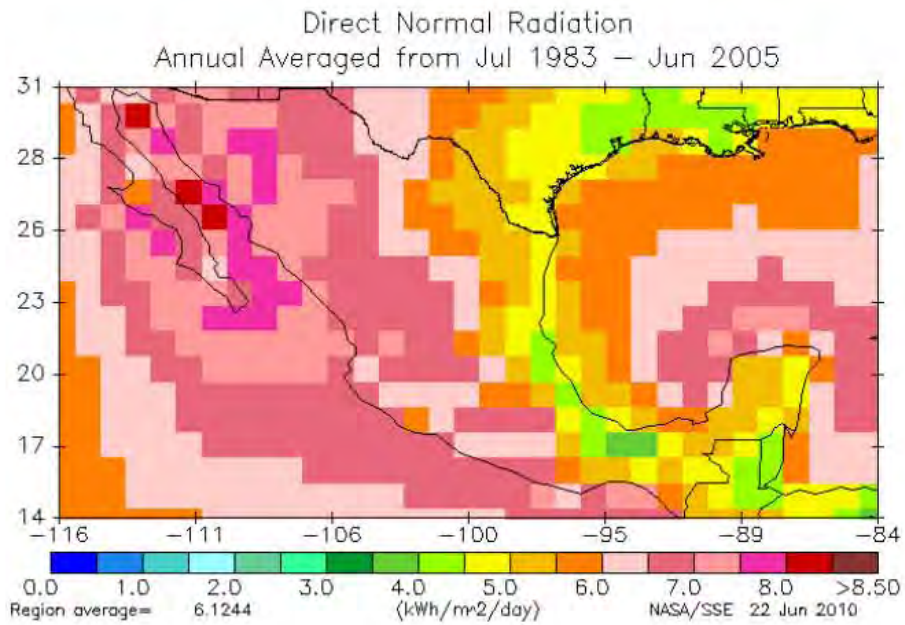


Figura 3.2. Radiación solar directa para todas las regiones de México (NASA, 2010)



### 3.1.2. Energía eólica

Se necesitan estudios adicionales para evaluar con precisión el potencial eléctrico del viento, teniendo en cuenta factores tales como la redes existentes y la accesibilidad (Elliot et al., 2003). Pero como bien se sabe, la región con más potencial hasta el momento y la única con datos de potencial eléctrico es la región de la costa de Oaxaca. En la Tabla 3.3 se muestra la clasificación de los recursos eólicos, la cual coincide con los mapas de recursos eólicos de Oaxaca.

Tabla 3.3. Potencial eléctrico del viento en Oaxaca (Elliot et al., 2003)

#### Recurso eólico (bueno a excelente) a 50 m

Recurso eólico escala útil	Clase de viento	Potencia del viento a 50 m (W/m <sup>2</sup> )	Velocidad del viento a 50 m (m/s*)	Área total (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de tierra ventosa	Capacidad total instalada (MW)
Bueno	4	400 – 500	6.7 – 7.3	2,263	2.5	11,300
Excelente	5	500 – 600	7.3 – 7.7	1,370	1.5	6,850
Excelente	6	600 – 700	7.7 – 8.5	1,756	1.9	8,800
Excelente	7	> 800	> 8.5	1,248	1.4	6,250
Total				6,637	7.3	33,200

#### Recurso eólico (moderado a excelente) a 50 m

Recurso eólico escala útil	Clase de viento	Potencia del viento a 50 m (W/m <sup>2</sup> )	Velocidad del viento a 50 m (m/s*)	Área total (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de tierra ventosa	Capacidad total instalada (MW)
Moderado	3	300 – 400	6.1 – 6.7	2,234	2.4	11,150
Bueno	4	400 – 500	6.7 – 7.3	2,263	2.5	11,300
Excelente	5	500 – 600	7.3 – 7.7	1,370	1.5	6,850
Excelente	6	600 – 700	7.7 – 8.5	1,756	1.9	8,800
Excelente	7	> 800	> 8.5	1,248	1.4	6,250
Total				8,871	9.7	44,350

\*Las velocidades del viento se basan en una elevación de 2000 m y una k de Weibull de 2.0

#### Suposiciones

Capacidad instalada por km<sup>2</sup> = 5 MW

Superficie total de Oaxaca = 91,500 km<sup>2</sup>

La capacidad instalada de la Tabla 3.3 representa el potencial eléctrico neto del viento. No se encuentra reducido por factores tales como las exclusiones de las tierras en uso. Los supuestos utilizados para el cálculo de los potenciales, se encuentran listados en la parte inferior de la Tabla 3.3 (Elliot et al., 2003). La Figura 3.3 señala esta información de manera gráfica.

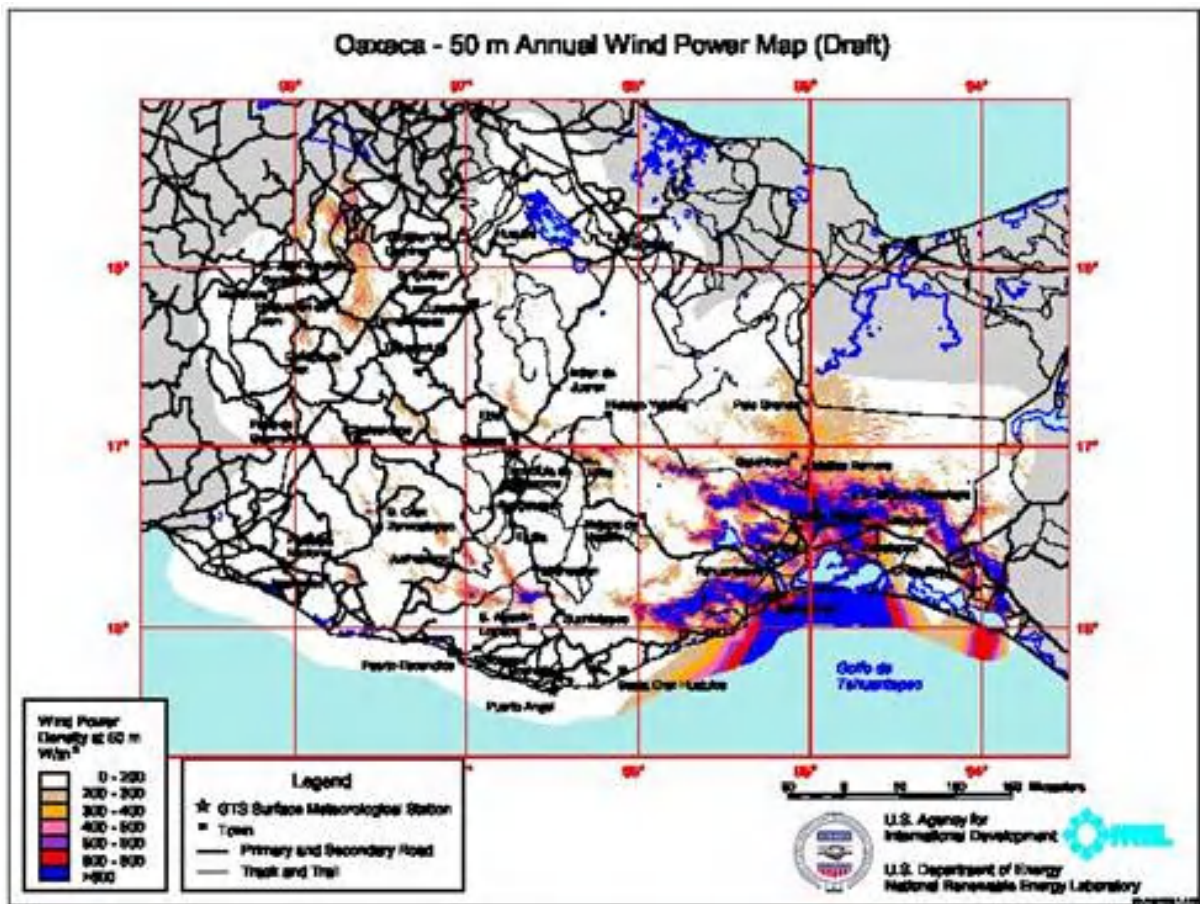


Figura 3.3. Mapa de la potencia del viento, anual para Oaxaca (Secretaría de Energía, 2010)

Se estima que alrededor de 6,600 km<sup>2</sup> de las tierras en Oaxaca, poseen un potencial eólico de bueno a excelente. Aproximadamente 4,400 km<sup>2</sup> de esos 6,600 km<sup>2</sup> de tierra ventosa, se considera que tienen un potencial

eólico excelente. Esta tierra con viento, representa más del 7% de la superficie total (sin incluir lagunas) de 91,500 km<sup>2</sup>. Suponiendo que se usara una potencia conservadora de 5 MW/km<sup>2</sup>, estas tierras podrían dar más de 3,000 MW de la capacidad potencial instalada (Elliot et al., 2003).

### 3.2 Enfoque de diseño

No hay una forma sencilla para seleccionar la tecnología apropiada para un caso concreto de energía renovable-desalinización. Es más adecuado seguir un enfoque iterativo, lo cual implica una evaluación cuidadosa de las opciones disponibles para atender la demanda regional de agua y la viabilidad económica de la solución adoptada.

El poder de decisión maneja la información como la cantidad y calidad del agua de alimentación, las especificaciones del agua desalinizada, tipo, tamaño, potencial de la energía renovable disponible y la madurez comercial de la tecnología a fin de decidir sobre las características operacionales de cada solución probable (Voivontas et al., 2001).

#### 3.2.1. Diseño de la unidad de desalinización-fuente de energía renovable

La capacidad de la planta de desalinización y la operación diaria y estacional, son determinados por la demanda de agua. El proceso de desalinización se selecciona teniendo en cuenta la capacidad de la planta, la calidad del agua de alimentación y las necesidades del agua producida. La capacidad de la planta, la salinidad del agua de alimentación, así como las características de funcionamiento de la planta, determinan las necesidades energéticas de cada procesos de desalinización. En la Tabla

3.4 se describen los modelos para la evaluación de las necesidades energéticas de los procesos de desalinización.

El problema más difícil asociado con la implementación de la energización de una planta de desalinización via fuentes de energía renovable es la adecuación óptima de la producción de energía renovable intermitente, con la demanda constante de energía para el proceso de desalinización. La administración de la energía y la gestión de la demanda son las dos opciones disponibles para resolver este problema.

Los procesos de desalinización de agua de mar que pueden ser utilizados son: destilación de múltiple efecto, compresión de vapor, ósmosis inversa y electrodiálisis (Voivontas et al., 2001).

### 3.3. Sistema de desalinización de agua de mar por destilación multiefecto en combinación con un sistema mecánico de compresión de vapor

Este sistema está diseñado para producir 100 m<sup>3</sup>/h de agua dulce. El agua de mar entra primero a un sistema de destilación multiefecto alimentado por energía térmica, produciendo 37.5 m<sup>3</sup>/h de agua dulce. La salmuera concentrada pasa a un sistema evaporador de compresión mecánica de vapor generándose los 62.5 m<sup>3</sup>/h restantes y sal cristalizada. Los consumos energéticos requeridos para ello son 2,362 kW<sub>t</sub>.h para el sistema de destilación multiefecto y 1,944 kW<sub>e</sub>.h para el sistema de compresión mecánica de vapor, siendo el 55% de las necesidades energéticas de origen térmico. En la Figura 3.4 se muestra el diagrama de flujo del sistema propuesto (Viedma et al., 2009).

## Destilación multiefecto (DME)

## Compresión mecánica de vapor (CMV)

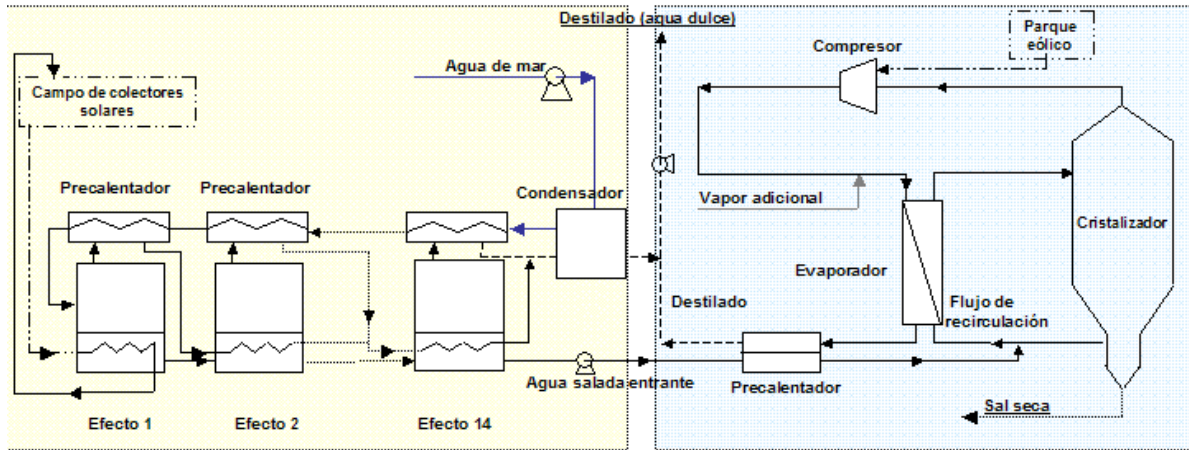


Figura 3.4. Diagrama de flujos (Viedma et al., 2009)

El sistema de destilación multiefecto está compuesto por 14 etapas o efectos conectados en serie en orden decreciente de presión y temperatura desde la etapa 1 hasta la etapa 14. El agua de mar es precalentada de etapa en etapa en los 13 precalentadores. Desde la etapa 1, el agua de mar pasa de una etapa a otra por efecto de la gravedad antes de ser extraída de la etapa 14 mediante una bomba. Parte del agua de mar es utilizada como refrigerante del condensador para después ser expulsada y el resto se utiliza para ser pulverizada sobre el haz de tubos de la etapa 1. El agua dulce es extraída del condensador por medio de una bomba para destilados.

El proceso de destilación se produce en vacío parcial y, por lo tanto, a bajas temperaturas. El rango de valores de temperatura y presión va de 67°C y 0.28 bar, para la primera etapa hasta 33°C y 0.05 bar de la décimo cuarta etapa. La razón de no sobrepasar los 70°C es evitar las incrustaciones de sales en los evaporadores. La salmuera concentrada

entra en el precalentador del sistema de compresión mecánica de vapor, donde se produce la separación total del agua y la sal.

Los principales elementos del sistema de compresión mecánica de vapor son tres: Un evaporador, un cristalizador y un compresor. La salmuera se incorpora tras pasar por un precalentador al flujo de recirculación entre el cristalizador y el evaporador de haz de tubos verticales. La disolución más concentrada permanece en el cristalizador, donde se van formando cristales de sal que en el proceso de recirculación aumentan hasta sedimentarse en el cono inferior del cristalizador. En el extremo inferior de éste se extrae la sal, que pasa a un proceso de secado y depuración.

El vapor producido en el evaporador se condensa en la parte superior del cristalizador a 1.4 bar de presión y 52°C de temperatura, se separa y sale por un conducto en el extremo superior del cristalizador hacia el compresor. Este vapor es comprimido en el compresor centrífugo de vapor donde la presión se eleva a 2.2 bar a una temperatura de 189 a 190°C.

Este vapor sobrecalentado pasa a la camisa del evaporador donde se condensa cediendo su calor latente para evaporar la salmuera recirculante.

### 3.3.1. Ciclo termodinámico y análisis energético del sistema de compresión mecánica de vapor (CMV)

Una vez realizados los estudios paramétricos y elegidos los valores de las variables que establecen el ciclo, se puede proponer un punto de funcionamiento sobre el cual seguir desarrollando el estudio de viabilidad de la instalación teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Minimizar el costo energético debido a la compresión mecánica de vapor, lo cual significa elegir el menor salto térmico posible en el intercambiador ajustando en la medida de lo posible a la temperatura de condensación.
- Obtener áreas de intercambio de calor admisibles para el intercambiador de calor. El calor a intercambiar viene fijado por el caudal de agua que se va a evaporar, un descenso del salto térmico conlleva simultáneamente una disminución del coeficiente global de intercambio de calor y un aumento del área necesaria. A partir de una cierta temperatura de condensación, una disminución de ésta trae aumentos exponenciales del área necesaria.
- Trabajar con temperaturas de ebullición por debajo de los 60°C, que protejan la instalación de precipitados (incrustaciones) y/o corrosión.

Los parámetros de funcionamiento de la instalación calculados son:

- ✦ Caudal de evaporación: 27.0 kg/s
- ✦ Caudal en el intercambiador : 31.7 kg/s
- ✦ Coeficiente de recirculación: 1.1
- ✦ Concentración de sal en el evaporador:  $X_{\text{sal}}=6.7\%$
- ✦ Condiciones de evaporación:  $T_{\text{ebu}}=52.5^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{ebu}}=0.14$  bar
- ✦ Condiciones de condensación:  $T_{\text{con}}=60.0^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{con}}=0.27$  bar
- ✦ Salto térmico  $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$
- ✦ Energía necesaria para desalar el agua: 30.4 kWh/m<sup>2</sup>
- ✦ Área específica de intercambio: 50 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>/h)

### 3.3.2. Integración del sistema de destilación multiefecto (DME) como fase previa al sistema de compresión mecánica de vapor (CMV)

Parte del agua dulce se obtendrá en el sistema DME y la salmuera más concentrada en sal que el agua de mar original, que pasará al ciclo de evaporación con CMV. Este cambio de salinidad origina una modificación en el salto térmico o induce a variaciones en la temperatura de condensación.

Se han realizado algunos cálculos modificando la temperatura de condensación y manteniendo constante el salto térmico en 8°C. La sobresaturación a la salida del evaporador también se mantiene constante modificando el caudal de recirculación.

El sistema de destilación multiefecto ha sido diseñado suponiendo los siguientes criterios:

- ✦ La planta de destilación multiefecto está compuesta por 14 efectos o etapas conectadas en serie,
- ✦ El destilado está libre de sales, las pérdidas de masa y calor en el sistema de vacío son despreciables,
- ✦ En el evaporador las temperaturas de la fase líquida y la fase vapor se relacionan mediante las correlaciones de elevación del punto de ebullición,
- ✦ Las pérdidas de calor son despreciables debido al aislamiento y las bajas temperaturas de operación,
- ✦ Perfecta mezcla de agua y vapor y



- ✦ El calor específico a presión constante, depende sólo de la temperatura.

El modelo termodinámico diseñado se ha basado en el proyecto PSA SOL-14 (planta de desalinización en Almería, España), donde el factor de rendimiento óptimo del sistema es de alrededor de 9.

Si se considera a la planta de destilación multiefecto como primer paso o fase previa para la completa desalinización al sistema de compresión mecánica de vapor, en la Tabla 3.4 se muestra la energía consumida y las concentraciones de sal en el agua de entrada al sistema de compresión mecánica de vapor (CMV) dependiendo del porcentaje de agua de entrada al CMV y del caudal que entra al sistema de destilación multiefecto (DME).

Los consumos están referidos por cada m<sup>3</sup> producido por el sistema en conjunto y, por eso, disminuye el consumo eléctrico por m<sup>3</sup> producido en un 33% al hacer pasar por el ciclo multiefecto el 100% del caudal original.

Se puede comprobar cómo a la entrada del ciclo de compresión mecánica de vapor (CMV) aumenta la concentración de sal (Viedma et al., 2009).

Tabla 3.4. Comportamiento del sistema DME+CMV, para diferentes caudales a la entrada del sistema DME (Viedma et al., 2009)

DME % Volumen	CMV Producción (m3/h)	DME Producción (m3/h)	Consumo eléctrico (kW)	Consumo térmico (kW)	% CT	CMV Xsal
0.00	100.00	0.00	3,031.18	0.00	0.00	3.50
20.00	92.47	7.50	2,821.68	473.00	14.36	3.92
40.00	85.00	15.00	2,595.59	495.00	26.69	4.34
60.00	77.49	22.50	2,381.61	1,418.00	37.32	4.76
80.00	69.98	30.00	2,164.44	1,890.00	46.62	5.18
100.00	62.50	37.50	1,944.19	2,362.00	54.85	5.60

### 3.3.3. Suministro de energía mediante energías renovables

#### 3.3.3.1. Abastecimiento de energía térmica con recolectores solares

El objeto de este apartado es prediseñar una instalación solar que sea capaz de proporcionar la energía térmica demandada en la planta de destilación multiefecto (DME). Se necesitan 2,362 kW de potencia térmica en la planta DME para desalar 100 m<sup>3</sup>/h de agua de mar. Considerando que la instalación trabaja continuamente 24 horas al día, la energía demandada anualmente es de 74,488,032 MJ/año (20,691,120 kW-h/año).

El sistema proporciona 100 m<sup>3</sup>/h de agua de mar a 67°C. Para conseguir esto, el agua de mar que ha sido precalentada a 49°C como líquido de refrigeración en las etapas de la planta de destilación multiefecto es además calentada en el intercambiador por transferencia de calor de otro circuito de agua que ha sido precalentado por recolectores solares y almacenado en un tanque acumulador.

Como la radiación solar es discontinua, la potencia capturada durante las horas de máxima radiación solar excederá a la necesaria en la planta. El exceso de energía térmica permanece almacenado en el tanque acumulador como reserva en las horas de baja radiación. Adicionalmente, para que la planta desalinizadora trabaje a régimen continuo y para prever la escasez o ausencia de la radiación solar, se debe introducir un sistema de apoyo que sea capaz de garantizar en estos casos las condiciones de 67°C para un caudal de 100 m<sup>3</sup>/h.

El número de recolectores necesarios a instalar depende del tipo de recolector, caracterizado principalmente por su curva de rendimiento y de la zona geográfica. En el caso de la referencia consultada la instalación estará localizada en Murcia, España (37°59' N) y de ella debe tomarse el promedio de la potencia solar disponible en dicha zona.

En la Tabla 3.5 se presentan los datos de la irradiación media diaria disponible, aplicándole unos coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  de corrección de claridad del cielo y corrección no perpendicular de los rayos solares con el recolector respectivamente. La Figura 3.5 muestra el sistema (Viedma et al., 2009).

Tabla 3.5. Datos solares para la región de Murcia (España) (Viedma et al., 2009)

Meses	$H_p$ ( $\text{kJ/m}^2$ )	$k_2$	$E = k_1 \cdot k_2 \cdot H_p$ ( $\text{kJ/m}^2$ )	Número de horas útiles (h)	Irradiancia media I ( $\text{W/m}^2$ )
Enero	10.100	1,33	11.995,67	7,0	476,02
Febrero	14.800	1,24	16.388,34	7,5	606,98
Marzo	16.600	1,14	1.6899,13	8,5	552,26
Abril	20.400	1,03	18.763,72	10,0	521,21
Mayo	24.200	0,96	20.746,18	11,0	523,89
Junio	25.600	0,93	2.1260,54	11,5	513,54
Julio	27.700	0,96	23.746,66	11,5	573,59
Agosto	23.500	1,04	21.824,92	10,5	577,38
Septiembre	18.600	1,17	19.433,47	9,0	599,80
Octubre	13.900	1,32	16.384,76	8,0	568,92
Noviembre	9.800	1,42	12.426,99	7,0	493,13
Diciembre	8.100	1,41	10.198,95	6,5	435,85

Para estimar el número de recolectores solares necesarios, se realizó un estudio del rendimiento del recolector solar con tres modelos diferentes. Se realizó un balance mensual de la disponibilidad y la necesidad energética para los meses de verano e invierno. Para calcular el área del campo de recolectores se consideraron dos criterios:

- ✓ Superficie máxima, de modo que se cubra la necesidad energética incluso en diciembre, el mes de menor disponibilidad de energía solar para esta región del planeta.
- ✓ Superficie media, de modo que se cubran las necesidades medias. En este caso, durante los meses en que la energía disponible sea menor que la media, se deberá completar con una caldera alimentada con gas. Esta solución es considerada en el análisis termo-económico.

