



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN CONCEPTUAL DEL POTENCIAL DE
APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES
EN MÉXICO**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

JESSICA SAMANTHA MAYORGA CASTILLO



MÉXICO, D.F.

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: José Antonio Ortiz Ramírez**

VOCAL: **Profesor: Ezequiel Millán Velasco**

SECRETARIO: **Profesor: Alfonso Durán Moreno**

1er. SUPLENTE: **Profesor: José Agustín García Reynoso**

2° SUPLENTE: **Profesor: Alejandro Zanelli Trejo**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

3er. piso, Ala sur, Torre de Ingeniería, Ciudad Universitaria

ASESOR DEL TEMA: Dr. Alfonso Durán Moreno

SUSTENTANTE: Jessica Samantha Mayorga Castillo



ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 PROBLEMÁTICA.....	10
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	11
1.3 OBJETIVO GENERAL	11
1.4 ALCANCES.....	11
2. CONTEXTO EN MATERIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y ENERGÍAS RENOVABLES (ER).....	12
2.1 ENERGÍA ELÉCTRICA.	12
2.2 OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES.....	12
2.3 IMPACTOS CAUSADOS POR LAS FUENTES CONVENCIONALES DE ENERGÍA: .	15
2.4 OTRAS FUENTES DE ENERGÍA.....	16
2.5 FUENTES DE GENERACIÓN NACIONAL.	17
2.6 PRECIOS DE ELECTRICIDAD.....	18
2.7 ESTRUCTURA ENÉRGICA NACIONAL ACTUAL	19
2.8 CONSUMO Y GENERACIÓN.....	20
2.9 CRECIMIENTO	22
2.10 COMERCIALIZACIÓN	24
2.11 ENERGÍAS RENOVABLES (ER).....	25
2.12 FUENTES O ENERGÍAS RENOVABLES Y SU UTILIDAD.	28
2.13 VENTAJAS DE UTILIZAR FUENTES RENOVABLES:	34
3. MARCO LEGAL EN MATERIA DE ENERGÍAS RENOVABLES.....	36
3.1 POLÍTICA ENERGÉTICA.....	36
3.2 CONSIDERACIONES PARA LOGRAR LA ESTRUCTURA ENERGÉTICA	40
3.3 LEGISLACIÓN VIGENTE.....	42
4. METODOLOGÍA.....	69
5. ESTABLECIMIENTO DEL POTENCIAL DE APLICACIÓN DE LAS ER EN MÉXICO.....	70
5.1 ENERGÍA SOLAR	70
5.2 ENERGÍA EÓLICA	102
5.3 BIOENERGÍA	125
5.4 GEOTÉRMICA.....	180
5.5 ENERGÍA HIDRÁULICA.....	208
5.6 ENERGÍA OCEÁNICA.....	238
6. EXPERIENCIA DE LA APLICACIÓN DE ER (ELÉCTRICA O TÉRMICA). ...	246
6.1 APLICACIÓN NACIONAL.....	246
6.2 APLICACIÓN INTERNACIONAL.....	253
7. PROGRAMAS DE APOYO PARA EL FOMENTO DEL USO DE LA ER.	260
7.1 PROGRAMAS NACIONALES E INCENTIVOS.	260
7.2 PROGRAMAS INTERNACIONALES E INCENTIVOS.....	267



8. VIABILIDAD DE LA INCURSIÓN DE ER EN EL SECTOR ELÉCTRICO.....	270
8.1 BARRERAS EN EL DESARROLLO SUSTENTABLE.....	272
8.2 BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE LAS ER.....	274
9. CONCLUSIONES.....	275
10. BIBLIOGRAFÍA.....	283
GLOSARIO Y ACOTACIONES.....	294
ANEXOS.....	298