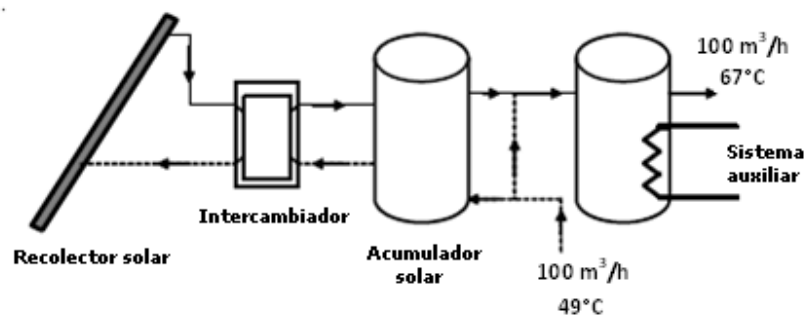


Figura 3.5. Diseño de la instalación solar (Viedma et al., 2009)

En la Tabla 3.6. se muestra la energía requerida, la energía obtenida por el sistema de recolectores solares, considerando la máxima superficie obtenida (primer criterio), la superficie media (segundo criterio) y el número final de recolectores necesarios.

Tabla 3.6. Datos de energía de los colectores solares térmicos, CST (Viedma et al., 2009)

Recolector solar	Energía demandada	Energía solar	Superficie	Superficie	Número de CST
térmico, CST	anualmente (MJ)	disponible (kJ/m <sup>2</sup> )	máxima (m <sup>2</sup> )	media (m <sup>2</sup> )	(superficie media)
CST 1	74,488.03	3,135,292.00	47.01	23.76	6.10
CST 2	74,488.03	3,284,961.00	43.48	22.68	6.59
CST 3	74,488.03	2,545,929.00	72.79	29.26	11.70

### 3.3.3.2. Abastecimiento eléctrico con energía eólica

Para el abastecimiento eléctrico de la etapa de compresión mecánica de vapor, se precisan 1,944 kW de potencia que han de ser proporcionados por una instalación eólica. A esto hay que añadir la potencia necesaria del bombeo tanto de la planta desalinizadora como del campo de recolectores solares. Se estima en 3 kWh/m<sup>3</sup> de agua dulce, la energía eléctrica necesaria para esta tarea.

Por lo tanto, la energía mínima que deberá producir el parque eólico para cubrir la demanda anual de la planta desalinizadora será:

$$E = \text{Potencia eléctrica} \times \text{no. de horas}$$

- Demanda eléctrica del compresor:

$$E_0 = 1,944 \text{ kW} \times (365 \text{ días} \times 24 \text{ horas}) = 17.03 \text{ GWh/año}$$

- Demanda eléctrica del sistema de bombeo:

$$E_1 = 3 \text{ kWh/m}^3 \times 100 \text{ m}^3 \times (365 \text{ días} \times 24 \text{ horas}) = 2.63 \text{ GWh/año}$$

Por lo tanto la demanda eléctrica total de 19.66 GWh/año.

El número necesario de aerogeneradores dependerá de la potencia de la máquina, así como del número de horas equivalentes anuales de funcionamiento de cada uno de ellos, dependiente del régimen de vientos existente. Considerando un régimen de viento medio (2,000 h-eq) y el tipo de aeroturbinas seleccionada de 2MW de potencia, se necesitarán 5 aeroturbinas para abastecer la demanda eléctrica. Por tanto, la potencia nominal del parque eólico es:

$$P_n = 5 \text{ aerogeneradores} \times 2,000 \text{ h-eq} = 10 \text{ MW}$$

La energía eléctrica producida se cederá a la red eléctrica en su totalidad y se estima en 20,000,000 kW-h/año (Viedma et al., 2009).

### 3.4 Sistema de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa alimentado por energía eólica sin el uso de baterías (Miranda e Infield, 2002)

Este sistema se ha basado en algunos de los puntos discutidos en la literatura: la existencia de una alternativa de suministro eléctrico (red eléctrica o por un generador a diesel); la adecuación de la energía eólica disponible a la carga y las características de funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa.

#### 3.4.1. Sistema con respaldo en el suministro de energía (diesel / Red eléctrica local)

En este sistema está prevista una fuente de energía adicional (un generador a diesel o incluso la red eléctrica local) para que la potencia suministrada a la planta de ósmosis inversa sea constante. La generación de energía de respaldo complementa la potencia generada por la turbina de viento para coincidir con el consumo de energía de la planta de ósmosis inversa.

La principal ventaja de esta clase de sistemas, como en cualquier configuración híbrida eólico-diesel es un ahorro de combustible, que puede aumentar la disponibilidad del generador y reducir los costos generales de energía.

Por otro lado, los problemas como la escasez de combustible, mantenimiento del generador a diesel, interrupciones o cortes en el suministro de energía, puede dar lugar a la no disponibilidad del sistema de ósmosis inversa, ya que no puede ser alimentado solamente por la turbina eólica.

### 3.4.2. Sistema sin respaldo en el suministro de energía

Los sistemas sin una fuente externa de energía se pueden dividir en dos categorías, con énfasis en el funcionamiento de la planta de ósmosis inversa: sistemas que se ejecutan bajo condiciones de operación aproximadamente constantes y los que experimentan condiciones de operación variable.

#### 3.4.2.1. Condiciones de operación casi constantes

Este primer tipo de condiciones de operación puede ser ejecutado por tres medios diferentes: encendido/apagado (on/off) de las unidades de ósmosis inversa; uso de dispositivos de almacenamiento y reducción de la capacidad normal del aerogenerador. En los tres casos, se realiza un intento de suministrar a los módulos individuales de ósmosis inversa con una potencia casi constante.

##### 3.4.2.1.1. Dispositivos de almacenamiento

En esta estrategia, los dispositivos de almacenamiento se utilizan para acumular los excedentes de energía durante los períodos en que la energía generada por la turbina eólica es mayor que la demanda de la planta

desalinizadora. Este excedente sería utilizado más tarde, cuando la energía generada es insuficiente para satisfacer la demanda de carga.

Una manera común de almacenar el exceso de energía es mediante el uso de baterías. En este caso, la relación entre la presión de funcionamiento, el tamaño de almacenamiento y la velocidad media del viento deben ser considerados en la etapa de diseño. Además, el capital y los costos de mantenimiento deben ser cuidadosamente evaluados. Una desventaja de este enfoque para el diseño del sistema es la clasificación del sistema de almacenamiento de energía, ya que esto puede hacer que sea poco atractiva económicamente en los niveles superiores de energía, debido al tamaño del banco de baterías.

#### 3.4.2.1.2. Unidad de conmutación para la planta de ósmosis inversa

Esta estrategia se basa en el uso de una turbina eólica de alta potencia conectada a múltiples unidades más pequeñas de ósmosis inversa. El control de la potencia se logra encendiendo y apagando las unidades de ósmosis inversa, a fin de satisfacer la demanda de potencia total generada por la turbina de forma instantánea. No hay limitación sobre el número de sistemas de remo y este enfoque es viable hasta los niveles de potencia de cientos de kilowatts.

Aunque, no se recomiendan ciclos de unidades de ósmosis inversa, este problema puede superarse mediante la aplicación de diferentes tipos de configuraciones. Existen casos en los que se ha utilizado una turbina de alta potencia operando cerca de una velocidad constante (administración de la generación) conectada a muchas unidades igualmente pequeñas de



ósmosis inversa, las cuales se encienden y apagan (administración de la carga). Para suavizar las fluctuaciones, se utiliza el almacenamiento de energía a corto plazo. Variando el ángulo de paso de las palas de la turbina de viento se controla la energía generada (Figura 3.6).

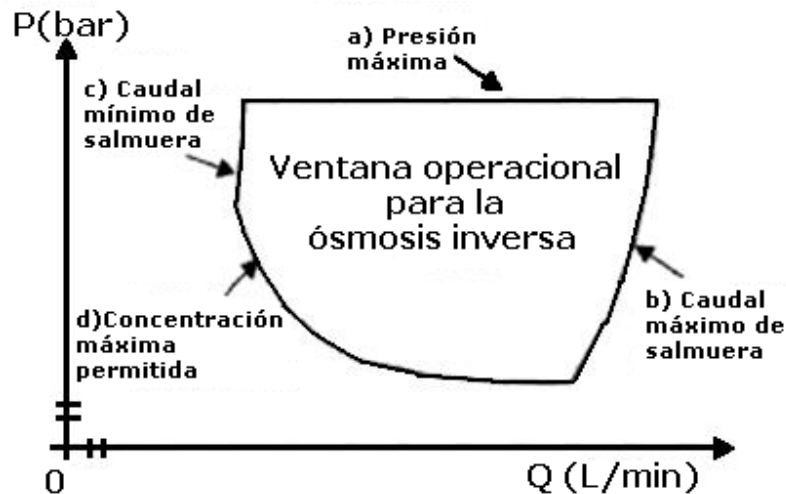


Figura 3.6. Ventana de operación de las membranas de ósmosis inversa (Miranda e Infield, 2002)

#### 3.4.2.1.3. Reducción de potencia de la turbina de tiempo

Este enfoque consiste en hacer uso de la parte final plana de un campo de turbinas de viento controlando la curva de potencia, para operar el sistema de ósmosis inversa, con una potencia aproximadamente constante. Una implicación de esta configuración es que, dado que la potencia nominal de la turbina sólo se logra a altas velocidades del viento, tendría que ser reduciendo la potencia o cambiando la configuración del mecanismo de giro. Esto hará que la energía generada sea igualada a bajas velocidades del viento y, en consecuencia, tener valores más bajos. Por lo tanto, la calificación original del rotor de la turbina debe ser considerablemente superior a la potencia nominal de la unidad de ósmosis inversa, haciendo al sistema más caro.

#### 3.4.2.2. Condiciones de operación variables

En contraste con los sistemas que operan bajo condiciones constantes, otra estrategia operativa se basa en el establecimiento y la imposición de determinados límites operacionales, como se muestra en la Figura 3.6. Esto significa que basándose en la potencia de entrada de la unidad de ósmosis inversa (presión veces el flujo), la estrategia de control queda determinada imponiendo un punto de trabajo fijo en el sistema, el cual se encuentra dentro de la región permitida (como se puede ver en la Figura 3.6).

De esta manera, se realiza un intento para hacer funcionar el sistema de forma autónoma en un rango mayor de potencias, sin la necesidad de utilizar una unidad de respaldo o dispositivos de almacenamiento energético. El efecto general es el de reducir el capital de inversión y los costos de operación. Un aspecto que debe enfatizarse es que se conoce poco acerca de las consecuencias de las variables de operación para las membranas de ósmosis inversa. Se reconoce que la fatiga mecánica puede ocurrir y que la vida de los elementos de ósmosis inversa puede verse reducida y alterar su desempeño.

#### 3.4.3. Diseño y operación del sistema

El sistema ha sido configurado y desarrollado por CREST, siglas del Centro para Sistemas de Tecnología de Energía Renovable, el cual se muestra en la Figura 3.7. El dispositivo de bombeo está compuesto por bombas Spectra Clark las cuales poseen un mecanismo de recuperación de energía

y el arreglo de membranas para ósmosis inversa, el cual se explica brevemente a continuación.

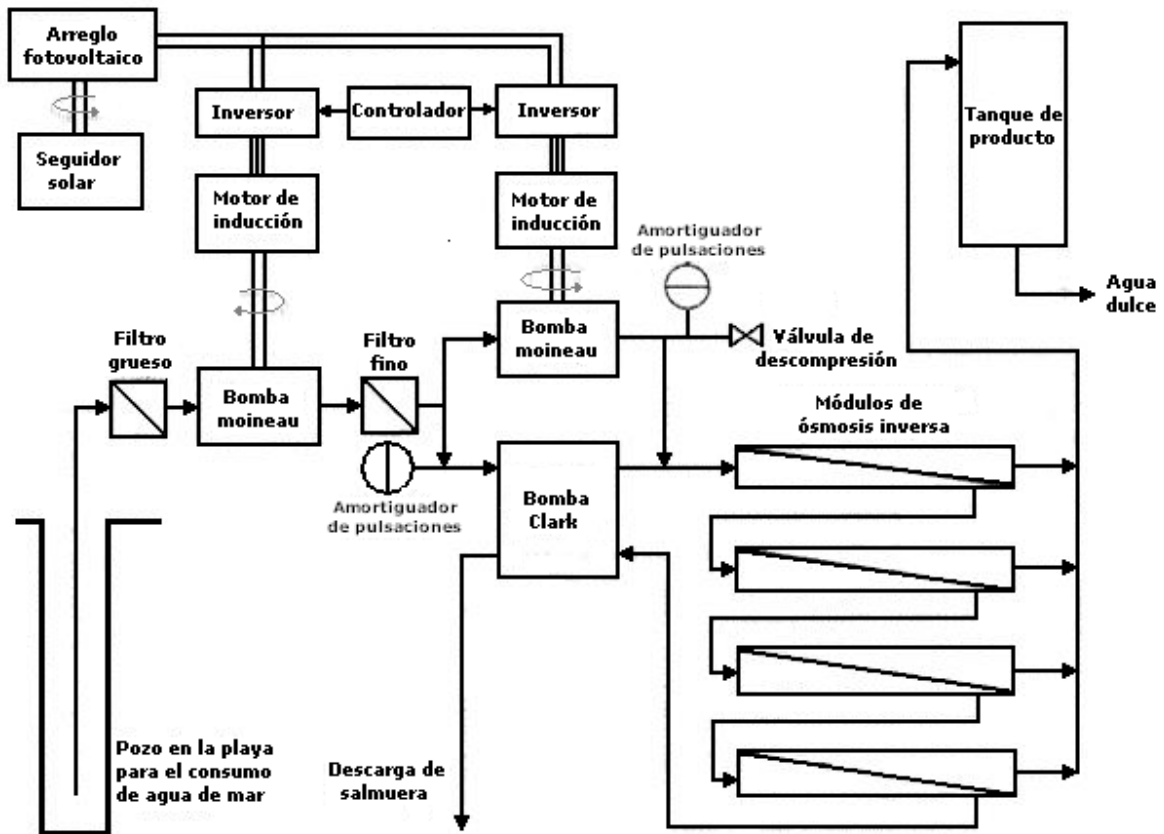


Figura 3.7. Configuración del sistema (Thomson e Infield, 2002)

La bomba tipo Moineau (cavidad progresiva) aspira el agua de mar de un pozo en la playa y la eleva a presión media. Una versión sumergible de la bomba se encuentra disponible por un costo adicional. La bomba tipo Clark de alimentación de agua, eleva la presión media a alta, en virtud de la energía que se recupera de la concentración. La relación de flujo de la bomba Clark es fijado por el diseño, que normalmente da una relación de recuperación de agua del 10% en las membranas. Sin embargo, la bomba de émbolo que se muestra en la Figura 3.7, inyecta una fuente adicional de alta presión, lo que aumenta el porcentaje de la relación de

recuperación de agua a cualquier valor deseado. La separación del control de velocidad de las dos bombas rotativas proporciona un control total de:

- La energía procedente del panel fotovoltaico, para el seguimiento del punto de potencia máxima (SPPM), y
- El coeficiente de recuperación de agua, caudal máximo del agua producida.

Un control apropiado de las dos velocidades de la bomba es fundamental para maximizar la eficiencia global del sistema.

#### 3.4.3.1. Modelo de simulación Matlab-Simulink

- La configuración del sistema mostrado en la Figura 3.7 ha sido desarrollado por CREST a través de un extenso uso del simulador Matlab-Simulink, el cual incluye todo lo necesario, desde la radiación solar que alcanzaban los paneles fotovoltaicos a través del agua en el tanque de producto.

Cada uno de los componentes de hardware se basa a detalle y las secciones críticas se basan en mediciones precisas en laboratorio. El modelo representa plenamente las variaciones de los flujos y las presiones en todo el sistema con respecto de las variaciones en la radiación solar y la temperatura del agua de alimentación. Este modelo puede, por ejemplo, realizar una simulación de hora por hora, de un año completo de operación. El modelo de CREST, Matlab-Simulink, también incluye un mecanismo para estimar el costo total de capital de los principales componentes en el sistema objeto de la investigación, el cual fue usado

para evaluar la relación costo/rendimiento de los componentes alternativos y las numerosas configuraciones.

#### 3.4.3.2. Sitio de recolección de datos

Los datos fueron tomados en las costas del Mar Rojo, específicamente en la población de Massawa, Eritrea, África. Esto permitió tomar decisiones claras para el diseño, basadas en predicciones de desempeño hora por hora durante todo un año. Sin embargo, afortunadamente, la mayoría de las decisiones no son específicas del sitio y, por lo tanto, el diseño es bueno para cualquier sitio con un buen recurso solar.

Obviamente, los resultados reales pueden variar en condiciones diferentes y sitios diferentes, pero la alteración del diseño es probable que sólo requiera un ajuste del número de paneles fotovoltaicos. En particular, los datos de Massawa son los siguientes: un análisis químico del agua de mar, de un pozo de agua de mar en la zona muestra una concentración de sólidos disueltos totales de casi 40,000 ppm, que es como se espera en la región del Mar Rojo y es isosmótico con 34,300 ppm de NaCl puro. Un perfil de temperatura anual para el Mar Rojo muestra un máximo de 33°C en verano y un mínimo de alrededor de 17°C en invierno. La irradiación solar hora por hora y los datos de temperatura ambiente se tomaron vía Meteonorm 4.0 (Base de datos de radiación solar global, en Suiza).

#### 3.4.3.3. Motores, inversores y controlador

Los motores y los inversores que se muestran en la Figura 3.7 son unidades industriales estándar, basada en motores de inducción de alta eficiencia y en inversores de frecuencia variable. Las recientes mejoras en

la eficiencia de los motores pequeños de inducción para el uso industrial general, significa que esta tecnología es ahora casi tan eficiente como cualquier sistema de motores síncronos disponible en el mercado, CA o CD (corriente alterna o corriente directa). El modelo de Matlab-Simulink del sistema completo: Paneles fotovoltaicos – ósmosis inversa mostró que el mayor costo de las diversas opciones de motores síncronos que se consideraban no estaba justificado. Además, el uso de componentes industriales estándar que pueden ser fácilmente sustituidos, resulta ser muy atractivo, especialmente para los sistemas destinados a ser utilizados en zonas remotas. Los inversores utilizados en sistemas de bombeo, vía paneles fotovoltaicos, también fueron considerados, ya que poseen la ventaja de la potencia máxima de giro y los cuales se construyen en el lugar. Sin embargo, ya que es un mercado relativamente pequeño, estos inversores tienden a ser bastante caros y ofrecen poco margen de maniobra en la estrategia de control. En particular, la adecuada distribución de la energía disponible entre los dos motores, para la optimización de la relación de recuperación de agua y la maximización del flujo del producto, resulta ser un punto muy difícil de implementar con inversores estándar para sistemas de bombeo mediante paneles fotovoltaicos.

Los inversores industriales estándar para estas dimensiones están diseñados para operar a una alimentación de 230 VCA. Sin embargo, la primera etapa suele ser un puente rectificador y siempre y cuando sea éste el caso, el inversor funcionará igual de bien que con una fuente de CD (corriente directa) (la corriente directa pasa directamente a través del rectificador). La conexión directa de un arreglo de paneles fotovoltaicos a un inversor industrial estándar es una técnica probada. Se requiere que el rango de tensión del módulo fotovoltaico se encuentre dentro del rango de

tensión operativa de seguridad del inversor. Un rango típico es de 230 VCA  $\pm 15\%$ , lo que se traduce en 276 a 374 VCD, pero en la práctica, el límite inferior puede ser ampliado.

El controlador que se muestra en la Figura 3.7 tiene dos objetivos. En primer lugar, debe proporcionar el seguimiento de punto de máxima potencia, que controla los consumos eléctricos de la red de los paneles fotovoltaicos, con el fin de obtener la máxima potencia de salida en condiciones diversas, particularmente irradiación y la temperatura del módulo. CREST está desarrollando un algoritmo de punto de máxima potencia de salida específicamente para el uso con inversores industriales estándar, sin la necesidad de sensores adicionales o calibración. Las pruebas iniciales del algoritmo fueron con el sistema de ósmosis inversa, pero el potencial de su aplicación es mucho más amplio.

En segundo lugar, el controlador debe compartir la energía del arreglo de paneles fotovoltaicos de manera adecuada entre los motores, con el fin de optimizar la relación de recuperación de agua y, por lo tanto, maximizar el flujo del producto, como se mencionó previamente.

#### 3.4.3.4. Generador fotoeléctrico

El diseño incluye un generador fotoeléctrico de 2.4 kWp, el cual fue seleccionado en el lugar mencionado en Massawa gracias a la ayuda del modelo simulador Matlab-Simulink del sistema fotovoltaico-ósmosis inversa, para minimizar el costo total por metro cúbico de agua producida. El modelo mostró que un conjunto más amplio podría aumentar el flujo del producto, pero que el costo por metro cúbico se elevaría. Con un panel más pequeño, el sistema podrá lograr su objetivo de producción total

durante el día, pero al amanecer y al atardecer el flujo se reduciría y, otra vez, el costo total por metro cúbico se elevaría.

Incluso con las impresionantes mejoras en rendimiento, dadas por la bomba Spectra Clark, a través de todo el sistema fotoeléctrico-ósmosis inversa, el panel fotoeléctrico sigue siendo la sección de costo más elevado en la instalación fotoeléctrica-ósmosis inversa. Representa aproximadamente un tercio del costo total de capital. Será, sin embargo, la que compense todos los gastos de combustible de toda la vida de la instalación.

El seguidor solar que se muestra en la Figura 3.7 es el que hace girar el conjunto fotoeléctrico para enfrentar al sol durante todo el día. Estos rastreadores se utilizan habitualmente en aplicaciones de bombeo fotoeléctrico. El modelo Matlab-Simulink del sistema completo fotoeléctrico-ósmosis inversa mostró que la utilización de un solo eje aumentará la producción anual de agua dulce por aproximadamente 33%. Un seguimiento de doble eje proporcionaría un incremento de sólo 3%. Por esta razón, se seleccionó un seguidor de un solo eje.

#### 3.4.3.5. Calidad del agua de alimentación

El costo de operación principal de un sistema sin baterías fotoeléctrico-ósmosis inversa se espera que sea la sustitución de las membranas de ósmosis inversa cuando se comiencen a ensuciar y ya no puedan ser limpiadas con efectividad. El índice de ensuciamiento de las membranas depende fuertemente de la calidad del agua de alimentación. La Figura 3.7 muestra que el agua de mar de alimentación proviene de un pozo en la playa. Esto se considera generalmente preferible a una toma de mar a



tubo abierto en la playa. En un pozo de playa bien construido, la arena de la playa puede funcionar como un eficiente filtro previo. Si la arena del lugar no es ideal, su rendimiento puede ser mejorado mediante la inclusión de arena de grano fino en torno de un revestimiento poroso. En la ausencia de una playa de arena adecuada, se puede considerar la construcción de un filtro lento de arena, aunque esto requeriría de una bomba adicional.

#### 3.4.3.6. Pre calentamiento del agua de alimentación

Es bien sabido que el flujo de los productos de un sistema de ósmosis inversa aumenta con el incremento de la temperatura de alimentación. La concentración del producto también aumenta, pero si esto se puede tolerar, entonces el precalentamiento del agua de alimentación puede ser útil. De hecho, el precalentamiento es una técnica reconocida en los sistemas de ósmosis inversa en los barcos, que puede utilizar el calor residual del motor empleado. Con esto en mente, se ha considerado el beneficio potencial de la energía solar de pre-calentamiento del agua de alimentación en un sistema fotoeléctrico-ósmosis inversa. Se ha reconocido que sería necesaria un área muy grande de energía solar para calentar el agua para elevar significativamente la temperatura del agua de alimentación.

Para solucionar esto, se ha modelado y elaborado un sistema de intercambiadores de calor para recuperar el calor del concentrado y de los flujos de los productos. A falta de un mecanismo hidráulico de recuperación de calor salmuera-vapor, el modelo indica que la cantidad de agua producida se incrementará en alrededor de un 60% por el precalentamiento del agua de alimentación de 15 a 35°C. Esto sugirió que el

costo y la complejidad adicional del calentador solar de agua y los intercambiadores de calor fuesen justificados. Sin embargo, una vez que la bomba Spectra Clark para la recuperación de calor en el sistema salmuera-vapor fue añadida al modelo, el efecto de la temperatura del agua de alimentación prácticamente desapareció, haciendo evidente que el precalentamiento del agua de alimentación no era necesario (Thomson e Infield, 2002).

### 3.5. Desalinización de agua de mar mediante electrodiálisis propulsada por energía eólica

El proyecto recomienda el uso de una fuente de energía renovable como lo es la energía eólica, para la producción de un recurso natural escaso: el agua dulce. El proceso consiste en la conexión de tres tipos de sistemas de desalinización, ósmosis inversa, compresión de vapor y la electrodiálisis inversa. Para cualquiera de ellas la fuente de energía es un parque eólico, el cual no se encuentra conectado a la red de energía eléctrica pública para producir agua dulce a una escala significativa. El objetivo es evaluar la influencia de las variaciones de la energía eólica en el comportamiento de los elementos de la planta de desalinización y en la calidad del agua dulce producida.

La particularidad de las plantas desalinizadoras de agua de mar, acopladas a parques eólicos autónomos, implica que estos últimos deben estar estrechamente controlados cuando la fuerza del viento proporciona más energía de la que la planta de desalinización requiere. Por el contrario, cuando la energía eólica disponible no es suficiente para proveer de agua dulce para la producción nominal, la planta de desalinización también debe

adaptarse a esta situación, modulando la producción en función de la potencia disponible.

El sistema consta del siguiente número de unidades:

- ✦ Dos turbinas de viento (aerogeneradores) de 230 kW cada una
- ✦ Ocho unidades de ósmosis inversa con una capacidad de producción de 25 m<sup>3</sup>/d cada una
- ✦ Una unidad de compresión de vapor con capacidad de 50 m<sup>3</sup>/d
- ✦ Una unidad de electrodiálisis con una capacidad de producción de 192 m<sup>3</sup>/d que puede disminuir hasta 72 m<sup>3</sup>/d

### 3.5.1. Descripción de la planta

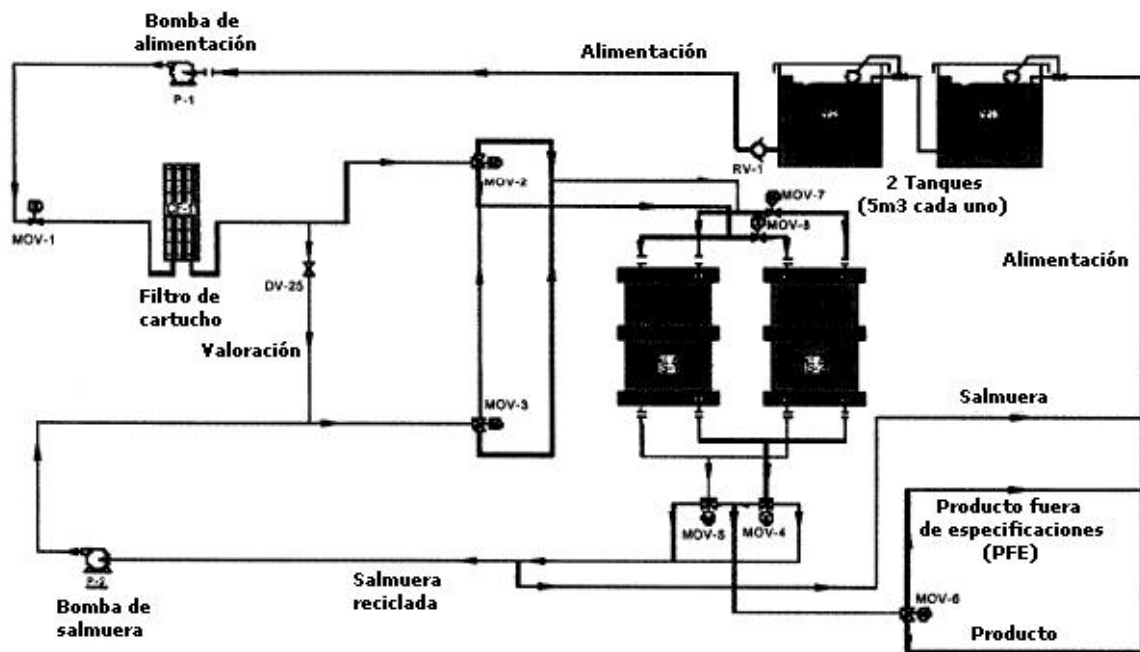


Figura 3.8. Diagrama de flujo de la planta de electrodiálisis (Veza et al., 2001, 2004)

La unidad de electrodiálisis ha sido diseñada para utilizar agua salobre en la alimentación y tratarla para su uso como agua potable. El propósito del tratamiento es mejorar la calidad del agua mediante la eliminación de sólidos disueltos, incluyendo los iones en disolución. La Figura 3.8 muestra el diagrama de flujo de la planta de electrodiálisis.

La unidad de electrodiálisis es un diseño modificado de un módulo estándar (modelo modificado de Aquamite V-II por parte de Ionics, Inc.). Debido a la entrada de energía de los vientos no estacionarios, se introdujeron algunas modificaciones básicas. Éstas fueron:

- Controladores eléctricos para corriente directa (CD) para cada etapa, en cada una de las pilas de membranas. Cada controlador CD es conducido por una señal de control, lo que significa que el voltaje (tensión eléctrica) CD a ser aplicado a la etapa eléctrica. Por lo tanto, la corriente continua o directa aplicada para la eliminación de compuestos iónicos (sales disueltas) pueden ser regulados de manera continua.
- Los controladores de frecuencia variable, tanto para la bomba de alimentación como para la bomba de reciclado de salmuera. Esto significa que el flujo a través de las membranas puede variar a raíz de una señal del sistema de control.
- Cambio en el diseño conceptual del sistema de control de la unidad. Una matriz de control en la que todos los datos operativos de la planta (potencia requerida, las tasas de flujo, los voltajes y la calidad del agua) deben ser almacenados. La planta leería la potencia disponible del sistema general de control y luego su propia unidad de

control que establezca todos los conductores para que coincida con el consumo de potencia deseado (Veza et al., 2001, 2004).

### 3.5.1.1. Descripción del equipo

#### 3.5.1.1.1. Dosis química

El electrodo de limpieza in situ del sistema funciona de manera intermitente mientras el sistema está funcionando, utilizando ácido (HCl) del tanque de ácido y agua de alimentación del sistema de electrodiálisis. Esto se generalmente se realiza cada 24 h. El ácido se mezcla con el agua de alimentación de los electrodos, mientras que se transmite a los compartimentos de los electrodos. El sistema está dotado de una adición de hasta dos flujos de agentes químicos en el concentrado de reciclaje de la pila de entrada. La limpieza ocasional del sistema mediante un proceso in situ puede ser necesaria para limpiar el aumento o crecimiento de incrustaciones y organismos biológicos de las pilas (Veza et al., 2001).

#### 3.5.1.1.2. Sistema hidráulico

Como no existe una fuente cercana de agua salobre (salinidad por debajo de 10,000 ppm SDT) y este sistema de electrodiálisis en particular no es capaz de desalar agua de mar, se decidió producir agua salobre artificial.

Entre las opciones para preparar el agua salobre deseada para alimentar la planta de electrodiálisis, se decidió mezclar agua de mar con agua dulce en un tanque. Se decidió producir el agua salobre del agua de mar mezclando agua de mar (38,000 ppm) con agua destilada (2 ppm)

producida en la planta de compresión de vapor en dos tanques de 5 m<sup>3</sup> (Veza et al., 2001).

#### 3.5.1.1.3. Bomba de alimentación y concentrados

EL régimen de flujo del producto y la presión necesaria para el funcionamiento se controlan con la bomba de alimentación y el concentrado reciclado, el cual proviene de las pilas de membranas, mediante una bomba para la salmuera. Las bombas se controlan mediante una pantalla con controladores de frecuencia variable (VFD, por sus siglas en inglés), la cual cambia la velocidad de la bomba para controlar la presión de alimentación y la presión diferencial de entrada de la pila de membranas, respectivamente.

#### 3.5.1.1.4. Sistema eléctrico

La unidad de electrodiálisis es alimentada y controlada a través de los sistemas de control eléctrico. La electricidad se utiliza para alimentar el controlador lógico programable, (PLC, por sus siglas en inglés), para conducir la unidad y proporcionar la circulación del agua y la dosificación de los agentes químicos, para dirigir el sistema de electrodiálisis (mediante la conversión a corriente continua, CD, con un controlador de CD) y también para controlar las válvulas operadoras de los motores.

#### 3.5.1.1.5. Sistema de control general

El sistema de control general, a través de la rutina de administración de energía, enviará la potencia disponible para la planta de electrodiálisis. Esta energía es una fracción de la potencia total disponible en el parque

eólico. Entonces el controlador lógico programable, (PLC por sus siglas en inglés) establecerá todos los controles de la planta para adaptar su consumo de energía a la fracción de energía disponible asignada. Los datos disponibles de energía, las órdenes comenzar/parar (del inglés start/stop) y la solicitud de datos son los elementos de comunicación que la planta recibe del sistema general de control (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Especificaciones de la planta de electrodiálisis (Veza et al., 2001)

Especificaciones del sistema	
Potencia de entrada	380 V, Trifásica, 50 Hz
No./ ubicación de conexiones	Una en el recinto de la unidad CD
Carga plena	140 A
Carga total conectada	93 kVA
CD a la salida del variador, etapa 1	132 V <sub>CD</sub> , 46 A máx.
CD a la salida del variador, etapa 2	91 V <sub>CD</sub> , 16 A máx.
No. de pilas de membranas de electrodiálisis	2
Etapas hidráulicas (por línea)	4
Fases eléctricas (por línea)	2
Flujo de alimentación máx.	243 m <sup>3</sup> /d
Capacidad de producción máx.	192 m <sup>3</sup> /d
Flujo de salmuera	51 m <sup>3</sup> /d
Consumo específico (8 m <sup>3</sup> /d)	1.22 - 2.32 kWh/m <sup>3</sup>
No. de pares de celdas	340
Configuración de los pares de celdas	95/75/95/75
Membranas:	
Transferencia de aniones, por pila	340
Transferencia de cationes, por pila	336
Transferencia de cationes pesados, por pila	6
Espaciadores, por pila	680 "tortuous" (Mark IV)

- Sistema de control del sistema de electrodiálisis: La planta de electrodiálisis es controlada por su propio PLC (Controlador lógico programable, por sus siglas en inglés), el cual es el responsable del

modo de operación y de la transferencia de datos sobre las variables del proceso al sistema de adquisición de datos.

- Pila de membranas. Todas las pilas utilizadas en la instalación son idénticas. La planta de electrodiálisis utiliza espaciadores especiales (de tercera generación) para proporcionar una alta eficiencia a la pila de membranas.
- Datos adicionales sobre las especificaciones de las pilas de membranas para la electrodiálisis. Estos se muestran en la Tabla 3.7. (Veza et al., 2001).

### 3.6 Producción de biodiesel a partir de algas marinas (Garibay-Hernández et al., 2009)

En este siglo la humanidad afronta una grave problemática debido al aumento de la demanda energética mundial, agotamiento de los combustibles fósiles, incremento del precio del petróleo y las dificultades ambientales causadas por los gases de efecto invernadero, precursores de la contaminación del aire y el calentamiento global. Esta situación demanda urgentemente fuentes alternativas de energía basadas en procesos sustentables, renovables y amigables con el medio ambiente que, además, permitan el "secuestro" de CO<sub>2</sub>. Una alternativa energética promisoría que ha resultado muy atractiva en años recientes es el biodiesel.

#### 3.6.1. Situación actual del biodiesel

El biodiesel consiste en monoalquilésteres de alcoholes de cadena corta, usualmente etanol y metanol, con ácidos grasos de cadena larga obtenidos



a partir de biomasa renovable y que es técnicamente capaz de sustituir al diesel derivado de petróleo como combustible.

En contraste con el petrodiesel, el biodiesel ofrece varias ventajas ya que es una fuente de energía renovable y biodegradable (se degrada cuatro veces más rápidamente que el diesel fósil) y produce menos emisiones indeseables (CO, hidrocarburos aromáticos policíclicos, partículas de hollín, óxidos de azufre y nitrógeno, metales) durante su combustión a causa de su estado oxigenado, siendo éstas, por ende, menos nocivas. Además, posee propiedades lubricantes que reducen el desgaste del motor y es un material seguro para su transporte, almacenamiento y manejo debido a su baja volatilidad y elevado punto de ignición (100 - 170°C). El biodiesel puede utilizar la infraestructura actual de almacenamiento y distribución para el diesel de petróleo. Asimismo, debido a la similitud de las propiedades físicas y químicas del diesel fósil con las del biocombustible, su uso no requiere de modificación alguna en los motores diesel convencionales, por lo que puede ser empleado en éste ya sea directamente (B100) o en mezclas biodiesel-petrodiesel al 2% (B2), 5% (B5) y 20% (B20).

Existen diversas metodologías para la producción de biodiesel, cuatro de ellas han sido estudiadas exhaustivamente: uso directo de aceites o mezclas de estos con diesel fósil, microemulsiones, pirólisis y transesterificación. La aplicación de las tres primeras alternativas en motores diesel es impráctica e insatisfactoria, ya que ocasionan problemas tales como la obstrucción de los inyectores, la formación de depósitos de carbono, la combustión incompleta, el golpeteo en el motor, el desgaste excesivo del mismo, el daño del lubricante y, en el caso específico de la pirólisis, la eliminación de los beneficios ambientales inherentes al uso de

combustibles oxigenados. La transesterificación o alcoholísis es la reacción química ocurrida entre los aceites (triglicéridos) y un alcohol (comúnmente metanol, etanol, propanol o butanol) para producir glicerol y alquil-ésteres de ácidos grasos, los cuales son conocidos como biodiesel.

Los principales factores que influyen en el proceso son la relación molar alcohol: glicéridos, el tipo de catalizador (álcali, ácido, lipasas), la temperatura, el tiempo de reacción y el contenido de agua y ácidos grasos libres de materia prima (Figura 3.9). En la actualidad, la mayoría del biodiesel es producido mediante transesterificación alcalina, a causa de su rapidez y condiciones moderadas que la caracterizan.

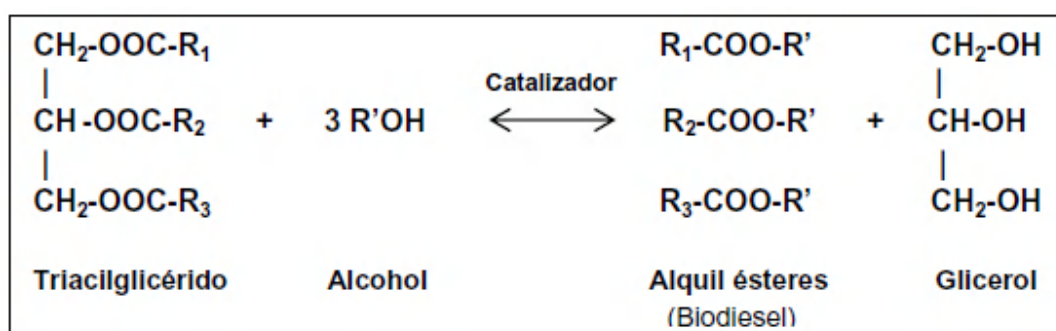


Figura 3.9. Reacción general de transesterificación. R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> y R' son radicales alquilo. Los catalizadores pueden ser álcalis, ácidos o enzimas (lipasas) (Garibay-Hernández et al., 2009)

La Unión Europea, con una producción de 8,812 millones de litros (ML) en el 2008, es el líder mundial en la industria del biodiesel y se estima que lo seguirá siendo durante la década próxima. Alemania encabeza la lista de países productores (3,203 ML). En el resto del mundo le sigue EEUU (3,182ML), Francia (2,063 ML) e Italia (676 ML). Países con economías emergentes tales como Malasia, China, Brasil, Colombia, Argentina e Indonesia son prometedores en la industria del biodiesel. Se estima un

mercado de biodiesel de 168,206 ML para el año 2016. Su introducción exitosa en varios países ha dado lugar al establecimiento de normas que regulan sus propiedades y aseguran su calidad. Los estándares usualmente utilizados como referencia son la norma ASTM D6751 en EEUU y las normas europeas EN 14213 (biodiesel para calefacción) y EN 14214 (biodiesel para uso vehicular). El cumplimiento de tales disposiciones precisa de biodiesel enriquecido en ácidos grasos de cadena larga con elevado grado de saturación, preferentemente los ácidos palmitoleico (16:1), oleico (18:1) y mirístico (14:0), que permitan disminuir las emisiones tóxicas y mejorar las propiedades del biocombustible (número de cetanos, poder calorífico y estabilidad oxidativa) sin comprometer sus características de flujo, viscosidad y lubricidad.

### 3.6.2. Fuentes de materia prima

Los aceites vegetales son la principal materia prima para la producción de biodiesel, razón por la cual el uso de cultivos de alto contenido oleaginoso ha sido estudiado exhaustivamente. Los principales materiales oleaginosos utilizados derivan de la palma, colza y soya, además del girasol, coco, cacahuate, oliva, mostaza, entre otros. El mercado creciente de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales comestibles, requeriría del uso de enormes extensiones de terreno fértil, situación que podría conllevar a crisis alimentarias ante la escasez de suelos cultivables. En el caso del sureste asiático y Brasil, el considerable incremento en su tasa de producción de biodiesel a partir de palma y soya, ha ocasionado problemas ambientales inherentes a la deforestación de regiones tropicales.

En consecuencia, se ha planteado el uso de aceites no comestibles procedentes de cultivos marginales tales como *Jatropha curcas* (piñón),

*Calopghyllum inophyllum* (tamanu), *Pongamia pinnata* (haya de la India, karanja), *Madhuca indica*, *Swida wilsoniana*, *Ricinus cummins* (higuerilla) y *Vernicia fordii* (tung). Estos cultivos marginales no requieren de terrenos fértiles, ya que proliferan en suelos áridos, pobres en nutrientes, con altos niveles de radiación y baja precipitación pluvial. El elevado costo de la materia prima, que contribuye del 50 al 90% del precio de producción del biodiesel, ha obstaculizado la comercialización del biocombustible, motivo por el cual se ha propuesto el uso de aceites de desecho y de grasas animales, alternativa que no ha sido satisfactoria a causa de los gastos adicionales necesarios para el refinamiento y la transesterificación del material. En el 2007, la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales (comestibles y no comestibles, vírgenes y usados) y grasas animales (12 Mtons) correspondió al 0.3% del consumo global de petróleo (3952.8 MTons), situación que hace constar la incapacidad de estas fuentes para desplazar la demanda actual y futura de combustible.

Asimismo, la obtención de biodiesel a partir de plantas oleaginosas (comestibles y no comestibles) está limitada por varios inconvenientes tales como los largos periodos de producción (meses o años) inherentes a la tecnología agrícola, el rendimiento lipídico restringido (menor al 5% de la masa seca total) y a la dependencia a las condiciones climáticas, la ubicación geográfica, la fertilidad de los suelos y la variedad cultivada. No obstante, el principal obstáculo es la extensa superficie de cultivo requerida y el volumen de agua necesario para el riego. La sustentabilidad de la industria del biodiesel requiere de materias primas alternas que permitan operar continuamente y superar las limitaciones señaladas. Una alternativa prometedora es la obtención de aceites a partir de cultivos de microalgas.

### 3.6.2.1. Las microalgas como materia prima alterna

Las microalgas, como ya se mencionó, son un conjunto heterogéneo de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes (cianobacterias) y eucariontes, que se localizan en hábitats diversos tales como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes. Se les considera responsables de la producción del 50% del oxígeno y de la fijación del 50% del carbono en el planeta. Su biodiversidad es enorme y se han identificado alrededor de 40,000 especies, aunque se estima que existen más de 100,000, de las cuales con frecuencia se desconoce su composición bioquímica y metabolismo. Las microalgas se clasifican de acuerdo con varios parámetros tales como pigmentación, ciclo de vida, morfología y estructura celular, como se muestra en la Tabla 3.8. Las especies más estudiadas para aplicaciones biotecnológicas corresponden a las algas verdes y a las diatomeas.

Desde la antigüedad las microalgas se han usado como alimento humano; sin embargo, es hasta ahora que han atraído la atención para la investigación de su potencial biotecnológico.

El atractivo de las microalgas posteriormente fue encauzado hacia otras aplicaciones tales como la acuicultura (cultivo de especies acuáticas vegetales y animales en medios naturales y artificiales), el tratamiento de aguas residuales, la obtención de sustancias químicas finas, la producción de agentes farmacéuticos y los procesos de bioconversión energética. La producción de bioenergía a partir de microalgas fue contemplada desde los años cincuenta; sin embargo, a partir de la crisis energética de 1975, el

potencial económico de esta tecnología fue reconocido por varios países como EEUU, Japón y Australia.