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1	PORCENTAJES GLOBALES DE EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO.....	13
TABLA 2.2	CONSUMO ENERGÉTICO/EMISIONES GENERADAS EN LA EXTRACCIÓN DE CRUDO.....	13
TABLA 2.3	CONSECUENCIAS DEL USO DE FUENTES CONVENCIONALES DE ENERGÍA.....	15
TABLA 2.4	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE FUENTES CONVENCIONALES.....	16
TABLA 2.5	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ENERGÍA NUCLEAR.....	17
TABLA 2.6	GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN MÉXICO.....	18
TABLA 2.7	PROYECCIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	23
TABLA 2.8	COSTOS FEDERALES DE ELECTRICIDAD.....	24
TABLA 2.9	ENERGÍAS RENOVABLES.....	27
TABLA 2.10	CLASIFICACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	28
TABLA 2.11	IMPACTOS AMBIENTALES POR FUENTE DE GENERACIÓN ENERGÉTICA [G/KWH].....	29
TABLA 2.12	IMPACTO AMBIENTAL SEGÚN EL SISTEMA DE GENERACIÓN UTILIZADO.....	32
TABLA 3.1	REGULACIÓN INTERNACIONAL.....	43
TABLA 3.2	MARCO JURÍDICO DEL SECTOR ENERGÉTICO.....	50
TABLA 3.3	MARCO LEGAL EN MATERIA DE HIDROCARBUROS.....	51
TABLA 3.4	RESPONSABILIDADES EN MATERIA DE BIOENERGÉTICOS.....	55
TABLA 3.5	RESPONSABILIDADES EN MATERIA DE ENERGÍAS RENOVABLES.....	58
TABLA 3.6	SUBSECTOR DE PLANEACIÓN ENERGÉTICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO.....	63
TABLA 3.7	LEYES EN MATERIA DE DESARROLLO RURAL SUSTENTABLE MEDIANTE ER.....	63
TABLA 3.8	NOM EN MATERIA DE AHORRO, PRESERVACIÓN Y USO RACIONAL DE ENERGÍA.....	66
TABLA 3.9	NOM EN MATERIA DE EJECUCIÓN DE PROYECTOS DE ER.....	67
TABLA 5.1	RADIACIÓN RECIBIDA EN LA REPÚBLICA MEXICANA.....	72
TABLA 5.2	COCINAS SOLARES DE ACUMULACIÓN Y DE CONCENTRACIÓN.....	76
TABLA 5.3	RENDIMIENTO Y EFICIENCIA DE LOS COLECTORES SOLARES.....	88
TABLA 5.4	COSTOS DE TECNOLOGÍAS SOLARES TÉRMICAS.....	91
TABLA 5.5	SISTEMAS FV.....	101
TABLA 5.6	VALORES DE Z_0 PARA LA ECUACIÓN 5.22.....	104
TABLA 5.7	CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS AEROGENERADORES.....	112
TABLA 5.8	BIOMASA EN LA REPÚBLICA MEXICANA.....	126
TABLA 5.9	PODER CALORÍFICO DE LA BIOMASA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD.....	128
TABLA 5.10	DISTRIBUCIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS SEGÚN SU ORIGEN.....	129
TABLA 5.11	POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE LOS RSU.....	130
TABLA 5.12	POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE EXCRETAS DE GANADO BOVINO LECHERO.....	130
TABLA 5.13	POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE EXCRETAS DE GANADO PORCINO.....	130
TABLA 5.14	COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS.....	136
TABLA 5.15	BIOCARBURANTES ACTUALES.....	140
TABLA 5.16	VENTAJAS Y LIMITANTES DEL USO DE ETBE EN RELACIÓN AL MTBE.....	143



TABLA 5.17	COMPARACIÓN DEL BIOETANOL Y LA GASOLINA CONVENCIONAL	143
TABLA 5.18	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL	144
TABLA 5.19	PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA.	146
TABLA 5.20	DIGESTIÓN ANAEROBIA	149
TABLA 5.21	BIOGÁS GENERADO POR DIGESTIÓN ANAEROBIA	150
TABLA 5.22	GASIFICADORES COMUNES	151
TABLA 5.23	GASIFICACIÓN	151
TABLA 5.24	APLICACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN	152
TABLA 5.25	EFICIENCIA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	152
TABLA 5.26	EQUIPOS DE PIRÓLISIS COMUNES	153
TABLA 5.27	TIPOS DE PIRÓLISIS	154
TABLA 5.28	PIRÓLISIS	154
TABLA 5.29	INCINERACIÓN	155
TABLA 5.30	TIPOS DE INCINERADORES	156
TABLA 5.31	PLASMA	158
TABLA 5.32	HIDROGENACIÓN	159
TABLA 5.33	OXIDACIÓN CATALÍTICA	159
TABLA 5.34	APORTE ANUAL DE LA ENERGÍA DE LA BIOMASA. [GW] (20)	164
TABLA 5.35	RENDIMIENTOS TEÓRICOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL	164
TABLA 5.36	RENDIMIENTOS TEÓRICOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	164
TABLA 5.37	CULTIVO PARA LA PRODUCCIÓN DE ACEITE VEGETAL.	165
TABLA 5.38	COSTOS DEL BIODIESEL Y DE LOS SUBPRODUCTOS DEL PROCESO	167
TABLA 5.39	COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DEL BIOETANOL Y LA GASOLINA.	168
TABLA 5.40	COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DEL BIODIESEL Y EL GASÓLEO.	168
TABLA 5.41	EMISIONES DE GEI DE ACEITES UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	169
TABLA 5.42	EMISIONES DE GEI POR MEZCLAS DE BIODIESEL.	170
TABLA 5.43	EMISIONES DE GEI EN LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE LAS MEZCLAS BD	171
TABLA 5.44	ENERGÍA UTILIZADA EN LA PRODUCCIÓN DE ACEITES PARA BIODIESEL	172
TABLA 5.45	CONSUMOS DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.	172
TABLA 5.46	SECCIONES DE UNA CENTRAL DE BIOMASA.	175
TABLA 5.47	CAMPOS GEOTÉRMICOS	182
TABLA 5.48	RESERVAS DE RECURSO DE ALTA ENTALPÍA	184
TABLA 5.49	RESERVAS DE RECURSO DE ALTA ENTALPÍA	185
TABLA 5.50	ORIGEN DEL CALOR EN EL INTERIOR DE LA TIERRA.	189
TABLA 5.51	RESERVAS DE RECURSO DE ALTA ENTALPÍA	190
TABLA 5.52	ESTIMACIÓN DE COSTOS EN UNA PLANTA GEOTÉRMICA	199
TABLA 5.53	ESTIMACIÓN DE COSTOS EN UNA PLANTA GEOTÉRMICA	204
TABLA 5.54	EMISIONES GENERADAS EN LA GEOTERMIA	205
TABLA 5.55	CAMPOS GEOTÉRMICOS	206
TABLA 5.56	CENTRALES MINIHIDRÁULICAS PÚBLICAS (CFE) Y PRIVADAS	209
TABLA 5.57	CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN OPERACIÓN	210
TABLA 5.58	POTENCIA HIDROELÉCTRICA	210
TABLA 5.59	CLASIFICACIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	211
TABLA 5.60	CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS HIDROELÉCTRICAS	220
TABLA 5.61	RENTABILIDAD DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA	229
TABLA 5.62	MÉTODOS PARA CALCULAR EL CAUDAL ECOLÓGICO	235
TABLA 5.63	SECCIONES DE UNA CENTRAL DE GRADIENTE TÉRMICO	241
TABLA 6.1	PROYECTOS EÓLICOS EN MÉXICO.	249
TABLA 6.2	DESARROLLO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL MUNDO	253