Tabla 3.8. Clasificación de las principales divisiones de las microalgas (Garibay-Hernández et al., 2009)

Clase	Características
Chlorophyta (algas verdes)	División conformada por una gran cantidad de especies, en particular por las que proliferan en ambientes dulceacuicolas. Pueden existir ya sea como células individuales o colonias. Su principal reserva de carbono es el almidón, sin embargo pueden almacenar lípidos bajo determinadas condiciones. En esta división destaca la clase Prasinophyceae, caracterizada por incluir especies que forman parte del 'pico-plancton'
Bacillariophyta (diatomeas)	Las diatomeas predominan en aguas oceánicas, no obstante también se les puede encontrar en aguas dulces y residuales. Se caracterizan por contener silicio en sus paredes celulares. Almacenan carbono de maneras diversas, ya sea como aceites o como crisolaminarina (polímero glucídico)
Heterokontophyta	División constituida por una gran diversidad de clases dentro de las cuales destaca la Cryophyceae (algas doradas), conformada por especies similares a las diatomeas en términos de composición bioquímica y contenido de pigmentos. Las algas doradas se distinguen por los complejos pigmentos que las conforman, los cuales les proporcionan tonalidades amarillas, cafés o naranjas. Las especies de este grupo son principalmente de agua dulce. Sus reservas de carbono son los lípidos y los carbohidratos. Asimismo, otras clases relevantes de esta división son: Phaeophyceae (algas cafés), Xanthophyceae (algas verde-amarillas), Eustigmatophyceae (forma parte del 'pico-plancton'), entre otras
Cianobacteria	Las cianobacterias son microorganismos procariotes cuya estructura y organización son similares a las de las bacterias. Las cianobacterias desempeñan un papel relevante en la fijación del nitrógeno atmosférico
Otras divisiones	Rhodophyta (algas rojas), Dinophyta (dinoflagelados)

Destaca el proyecto solventado por el Departamento de Energía de los EEUU (DOE, por sus siglas en inglés), con más de 25 millones de dólares, y el "Programa de especies acuáticas" del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés) con una duración de 18 años (1978 – 1996), cuyas importantes aportaciones en las áreas de aislamiento, caracterización, fisiología, bioquímica e ingeniería genética de especies microalgales, aunadas a los avances en el análisis económico y escalamiento de cultivos en sistemas eficientes, constituyen las bases actuales para el desarrollo de biocombustibles a partir de microalgas.

Asimismo, sobresale el programa subvencionado por el gobierno japonés (1990 – 2000), el cual estuvo dirigido al estudio de la fijación de CO<sub>2</sub> y a la optimización del crecimiento microalgal. Estos proyectos fueron suspendidos en parte, ante la falta de competitividad del biocombustible frente los precios del combustible fósil. No obstante, debido a la condición actual de agotamiento de los combustibles fósiles, el incremento de los precios del petróleo y el calentamiento global como consecuencia de la acumulación de gases de efecto invernadero, el panorama para la producción de bioenergía a partir de microalgas es alentador.

### 3.6.3. Características relevantes de los cultivos microalgales para la producción de biodiesel

En la actualidad se ha detectado el uso de lípidos microalgales para la producción de biodiesel, ya que es una alternativa que asegura satisfacer o reemplazar la demanda global de petrodiesel. Esta tecnología es prometedora dadas las ventajas que ofrece en contraste con las plantas oleaginosas, tales como: mayor eficiencia fotosintética; eficacia superior en la asimilación de nutrientes; y periodos cortos de producción sostenida durante todo el año, a causa de los breves tiempos de duplicación de las microalgas. Los cultivos microalgales son independientes de la estacionalidad inherente a los cultivos agrícolas y de la fertilidad del suelo, condición que posibilita prescindir de herbicidas y plaguicidas en general. Además, permite emplear territorios marginales e inclusive zonas no aptas para la agricultura, ganadería, industria y turismo. Asimismo, en contraste con los cultivos tradicionales, requieren de menores cantidades de agua y son flexibles ante el tipo y la calidad de ésta, por lo que prosperan convenientemente, tanto en aguas marinas, como dulces, salobres y residuales. Igualmente, el contenido oleaginoso y el perfil de composición

lipídica de las microalgas, puede ser controlado en función de las condiciones de cultivo, principalmente mediante la limitación de nutrientes. Además, esta tecnología puede ser acoplada al reciclaje del CO<sub>2</sub> liberado en las emisiones industriales, especialmente por las plantas de producción de electricidad a partir de combustibles fósiles.

Una ventaja adicional estriba en la posibilidad de obtener subproductos (proteína, carbohidratos, biopolímeros, pigmentos, biogás, etc.) a partir de la biomasa microalgal residual una vez que los lípidos han sido extraídos. Inclusive, resulta factible el empleo de algunos de estos residuos en la alimentación humana o animal y en la producción de fertilizantes o de otros biocombustibles. Finalmente, la ventaja competitiva más importante del biodiesel de microalgas, consiste en los rendimientos lipídicos por unidad de área considerablemente superiores a los obtenidos con plantas oleaginosas.

Una de las estimaciones más conservadoras para el rendimiento anual de biodiesel microalgal, como se indica en la Tabla 3.9, por lo menos duplica los rendimientos a partir de plantas oleaginosas. En el año 2008, la demanda de petrodiesel en México fue de 23,630 ML, el reemplazo de esta demanda con biodiesel de origen vegetal, incluso con aquél derivado de cultivos de elevada productividad lipídica como la palma, requeriría de extensas regiones fértiles. Igualmente, el uso de plantas marginales como *Jatropha curcas*, precisaría de superficies mayores a las comprendidas por cultivos microalgales independientemente de la fertilidad de los suelos.

La tecnología de microalgas es una alternativa prometedora, ya que para satisfacer el 100% de la demanda actual de diesel de petróleo en México, sería necesario emplear sólo un 1% de la extensión total del país, al



considerar el rendimiento lipídico y la dependencia a la calidad de los suelos por parte de los cultivos de microalgas.

### 3.6.4. Potencial de producción de biodiesel microalgal

Recientemente, el potencial de las microalgas para la producción de biodiesel ha sido sobreestimado por empresas diversas que aseguran productividades iguales o superiores al máximo teórico posible.

Tabla 3.9. Comparación de distintas fuentes de materia prima para la producción de biodiesel en México. Se indican las proporciones de suelo fértil y de superficie total del país necesarias para reemplazar con biodiesel el 100% de la demanda de petrodiesel en México. Las fracciones de superficie total sólo se señalan para materias primas que no precisan de suelos fértiles (CIA World Factbook, 2009; Garibay-Hernández et al., 2009; Shenk et al., 2008)

<b>Materia prima</b>	<b>Productividad De Biodiesel (L/ha/año)</b>	<b>Superficie equivalente requerida (ha x 10<sup>6</sup>)</b>	<b>Porcentaje equivalente de la superficie fértil requerida</b>	<b>Porcentaje equivalente de la superficie total (no necesariamente fértil) requerida</b>
Palma	5,950	3.972	16.14	--
Jatropha	1,892	12.490	50.75	6.43
Colza	1,190	19.859	80.69	--
Girasol	952	24.823	100.9	--
Soya	446	52.986	215.3	--
Microalgas <sup>a</sup>	12,000	1.969	8.00	1.01
Microalgas <sup>b</sup>	20,000	1.181	4.80	0.61

<sup>a</sup>Rendimiento conservador de productividad de biodiesel microalgal acorde con Shenk *et al.*, 2008

<sup>b</sup>Productividad de biodiesel microalgal asequible a través de la tecnología actualmente disponible, acorde con Wijffels, 2008

La determinación de la productividad máxima teórica se fundamenta en la eficiencia fotosintética, la cual se define como la fracción de la energía

luminosa absorbida que es fijada como energía química en la biomasa durante el crecimiento fotoautotrófico. La fijación fotosintética de un mol de  $\text{CO}_2$  en biomasa microalgal con una composición representativa ( $\text{CH}_{1.78}\text{O}_{0.36}\text{N}_{0.12}$ ) en sistemas con amonio como fuente de nitrógeno, se considera que requiere de la absorción de 14 fotones, aunque de acuerdo a las estimaciones de autores diversos, esta magnitud puede variar de 6 a 16. La incorporación de un mol de carbono resulta así en la producción de 21.25 g/mol de masa seca con un contenido energético (entalpía de combustión) de 547.8 kJ (Wijffels, 2008).

Cabe destacar que la totalidad de la radiación solar no es aprovechada en la fotosíntesis microalgal, sólo es útil el espectro comprendido entre los 400 y 700 nm de longitud de onda denominado "radiación fotosintéticamente activa" (PAR por sus siglas en inglés), región que sólo representa el 42.3% del total. La energía promedio de los fotones comprendidos en este rango es de 218 kJ. Los datos anteriores posibilitan determinar una eficiencia fotosintética máxima para las microalgas del 7.6% respecto a la radiación solar total, valor que a pesar de ser reportado por varios investigadores en un intervalo del 3 al 10%, es cercano o superior al máximo teórico precisado para plantas C3 (2.4 - 4.3%) y C4 (1.3 - 3.7%). El aprovechamiento parcial de la radiación fotosintéticamente activa es atribuido a fenómenos diversos, principalmente a la disipación de energía en los aparatos fotosintéticos en manera de calor o fluorescencia con la intención de evitar el daño de estos por radiación excesiva.

Al considerar una eficiencia de 7.6%, se determina que la máxima productividad teórica de biomasa seca microalgal en México sería de 194 tons/ha/año; asimismo, al suponer un contenido de triglicéridos del 30%

( $g_{TAG}/g_{biomasa}$ ), una eficiencia de transesterificación del 96% y una densidad del biodiesel microalgal de 0.864 kg/L, se estima una producción de hipotética del biocombustible (biodiesel) de 64,500 L/ha/año, magnitud inasequible hasta ahora. Actualmente la tecnología disponible permitiría producir alrededor de 20,000 L/ha/año de biodiesel. No obstante, este valor podría ser cercano al máximo teórico a través de avances en la selección de especies, las estrategias y sistemas de cultivo, los procedimientos de cosecha y extracción de aceites, aunados a la optimización del metabolismo de los microorganismos mediante recursos moleculares (Wijffels, 2007). Estos datos indican la superioridad del potencial de producción de biodiesel a partir de cultivos microalgales en contraste con el uso de aceites vegetales (comestibles y no comestibles) como materia prima para la obtención de biodiesel, como se muestra en la Tabla 3.9 (Garibay-Hernández et al., 2009).

### 3.6.5. Contenido lipídico de las microalgas

Las microalgas con elevadas productividades lipídicas son deseables para la elaboración de biodiesel, razón por la cual la cantidad de lípidos contenidos en la biomasa y la velocidad de crecimiento, sumados a la eficiencia metabólica y robustez del microorganismo, son parámetros relevantes para su elección (Garibay-Hernández et al., 2009).

La determinación del contenido oleaginoso de las microalgas resulta complicada a causa de su variación ante condiciones distintas de cultivo; el desarrollo en ambientes desfavorables o bajo estrés, frecuentemente conlleva al incremento de la productividad lipídica del cultivo. Los lípidos comprendidos en las microalgas por lo general constituyen del 20 al 50% de su peso seco, sin embargo se han reportado valores en un rango del 1

al 80%, o incluso superiores, como se señala en la Tabla 3.10 (Chisti, 2007). Las especies que producen más de un 30% de materias grasas se denominan oleaginosas.

Tabla 3.10. Contenido lipídico de algunas microalgas en condiciones autotróficas (Garibay-Hernández et al., 2009).

Especie	%Contenido lipídico (gLípidos/gPeso-seco X100)	Especie	%Contenido lipídico (gLípidos/gPeso-seco X100)
<i>Ankistrodesmus</i> sp. <sup>2,4,6</sup>	24.5 – 40.3	<i>Hormotilopsis gelatinosa</i> <sup>2</sup>	49.1
<i>Botryococcus braunii</i> var. A <sup>2,5</sup>	43.0 – 63.0	<i>Isochrysis</i> sp. <sup>4,8</sup>	7.1 – 47.0
<i>Botryococcus braunii</i> var. B <sup>2,5</sup>	53.0 – 86.0	<i>Monallantus salina</i> <sup>1,2</sup>	20.0 – 72.2
<i>Botryococcus sudeticus</i> <sup>7</sup>	9.39 – 23.09	<i>Monodus subterraneus</i> <sup>2,10</sup>	39.3 - 40.0
<i>Chaetoceros gracilis</i> <sup>2</sup>	46.0	<i>Nannochloris</i> sp. <sup>1,8</sup>	20.0 – 47.8
<i>Characium polymorphum</i> <sup>2</sup>	42.0	<i>Nannochloropsis salina</i> <sup>8</sup>	40.8 – 72.2
<i>Chlamydomonas applanata</i> <sup>2</sup>	32.8	<i>Nannochloropsis</i> sp. <sup>1,9</sup>	28.7 – 68.0
<i>Chlorella emersonii</i> <sup>9,10</sup>	63.0	<i>Naviculla pelliculosa</i> <sup>2,8</sup>	22.0 – 44.8
<i>Chlorella minutissima</i> <sup>9,10</sup>	57.0	<i>Neochloris oleoabundans</i> <sup>2,3</sup>	18.9 – 88.8
<i>Chlorella protothecoides</i> <sup>10</sup>	23.0	<i>Nitzschia laevis</i> <sup>10</sup>	69.1
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> <sup>2,8</sup>	14.4 – 35.8	<i>Nitzschia pelea</i> Kutz <sup>2,8</sup>	27.2 – 39.5
<i>Chlorella sorokiana</i> <sup>9,10</sup>	22.0	<i>Nitzschia</i> sp. <sup>1,4</sup>	22.1 – 47.0
<i>Chlorella</i> sp. <sup>1</sup>	28.0 – 32.0	<i>Ochromonas danica</i> <sup>2,8</sup>	39.0 – 71.0
<i>Chlorella vulgaris</i> <sup>9</sup>	5.1 - 56.0	<i>Oocystis polymorpha</i> <sup>2</sup>	34.7
<i>Chlorococcum oleofaciens</i> <sup>2</sup>	44.3	<i>Parietochloris incisa</i> <sup>10</sup>	62.0
<i>Chlorosarcinopsis nagevensis</i> <sup>2</sup>	32.2	<i>Ourococcus</i> sp. <sup>2,8</sup>	27.0 – 49.5
<i>Chroomonas salina</i> <sup>8</sup>	44.0	<i>Peridinium cinctum</i> fa. Westi <sup>2</sup>	36.0
<i>Chrysochromulina kappa</i> <sup>2,8</sup>	32.6	<i>Phaeodactylum tricomutum</i> <sup>2</sup>	31.0
<i>Chrysochromulina polylepsis</i> <sup>2,8</sup>	47.6	<i>Protosiphon botryoides</i> <sup>2,8</sup>	37.0
<i>Cosmarium laeve</i> <sup>2,8</sup>	15.0 - 33.0	<i>Prymnesium parvm</i> <sup>2,8</sup>	22.0 - 38.2
<i>Cryptocodinium cohnii</i> <sup>1</sup>	20.0	<i>Radiosphaera nagevensis</i> <sup>2,8</sup>	43.0
<i>Cyclotella cryptica</i> <sup>2</sup>	36.8	<i>Scenedesmus dimorphus</i> <sup>2,8,9</sup>	6.0 – 40.0
<i>Cyclotella</i> sp. <sup>2</sup>	54.0	<i>Scenedesmus obliquus</i> <sup>9</sup>	11.0 - 55.0
<i>Cylindrotheca</i> sp. <sup>1</sup>	16.0 – 37.0	<i>Scotiella</i> sp. <sup>2,8</sup>	34.5 – 48.0
<i>Dunaliella primolecta</i> <sup>1,2,8</sup>	23.0 – 53.8	<i>Schizochytrium</i> sp. <sup>1</sup>	50.0 - 77.0
<i>Dunaliella salina</i> <sup>2,4,8</sup>	9.2 – 47.2	<i>Skeletonema costatum</i> <sup>2</sup>	30.3
<i>Euglena gracilis</i> <sup>2</sup>	55.0	<i>Stichoccus bacillaris</i> <sup>2</sup>	38.9
<i>Hantzchia</i> sp. <sup>2</sup>	61.0	<i>Tetraselmis sueica</i> <sup>1</sup>	15.0 – 23.0

<sup>1</sup>Chisti, 2007; <sup>2</sup>Arredondo y Vázquez-Duhalt, 1991; <sup>3</sup>Gatenby et al., 2003; <sup>4</sup>Ben-Amotz et al., 1985; <sup>5</sup>Metzger y Largeau, 2005; <sup>6</sup>Sheenan et al., 1998; <sup>7</sup>Vázquez-Duhalt y Greppin, 1987; <sup>8</sup>Cohen, 1986; <sup>9</sup>Gouveia y Oliveira, 2009; <sup>10</sup>Li et al., 2008

Los grupos taxonómicos a los cuales pertenecen las microalgas oleaginosas son diversos. En los ejemplares eucariontes, el contenido lipídico es considerado como propio de la especie y no del género, de manera tal que este parámetro varía notablemente entre las especies individuales de cada grupo taxonómico.

No obstante, es posible generalizar que microalgas oleaginosas eucariontes de grupos diversos (clorofitas, diatomeas, crisofitas, haptofitas, eustigmatofitas, dinofitas, xantofitas y rodofitas) presentan, bajo condiciones normales de cultivo, una fracción lipídica promedio del 25.1%, magnitud que aunque no es superior al 45% en situaciones de estrés es adecuada. Cabe destacar que la ubicuidad de las algas verdes (clorofitas) en hábitats diversos, además de la facilidad para su aislamiento y desarrollo en condiciones de laboratorio, ha favorecido la identificación de numerosas especies oleaginosas en este grupo, condición que no necesariamente es distintiva del mismo.

Las cianobacterias por su parte presentan bajos contenidos lipídicos, en promedio 9.8%; sin embargo, su aplicación en la producción de biodiesel ha sido sugerida a causa de la producción de lípidos paralela al crecimiento y la sencillez para la manipulación genética que ofrecen, en contraste con las especies eucariontes. Químicamente los lípidos son sustancias de origen biológico que, siendo escasamente solubles en agua, pueden ser extraídas con disolventes orgánicos de baja polaridad.

Las estructuras de estas biomoléculas comprenden largas cadenas hidrocarbonadas, unidades de isopreno y grupos funcionales diversos (oxigenados principalmente). En las microalgas, los principales componentes de la fracción lipídica son triacilglicerolos, ácidos grasos

libres, ceras, esteroides, hidrocarburos, glicolípidos (predominantes en membranas cloroplásticas), fosfolípidos (abundantes en plasmalema y diversos sistemas endomembranosos) y pigmentos (carotenoides, clorofilas, ficobilinas, etc.), aunque compuestos inusuales tales como ácidos grasos halogenados e hidroxilados, alquenonas de cadena larga, entre otros, también ocurren (Garibay-Hernández et al., 2009).

No todos los lípidos microalgales son satisfactorios para la producción de biodiesel, sin embargo los apropiados para ello (ácidos grasos libres y unidos covalentemente al glicerol y sus derivados) son producidos con frecuencia y constituyen la mayor fracción de los lípidos totales, usualmente del 20 al 40% (Chisti, 2007). Un perfil de ácidos grasos de cadena larga con un bajo de insaturación es deseable para la elaboración de biocombustible de calidad.

#### 3.6.6. Síntesis de lípidos

La composición de ácidos grasos de las microalgas comúnmente incluye moléculas lineales de 12 a 22 átomos de carbono en número par, saturadas e insaturadas, donde la posición y el número de enlaces dobles (1 a 6) es variable, siendo por lo general *cis* la configuración de éstos. Los ácidos grasos de 16C a 18C son los más frecuentes; no obstante, predominan en algunas especies con moléculas de cadena media (10C, 12C, 14C) o larga (> 20C).

El metabolismo lipídico de las algas es similar al de las plantas superiores, particularmente en la biosíntesis de ácidos grasos y triglicéridos y, como consecuencia, presenta similitud de características bioquímicas como las observadas entre ciertos genes y enzimas, de origen vegetal y algal,

involucrados en la producción de lípidos. En el cloroplasto ocurre la síntesis de novo de ácidos grasos, cuyo paso inicial consiste en la carboxilación de acetil-CoA dependiente de ATP para su conversión en malonil-CoA. Esta reacción es catalizada por la acetil-CoA carboxilasa y es considerada el paso limitante del proceso, ya que compromete el flujo de acetil-CoA hacia la biosíntesis de lípidos, donde las unidades de acetil-CoA probablemente derivan del piruvato proveniente de la glucólisis. La reacción anterior es seguida por ciclos de adición descarboxilativa de malonil-CoA a unidades acilo y  $\beta$ -reducción, catalizados por el sistema ácido graso-sintetasa, hasta producir moléculas de 16C y 18C saturadas. Los ácido palmítico y oleico son los precursores de la moléculas poli-insaturadas, a su vez producidas mediante mecanismos de saturación aerobia y elongación. Por su parte, se sugiere que la biosíntesis de triglicéridos sucede en el citosol y en el retículo endoplásmico esencialmente a través de la catálisis por acil-transferasas del traslado secuencial de ácidos grasos a las posiciones 1, 2 y 3 del glicerol-3-fosfato, donde antes de la última transferencia, se requiere de la defosforilación del ácido fosfatídico previamente formado.

### 3.6.7. Condiciones ambientales que afectan la acumulación de lípidos

La producción de lípidos al igual que su composición en las microalgas, a pesar de depender principalmente de la especie y, en última instancia, de su constitución genética, son afectados por diversas condiciones físicas y químicas de cultivo, tales como la fase de crecimiento, la disponibilidad y la clase de nutrientes, la salinidad, el tipo, periodos e intensidad de luz, la temperatura, el pH, e incluso, la asociación con otros microorganismos. La limitación de las microalgas a la restricción de nutrientes se caracteriza por la manifestación de respuestas específicas para el elemento limitado

(inducción de sistemas de transporte de alta afinidad y de la síntesis de enzimas hidrolíticas para la liberación intra- o extracelular del nutriente), además de respuestas generales tales como cambios morfológicos, cese de la división celular, alteraciones en la permeabilidad de las membranas, acumulación de lípidos y/o polisacáridos, reducción de la actividad fotosintética y modificación de procesos metabólicos.

La limitación de nitrógeno es considerada como la estrategia más eficiente para incrementar el contenido de lípidos neutros en las microalgas, en particular el de triglicéridos conformados por ácidos grasos con un elevado grado de saturación. Se pueden inducir respuestas similares por la deficiencia de fósforo, azufre y silicio, siendo el efecto de este último específico para las diatomeas. Asimismo, la disponibilidad de hierro (+3) influye en el contenido oleaginoso, aunque el mecanismo se desconoce.

La acumulación de lípidos en especies oleaginosas, a pesar de la atenuación de la división celular, es consecuencia de la asimilación continua de carbono y su orientación hacia la síntesis activa de ácidos grasos. Los lípidos bajo tales circunstancias funcionan como una reserva de carbono y energía, además de proteger al organismo contra el estrés fotooxidativo.

La temperatura, por su parte, afecta notablemente el perfil lipídico de las microalgas, de manera tal que a bajas temperaturas incrementa el grado de insaturación. Las altas intensidades luminosas son otra de las condiciones que favorecen sustancialmente la acumulación de triglicéridos con un elevado perfil de saturación, donde intensidades bajas a su vez promueven la síntesis de lípidos polares altamente insaturados, estructural y funcionalmente asociados con las membranas. El pH y la salinidad son



otros factores que modifican la síntesis de lípidos de diversas microalgas; sin embargo, el tipo y cantidad de lípidos producidos también depende de la especie y de la magnitud del cambio de estas variables (Garibay-Hernández et al., 2009).