TABLA 6.3	USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	256
TABLA 6.4	PAÍSES QUE UTILIZAN LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	257
TABLA 7.1	APOYO INTERNACIONAL PARA IMPLEMENTAR PROYECTOS SUSTENTABLES	262
TABLA 7.2	PROGRAMAS DEL GOBIERNO FEDERAL PARA EL APOYO DE PROYECTOS DE ER	264
TABLA 7.3	PROGRAMAS PRIVADOS O MIXTOS DE APOYO PARA PROYECTOS DE ER	266
TABLA 7.4	PROGRAMAS INTERNACIONALES DE APOYO PARA PROYECTOS DE ER	269
TABLA 9.1	EMISIONES REDUCIDAS MEDIANTE EL USO DE FUENTES RENOVABLES	282
TABLA 0.1	NORMALIZACIÓN Y CATEGORIZACIÓN PARA EL CÁLCULO DE ECOPUNTOS.	301
TABLA 0.2	EVALUACIÓN CON ECOPUNTOS.....	302

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1	RELACIONES PRECIO/COSTO DE TARIFAS RESIDENCIALES Y AGRÍCOLAS.....	19
GRÁFICO 2.2	GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR FUENTE	20
GRÁFICO 2.3	CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR SECTORES	21
GRÁFICO 2.4	CRECIMIENTO DE LOS SECTORES ELÉCTRICOS	22
GRÁFICO 2.5	TECNOLOGÍAS BIOENERGÉTICAS, MÉXICO 2005 - 2030	24
GRÁFICO 2.6	IMPACTOS AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA.....	31
GRÁFICO 2.7	EMISIONES DE CO₂ EN AMÉRICA LATINA.....	33
GRÁFICO 3.1	DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA USANDO ENERGÍAS CONVENCIONALES.	40
GRÁFICO 3.2	DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA USANDO ENERGÍAS ALTERNATIVAS.	40
GRÁFICO 3.3	PORCENTAJES DE VENTA DEL SERVICIO PÚBLICO DE ELECTRICIDAD.....	42
GRÁFICO 5.1	CURVA DE EFICIENCIA TÉRMICA.	90
GRÁFICO 5.2	GENERACIÓN EN RELACIÓN A LA VELOCIDAD DEL AEROGENERADOR.....	111
GRÁFICO 5.3	COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS DIFERENTES ROTORES.....	116
GRÁFICO 5.4	PARTICIPACIÓN EN PORCENTUAL, EN EL PRECIO TOTAL DEL AEROGENERADOR.....	121
GRÁFICO 5.5	COSTOS DE INVERSIÓN EN UNA CENTRAL EOLOELÉCTRICA	122
GRÁFICO 5.6	POTENCIAL BIOENERGÉTICO EN MÉXICO	126
GRÁFICO 5.7	APLICACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	194
GRÁFICO 5.8	RUBROS DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.	196
GRÁFICO 5.9	COMPARACIÓN DE GASTOS ENTRE PLANTAS TÉRMICAS Y GEOTÉRMICAS.	205
GRÁFICO 5.10	ÁBACO PARA LA ELECCIÓN DE TURBINA HIDRÁULICA.	223
GRÁFICO 6.1	PARTICIPACIÓN POR PAÍS A FINALES DE 2011.....	256
GRÁFICO 6.2	CAPACIDAD DE ENERGÍA HIDRÁULICA INSTALADA A NIVEL INTERNACIONAL.....	258

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	PROCESOS IMPLICADOS EN LA EXTRACCIÓN Y TRANSPORTE DEL CRUDO.....	14
FIGURA 2.2	MERCADO DE ELECTRICIDAD NACIONAL.	21
FIGURA 2.3	ACV DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD.....	30
FIGURA 3.1	VENTAS MÁS AUTOABASTECIMIENTO DURANTE EL PERIODO 1998 – 2018.	41
FIGURA 4.1	METODOLOGÍA APLICADA.	69
FIGURA 5.1	INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA REPÚBLICA MEXICANA.	72
FIGURA 5.2	COLECTOR SOLAR BÁSICO DEL TIPO CUERPO NEGRO.....	74
FIGURA 5.3	COLECTORES DE PLACA PLANA: TIPO SERPENTÍN Y TUBOS PARALELOS.	75
FIGURA 5.4	COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACÍO.....	75
FIGURA 5.5	COCINA SOLAR DE CAJA	76
FIGURA 5.6	COCINA SOLAR PARABÓLICA DE CONCENTRACIÓN	76



FIGURA 5.7	CALENTADOR SOLAR DE AGUA PARA USO DOMÉSTICO	77
FIGURA 5.8	SUELO RADIANTE	78
FIGURA 5.9	CONDUCTO SOLAR.....	78
FIGURA 5.10	REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.	79
FIGURA 5.11	DESTILADOR SOLAR.....	79
FIGURA 5.12	PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE	81
FIGURA 5.13	REACTOR SOLAR.....	83
FIGURA 5.14	CANAL PARABÓLICO.....	83
FIGURA 5.15	TORRE CENTRAL	84
FIGURA 5.16	SISTEMA DE DISCO Y SISTEMA DE PLATO PARABÓLICO.	85
FIGURA 5.17	ARQUITECTURA SOLAR PASIVA	86
FIGURA 5.18	ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA.	94
FIGURA 5.19	CONFORMACIÓN DE UN PANEL SOLAR	97
FIGURA 5.20	CARROS SOLARES UTILIZADOS EN RALLIES.....	99
FIGURA 5.21	CASA SOLAR.	99
FIGURA 5.22	FORMACIÓN DE VIENTOS EN EL SUROESTE DE LA REPÚBLICA MEXICANA.	103
FIGURA 5.23	CAPACIDAD EÓLICA EN LA REPÚBLICA MEXICANA.	105
FIGURA 5.24	AEROGENERADOR BÁSICO	108
FIGURA 5.25	(A) VELETA. (B) SENSOR DE VIENTO.....	110
FIGURA 5.26	AEROGENERADORES (A) QUIETREVOLUTION (B) ENFLO.....	115
FIGURA 5.27	BIOMASA EN LA REPÚBLICA MEXICANA	127
FIGURA 5.28	PROYECTOS DE BIOENERGÍA	127
FIGURA 5.29	INVESTIGACIÓN EN BIOENERGÍA.....	128
FIGURA 5.30	INVESTIGACIÓN EN BIOENERGÍA.....	136
FIGURA 5.31	PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	138
FIGURA 5.32	PRODUCCIÓN DE ETANOL	141
FIGURA 5.33	OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE LA GLUCOSA	142
FIGURA 5.34	CLASIFICACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES.	144
FIGURA 5.35	RUTAS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA.	147
FIGURA 5.36	OBTENCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	149
FIGURA 5.37	OBTENCIÓN DE ENERGÍA Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE GASIFICACIÓN	152
FIGURA 5.38	OBTENCIÓN DE ENERGÍA Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS	154
FIGURA 5.39	OBTENCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE INCINERACIÓN	156
FIGURA 5.40	PRODUCTOS DE PROCESOS PIROLÍTICOS.	157
FIGURA 5.41	OBTENCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE GASIFICACIÓN POR PLASMA.....	158
FIGURA 5.42	RECORRIDO DE LA BIOMASA EN UNA CENTRAL.....	174
FIGURA 5.43	CENTRAL DE BIOMASA.	174
FIGURA 5.44	PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA.....	176
FIGURA 5.45	DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN LA TIERRA.	181
FIGURA 5.46	ENERGÍA GEOTÉRMICA EN LA REPÚBLICA MEXICANA.....	182
FIGURA 5.47	YACIMIENTO GEOTÉRMICO.	183
FIGURA 5.48	SISTEMA GEOTÉRMICO HDR.....	187
FIGURA 5.49	SISTEMA GEOTÉRMICO MAGMÁTICO.....	188
FIGURA 5.50	CAMBIO DE TEMPERATURA EN LA CORTEZA TERRESTRE.....	191
FIGURA 5.51	CICLOS TERMODINÁMICOS DIRECTOS, CON Y SIN CONDENSACIÓN.....	195
FIGURA 5.52	TECNOLOGÍA FLASH.....	195
FIGURA 5.53	TECNOLOGÍA DE CICLO BINARIO.....	196
FIGURA 5.54	ENERGÍA GEOTÉRMICA EN LA REPÚBLICA MEXICANA.....	197
FIGURA 5.55	PLANTA GEOTERMOELÉCTRICA.....	206



FIGURA 5.56	RÍOS POTENCIALES PARA MINIHIDRÁULICA.....	209
FIGURA 5.57	ELEMENTOS DE UNA CENTRAL HIDRÁULICA.....	213
FIGURA 5.58	CURVA DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS.....	215
FIGURA 5.59	CURVA DE CAUDALES CLASIFICADOS.....	215
FIGURA 5.60	ELEMENTOS DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	218
FIGURA 5.61	ESCALA DE ESCOTADURAS VERTICALES.....	236
FIGURA 5.62	ESQUEMA CONCEPTUAL DE UNA CENTRAL DE GRADIENTE TÉRMICO.....	241
FIGURA 5.63	CENTRAL CON FUNCIONAMIENTO DE GRADIENTE TÉRMICO.....	241
FIGURA 5.64	TURBINA DE EJE HORIZONTAL.....	242
FIGURA 5.65	CENTRAL ELÉCTRICA EN COREA DEL SUR.....	243
FIGURA 5.66	ESTRUCTURA FLOTANTE O ATENUADOR.....	244
FIGURA 5.67	ESTRUCTURA DESBORDAMIENTO.....	244
FIGURA 5.68	PUNTO ABSORBEDOR CON TURBINA PELTON.....	244
FIGURA 5.69	FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO OWSC.....	245
FIGURA 6.1	TECNOLOGÍA SOLAR.....	254
FIGURA 6.2	RADIACIÓN SOLAR EN EL MUNDO.....	254
FIGURA 0.1	ETAPAS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).....	300