### 3.6.8. Producción de microalgas

La producción de biodiesel a partir de microalgas es un proceso conformado, en términos generales, por las etapas elementales de producción de biomasa rica en lípidos, recuperación o cosecha de la biomasa, extracción de lípidos y transesterificación, como se muestra en la Figura 3.10. (Chisti, 2008; Garibay et al., 2009; Schenk et al., 2008)

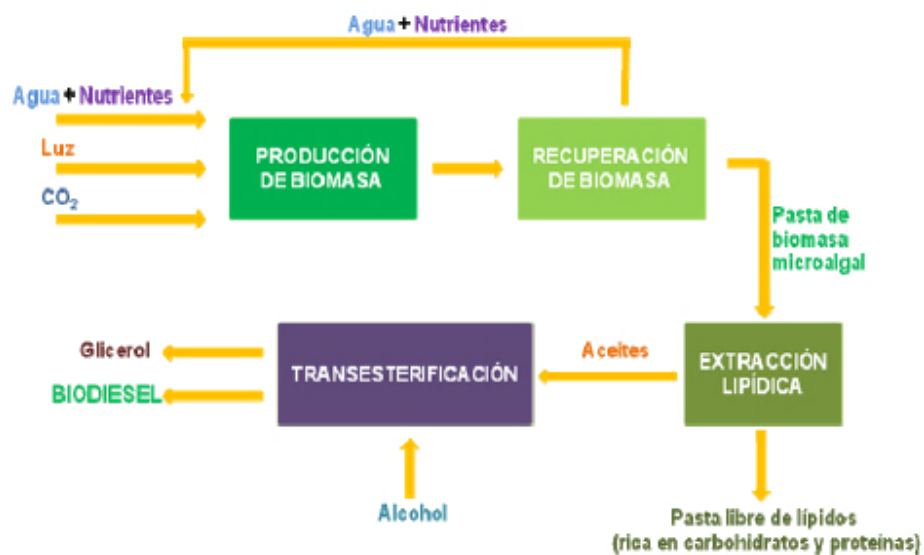


Figura 3.10 Esquema conceptual del proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas (Chisti, 2008; Garibay et al., 2009; Schenk et al., 2008)

En relación con la etapa de producción de biomasa de microalgas, actualmente existen sistemas de cultivo de microalgas destinado a la

obtención de productos de alto valor agregado (pigmentos carotenoides, ácidos grasos esenciales –  $\omega 3$  y  $\omega 6$  -, compuestos isotópicos, ficobiliproteínas, farmacéuticos – anticancerígenos y antibióticos -, vitaminas C y E, etc.) (Schenk et al., 2008; Wijffels, 2008)

Existen dos tipos de sistemas utilizados en la producción de biomasa algal, éstos son abiertos y cerrados.

#### 3.6.8.1. Sistemas abiertos

Los sistemas abiertos pueden ser de diferentes formas y tamaños y destacan por asemejarse al entorno natural de las microalgas. Los cultivos abiertos comprenden sistemas naturales (lagos, lagunas, estanques), artificiales, de superficie inclinada y estanques tipo circuito (raceway ponds, por su nombre en inglés), donde estos últimos son los de uso más extendido (Figura 3.11).

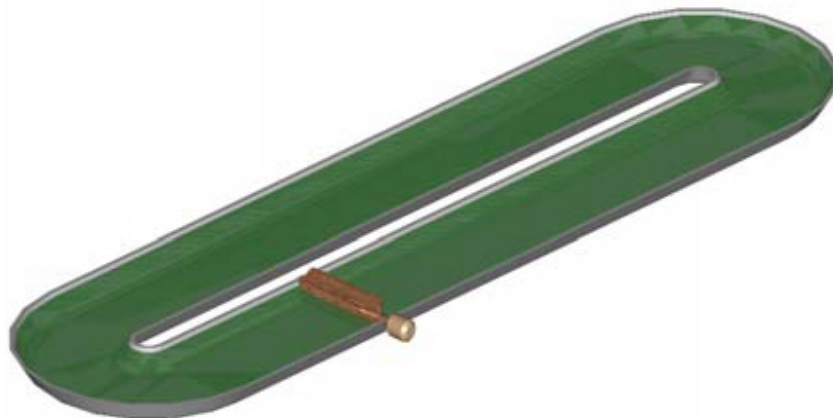


Figura 3.11. Estanque tipo circuito (Garibay-Hernández et al., 2009)

Los estanques tipo circuito consisten en circuitos de 15 a 30 cm de profundidad, en los cuales una rueda de paletas mantiene el flujo constante del cultivo; las producciones y productividades biomásicas factibles en estos sistemas son bajas, aproximadamente de 1 g/L y de 10 – 25 g/m<sup>2</sup>/d, respectivamente. Las ventajas inherentes a los sistemas abiertos radican en su sencillez y bajo costo de inversión en contraste con los sistemas cerrados, a causa de la diversidad de materiales útiles para su construcción (concreto, tierra, plástico, etc.) y la facilidad de operación y mantenimiento. Sin embargo, acorde con Wijffels (2008), un factor determinante del costo de producción de biomasa en sistemas abiertos es la cosecha de la biomasa, debido a la baja concentración que ésta alcanza.



Figura 3.12. Estanque tipo circuito de carreras en Nature Technologies Ltd (Eliat, Israel), una subsidiaria de Nikken Sohonsa Co. (Gifu, Japón, <http://www.chlostanin.co.jp>)

Se han desarrollado una enorme variedad de sistemas de cultivo de microalgas. La única que se practica a gran escala y sobre una base comercial es el estanque tipo circuito de carreras poco profundo de canalización abierta. Estos estanques son, por lo general, de no más de 30 cm de profundidad y el agua, que contiene nutrientes y microalgas, se distribuye con una rueda de paletas (Wijffels, 2007).

De este modo, al considerar la operación de cosecha de la biomasa y la tecnología actualmente disponible, los costos de producción de los sistemas abiertos no son tan bajos e incluso, son del mismo orden de magnitud que los correspondientes a los sistemas cerrados.

Los sistemas abiertos presentan diversos inconvenientes tales como pérdidas de agua por evaporación, transferencia limitada de CO<sub>2</sub> al cultivo por su baja concentración en el aire (0.035% v/v) y su difusión hacia la atmósfera, control limitado de las condiciones de cultivo, alta susceptibilidad de contaminación (excepto en cultivos de especies extremófilas), requerimiento de superficies extensas, amplios periodos de producción (6 a 8 semanas), producciones reducidas de biomasa y penetración limitada de la luz (Chisti, 2007; Schenk et al., 2008; Wijffels, 2008).

#### 3.6.8.2. Sistemas cerrados

Los sistemas cerrados, en contraste con los abiertos, ofrecen numerosas ventajas tales como pérdidas mínimas de CO<sub>2</sub>, riesgo reducido de contaminación, control y reproducibilidad de las condiciones de cultivo, ahorro de agua y nutrientes, menores requerimientos de superficie, flexibilidad de diseño, cortos periodos de producción (2 a 4 semanas) y

productividades considerablemente superiores (5 a 13 veces). Los fotobiorreactores cerrados, con el propósito de coleccionar la mayor cuantía posible de energía solar por unidad de superficie, presentan configuraciones diversas, tubulares (vertical, horizontal, helicoidal, configuración a), paneles planos y columnas de burbujeo, principalmente. Los reactores tubulares (Figura 3.13) y de panel plano son los de uso más frecuente; habitualmente están conformados por dos unidades, una de recolección de luz y otra de transferencia de gases.



Figura 3.13 Fotobiorreactor más grande del mundo en Klötze, cerca de Wolfsburg, Alemania (Prof. Bioproducte Steinberg; [www.algomed.de](http://www.algomed.de)). El volumen de trabajo (700 m<sup>3</sup>) se distribuye en 500 km de tubos y produce hasta 100 T de biomasa de algas por año (Schenk et al., 2008)

La consideración de factores tales como la luz, la relación o razón CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, la temperatura, los nutrientes, la salinidad, el pH, entre otros, resulta trascendental para el diseño de sistemas cerrados. Las altas productividades inherentes a estos sistemas precisan de una penetración y distribución óptima de la luz, condición que a su vez requiere de materiales de construcción transparentes y de relaciones superficie/volumen elevadas. Sin embargo, la intensidad de la luz incidente debe ser moderada, de lo contrario se presentan fenómenos de

fotoinhibición y fotoblanqueo. Asimismo, la relación  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  debe ser tal que la proporción de  $\text{O}_2$  sea mínima y por ende sean impedidos procesos tales como la foto-respiración y daño fotooxidativo.

Actualmente la principal desventaja de los sistemas cerrados consiste en sus elevados costos, atribuidos en mayor medida a la energía invertida en la agitación mecánica de los cultivos con la finalidad de evitar la sedimentación y favorecer la transferencia de gases (Chisti, 2007, 2008; Schenk et al., 2008; Wijffels, 2008).

Los sistemas híbridos han sido propuestos como una alternativa económica para la producción de biodiesel microalgal a gran escala. En términos generales, tales sistemas consisten en una etapa inicial de producción de biomasa en fotobiorreactores cerrados, en los cuales los microorganismos son mantenidos en proliferación continua bajo condiciones de suficiencia de nutrientes, etapa que es seguida por una fase de acumulación de producto (lípidos) en estanques abiertos, inducida mediante la deficiencia de nutrientes (Schenk et al., 2008).

Una vez que la biomasa de microalgas ha sido producida en alguno de los sistemas descritos, se da inicio a la etapa de cosecha o recolección, cuyo propósito es el de remover el agua y concentrar las células microalgales para su posterior procesamiento. Esta etapa, como se ha mencionado, influye notablemente en los costos de producción del biodiesel, por lo que la selección de una técnica de recolección eficiente y de bajo costo es trascendental. La centrifugación, sedimentación, filtración y floculación, ya sea individualmente o combinados, son los procedimientos de cosecha más comunes, cuya aplicación depende de las propiedades de la especie de microalga cultivada (morfologías particulares, presencia de vacuolas

gaseosas, etc.), ya que algunas presentan características que facilitan su recolección (Schenk et al., 2008).

La filtración resulta conveniente para especies microalgales de forma filamentosa o capaces de formar colonias; cabe mencionar que esta operación a gran escala presenta inconvenientes tales como la obstrucción de los filtros, formación de tortas de filtración compresibles y altos costos de mantenimiento. La aplicación de la sedimentación o de la centrifugación podría ser factible en microalgas con diámetros mayores a los 5  $\mu\text{m}$  y paredes celulares relativamente gruesas. A pesar del frecuente empleo de la sedimentación en la acuicultura, su principal desventaja es la larga duración de esta operación. Por su parte, la centrifugación solamente resulta conveniente para productos de alto valor agregado, ya que implica un elevado consumo de energía. La floculación es otro procedimiento de cosecha común, el cual consiste en la aglomeración y posterior sedimentación o flotación de la biomasa de microalgas; ésta puede ser inducida de diversos modos. La floculación mediante la adición de sales inorgánicas (alúmina, cloruro férrico, óxido de calcio) no es recomendada por su alto costo y por contaminar la biomasa, de manera tal que ésta no puede ser utilizada posteriormente como alimento. El uso de polímeros orgánicos catiónicos como floculantes no presenta estos inconvenientes; sin embargo, su efectividad puede ser disminuida en aguas salobres como consecuencia de la elevada fuerza iónica que las caracteriza.

Por su parte, la biofloculación es un procedimiento alternativo de cosecha que consiste en el uso de especies de microalgas que naturalmente floculan o cuya aglomeración puede ser inducida mediante la aplicación de condiciones de estrés tales como cambios de pH, temperaturas extremas y restricciones de nutrientes. No obstante, la modificación de las condiciones

de cultivo puede alterar la composición bioquímica de las microalgas y, por tanto, el rendimiento lipídico.

Finalmente, se ha propuesto la floculación microbiana o co-biofloculación, procedimiento en el cual se adicionan microorganismos autofloculantes (tales como levaduras) al cultivo microalgal, de manera tal que se promueve la aglomeración conjunta de éstos con la biomasa que se desea cosechar (Schenk et al., 2008).

A partir de la biomasa cosechada se extraen los aceites mediante procedimientos tales como lixiviación con disolventes orgánicos, principalmente hexano. Sin embargo, algunos inconvenientes de esta técnica de extracción son los costos y la energía adicionales necesarios para la recuperación del disolvente, además de la contaminación de la biomasa microalgal libre de lípidos, restringiendo así las posibilidades para el posterior aprovechamiento de este co-producto.

En esta década, se han propuesto variantes para la lixiviación con disolventes orgánicos, tales como la extracción in situ a partir de células vivas de microalgas o el acoplamiento de la etapa de extracción lipídica con la transesterificación; no obstante, tanto su aplicación a gran escala, como su factibilidad económica, deben ser evaluadas. Asimismo, la extracción mediante prensado a sido sugerida aunque, a pesar de no implicar el uso de disolventes, su eficiencia es menor a la de la lixiviación (Chisti, 2008; Schenk et al., 2008).



# CAPÍTULO IV

## 4. Resultados y discusión

De acuerdo con la investigación realizada, ahora se analizará cada una de las tecnologías desde el punto de vista económico.

### 4.1. Sistema de desalinización de agua de mar por destilación multiefecto en combinación con un sistema mecánico de compresión de vapor (Viedma et al., 2009)

#### 4.1.1. Costos e ingresos de las instalaciones

Con el fin de calcular el costo del agua fue necesario llevar a cabo primero un estudio global del costo de las instalaciones. Estos se dividen en dos, el de capital y los costos de operación.

#### 4.1.2. Costos de capital

Estos se definen como la entrada de capital necesario para cubrir toda la infraestructura y lograr el nivel de rendimiento previsto. Estos costos pueden ser analizados de mejor manera sobre las instalaciones como si fueran divididas en tres unidades: la planta de destilación multiefecto más la planta de de compresión mecánica de vapor y los parques de energía solar y eólica.

##### 4.1.2.1. Planta de destilación multiefecto + planta de compresión mecánica de vapor

La estimación de costos de instalación se basa en los datos disponibles de otras plantas similares, las cuales han reportado que el total del capital de

la planta desalinizadora de destilación multiefecto en PSA en Almería (por sus siglas de Parque Solar de Almería) fue de aproximadamente un millón de euros (€ 1,000,000.00). Esta cifra fue reducida a las dimensiones empleadas.

La información proporcionada sobre el costo del sistema de compresión mecánica de vapor fue proporcionado directamente por la empresa Jumsal, S.A., que explota las minas de sal en Jumilla, España; la cual ha sido incrementada en un 50% para adaptarse a este caso en particular, el cual empleará una máquina más grande para la compresión mecánica de vapor.

Los datos disponibles de IDET Technologies Ltd., una empresa pionera y líder mundial en la entrega de soluciones sofisticadas de agua en Israel, llegó a la conclusión de que la inversión total de capital para las plantas de destilación multiefecto diseñadas para los niveles de producción de 14,400 y 25,000 m<sup>3</sup>/d fue de \$14,486,000 y \$22,100,000 USD, respectivamente (Ophir y Gendel, 2006).

Empleando la información proporcionada por las empresas antes mencionadas, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 4.1. Tomando en consideración todos estos datos, el costo de la inversión para la planta propuesta (destilación multiefecto + compresión mecánica de vapor) es de €4,500,000.

#### 4.1.2.2. Parque eólico

Esencialmente, el costo consiste en la compra de aerogeneradores (turbinas de viento), que representan el 71% del costo de la inversión.

Una estimación del costo de capital para un desarrollo de un parque eólico de 10,000 kW de potencial eólico se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1. Costos e inversión para la planta de destilación multiefecto + la planta de compresión mecánica de vapor (Viedma et al., 2009)

DME + CMV (costos e inversiones)			
Fases	Costo específico / inversión x €/m <sup>3</sup>	Costo total / inversión x €	Porcentaje (%)
Ubicación del estudio			
Análisis preliminary	0.01	4,500	0.10
Ubicación	0.01	9,000	0.20
Mediciones y otros análisis	0.05	42,750	0.95
Total	0.06	56,250	1.25
Apoyo del proyecto			
Proyectos	0.13	112,500	2.50
Estudio ambiental	0.01	4,500	0.10
Otros estudios	0.01	4,500	0.10
Gestión y seguimiento	0.03	22,500	0.50
Total	0.16	144,000	3.20
Licencias, impuestos y permisos de construcción			
Reglamentación de embalses	0.1	90,000	2.00
Compresores	0.82	720,000	16.00
Intercambiador de platos	0.69	607,000	13.49
Centrifugas e intercambiadores	0.49	425,500	9.46
Sistema DME	1.71	1,500,000	33.33
Instrumentos de medición	0.21	180,000	4.00
Tubería, válvulas y accesorios	0.26	225,000	5.00
Recolección de agua de mar	0.15	135,000	3.00
Ingeniería civil	0.35	304,650	6.77
Total	4.78	4,187,150	93.05
Ingeniería de control	0.03	22,500	0.50
Total de fases	5.14	4,500,000	100.00
Mantenimiento (2%)		90,000	

#### 4.1.2.3. Parque solar

El costo por panel solar oscila entre 1,200€ y 1,800€ (300 – 450 €/m<sup>2</sup>) en función del tipo de recolector. El costo medio de un recolector de tubos a vacío esté entre 2.30 y 3.10 €/W, que incluye la instalación, como se muestra a detalle en la Tabla 4.3.

Tabla 4.2. Costos e inversión para el parque eólico (Viedma et al., 2009)

Parque eólico (costos e inversiones)			
Energía eléctrica nominal de 10,000 kW (a régimen de vientos medios)			
Fases	Costo específico / inversión x €/m <sup>3</sup>	Costo total / inversión x €	Porcentaje (%)
Ubicación del estudio			
Análisis preliminary	1	10,000	0.10
Ubicación	2	20,000	0.20
Mediciones y otros análisis	12	120,000	1.21
Total	15	150,000	1.51
Fases	Costo específico / inversión x €/m <sup>3</sup>	Costo total / inversión x €	Porcentaje (%)
Apoyo del proyecto			
Proyectos	24	240,000	2.42
Estudio ambiental	1	10,000	0.10
Otros estudios	1	10,000	0.10
Gestión y seguimiento	10	100,000	1.01
Total	36	360,000	3.63
Licencias, impuestos y permisos de construcción			
Aero generadores	700	7,000,000	70.49
Infraestructura eléctrica del parque eólico	70	700,000	7.05
Infraestructura eléctrica para la conexión a la red	80	800,000	8.06
Ingeniería civil	85	850,000	8.56
Total	935	9,350,000	94.16
Ingeniería de control	5	50,000	0.50
Total de fases	993	9,930,000	100.00
Mantenimiento (3%)		397,200	

#### 4.1.2.4. Costos de operación

Estos gastos adicionales se derivan del régimen de operación de la planta. Incluyen los gastos de personal, gastos de mantenimiento, los costos de material consumible y los costos de energía.

##### 4.1.2.4.1. Costos de personal

El personal de la planta estaría integrado por un consejo directivo, personal operativo y personal de mantenimiento. Para un régimen de

funcionamiento óptimo de la planta, se tendrían que considerar tres turnos de trabajo para el personal de operación y mantenimiento.

Tabla 4.3. Costos e inversión para el parque solar (Viedma et al., 2009)

Parque solar (costos e inversiones)

Potencia térmica: 2,3620 kW

Fases	Costo específico / inversión x €/m <sup>3</sup>	Costo total / inversión x €	Porcentaje (%)
<b>Ubicación del estudio</b>			
Análisis preliminar	2	4,724	0.08
Ubicación	10	23,620	0.39
Mediciones y otros análisis	20	47,240	0.77
Total	32	75,584	1.24
<b>Apoyo del proyecto</b>			
Proyectos	50	118,100	1.93
Estudio ambiental	2	4,724	0.08
Otros estudios	1	2,362	0.04
Gestión y seguimiento	10	23,620	0.39
Total	63	148,806	2.44
Fases	Costo específico / inversión x €/m <sup>3</sup>	Costo total / inversión x €	Porcentaje (%)
<b>Licencias, impuestos y permisos de construcción</b>			
Sistemas de recolección y acumulación	1,800	4,251,600	69.63
<b>Intercambiadores, bombas y recipiente de expansión</b>			
Tubería, válvulas y accesorios	70	165,340	2.71
Instrumentos de medición	10	23,620	0.39
Ingeniería civil	200	472,400	7.74
Total	2,480	5,857,760	95.94
Ingeniería de control	5	11,810	0.19
Total de fases	2,585	6,105,770	100.00
Mantenimiento (2%)	78	183,173	

#### 4.1.2.4.2. Costos de mantenimiento

Estos incluyen las reparaciones y el mantenimiento de la instalación y de materiales relacionados con el mantenimiento (por ejemplo lubricantes y repuestos). Se supondrá que los costos de mantenimiento variarán durante la vida laboral de la instalación y, debido a ese hecho, los montos promedio anuales consideran esto.

En los primeros años, los costos de mantenimiento estarán a su nivel más bajo, pero se espera un aumento gradual a causa de averías. El costo medio anual de mantenimiento del sistema DME + MCV se calcula como el 2% del valor total de la inversión de la unidad (Viedma et al., 2009).

En cuanto a los parques eólico y solar, los costos anuales de mantenimiento medio son, respectivamente, previstas para ser de 3% y 4% del valor total de la inversión. Estos gastos se espera que aumenten debido a la tasa de inflación (Viedma et al., 2009).

#### 4.1.2.4.3. Costos de consumibles

Estos son los costos incurridos en la compra de todos los agentes químicos que se utilizarán en el proceso de desalinización, sobre todo en el acondicionamiento del agua de mar y agua dulce. En esencia, estas sustancias químicas son: desinfectantes, coagulantes, floculantes y controladores de pH. Las cantidades necesarias de estas sustancias dependerán de la magnitud del caudal de agua fresca.

#### 4.1.2.4.4. Costos de energía

El presente análisis se basa en las siguientes premisas y supuestos. Una de ellas es que las regulaciones de las tarifas eléctricas en España permiten diferentes tipos de contratación a fin de que los costos puedan reducirse al mínimo. Los cálculos actuales se basan en tarifas de 3.3, vía 2, y tipo 4 de la red y tarifa eléctrica. El precio calculado para kW, instalado y contratado por un régimen de funcionamiento de 8,760 h/año, es de 5.26 cent€/kWh. Al refinar estos cálculos para el caso de México, en

una investigación futura, se deberán considerar los que son aplicables para estos casos.

El costo asociado a la caldera instalada en el parque solar para garantizar el suministro de energía calorífica en los meses de baja radiación solar es de 50,090€, elevando el costo total de energía para la instalación de 1,088,048€. Con el fin de considerar todos los factores antes mencionados, un resumen de los costos globales sufragados para la instalación de la planta se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Costos globales para la instalación de la planta desalinizadora (Viedma et al., 2009)

Subsistemas	Costos de capital	Costos de operación				Total (€/año)
		Personal	Mantenimiento	Consumibles	Energía	
DME + CMV	4,500,000.00	191,685.83	90,000.00	56,940.00	1,033,958.00	1,372,583.83
Parque Solar	6,105,770.00	95,842.91	183,173.10	0.00	54,090.00	333,106.01
Parque eólico	9,930,000.00	95,842.91	397,200.00	0.00	0.00	493,042.91
Total	20,535,770.00	383,371.65	670,373.10	56,940.00	1,088,048.00	2,198,732.75

#### 4.1.3. Ingresos de la venta de sal y energía

Los cálculos de los beneficios de la venta de la sal y la energía se hacen de acuerdo con lo establecido en el Decreto Real (DR) 436/2004 del 12 de marzo publicado en España (Ministerio de Economía, 2004). Se afirma que la remuneración que los productores obtendrán a cambio de transferir energía eléctrica a la red de instalaciones de producción y bajo un régimen especial serán los siguientes:

$$P = P_m + B \pm EP$$

ec. 4.1

donde  $P$  = pago en €/kW;  $P_m$  = precio en el mercado, como se especifica en el artículo 24 DR 436/2004;  $B$  = bono, el cual es un porcentaje del promedio de la tarifa eléctrica media o de referencia. Los valores de esta se fijarán en función del grupo y subgrupo al que pertenece la instalación.  $EP$  = pago adicional, o un complemento por energía reactiva que se aplica a la suma de  $P_m$  y  $B$ , y se fija como un porcentaje de la tarifa eléctrica de referencia.