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 2.1	EMISIONES GENERADAS EN EL TRANSPORTE DE CRUDO.....	14
ECUACIÓN 2.2	ENERGÍA CONSUMIDA EN EL TRANSPORTE DE CRUDO.....	15
ECUACIÓN 5.1	ECUACIÓN DIFERENCIAL DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA SOLAR POR UNIDAD DE ÁREA.....	71
ECUACIÓN 5.2	RADIACIÓN CON RESPECTO AL ÁNGULO HORARIO.....	71
ECUACIÓN 5.3	CANTIDAD DE ENERGÍA SOLAR POR UNIDAD DE ÁREA.....	72
ECUACIÓN 5.4	RENDIMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR.....	89
ECUACIÓN 5.5	EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR.....	89
ECUACIÓN 5.6	EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR.....	89
ECUACIÓN 5.7	POTENCIAL ECONÓMICO DE LA ENERGÍA SOLAR.....	91
ECUACIÓN 5.8	POTENCIAL ECONÓMICO DE LAS ENERGÍAS TÉRMICA Y ELÉCTRICA.....	92
ECUACIÓN 5.9	POTENCIAL ECONÓMICO DE LA ENERGÍA SOLAR EN EL MES I.....	92
ECUACIÓN 5.10	CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL VOLTAJE DE LA CELDA.....	94
ECUACIÓN 5.11	CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO.....	94
ECUACIÓN 5.12	VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO.....	95
ECUACIÓN 5.13	CONSTANTE B.....	95
ECUACIÓN 5.14	EFEECTO DE LA CAPACITANCIA INTERNA DEL PANEL FOTOVOLTAICO.....	96
ECUACIÓN 5.15	CORRIENTE DE SALIDA DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA.....	96
ECUACIÓN 5.16	ECUACIÓN REDUCIDA DE LA CORRIENTE DE SALIDA DE UNA CELDA.....	96
ECUACIÓN 5.17	POTENCIA DEL PANEL FOTOVOLTAICO.....	97
ECUACIÓN 5.18	INTENSIDAD MÁXIMA DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	98
ECUACIÓN 5.19	BALANCE DE ENERGÍA EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	98
ECUACIÓN 5.20	BE EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EN CONDICIÓN DINÁMICA.....	98
ECUACIÓN 5.21	BE EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EN CONDICIÓN ESTÁTICA.....	98
ECUACIÓN 5.22	VELOCIDAD DEL VIENTO EN FUNCIÓN DEL TERRENO.....	104
ECUACIÓN 5.23	POTENCIA EN EL VIENTO.....	106
ECUACIÓN 5.24	POTENCIA DEL ROTOR.....	106
ECUACIÓN 5.25	POTENCIA DE SALIDA DEL AEROGENERADOR.....	107
ECUACIÓN 5.26	FACTOR DE EFICIENCIA DE UN AEROGENERADOR.....	107
ECUACIÓN 5.27	DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE WEIBULL.....	119



ECUACIÓN 5.28	COSTO NIVELADO DE GENERACIÓN.	122
ECUACIÓN 5.29	GENERACIÓN ANUAL DE METANO.	137
ECUACIÓN 5.30	REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN.	139
ECUACIÓN 5.31	REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN.	140
ECUACIÓN 5.32	COSTOS DE INVERSIÓN Y O&M EN DIGESTIÓN ANAEROBIA.	150
ECUACIÓN 5.33	COSTOS DE INVERSIÓN Y O&M EN GASIFICACIÓN.	153
ECUACIÓN 5.34	COSTOS DE INVERSIÓN Y O&M EN PIRÓLISIS.	155
ECUACIÓN 5.35	CONSUMO O DISPONIBILIDAD DE BIOMASA AL AÑO.	177
ECUACIÓN 5.36	ENERGÍA DISPONIBLE O PRODUCIDA AL AÑO A PARTIR DE LA BIOMASA.	177
ECUACIÓN 5.37	CAUDAL MÁSIKO DEL COMBUSTIBLE.	177
ECUACIÓN 5.38	CAUDAL MÁSIKO DE LA BIOMASA CON HUMEDAD.	177
ECUACIÓN 5.39	CAUDAL MÁSIKO DEL AGUA.	177
ECUACIÓN 5.40	CAUDAL MÁSIKO DEL COMBUSTIBLE SECO.	177
ECUACIÓN 5.41	CAUDAL MÁSIKO DEL AGUA EN UN COMBUSTIBLE SECO.	177
ECUACIÓN 5.42	NECESIDAD DE EVAPORACIÓN.	177
ECUACIÓN 5.43	POTENCIA DE EVAPORACIÓN.	177
ECUACIÓN 5.44	CAUDAL DE VAPOR NECESARIO EN EL ÁREA DE SECADO.	177
ECUACIÓN 5.45	PODER CALORÍFICO DEL COMBUSTIBLE SECO.	177
ECUACIÓN 5.46	PODER CALORÍFICO DEL COMBUSTIBLE QUE ENTRA A LA CALDERA.	177
ECUACIÓN 5.47	POTENCIA DE LA CALDERA.	178
ECUACIÓN 5.48	CAUDAL DE VAPOR EN LA CALDERA.	178
ECUACIÓN 5.49	CAUDAL DE VAPOR EN LA TURBINA.	178
ECUACIÓN 5.50	POTENCIA DE LA TURBINA.	178
ECUACIÓN 5.51	POTENCIA DEL ALTERNADOR.	178
ECUACIÓN 5.52	CALOR LIBERADO EN EL CONDENSADOR.	178
ECUACIÓN 5.53	CONSUMO SSAA.	178
ECUACIÓN 5.54	CONSUMO EN MOLIENDA.	178
ECUACIÓN 5.55	POTENCIA NETA.	178
ECUACIÓN 5.56	ENERGÍA ELÉCTRICA NETA ANUAL.	178
ECUACIÓN 5.57	RENDIMIENTO ELÉCTRICO GLOBAL.	178
ECUACIÓN 5.58	POTENCIA DEL CICLO RANKINE.	178
ECUACIÓN 5.59	RENDIMIENTO DEL CICLO RANKINE.	178
ECUACIÓN 5.60	PROPAGACIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN.	189
ECUACIÓN 5.61	PROPAGACIÓN DE CALOR EN RÉGIMEN NO ESTACIONARIO.	191
ECUACIÓN 5.62	PROPAGACIÓN DE CALOR EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	191
ECUACIÓN 5.63	VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD.	192
ECUACIÓN 5.64	FLUJO SUBTERRÁNEO.	192
ECUACIÓN 5.65	TRANSPORTE DE SOLUTOS.	193
ECUACIÓN 5.66	BALANCE DE ENERGÍA.	198
ECUACIÓN 5.67	COEFICIENTE DE FUNCIONAMIENTO.	198
ECUACIÓN 5.68	EFICIENCIA DE LAS BOMBAS.	198
ECUACIÓN 5.69	EFICIENCIA MÁXIMA DE LAS BOMBAS.	199
ECUACIÓN 5.70	RENDIMIENTO BRUTO DE UNA CENTRAL GEOELÉCTRICA.	202
ECUACIÓN 5.71	RENDIMIENTO NETO DE UNA CENTRAL GEOELÉCTRICA.	202
ECUACIÓN 5.72	COSTO TOTAL DE UNA PLANTA TÉRMICA.	203
ECUACIÓN 5.73	COSTO TOTAL DE LA PLANTA TÉRMICA.	204
ECUACIÓN 5.74	COSTO TOTAL DE LA PLANTA GEOTÉRMICA (INCLUYE EXPLORACIÓN).	204
ECUACIÓN 5.75	BENEFICIO NETO.	204
ECUACIÓN 5.76	POTENCIA HIDRÁULICA.	211



ECUACIÓN 5.77	SALTO NETO EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	214
ECUACIÓN 5.78	SECCIÓN MOJADA MÍNIMA DEL CANAL EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	216
ECUACIÓN 5.79	ENERGÍA GENERADA EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	216
ECUACIÓN 5.80	ENERGÍA HIDRÁULICA ESPECÍFICA DE UNA TURBINA	222
ECUACIÓN 5.81	POTENCIA TEÓRICA DE UNA CENTRAL HIDRÁULICA	226
ECUACIÓN 5.82	PRODUCCIÓN DE UNA CENTRAL HIDRÁULICA	227
ECUACIÓN 5.83	PRODUCCIÓN ANUAL DE ENERGÍA	227
ECUACIÓN 5.84	PRECIO DE VENTA DE ENERGÍA HIDRÁULICA.....	227
ECUACIÓN 5.85	PERIODO DE RETORNO, TIEMPO QUE SE TARDA EN RECUPERAR LA INVERSIÓN.....	228
ECUACIÓN 5.86	ÍNDICE DE ENERGÍA, ES EL COSTO DEL KILOVATIO HORA GENERADO.....	228
ECUACIÓN 5.87	ÍNDICE DE POTENCIA, QUE ES EL COSTO DEL KILOVATIO INSTALADO.	228
ECUACIÓN 0.1	CÁLCULO DE ECOPUNTOS.....	302



1. Introducción

En México, se tiene un alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica debido a la gran disponibilidad de fuentes renovables (1):

- Altos niveles de insolación;
- Recursos hidráulicos para la instalación de plantas minihidráulicas;
- Vapor y agua para el desarrollo de campos geotérmicos;
- Zonas con alta intensidad y constancia de vientos prevalecientes;
- Grandes volúmenes de esquilmos agrícolas y de desperdicios orgánicos.

Su ubicación geográfica lo sitúa en una de las zonas del planeta con mejor radiación solar. Igualmente las corrientes de aire en el Golfo de México y el Océano Pacífico provocan fuertes vientos que cruzan el Istmo de Tehuantepec, lo que resulta en una zona de importante fuente eólica.

El país tiene una amplia diversidad de climas, desde los muy calientes (el desierto de Sonora alcanza temperaturas de 45 °C) hasta los muy fríos (en algunas zonas de Chihuahua se tienen temperaturas de hasta -20 °C). Otra característica es su relieve, con zonas montañosas, volcanes, valles, altiplanicies y mesetas. En éstas se tiene una gran actividad volcánica y tectónica, lo que aumenta la formación de depósitos hidrotérmicos, lo que ofrece un amplio mercado para la energía geotérmica y la abundancia de metales. Igualmente cuenta con ríos de corriente rápida y grandes lagos, lo que significa un importante potencial hidráulico (2).

La abundancia de recursos nacionales ha llevado a que actualmente se tengan programas de apoyo al estudio y desarrollo de tecnología para aprovechamiento de las fuentes renovables. Esto, aunado a que los costos de transportación son relativamente bajos; colocan al país entre los de menores costos para la manufactura de componentes industriales en el ámbito de esta tecnología.

Indudablemente los combustibles fósiles han sido la base para el desarrollo nacional. Las estadísticas indican que seguirán ocupando una participación activa como fuente primaria de energía para las próximas décadas; sin embargo, es necesario iniciar las acciones que permitan, en un futuro cercano, diversificar las fuentes de energía para atender las necesidades de los consumidores, lo cual además representará un mecanismo para reducir la dependencia de México en los combustibles fósiles, y así fomentar la seguridad energética (3).