Las tarifas eléctricas para 2006 fueron establecidas de acuerdo con el "Decreto Real" DR 1556/2005 del 23 de diciembre (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2005). Dicho decreto también establece el incremento nominal de la referencia arancelaria eléctrica para la venta de electricidad durante el año 2006. Este incremento se fijó en el 4.48%, por lo que la tarifa eléctrica media para el 2006 es de 7.66 cent€/kW. Este rubro también deberá ser adecuado en una investigación futura a las condiciones de México.

La producción de sal en la planta desalinizadora se calcula en 0.987 k/s. Si se considera un precio comercial de la sal de 0.04 €/kg, se obtendrá un ingreso anual por la venta de la sal de 1,233,700€. El precio antes mencionado de la sal se ha calculado del promedio de los precios previstos de varios productores (Viedma et al., 2009).

La metodología para estimar el costo del agua fresca producida, después del estudio de la inversión inicial y los costos anuales, se basa en la capitalización a un determinado tipo de interés (4%) para los pagos efectuados durante la inversión. La capitalización duraría por un período igual al de la vida útil del sistema operativo. Para el cálculo de la cuota de amortización, se utiliza una ecuación general de la amortización financiera:



$$a = I \left( \frac{i(i+1)^t}{(i+1)^t - 1} \right) \quad \text{ec. 4.2}$$

donde I es el capital de inversión; la potencia t es el número de años de vida útil de la inversión (20 años) e i que es la tasa de interés (4%).

El costo total del agua se calcula por medio de la expresión:

$$\text{El costo total del agua (m}^3\text{)} = \left( \frac{(FC + OC)}{(Q \times t)} \right) \quad \text{ec. 4.3}$$

donde FC es el costo financiero; OC es el costo de operación; Q x t es la producción anual de agua; 365 d x 24 h x 100 m<sup>3</sup>= 876,000 m<sup>3</sup>/año (Viedma et al., 2009).

El costo sin ningún tipo de cuota sería de 4.22 €/m<sup>3</sup>. Si se incluyen los ingresos de la venta de la sal y la energía, el costo total del agua es de 0.59 €/m<sup>3</sup>, ver Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Costo total del agua (k€) (Viedma et al., 2009)

Costo de capital inicial (k€)	20,536.00
Amortización (k€/año)	1,499.00
Costos de operación (k€/año)	2,199.00
Personal	383.00
Mantenimiento	670.00
Consumibles	57.00
Energía	1,088.00
Amortización total + costos de operación (k€)	3,698.00
Costo total del agua (€/m <sup>3</sup> ) (excluyendo ingresos)	4.22
Ingresos (k€/año)	
Sal	1,234.00
Energía	1,946.00
Balance de costos e ingresos (k€)	518.00
Costo total del agua (€/m <sup>3</sup> ) (incluyendo los ingresos)	0.59

Considerando un subsidio del 35%, el costo del agua sin ningún tipo de cuota sería de 4.04 €/m<sup>3</sup>, mientras que el costo total incluyendo los honorarios de la venta de la sal y la energía eólica es sólo de 0.41 €/m<sup>3</sup> (ver Tabla 4.6).

Tabla 4.6. Costo total del agua considerando un subsidio del 35% (k€)  
(Viedma et al., 2009)

Costo de capital inicial (k€)	18,399.00
Amortización (k€/año)	1,343.00
Costos de operación (k€/año)	2,199.00
Personal	383.00
Mantenimiento	670.00
Consumibles	57.00
Energía	1,088.00
Amortización total + costos de operación (k€)	3,542.00
Costo total del agua (€/m <sup>3</sup> ) (excluyendo ingresos)	4.04
Ingresos (k€/año)	
Sal	1,234.00
Energía	1,946.00
Balance de costos e ingresos (k€)	362.00
Costo total del agua (€/m <sup>3</sup> ) (incluyendo los ingresos)	0.41

#### 4.2. Sistema de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa alimentado por energía eólica sin el uso de baterías

Un análisis total de costos del sistema fue presentado por la empresa Dulas Ltd, en Machynlleth, Reino Unido. Éste incluye todos los componentes auxiliares y los costos de fabricación, pero no el envío o la instalación. El costo de capital total del sistema se estima en £23,055.00 (Thomson e Infield, 2002).

Con el fin de estimar el costo del agua durante el tiempo de vida útil de los equipos, la compañía Dulas supone una vida útil de 20 años para la planta en conjunto, con reemplazos de la bomba a los 5, 10 y 15 años. También suponen que una serie completa de elementos para la membrana de

ósmosis inversa se necesitarán cada 12 meses. El costo global estimado del agua, incluido el mantenimiento completo y con un descuento del 8% es de 2.00 £/m<sup>3</sup>. Esta cifra se reducirá notablemente, si fuese posible utilizar membranas de larga duración (Tzen y Morris, 2003).

#### 4.3. Sistema de desalinización de agua de mar por electrodiálisis (Tureck y Bandura, 2007)

De acuerdo con Tureck y Bandura (2007), la potencia de las celdas electrolíticas disminuye debido a la energía de bombeo. El valor de la energía de bombeo que se estima para una planta industrial de electrodiálisis inversa suponiendo una longitud de membrana efectiva de 0.5 m, longitudes de pasillo de entrada y salida iguales a 3 cm, la velocidad de la disolución en la entrada y en el conducto de salida tres veces mayor que en la corriente que pasa por la sección.

Como se comprobó que la caída de presión es función lineal de la velocidad de flujo y es igual a 2550 Pa para una velocidad de flujo de 1 cm/s y un canal de 10 cm de longitud.

El área efectiva de trabajo para la membrana se estimó en un 80% del área total de la membrana. La vida de la membrana es de 10 años (80,000 h) y el costo total de la inversión es de \$1,100.00 USD por m<sup>2</sup> de membrana instalado.

Suponiendo una potencia pico de 460 MW/m<sup>2</sup> (para membranas de baja resistencia y un flujo de 0.54 cm/s), la proporción del costo de inversión en la producción de energía resultó ser igual a \$6.79/kWh.

#### 4.4. Producción de biodiesel a partir de microalgas marinas

La factibilidad económica de este producto está en función del petróleo, dado que el diesel del petróleo es el principal producto con el que tiene que competir. Los costos del barril de petróleo han sido muy variables en los dos últimos años puesto que han estado sujetos a las presiones de la economía internacional. La OPEP ha previsto que el consumo de crudo se mueva al alza, tras 2 años consecutivos de descensos y alcance los 85.13 millones de barriles por día y ha insistido en considerar aceptable un precio de 75 a 85 dólares por barril para el 2010. De hecho, el precio del petróleo crudo de Texas alcanzó los \$82.50 dólares por barril el 18 de marzo del 2010 (Loera-Quezada y Olgúin, 2010).

Según Castro y Middleton (2010), el costo de la inversión por hectárea es de \$25,000 a \$200,000 US dólares (y por acre es de \$10,000 a \$80,000 US dólares), con un costo de operación y mantenimiento de \$10,000 a \$25,000 US dólares por hectárea (\$4000 a \$10,000 dólares por acre), respectivamente, dando un costo total de entre \$35,000 y \$225,000 dólares de inversión.

##### 4.4.1. Producción por hectárea / año (acre/año)

Cada hectárea puede secuestrar entre 125 y 150 toneladas de CO<sub>2</sub> (50 y 60 toneladas por acre) y producir entre 18,930 y 56,780 L/ha (5,000 y 15,000 gal/acre) de biodiesel, con una producción de 50 a 250 ton/ha (20 a 100 ton/acre) de algas. Para terminar, una tonelada de microalgas produce 180 kg de aceite (400 lb) y 725 kg de biomasa. En el siguiente capítulo se presenta la discusión final del análisis de esta investigación.

# CAPÍTULO V

## 5. Análisis final

### 5.1. Proceso de selección

Durante la fase de diseño de un sistema de desalinización abastecido por energía renovable, el diseñador tendrá que seleccionar un procedimiento adecuado para una aplicación en particular. Los factores que deben tenerse en cuenta para esta selección son los siguientes:

- ✦ La adecuación del proceso para la aplicación de la energía renovable.
- ✦ La eficiencia del proceso con respecto al consumo de la energía.
- ✦ La cantidad de agua fresca necesaria en una aplicación determinada en combinación con el rango de aplicabilidad de los procesos diferentes de desalinización.
- ✦ Los requisitos para el tratamiento del agua de mar.
- ✦ El costo de capital del equipo.
- ✦ El área de tierra requerida o disponible para la instalación de los equipos.

Antes de iniciar cualquier proceso de selección, se puede comenzar con una serie de parámetros fundamentales los cuales deben ser investigados. La primera es la evaluación de los recursos hídricos en general. Esto debe hacerse tanto en términos de calidad y cantidad (por los recursos de agua salobre).

En el caso de tratarse de agua salobre, esto puede ser más atractivo, ya que la salinidad es normalmente mucho más baja (10,000 ppm) y, por lo tanto, la desalinización del agua salobre debería ser la opción más

atractiva. Tierra dentro, el agua salobre puede ser la única opción. En la costa, el agua de mar normalmente está disponible.

La identificación y evaluación de los recursos energéticos renovables en el área, completa los pasos básicos para llevar a cabo el diseño de un sistema de desalinización impulsado por sistemas de energía renovable.

Las tecnologías de desalinización impulsadas por energía renovable, principalmente, se dividen en dos categorías.

La primera categoría incluye las tecnologías de desalinización de destilación impulsada por el calor producido por energías renovables, mientras que el segundo incluye las tecnologías de membrana y la destilación impulsados por electricidad o energía mecánica producidas por energías renovables.

Estos sistemas deben caracterizarse por su robustez, simplicidad de operación, bajo mantenimiento, tamaño compacto, fácil transporte al destino final, tratamiento previo y sistemas de admisión simples para garantizar la correcta operación de una planta en condiciones difíciles, las cuales a menudo se encuentran en las zonas más remotas. En cuanto a la combinación de ambos sistemas (desalinización y energía renovable), la experiencia actual ha demostrado que no existe ningún problema técnico importante (Kalogirou, 2005).

Los costos de producción de agua generalmente incluyen los siguientes elementos:

- gastos fijos, los cuales dependen de los costos de capital y el factor de depreciación (determinado por la vida de la planta y los parámetros de financiamientos y por consiguiente diferentes para cada país);
- cuotas variables, las cuales dependen del consumo y costo de la energía (en relación con la fuente empleada y con la ubicación seleccionada), de funcionamiento (mano de obra) y el costo de mantenimiento (que varía para cada país), el consumo y el costo de los productos químicos utilizados para la pre- y post-tratamiento de agua (especialmente en las plantas de ósmosis inversa) y el ritmo en el que van a ser sustituidas las membranas en las plantas de ósmosis inversa (ambos factores se encuentran relacionados con los sitios de instalación).

En general, el porcentaje de sólidos disueltos totales en el agua de mar no tienen prácticamente ningún efecto en los procesos térmicos, pero tienen un efecto notable en la ósmosis inversa, donde la demanda de energía aumenta de forma lineal a un ritmo de más de 1 kW /m<sup>3</sup> por 10,000 ppm. Sin embargo, si las presiones de entrada no son modificadas, el porcentaje de sales en el agua producida podría ser intolerable. Normalmente, este valor para el proceso de ósmosis inversa se espera que sea alrededor de 300 ppm. El valor, aunque se encuentre dentro del límite de 500 ppm (fijado por la OMS para el agua potable), todavía da lugar a que al menos un orden de magnitud superior a la salinidad del agua producida a partir de procesos térmicos. También para concentraciones altas de salinidad el uso de la tecnología de ósmosis inversa es muy problemática.

Las energías renovables pueden proporcionar la energía térmica (colectores solares, energía geotérmica), electricidad (energía fotovoltaica,

energía eólica, sistemas solares de energía térmica) o mecánica (energía eólica). Todas estas formas de energía se pueden utilizar en las plantas de desalinización.

#### 5.1.1. Energía solar

La energía solar en general puede ser convertida en energía útil, ya sea en forma de calor, con colectores solares y estanques solares o como electricidad, mediante el uso de células fotovoltaicas y sistemas solares térmicos. Ambos métodos de energía se han utilizado para alimentar a los sistemas de desalinización. Los sistemas de recolección directa sólo deben ser utilizados cuando la energía solar que se encuentre disponible no sea baja o que su recolección sea ineficiente.

Por otra parte, en los sistemas de recolección indirecta, la energía solar es recolectada de manera más eficiente, en forma de agua caliente o vapor. Hay que señalar, que la energía solar solamente está disponible para casi la mitad del día. Esto implica que el proceso opera sólo la mitad del tiempo disponible a menos que se utilice algún dispositivo de almacenamiento. El dispositivo de almacenamiento, que normalmente suele ser caro, puede ser sustituido por una caldera de seguridad o electricidad de la red con el fin de operar el sistema durante periodos de radiación baja y de noche.

Cuando el sistema de desalinización funciona sin un amortiguador térmico, el sub-sistema de desalinización debe ser capaz de seguir operando con un suministro de energía alterno, sin mostrar variaciones. En todos los sistemas de desalinización a base de energía solar se debe calcular un factor de rendimiento óptimo, basado en el costo de los colectores solares, costo de dispositivos de almacenamiento (si se utilizan) y el costo



de la planta desalinizadora. Probablemente, la única forma de suministro de energía estable es el estanque solar, que debido a su tamaño, no se carga / descarga con facilidad, y así es más insensible a las variaciones climáticas.

### 5.1.2. Energía eólica

La energía eólica es una fuente altamente variable, tanto en relación con la velocidad del viento como con la frecuencia del mismo. Cuando la energía eólica es utilizada para la generación de electricidad, la variación del viento puede ser compensada por la adición de bancos de baterías, los cuales actúan de forma similar a un tanque de almacenamiento térmico de energía en los sistemas solares, es decir, cargar las baterías cuando el viento está disponible y descargar las baterías (alimentando la planta desalinizadora) cuando sea necesario. En el caso de la producción de energía mecánica a partir del viento, la planta de desalinización funciona solamente cuando hay viento. En este caso, la planta de desalinización por lo general es diseñada de gran tamaño con respecto a la demanda de agua, y en lugar de almacenar energía, se almacena el agua producida cuando el viento está disponible.

### 5.1.3. Conexión entre la planta de desalinización y el sistema de energía renovable

Con respecto a la selección de tecnologías otro parámetro a tener en mente es el tipo de conexión de las dos tecnologías. Una planta de desalinización por ósmosis inversa que utiliza energías renovables puede ser diseñada para operar acoplada a la red eléctrica o fuera de la red (sistema autónomo-independiente). Cuando el sistema está conectado a la

red, la planta de desalinización puede funcionar de forma continua como una planta convencional y la fuente de energía renovable sólo actúa como un sustituto de los combustibles. Cuando no se dispone de la red eléctrica, se tiene que desarrollar un sistema autónomo que permita la naturaleza intermitente de la fuente de energía renovable.

Los sistemas de desalinización han sido diseñados tradicionalmente para funcionar con una entrada de energía constante. Una entrada impredecible y discontinua de energía, causaría problemas de operación en la planta. Cada sistema de desalinización posee problemas específicos cuando se encuentra conectado a un sistema de potencia variable. Por ejemplo, el sistema de ósmosis inversa tiene que hacer frente a la sensibilidad de las membranas en relación con incrustaciones, escamas, así como a los fenómenos imprevisibles debidos a los ciclos de arranque-paro y la operación de carga parcial durante los periodos de alimentación oscilante.

Por otro lado, el sistema de compresión de vapor tiene una inercia térmica considerable y requiere mucha energía para llegar al punto de trabajo nominal. Para sistemas autónomos un sistema pequeño de almacenamiento de energía, baterías o almacenamiento térmico, deben ser añadidos para ofrecer energía estable a la planta desalinizadora. Cualquier opción resultante de los parámetros anteriores debe ser investigada a través de nuevas restricciones tales como las características del emplazamiento (accesibilidad, formación de la tierra, etc.) además de las necesidades financieras.

La energía necesaria para los procesos de desalinización diversos se ha obtenido como resultado de una encuesta con los fabricantes. Los datos se muestran en la Tabla 5.1. Se puede observar en dicha tabla que el proceso

con el requisito mínimo de energía es la ósmosis inversa con recuperación de energía. Pero esto sólo es viable para sistemas muy grandes debido al alto costo de la turbina de recuperación de energía. El siguiente más bajo es la ósmosis inversa sin recuperación de energía y la destilación multiefecto (Kalogirou, 2005).

Tabla 5.1. Consumo de energía de los sistemas de desalinización  
(Kalogirou, 2005)

Proceso	Entrada de calor (kJ/kg de producto)	Aportación de energía mecánica (kWh/m <sup>3</sup> de producto)	Consumo primario de energía (kJ/kg de producto) <sup>a</sup>
Destilación múltiple efecto instantánea	294	2.5-4 (3.7) <sup>b</sup>	338.40
Destilación múltiple efecto	123	2.2	149.40
Compresión de vapor	-	8-16 (16)	192.00
Ósmosis inversa	-	5-13 (10)	120.00
Ósmosis inversa con recuperación de energía	-	4-6 (5)	60.00
Electrodialisis	-	12	144.00
Destilador solar	2330	0.3	2,333.60

a Suponiendo una eficiencia de conversión de la energía eléctrica del 30%

b Las cifras empleadas para la primera estimación de consumo de energía se muestra en la última columna

Una comparación de los costos de los equipos de desalinización de agua de mar y la exigencia del tratamiento, obtenidos de un estudio de los datos de los fabricantes se muestra en la Tabla 5.2. El sistema más económico de los sistemas considerados es el destilador solar. Se trata de un sistema de recolección directa, el cual es muy fácil de construir y operar. La desventaja de este proceso es el bajo rendimiento, lo cual implica que sean requeridas grandes extensiones de terreno plano.

Cabe preguntarse si tal proceso económico es viable, a menos que se disponga de terrenos en el desierto cercanos al mar. El proceso de destilación multiefecto es el más económico de todos los sistemas de recolección indirecta, así como el que requiere el tratamiento para el agua de mar más simple. El sistema de ósmosis inversa aunque requiera una menor cantidad de energía es caro y requiere un tratamiento del agua de mar complejo (Kalogirou, 2005).

Tabla 5.2. Comparación de las plantas desalinizadoras (Kalogirou, 2005)

Elemento	DMI	DME	CV	OI	DS
Tamaño de aplicación	Mediano-largo	Pequeño-mediano	Pequeño	Pequeño-largo	Pequeño
Tratamiento del agua de mar	Inhibidor de incrustaciones, agentes químicos antiespumantes	Inhibidor de incrustaciones	Inhibidor de incrustaciones	Ácido esterilizador coagulante desoxidante	–
Precio del equipo (€/m <sup>3</sup> )	950 - 1900	900 - 1700	1500 - 2500	900 - 2500 (reemplazo de las membranas cada 4 - 5 años)	800 - 1000

Las cifras bajas en el precio del equipo se refieren a un mayor tamaño en el rango indicado y viceversa. Durante las dos últimas décadas, se han construido sistemas de desalinización que utilizan diversos tipos de energías renovables. Casi todos estos sistemas se construyeron como proyectos de investigación o de demostración y por consiguiente fueron construidos para una capacidad pequeña. No se sabe cuantas de estas plantas existen todavía, pero es probable sólo algunas de estas plantas permanecen todavía en funcionamiento (Figuras 5.1 a 5.6). Las lecciones aprendidas han sido transmitidas con suerte y se reflejan en las plantas actualmente en construcción. La Tabla 5.3 proporciona una serie de

plantas de desalinización que emplean fuentes de energía renovable (Tzen y Morris, 2003).



Figura 5.1. Sistema solar fotovoltaico de la planta fotovoltaico-ósmosis inversa en Lampedusa, Italia (Tzen y Morris, 2003)

Tabla 5.3. Aplicaciones de desalinización (Tzen y Morris, 2003)

Localización de la planta	Tipo de agua	Capacidad de la unidad de desalinización	Potencia suministrada por el sistema de energía renovable instalado	Año de puesta en marcha	Costo unitario del agua
Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos	Agua de mar	80 m <sup>3</sup> /d DME	1862 m <sup>2</sup> , recolectores solares	1984	8 USD/m <sup>3</sup>
Lampedusa, Italia	Agua de mar	3 + 2 m <sup>3</sup> /h OI	100 kWp Paneles fotovoltaicos	1990	~6.5 €/m <sup>3</sup>
Universidad de Almería, España	Agua salobre	2.5 m <sup>3</sup> /h OI	23.5 kWp Paneles fotovoltaicos	1990	–
Maagan Michel, Israel	Agua salobre	0.4 m <sup>3</sup> /h OI	3.5 kWp, Paneles fotovoltaicos, 0.6 kW eólico/térmico + 3 kW diesel	1997	–
ITC, Gran Canaria	Agua de mar	50 m <sup>3</sup> /d CMV	230 kW eólico/térmico	1988	–
Almería, España	Agua de mar	3 m <sup>3</sup> /h DME	6.5 MW recolectores térmicos	1988	~3.5 €/m <sup>3</sup>
CIEMAT, DLR, Isla Syros, Grecia	Agua de mar	900 m <sup>3</sup> /d OI	500 kW eólico/térmico	1998	–
Isla Kimolos, Grecia	Agua de mar	80 m <sup>3</sup> /d DME	Geotermico, 61°C	2000	–
CRES, Grecia	Agua de mar	130 L/h OI	4 kWp Paneles fotovoltaicos, 1 kW eólico/térmico	2002	–

CMV: por compresión mecánica de vapor

DME: por destilación multi-efecto

OI: por ósmosis inversa

Para que los sistemas híbridos autónomos funcionen, es necesario realizar mucho trabajo en el área de control para la explotación de las fuentes de energía renovable. Por último, el costo es un parámetro importante que afecta la fuerza del mercado y se debe considerar principalmente por los fabricantes de ambas tecnologías (Tzen y Morris, 2003).