Hoy en día México cuenta más de 12,000 MW de capacidad instalada de generación eléctrica con base en energías renovables, de los cuales el 95 % pertenece a CFE, el 4 % está en plantas de autoabastecimiento interconectadas a la red, y el 1 % en sistemas aislados. De este total, el 81 % se obtiene por energía hidráulica, el 9 % por geotérmica, 5 % por biomasa, 3 % por solar fotovoltaica y 2 % por eólica. Al año 2014 la CRE ha autorizado diversos proyectos de desarrollo para autoabastecimiento, con la siguiente distribución: 12 % en energía hidráulica, 79% en energía eólica, 3 % por biomasa y 6 % por biogás. (4)

La estructura energética de México está fundamentada en el uso de las siguientes fuentes primarias: carbón, petróleo, gas natural, energía nuclear, hidráulica, geotérmica, eólica y biomasa (bagazo de la caña de azúcar, madera y residuos forestales). Las fuentes secundarias de energía son el coque, el gas licuado de petróleo, gasolina, naftas, keroseno, diésel, gasoil, gas seco y electricidad. Estas fuentes de energía se usan para satisfacer las necesidades de los consumidores tradicionales que son los sectores residencial, comercial, industrial y de transporte.

México cuenta con gran un potencial para el desarrollo de la industria energética por fuentes renovables, ya que representa, una gran oportunidad para la inversión y desarrollo de proyectos de este tipo de energías, y también es una excelente plataforma para la creación de empleos mediante la fabricación y manufactura de componentes necesarios para el impulso de las mismas (5).

1.1 Problemática

El modelo actual de flujo de energía no permite que se tenga un ritmo de crecimiento en la mayoría de los países, debido al desequilibrio entre suministro y demanda de energía, y el alza de los precios del petróleo y del gas natural (2). En México, por ejemplo, el sistema de electricidad se basa en el alto costo de los combustibles fósiles con deficiencias en su suministro. Sin embargo, la incertidumbre política y económica sobre el futuro del país en cuanto a sus reservas de petróleo y el desarrollo global de las energías renovables (ER), ha incrementado el interés en cuanto a su implementación nacional.



1.2 Justificación

En México, el desarrollo de proyectos de generación de energía a partir de fuentes renovables es incipiente, los cuales han sido principalmente en energía eólica y ejecutados por grandes empresas extranjeras como Iberdrola.

El Plan Nacional de Desarrollo tiene como una de las metas prioritarias, el uso racional y sustentable de las fuentes renovables de energía, y la progresiva disminución del efecto invernadero causado por las emisiones atmosféricas.

Sabiendo el potencial nacional en diversas fuentes de energía y que los pequeños y medianos empresarios desconocen qué tipos de fuentes renovables pueden ser aprovechadas, las características de cada una, su madurez tecnológica, los criterios a tomar en cuenta para su implementación y los apoyos que otorgan el gobierno y los organismos internacionales para este tipo de proyectos, se considera necesario elaborar un documento que contenga los principios básicos de operación de las tecnologías sustentables así como un acercamiento a la visión de negocio que representaría la explotación de las mismas.

1.3 Objetivo general

Evaluar conceptualmente los aspectos técnicos que determinen el potencial de aplicación de energías renovables en México, mediante la revisión documental de los recursos naturales, las condiciones geográficas de México, los fundamentos técnicos de las tecnologías y los aspectos normativos, para contar con un documento de referencia para la realización de proyectos.

1.4 Alcances

1. Identificar las opciones nacionales para el desarrollo de la industria de las energías renovables y describirlas en términos de los beneficios tecnológicos, científicos, económicos, sociales y ambientales que significarían.
2. Realizar un mapeo de la República Mexicana para identificar el potencial de energías renovables aprovechables, por cada estado federal.



2. Contexto en Materia de Energía Eléctrica y Energías Renovables (ER).

2.1 Energía eléctrica.

Es la energía que resulta cuando existe una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos si se ponen en contacto por medio de un conductor eléctrico; el movimiento de los electrones comienza cuando se cierra el circuito, que se logra al accionar un interruptor. Actualmente la electricidad se puede generar en: hidroeléctricas, termoeléctricas, geotermoeléctricas, centrales nucleares, solares, eólicas y por biomasa; donde se utilizan combustibles fósiles y recursos naturales renovables.

La unidad de medición del flujo de electricidad es el Watt. En materia, hay dos términos que expresan el potencial de cada tecnología aplicada: la capacidad y la corriente eléctrica que éstas generan. Capacidad es la propiedad de un conductor de adquirir carga eléctrica, y se mide por la cantidad de carga que adquiere por unidad de potencial. La corriente eléctrica es el flujo de electrones o cargas eléctricas que pueden generarse en un conductor en un tiempo determinado. La unidad que mide la capacidad de las tecnologías de energía renovable generalmente es el Megawatt (MW), y la unidad que mide la energía eléctrica producida en cierto tiempo es el kilowatt –hora (kWh) (6).

2.2 Obtención de combustibles fósiles

La obtención de combustibles fósiles se realiza de las siguientes maneras (7):

Inyección de vapor: se utiliza cuando los depósitos contienen petróleo viscoso. El vapor desplaza el petróleo y reduce la viscosidad, por aumentar la temperatura del yacimiento, con lo que el crudo fluye con mayor rapidez a una presión dada.