Figura 5.2. Unidad de ósmosis inversa que produce 130 L/h en Lavrio, Grecia (Tzen y Morris, 2003)



Figura 5.3. Sistema de banco de baterías de la planta en Lampedusa, Italia (Tzen y Morris, 2003)



Figura 5.4. Parque eólico y los domos de desalinización en la isla Gran Canaria (Tzen y Morris, 2003)



Figura 5.5. Planta de compresión de vapor, plato de intercambio de calor en la isla Gran Canaria (Tzen y Morris, 2003)



Figura 5.6. Arreglo de 4kWp, 900 W W/T en Lavrio, Grecia. (Tzen y Morris, 2003)



## 5.2. Producción de biodiesel a partir de microalgas

Las microalgas parecen ser la única fuente de biodiesel que tiene el potencial para desplazar completamente el diesel fósil, tal como se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Comparación de algunas fuentes de biodiesel (Chisti, 2007)

<b>Cultivo</b>	<b>Rendimiento en la producción de aceite (L/ha)</b>	<b>Superficie de tierra necesaria (M ha)<sup>a</sup></b>	<b>Porcentaje de cultivos existentes en EE.UU.</b>
Maíz	172	1,540.0	846.0
Soya	446	594.0	326.0
Canola	1,190	223.0	122.0
Jatropha	1,892	140.0	77.0
Coco	2,689	99.0	54.0
Aceite de palma	5,950	45.0	24.0
Microalgas <sup>b</sup>	136,900	2.0	1.1
Microalgas <sup>c</sup>	58,700	4.5	2.5

a Para cumplir con el 50% de todas las necesidades de combustible del transporte en los EE.UU

b 70% de aceite (en peso) en la biomasa

c 30% de aceite (en peso) en la biomasa

A diferencia de otros cultivos oleaginosos, las microalgas crecen muy rápidamente y muchas son ricas en aceite. Las microalgas comúnmente duplican su biomasa en 24 h. Los tiempos de duplicación de biomasa durante su proliferación exponencial son comúnmente tan cortos como 3.5 h. El contenido de aceite en las microalgas puede ser superior al 80% en masa de biomasa seca. Los niveles de aceite en las microalgas del 20 – 50% son bastante comunes (Tabla 5.5.). La productividad de aceite, que es la masa de aceite producido por unidad de volumen del caldo de microalgas por día, depende de la tasa de reproducción de las algas y el



contenido de aceite de la biomasa. Las microalgas con elevadas producciones de aceite son las deseadas para la producción de biodiesel.

Tabla 5.5. Contenido de aceite de algunas microalgas (Chisti, 2007)

<b>Microalgas</b>	<b>Contenido de aceite (% masa seca)</b>
<i>Botryococcus braunii</i>	25 - 75
<i>Chlorella sp.</i>	28 - 32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16 - 37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25 - 33
<i>Monallanthus salina</i>	> 20
<i>Nannochloris sp.</i>	20 - 35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31 - 68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35 - 54
<i>Nitzschia sp.</i>	45 - 47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20 - 30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50 - 77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15 - 23

El biodiesel de microalgas es técnicamente factible. Es el único biodiesel renovable que puede potencial y completamente desplazar a los combustibles líquidos derivados del petróleo. La economía de la producción de biodiesel a partir de microalgas, necesita mejorar sustancialmente para que este sea posible. La producción de biodiesel a partir de microalgas a bajo costo, requiere sobre todo la mejora de la biología de las microalgas a través de la ingeniería genética y metabólica. El uso del concepto de biorrefinería y los avances en la ingeniería de fotobiorreactores, reducirá aún más el costo de producción. En vista de su productividad, mucho mayor que en los sistemas de canales abiertos, los fotobiorreactores tubulares son susceptibles de ser utilizados en la producción de gran parte de la biomasa de las microalgas necesaria para la producción de biodiesel (Fig. 5.7).



Figura 5.7. Biomasa de microalgas recuperado por filtración del caldo de cultivo, que se mueve a lo largo de una cinta transportadora en Cyanotech Corporation, Hawaii, EE.UU([www.cyanotech.com](http://www.cyanotech.com)). Fotografía de Lucas Terry. Cortesía de Honolulu Star-Bulletin (Schenk et al., 2008)

Los fotobiorreactores proporcionan un ambiente controlado que se pueden adaptar a las demandas específicas de las microalgas de alta productividad para alcanzar una producción anual de aceite de buena manera y consistente (Chisti, 2007).

#### 5.2.1. Viabilidad económica del biodiesel de microalgas

El potencial de producción de biocombustibles se destaca por el hecho de que incluso con la tecnología actual, el biocombustible brasileño a base de caña de azúcar y el norteamericano a base de maíz, han reportado una producción de bioetanol con costos competitivos con los precios del petróleo, reportando precios de \$40 USD y \$60 USD, mientras que el equivalente para el biodiesel fue de \$80 USD (Schenk et al., 2008).

Por lo tanto, ya que el precio del petróleo ha llegado recientemente a \$100 USD por barril, estos combustibles pueden, en teoría, ser producidos económicamente, incluso un modesto incremento en la eficiencia del proceso fotosintético y se espera que produzca un aumento significativo en la competitividad económica (Schenk et al., 2008).

El biodiesel se está convirtiendo en uno de los biocombustibles más importantes en el mercado ya que prácticamente todos los vehículos industriales utilizados para la agricultura, el transporte y el comercio operan con base en diesel. En la última década, la industria del biodiesel ha experimentado un crecimiento masivo a nivel mundial, más del doble de la producción de cada 2 años.

La creciente demanda de aceites vegetales para la producción de biodiesel ha llevado a una gran presión en el mercado del aceite vegetal. De hecho, la industria del biodiesel en el mundo es operada muy por debajo de su capacidad debido a la falta de materia prima.

Los sistemas de microalgas de segunda generación son cada vez más; expertos internacionales responsables de la política juegan un papel muy importante, crucial en un futuro limpio ecológicamente sostenible, ya que, dichos sistemas poseen importantes ventajas.

Lo más significativo es que estos sistemas tienen un mayor rendimiento por hectárea (más de 15 veces mayor que la palma de aceite, que es el mayor productor de petróleo en curso) y su capacidad para ser "cultivada" en tierras no cultivables, reduce la competencia con los cultivos tradicionales de alimentos. Los sistemas de producción de algas son reconocidos como uno de los medios más eficientes para la obtención de

biomasa como combustible y las mejoras son más probables en un futuro próximo. Por ejemplo, las algas ya están siendo diseñadas para incrementar su eficiencia fotosintética sobre los cultivos debido a la penetración de la luz y fluorescencia y pérdidas de calor reducidos (Schenk et al., 2008).

Varios estudios han intentado calcular el costo de producción de aceite a partir de microalgas de las granjas a gran escala. Un análisis completo y un buen camino para construir tal sistema para estimar el costo del aceite de microalgas lo definieron en un rango entre \$39 y 69 USD/barril, tomando en cuenta la inflación para el año 2008, el rango fue de \$52 y 91 USD/barril (Schenk et al., 2008).

Esta estimación se basó en un área de 400 hectáreas de estanques abiertos, utilizando CO<sub>2</sub> puro o gases de combustión de una central eléctrica a carbón y las hipótesis de productividad de 30-60 g/m<sup>2</sup>día con un rendimiento del 50% de lípidos de microalgas. Estos altos rendimientos son teóricamente posibles pero hasta la fecha no han sido demostrados. Un análisis más reciente estima que los costos de producción de aceite de microalgas es de \$84 USD/barril. Este escenario se basa en los supuestos costos de la infraestructura, pero utiliza un sistema híbrido con una productividad aérea de 70.4 /m<sup>2</sup>día y un rendimiento de 35% de lípidos de microalgas (Schenk et al., 2008).

Las empresas comerciales que producen las algas no han sido tan optimistas en los costos de producción. Una compañía que está cerca de alcanzar estos valores es Seabiotic Ltd. (en Israel). Se estima que los costos de producción de sus algas secas es de \$0.34 USD/kg. La

productividad es de 20 g/m<sup>2</sup>día y el contenido de lípidos totales se encuentra en el rango de entre 8 y 40% (Schenk et al., 2008).

Suponiendo que el rendimiento medio de lípidos extraídos es del 24% y sin ningún costo adicional, entonces el costo sería de \$1.42 USD/kg de lípidos, lo que equivale a \$209 USD/bbl. En el rendimiento más optimista del 40% de lípidos el costo sería es de \$0.85 USD/kg, lo cual equivale a \$126 USD/bbl. Los cálculos se basaron en la densidad del aceite de soya (0.925 kg/L, 1 kg = 1.08 L, 147.2 kg = 1 bbl) teniendo en cuenta que los precios del petróleo comienzan a estabilizarse alrededor de \$90 USD por barril. Algunas de estas estimaciones sugieren que la producción de biodiesel a partir de microalgas ya podría ser económicamente viable (Schenk et al., 2008).

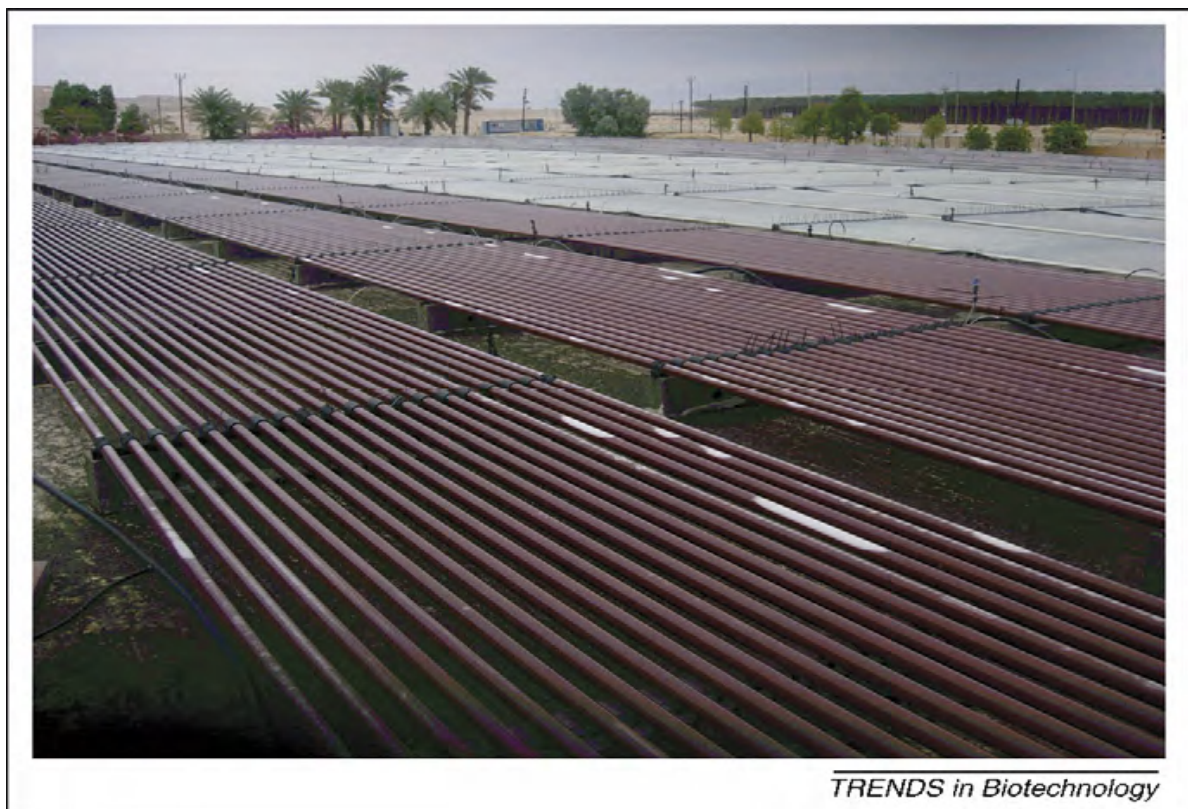


Figura 5.8. Fotobiorreactor tubular de Algatechnology ([www.algotech.com](http://www.algotech.com)) sitio de producción (Valle Ketura Arava, Israel) (Wijffels, 2008)

En la Figura 5.8 se muestra un fotobiorreactor tubular, el cual consiste de tubos transparentes con diámetros de 3 a 6 cm y longitudes en un rango de 10 a 200 m; en el cual el líquido de cultivo es bombeado a través de estos tubos por bombas mecánicas o de emulsión (Wijffels, 2008).

### 5.3. Recomendaciones finales

La combinación más común de las tecnologías para la desalinización del agua del mar son la destilación multiefecto con recolectores térmicos y la ósmosis inversa con las celdas solares fotovoltaicas. Las celdas solares fotovoltaicas son particularmente buenas para aplicaciones pequeñas en zonas soleadas. Para las plantas grandes, la energía eólica puede ser la solución más atractiva, ya que no requiere extensiones grandes de terreno. Esto es a menudo el caso de las islas, donde hay un régimen de buen viento y, frecuentemente pocos terrenos planos. En los procesos de destilación, las plantas de gran tamaño son más atractivas debido a las altas pérdidas de calor que se presenta en las plantas pequeñas.

El costo de energía es uno de los elementos más importantes en la determinación de los costos del agua, cuando el agua se produce a partir de plantas de desalinización. Las necesidades mundiales de agua están aumentando dramáticamente.

Es por eso que las energías eólica, solar y otras tecnologías renovables (biocombustibles, etc) que pueden ser utilizadas para la desalinización están surgiendo rápidamente con la promesa de la viabilidad económica y mediambiental a gran escala. Hay una necesidad de acelerar el desarrollo de los nuevos sistemas de producción de agua a partir de fuentes renovables de energía. Teniendo en cuenta los objetivos de la protección

del clima y las fuertes preocupaciones ambientales, la futura desalinización de agua alrededor del mundo debería ser generada por las energías renovables limpias (solar, eólica y otras) cada vez más (Kalogirou, 2005; Tzen y Morris, 2003).

Actualmente es posible alcanzar la separación total del agua de mar y la sal y, por tanto, la no producción de salmuera, empleando fuentes energéticas de origen alternativo y renovable. Una combinación adecuada y viable es la desalinización multiefecto inicial alimentada por un campo de recolectores solares y la separación final mediante la evaporación con compresión mecánica de vapor alimentada por aerogeneradores (Viedma et al., 2009).

Como es sabido, el aumento global de CO<sub>2</sub> atmosférico y el agotamiento de las reservas de hidrocarburos requiere el rápido desarrollo de alternativas renovables sin emisiones de carbono. La producción de biodiesel a partir de microalgas proporciona viabilidad técnica y económica que también tiene el potencial de secuestrar el CO<sub>2</sub> y por lo tanto es probable que encuentre una amplia aceptación.

Los biocombustibles a partir de algas parecen ser la única fuente renovable que pueda hacer frente a la demanda global de combustibles para el transporte. Además presentan menor impacto en el medio ambiente y el suministro de alimentos mundial, que los cultivos convencionales productores de biocombustibles.

Las principales razones para esto son los altos rendimientos, una corriente casi continua de la cosecha y el potencial de los biorreactores de algas para ser instalados en terrenos no cultivables (Schenk et al., 2008).



Por todo esto, se recomienda la adición al sistema propuesto en esta investigación de desalinización, la planta de producción de biodiesel, ya que ambas tecnologías pueden ser acopladas y beneficiadas, pues la producción de biodiesel es muy prometedora. Así, se podría iniciar un programa de fuentes de energía renovable biológica en México como se muestra en la Fig. 5.9 (Castro y Middleton, 2010).

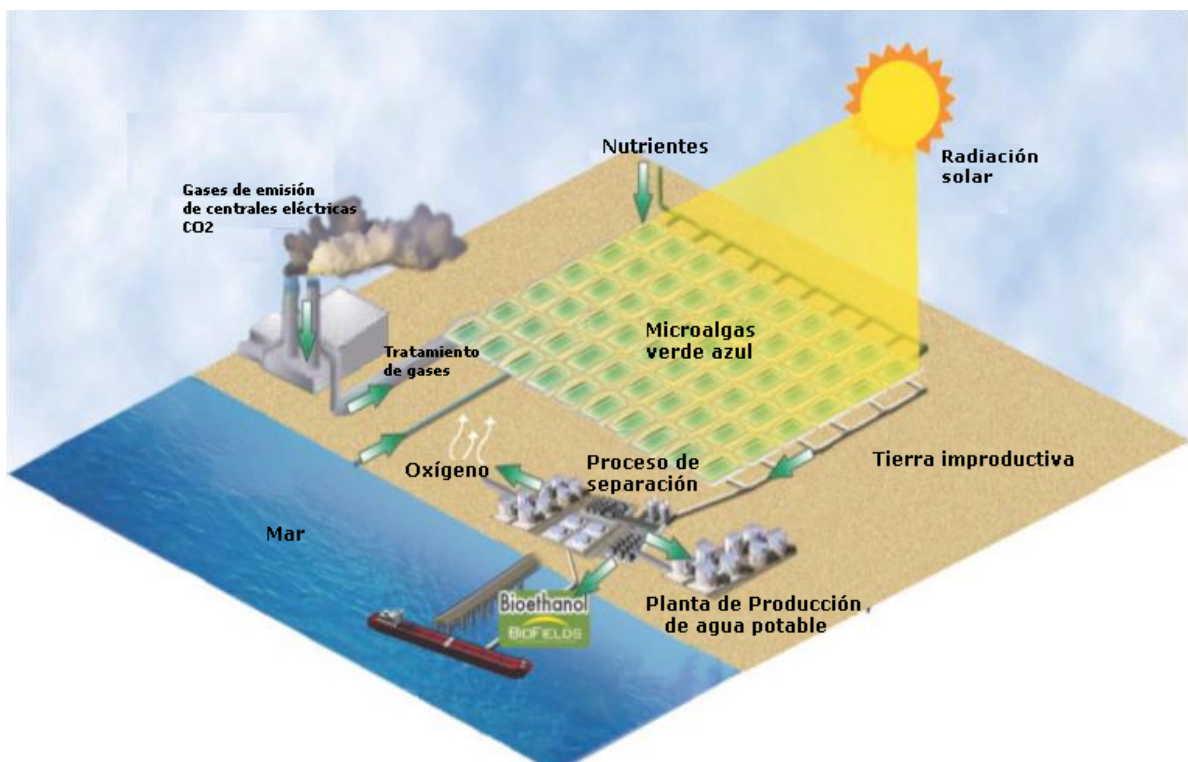


Figura 5.9. Esquema de las plantas de producción de biodiesel a partir de microalgas y desalinización de agua de mar (Castro y Middleton, 2010)

#### 5.4. Diagrama del proceso propuesto

De acuerdo con este análisis en la Fig. 5.10 se presenta el diagrama del proceso propuesto en esta investigación.



Será necesario en la siguiente fase de la investigación, cuantificar los costos reales en México de cada operación unitaria y el análisis financiero ( $\pm 30\%$ ) incluyendo la tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación.

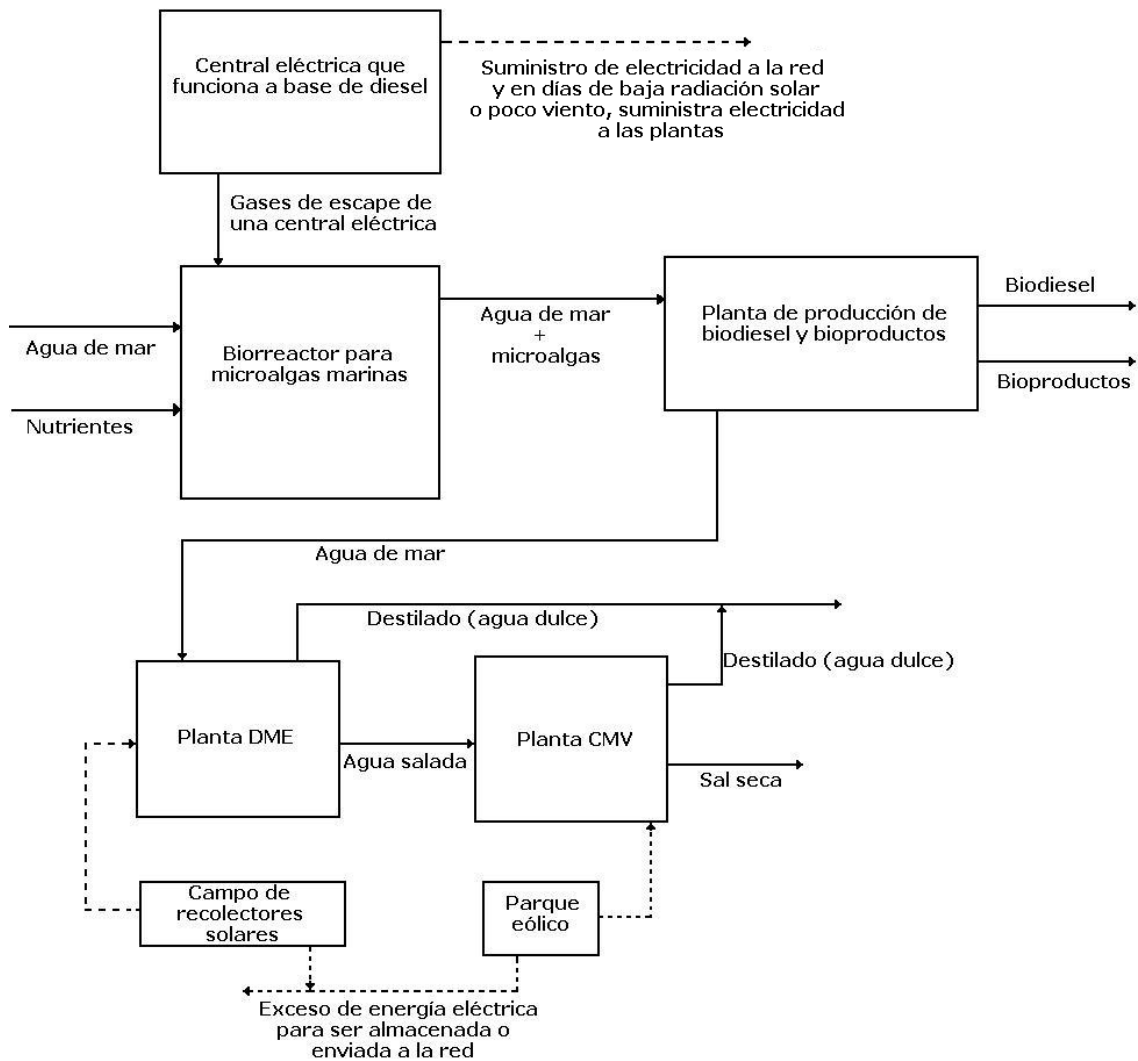


Figura 5.10. Diagrama del proceso de producción de desalinización de agua y producción de biodiesel, propuesto en tierras marginales (DME: por destilación multi-efecto, CMV: por compresión mecánica de vapor)

# CAPÍTULO VI

## 6. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con el objetivo y las metas de esta investigación de estudiar el mejor método para eliminar sales del agua de mar empleando microalgas obteniendo la energía a partir de la biomasa algal definiendo las mejores opciones de obtención de agua potable a partir de agua de mar, empleando microalgas y aprovechando la biomasa algal para la obtención de energéticos, a continuación se presentan las conclusiones obtenidas.

### 6.1. Conclusiones

Se seleccionaron las siguientes opciones para la planta de desalinización diseñada para producir 100 m<sup>3</sup>/h de agua dulce con total separación de la sal y el agua. El consumo energético estimado es de 2,362 kW/h para el sistema DME y 1,944 kW/h por el sistema CMV. Al utilizar energías renovables la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al año es de 8,957 Ton debidas al consumo eléctrico y 6,584 Ton al consumo térmico. Teniendo en cuenta los precios de la venta de la energía eléctrica producida y de la sal, el precio del agua sería de 0.59 €/m<sup>3</sup>; el cual con un subsidio del 35%, se podría reducir a 0.41 €/m<sup>3</sup> (Viedma et al., 2009).

Para la planta de producción de biodiesel para producir 47317.625 L/ha año (5000 gal/acre año), la cual secuestra 125 Ton de CO<sub>2</sub>/ha año (50 Ton de CO<sub>2</sub>/acre año) con 20 Ton (masa seca) de microalgas, con un costo de \$0.53 USD/L de biodiesel (\$2 USD/gal) (Castro y Middleton, 2010).

## 6.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar la adecuación del estudio técnico-económico de factibilidad para las condiciones de México evaluando la tasa interna de retorno con base en el costo de capital (Peters y Timmerhaus, 1991).

Una vez demostrada la bondad económica del sistema, se recomienda hacer las gestiones para construir una planta piloto para corroborar los costos y, si son positivos, promover con la Secretaría de Energía en el marco del plan a 2024 la construcción de una primera planta.

## Bibliografía

Anónimo. 2010. Los Angeles Department of Water and Power. Seawater Desalination Diversifies Water Resources. Water Supply Solutions. [www.ladwp.com/water](http://www.ladwp.com/water)

Abe, K., Takahashi, E., Hirano, M. 2008. Development of laboratory-scale photobioreactor for water purification by use of a biofilter composed of the aerial microalga *Trentepohlia aurea* (Chlorophyta). *Journal of Applied Phycology*. 20: 283-288.

Aboabboud, M.M., Mink, G., Kudish, A. 2009. Condensation Heat Recycle in Solar Stills. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2:1-3.

Al-Karaghoul, A., Renne, D., Kazmerski, L.L., 2009. Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13: 2397-2407.

Arredondo, B.O. y Vázquez-Duhalt, R. 1991. Aplicaciones biotecnológicas en el cultivo de microalgas. *Ciencia y Desarrollo*. 17:99-111.

Assimacopoulos, D. 2001. Desalination powered by renewable energy sources. *Feature -Water Water everywhere...* Pp. 38-43. [www.re-focus.net](http://www.re-focus.net)

Aybar, H.S., Assefi, H. 2009. A review and comparison of solar distillation: Direct and indirect type systems. *Desalination and Water Treatment*, 10:321-331.

Ayhan, T., Madani, H.A. 2010. Feasibility study of renewable energy powered seawater desalination technology using natural vacuum technique. *Renewable Energy*. 35:506-514.

Banasiak, L.J., Kruttschnitt, T.W., Schäfer, A.I. 2007. Desalination using electrodialysis as function of voltage and salt concentration. *Desalination*. 205:38-46.

Bayod-Rújula, A.A., Khalidou-Dia, N. 2010. Application of a multi-criteria analysis for the selection of the most suitable energy source and water desalination system in Mauritania. *Energy Policy*. 38:99-115.

Bazúa, C.D., Wilke, C.R. 1977. Ethanol effects on the kinetics of a continuous fermentation with *saccharomyces cerevisiae*. Biotechnol. Bioeng. Symp. No. 7. Pp 105-118.

Belessiotis, V., Delyannis, E. 2000. The history of renewable energies for water distillation. Desalination. 128:147-159.

Belessiotis, V., Delyannis, E. 2001. Water shortage and renewable energies (RE) desalination - possible technological applications. Desalination. 139:133-138.

Ben-Amotz A., Tornabene T.G., Thomas W.H. 1985. Chemical profile of selected species of microalgae with emphasis on lipids. J. Phycol. 21:72-81.

BenJemaa, F., Houcine, I., Chahbani, M.H. 1999. Potential of renewable energy development for water desalination in Tunisia. Renewable Energy. 18:331-347.

Boucekima, B., 2003. Solar desalination plant for small size use in remote arid areas of South Algeria for the production of drinking water. Desalination. 156:352-354.

Bouguecha, S., Hamrouni, B., Dhahbi, M. 2005. Small scale desalination pilots powered by renewable energy sources: case studies. Desalination. 183:151-165.

Brauns, E. 2008. Towards a worldwide sustainable and simultaneous large-scale production of renewable energy and potable water through salinity gradient power by combining reversed electrodialysis and solar power?. Desalination. 219:312-323.

Brauns, E. 2009. Salinity gradient power by reverse electrodialysis: effect of model parameters on electrical power output. Desalination. 237:378-391.

Brennan, L., Owende, P. 2010. Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extraction of biofuels and co-products. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14:557-577.

Castro, C., Middleton, D. 2010. Carbon Capture and Grow. U.S. Department of Energy.

Chafik, E. 2002. A new seawater desalination process using solar energy. *Desalination*. 153:25-37.

Chafik, E. 2003. A new type of seawater desalination plants using solar energy. *Desalination*. 156:333-348.

Charcosset, C. 2009. A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*. 245:214-231.

Charcosset, C., Falconet, C., Combe, M. 2009. Hydrostatic pressure plants for desalination via reverse osmosis. *Renewable Energy*. 34:2878-2882.

Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 25:294-306.

Chisti, Y. 2008. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*. 26(3):126-131.

Chisti, Y. 2008. Response to Reijnders: Do biofuels from microalgae beat biofuels from terrestrial plants?. *Trends in Biotechnology*. 26(7):351-352.

CIA. 2009. World Factbook. Página electrónica:  
[www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/](http://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/)

Cohen, Z. 1986. Products from microalgae. In: *Handbook of microalgal mass culture*. Richmond, A. (ed.) CRC Press pp 421-454.

Colombo, D., Gerloni, M. De, Reali, M. 1999. An energy-efficient submarine desalination plant. *Desalination*. 122:171-176.

Comisión Nacional del Agua. 2003. Estadísticas del Agua en México 2003. Sistema Unificado de Información Básica del Agua (SUIBA). Pp 106.

CONAGUA. 2010.

Delyannis, E. 2003. Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*. 75:357-366.

Dutang, M., 2005. Seawater Desalination. *The magazine of the Scientific Chronicles*. 4:1-4.

Elliot, D., Schwartz, M., Scott, G., Haymes, S., Heimiller, D., George, R. 2003. Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca. U.S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory. Pp. 135.

Eltawil, M.A., Zhengming, Z., Yuan, L. 2009. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13:2245-2262.

Epp, C., Papapertrou, M. 2004. Co-ordination action for autonomous desalination units based on renewable energy systems - ADU-RES. Desalination. 168:89-93.

Espino, T., Peñate, B., Piernavieja, G., Herold, D., Neskakis, A. 2003. Optimised desalination of seawater by PV powered reverse osmosis plant for a decentralised coastal water supply. Desalination. 156:349-350.

Exton, R.E., 2008. Building Water Resources for Global Water Needs. Water & Wastes Digest. Pp 16-19. [www.wwdmag.com](http://www.wwdmag.com)

Folley, M., Whittaker, T. 2009. The cost of water from an autonomous wave-powered desalination plant. Renewable Energy. 34:75-81.

Forstmeier, M., Mannerheim, F., D'Amato, F., Shah, M., Liu, Y., Baldea, M., Stella, A. 2007. Feasibility study on wind-powered desalination. Desalination. 203:463-470.

G8. 2003. Agua - A G8 Action Plan. Official web site of the Evian Summit 2003. [www.8.fr/evian/extras/510.pdf](http://www.8.fr/evian/extras/510.pdf)

García-Rodríguez, L. 2003. Renewable energy applications in desalination: state of the art. Solar Energy. 75:381-393.

García-Rodríguez, L. 2002. Seawater desalination driven by renewable energies: a review. Desalination. 143:103-113.

García-Rodríguez, L., Palmero-Marrero, A.I., Gómez-Camacho, C. 2002. Comparison of solar thermal technologies for applications in seawater desalination. Desalination. 142:135-142.

García-Rodríguez, L., Romero-Ternero, V., Gómez-Camacho, C. 2001. Economic analysis of wind-powered desalination. Desalination. 137:259-265.

Garibay-Hernández, A., Vázquez-Duhalt, R., Sánchez-Saavedra, M.P., Serrano-Carreón, L., Martínez-Jiménez, A. 2009. Biodiesel a partir de microalgas. *Biotecnología*. 13(3):38-61.

Gatenby, C.M., Orcutt, D.M., Kreeger, D.A., Parker, B.C., Jones, V.A., Neves, R.J. 2003. Biochemical composition of three algal species proposed as food for captive freshwater mussels. *J. Appl. Phycol.* 15:1-11.

Gazagnes, L., Cerneaux, S., Persin, M., Prouzet, E., Larbot, A. 2007. Desalination of sodium chloride solutions and seawater with hydrophobic ceramic membranes. *Desalination*. 217:260-266.

Gibbons, J., Papapetrou, M., Epp, C. 2008. Assessment of EU policy: Implications for the implementation of autonomous desalination units powered by renewable resources in the Mediterranean region. *Desalination*. 220:422-430.

Gomri, R. 2009. Energy and exergy analyses of seawater desalination system integrated in a solar heat transformer. *Desalination*. 249:188-196.

Gouveira, L. y Oliveira, A.C. 2009. Microalgae as raw material for biofuels production. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 36:269-274.

Harrison, D.G., Ho, G.E., Mathew, K. 1996. Desalination using renewable energy in Australia. *World Renewable Energy Congress*. Denver, EEUU.

He, T., Yan, L. 2009. Application of alternative energy integration technology in seawater desalination. *Desalination*. 249:104-108.

Hernández-Cano, G. 2004. Seguimiento de la producción de biogás en un relleno sanitario clausurado. Tesis de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Mayo 11. México D.F.

Houcine, I., Benjemaa, F., Chahbani, M.H., Maalej, M. 1999. Renewable energy sources for water desalting in Tunisia. *Desalination*. 125:123-132.

IEA bioenergy. 2001. The Role of Bioenergy in Greenhouse Gas Mitigation. [www.ieabioenergy-task38.org/publications/Role of Bioenergy in GHG Mitigation.pdf](http://www.ieabioenergy-task38.org/publications/Role%20of%20Bioenergy%20in%20GHG%20Mitigation.pdf)



INEGI. 2009. Estadísticas a propósito del día mundial del agua. Datos Nacionales.

[www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/.../estadisticas/2009/Agua09.doc](http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/.../estadisticas/2009/Agua09.doc)

Joanneum Research. 1998. The Role of Bioenergy in Greenhouse Gas Mitigation. IEA Bioenergy. Task 25. Pp 4. [www.joanneum.ac.at/iea-bioenergy-task25](http://www.joanneum.ac.at/iea-bioenergy-task25)

Juárez, E.M., Murrieta Guevara, F., Tavera Sánchez, L. 2009. Biodiesel base algas: una opción para México. Sesiones Técnicas. XLIX Convención Nacional IMIQ. Pp 12.

Kalogirou, S. 1998. Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination. Applied Energy. 60:65-88.

Kalogirou, S.A. 2005. Seawater desalination using renewable energy sources. Progress in Energy and Combustion Science. 31:242-281.

Karagiannis, I.C., Soldatos, P.G. 2008. Water desalination cost literature: review and assessment. Desalination. 223:448-456.

Kershman, S.A., Rheinländer, J., Gabler, H. 2002. Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources - hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya. Desalination. 153:17-23.

Khawaji, A.D., Kutubkhanah, I.K., Wie, J. 2008. Advances in seawater desalination technologies. Desalination. 221:47-69.

Koutroulis, E., Kolokotsa, D. 2010. Design optimization of desalination systems power-supplied by PV and W/G energy sources. Desalination. ARTICLE IN PRESS. DES-09846; No. Of pages 11.

Lamei, A., van der Zaag, P., von Münch, E. 2008. Impact of solar energy cost on water production cost of seawater desalination plants in Egypt. Energy Policy. 36:1748-1756.

Latorre M., 2005. Environmental impact of brine disposal on Psidonia seagrass. Desalination. 182:517-524.

Li, Q., Du, W. y Liu, D. 2008. Perspectives of microbial oils for biodiesel production. Appl. Microbiol. Biotechnol. 80:749-756.

Loera-Quezada, M.M., Olguín, E.J. 2010. Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. *Revista Latinoamericana de A94Biotecnología Ambiental Algal*. 1(1):91-116.

Mahakhant, A. 2010. Current Status and Future Program of Microalgae for Biofuel Production at TISTR, Thailand. 8<sup>th</sup> Asian Petroleum Technology Symposium. Tokyo. Japan.

[Http://pecj.webdrop.net/japanese/overseas/asia/asia\\_symp\\_8th/pdf/4-4\\_Dr.Aparat\\_Mahakhant.pdf](Http://pecj.webdrop.net/japanese/overseas/asia/asia_symp_8th/pdf/4-4_Dr.Aparat_Mahakhant.pdf)

Mahmoudi, H., Abdellah, O., Ghaffour, N. 2009. Capacity building strategies and policy for desalination using renewable energies in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13:921-926.

Mahmoudi, H., Abdul-Wahab, S.A., Goosen, M.F.A., Sablani, S.S., Perret, J., Ouagued, A., Spahis, N. 2008. Weather data and analysis of hybrid photovoltaic-wind power generation systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries. *Desalination*. 222:119-127.

Mahmoudi, H., Spahis, N., Abdul-Wahab, S.A., Sablani, S.S., Goosen, M.F.A. 2010. Improving the performance of Seawater Greenhouse desalination system by assessment of simulation models for different condensers. *ARTICLE IN PRESS*. RSER-924; No. of Pages 7.

Mahmoudi, H., Spahis, N., Goosen, M.F., Ghaffour, N., Drouiche, N., Ouagued, A. 2010. Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit: A case study from Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14:512-517.

Manahan, S.E., Enríquez-Pog, M., Tan-Molina, L., Durán-de-Bazúa, C. 2007. Energy and activated carbon production from crop biomass by products. En *Towards a cleaner planet. Energy for the future*. Eds. J. Klapp, J.L. Cervantes Cota, J.F. Chávez-Alcalá. Pp 365-387. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Nueva York.

Maratos, D.F., 2002. Technical feasibility of weavepower for seawater desalination using the hydro-ram (HyDRAM). *Desalination*. 153:287-293.

Martin-Lagardette, J.L. 2001. Desalination of seawater helps meet fresh water demand. *Water Engineering & Management*. Water Sources. Pp 18-20. [www.waterinfocenter.com](http://www.waterinfocenter.com)

Mathioulakis, E., Belessiotis, V., Delyannis, E. 2007. Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination*. 203:346-365.

McClelland, J. 2005. This means war. Mexconnect. Página electrónica: [www.mexconnect.com/articles/520-this-means-war](http://www.mexconnect.com/articles/520-this-means-war)

Meerganz von Medeazza, G., Moreau, V. 2007. Modelling of water-energy systems. The case of desalination. *Energy*. 32:1024-1031.

Meerganz von Medeazza, G.L. 2005. "Direct" and socially-induced environmental impacts of desalination. *Desalination*. 185:57-70.

Metzger, P. y Largeau, C. 2005. *Botryococcus braunii*: a rich source for hydrocarbons and related ether lipids. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 66:486-496.

Ministerio de Economía. 2004. Real Decreto 436/2004. Madrid. España. BOE 75:13217-13238.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 2005. Real Decreto 1556/2005. Madrid. España. BOE 310:42314-42600.

Miranda, M.S., Infield, D. 2002. A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination*. 153:9-16.

Mohamed, A.M.I., El-Minshawy, N.A.S. 2009. Humidification-dehumidification desalination system driven by geothermal energy. *Desalination*. 249:602-608.

Morton, A.J., Callister, I.K., Wade, N.M. 1996. Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes. *Desalination*. 108:1-10.

Naik, S.N., Goud, V.V., Rout, P.K., Dalai, A.K. 2010. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14:578-597.

NASA. 2010. Página electrónica: <http://eosweb.larc.nasa.gov/SSES>.

Nuez-Pestana, I., García-Latorre, F.J., Argudo-Espinoza, C., Gómez-Gotor, A. 2004. Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I: Wind energy. *Desalination*. 160:293-299.

ONU. 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Página electrónica: [www.un.org](http://www.un.org)

Ophir, A., Gendel, A. 2006. High performance MED plants. 8<sup>th</sup> IDS Annual Conference, Haifa, Israel.

Ortiz, J.M., Expósito, E., Gallud, F., García-García, V., Montiel, V., Aldaz, A. 2006. Photovoltaic electro dialysis system for brackish water desalination: Modeling of global process. *Journal of Membrane Science*. 274:138-149.

Ortiz, J.M., Expósito, E., Gallud, F., García-García, V., Montiel, V., Aldaz, A. 2007. Electro dialysis of brackish water powered by photovoltaic energy without batteries: direct connection behaviour. *Desalination*. 208:89-100.

Ortiz, J.M., Expósito, E., Gallud, F., García-García, V., Montiel, V., Aldaz, A. 2008. Desalination of underground brackish waters using an electro dialysis system powered directly by photovoltaic energy. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 92:1677-1688.

Papapetrou, M., Epp, C., Teksoy, S., Sözen, S., Subiela-Ortin, V., Seibert, U., Vogt, G. 2005. Market analysis for Autonomous Desalination Systems powered by renewable energy in southern Mediterranean countries. Case study on Turkey. *Desalination*. 183:29-40.

Paulsen, K., Hensel, F. 2005. Introduction of a new Energy Recovery System-optimized for the combination with renewable energy. *Desalination*. 184:211-215.

Peters, M.S., Timmerhaus, K.D. 1991. Plant design and economics for chemical engineers. McGraw-Hill Book Co. Singapore. Malaysia. 923 p.

Post, J.W., Veerman, J., Hamelers, H.V.M., Euverink, G.J.W., Metz, S.J., Nymeijer, K., Buisman, C.J.N. 2007 Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electro dialysis. *Journal of Membrane Science*. 288:218-230.

Raluy, R.G., Serra, L., Uche, J. 2005. Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies. *Desalination*. 183:81-93.

Raso-da-Cunha-e-Lorena, A.M. 2008. Modelling microalgal growth and carbon capture with Dynamic Energy Budgets Theory. Universidad Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Pp 1-64.

Reali, M., de Gerloni, M., Sampaolo, A. 1997. Submarine and underground reverse osmosis schemes for energy-efficient seawater desalination. *Desalination*. 109:269-275.

Roman, J.A. 2005. Saldó México histórica deuda de agua que mantenía con los Estados Unidos. *La Jornada*. [www.jornada.unam.mx/2005/10/10/016n1pol.php](http://www.jornada.unam.mx/2005/10/10/016n1pol.php)

Sadrzadeh, M., Mohammadi, T. 2009. Treatment of sea water using electrodialysis: Current efficiency evaluation. *Desalination*. 249:279-285.

Schenk, M.P., Thomas-Hall, S.R., Stephens, E., Marx, U.C., Mussgnug, J.H., Posten, C., Kruse, O., Hankamer, B. 2008. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenerg. Res.* 1:20-43.

Schoijet, M. 2002. Historia de la Energía. *Elementos*. 44:51-57.

Scrivani, A. 2005. Energy management and DSM techniques for a PV-diesel powered sea water reverse osmosis desalination plant in Ginostra, Sicily. *Desalination*. 183:63-72.

Secretaría de Energía. 2010. Página electrónica: [www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx)

Seibert, U., Vogt, G., Brenning, C., Gebhard, R., Holz, F. 2004. Autonomous desalination system concepts for seawater and brackish water rural areas with renewable energies - potentials, technologies, field experience, socio-technical and socio-economic impacts - ADIRA. *Desalination*. 168:29-37.

SEMARNAT. 2010. Estadísticas del Agua en México, edición 2010. Comisión Nacional del Agua. Pp257.

Shatat, M.I.M., Mahkamov, K. 2010. Determination of rational design parameters of a multi-stage solar water desalination still using transient mathematical modeling. *Renewable Energy*. 35:52-61.

Sheenan, J., Dunahay, T., Benemann, J. y Roessler, P. 1998. A look back to the US Department of Energy's Aquatic Species Program –

Biodiesel from algae. National Renewable Energy Laboratory. Golden CO. Report NREL/TP-580-24190. Pp 328. Página electrónica: [www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf](http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf)

Sirivedhin, T., McCue, J., Dallbauman, L. 2004. Reclaiming produced water for beneficial use: salt removal by electro dialysis. Journal of Membrane Science. 243:335-343.

Speros, D.M., Speros, P.C. 1978. Method and apparatus for solar distillation. Patente No. 1978/881,613. U.S.A. CI.

Spyrou, I.D., Anagnostopoulos, J.S. 2010. Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. Desalination. ARTICLE IN PRESS. DES-09820; No. Of pages 13.

Szacs vay, T., Hofer-Noser, P., Posnansky, M. 1999. Technical and economic aspects of small-scale solar-pond-powered seawater desalination systems. 122:185-193.

Taylor, J. 2008. Water Crisis: Availability Of Water in Mexico. Mexconnect. [www.mexconnect.com/articles/1497-water-crisis-availability-of-water-in-mexico](http://www.mexconnect.com/articles/1497-water-crisis-availability-of-water-in-mexico)

Thomson, M., Infield, D. 2002. A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. Desalination. 153:1-8.

Tiwari, G.N., Singh, H.N., Tripathi, R. 2003. Present status of solar distillation. Solar Energy. 75:367-373.

Tompson, B. 2005. Mexico is facing serious water problems. MEXIDATA.INFO. [mexidata@ix.netcom.com](mailto:mexidata@ix.netcom.com)

Turek, M., Bandura, B. 2007. Renewable energy by reverse electro dialysis. Desalination. 205:67-74.

Tzen, E., Morris, R. 2003. Renewable energy sources for desalination. Solar Energy. 75:375-379.

UN. 2008. Kyoto Protocol Reference Manual on accounting of emissions and assigned amount. Bali, Indonesia.

Vázquez-Duhalt, R. y Greppin, H. 1987. Growth and production of cell constituents in batch cultures of *Botryococcus sedeticus*. *Phytochem.* 26:885-889.

Veza, J.M., Peñate, B., Castellano, F. 2001. Electrodialysis desalination designed for wind energy (on-grid tests). *Desalination.* 141:53-61.

Veza, J.M., Peñate, B., Castellano, F. 2004. Electrodialysis desalination designed for off-grid wind energy. *Desalination.* 160:211-221.

Viedma, A., Fernández-López, C., Herrero, R., Kaiser, A.S. 2009. Seawater integrated desalination plant without brine discharge and power by renewable energy systems. *Desalination.* 235:179-198.

Virk, G.S., Ford, M.G., Denness, B., Ridett, A., Hunter, A. 2001. Ambient energy for low-cost water desalination. *Desalination.* 137:149-156.

Voivontas, D., Misirlis, K., Manoli, E., Arampatzis, G., Assimacopoulos, D., Zervos, A. 2001. A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies. *Desalination* 133:175-198.

Water Industry. 2010. The Story of Water. [Waterindustry.org](http://Waterindustry.org) Página electrónica: [www.waterindustry.org/Water-Facts/story-of-water.htm](http://www.waterindustry.org/Water-Facts/story-of-water.htm)

Welgemoed, T.J., Schutte, C.F. 2005. Capacitive Deionization Technology<sup>TM</sup>: An alternative desalination solution. *Desalination.* 183:327-340.

Wijffels, R.H. 2008. Potential of sponges and microalgae for marine biotechnology. *Trends in Biotechnology.* 26:26-31.

Wikipedia. 2010. Página electrónica: [www.es.wikipedia.org](http://www.es.wikipedia.org)

World Health Organization. 2003. The Right to Water. France. Pp1-43.

YSI Environmental. 2009. Desalination Plants: YSI Instruments Monitor Flow & Water Quality at Multiple Stages. [www.ysi.com](http://www.ysi.com)

Zhou, X., Xiao, B., Liu, W., Guo, X., Yang, J., Fan, J. 2010. Comparison of classical solar chimney power system and combined solar chimney system for power generation and seawater desalination. *Desalination.* 250:249-256.