Campo o yacimiento petrolero: zona por lo general rocosa, con abundancia de pozos de los que se extrae petróleo, gas natural o ambos; del subsuelo. Típicamente tienen una extensión de 10 a 20 km. El petróleo se forma en los poros de las rocas, y debe haber una estructura rocosa que haga de sello impermeable, para que los compuestos fósiles no puedan fluir a través de ella.



Plataforma marina: instalaciones ubicadas en los mares u océanos para extraer petróleo o gas natural del subsuelo marino. Suelen ser robustas para soportar los embates del oleaje marino y soportar la maquinaria de extracción. Cuentan con protección contra explosiones e incendios. Su principal operación es taladrar el subsuelo hasta alcanzar la zona donde reside el combustible, la cual puede ser cientos de metros debajo del foso marino.

Los porcentajes globales actuales de extracción se presentan en la Tabla 2.1, dando un promedio de crudo procesado por refinería de 11 550 toneladas (7).

Tabla 2.1 Porcentajes globales de extracción de petróleo.

Sistema de extracción	Porcentaje global
Inyección de vapor	0.90 %
Campo petrolero	73.36 %
Plataforma marina	25.74 %

● **Consumo energético y emisiones en la obtención de crudo**

Durante la exploración y perforación de los pozos petroleros, si es un campo petrolero se gasta el 0.75 % de la energía contenida en el crudo extraído; y si la extracción es de una plataforma marina se gasta el 7.5 %. En la Tabla 2.2 se muestra una aproximación de la energía consumida y las emisiones generadas según el tipo de extracción. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de flujo con los procesos necesarios para la extracción de crudo. (7).

Tabla 2.2 Consumo energético/emisiones generadas en la extracción de crudo.

ENERGÍA	EMISIONES AL AIRE
<i>Extracción del petróleo en un campo petrolífero</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Electricidad: 79 kWh/ton_{crudo}, usada en bombeo. ◆ Gas natural: 38 MJ/ton_{crudo} utilizado para la recuperación del crudo. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Combustión de gas natural para obtener la energía requerida en la separación de gas natural y crudo. ◆ Gas natural quemado o liberado.
<i>Extracción del petróleo en plataformas marinas</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Gas natural: 285 MJ/ton_{crudo}, utilizado para recuperación del crudo. ◆ Gas natural: 710 MJ/ton_{crudo}, utilizado para electricidad, bombeo, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Combustión en separadores de gas y crudo. ◆ Combustión de gas natural para generación de electricidad en las turbinas. ◆ Gas natural quemado o liberado.
<i>Extracción del petróleo por inyección de vapor</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Electricidad: 83 kWh/ton_{crudo}, usada en bombeo. ◆ Gas natural: 7 250 MJ/ton_{crudo}, utilizado para la recuperación de crudo 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Combustión del gas natural en calderas.

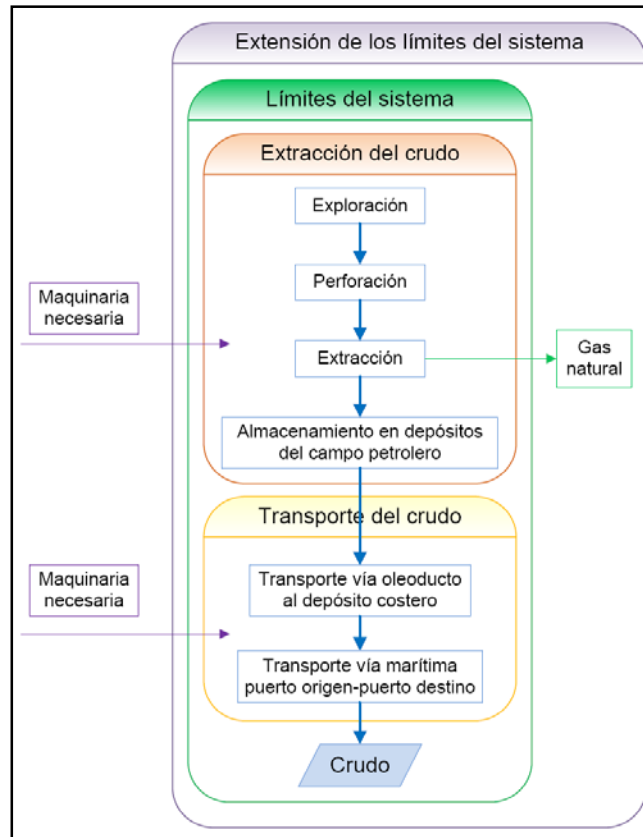


Figura 2.1 Procesos implicados en la extracción y transporte del crudo.

Para estimar las emisiones generadas y el consumo de energía durante el transporte de crudo vía marítima, del puerto de origen al puerto destino, se utiliza la Ecuación 2.1 llamada ecuación MEET¹ para emisiones. Para el cálculo de la energía consumida en el proceso se utiliza la Ecuación 2.2 llamada MEET para energía. Ésta considera que el buque realiza un viaje de ida con carga y uno de vuelta sin carga. En el primero el consumo de combustible varía en función de la carga y en el segundo se considera el consumo medio para el tipo de tanque (7).

$$E_i = \left(\sum_{j,k,l} \right) (E_{i,j,k,l}) \quad \text{Ecuación 2.1 Emisiones generadas en el transporte de crudo}$$

$$E_{i,j,k,l} = S_{j,k}(GT)(t_{j,k,l})(F_{i,j,l})$$

Donde:

E_i = emisiones totales del contaminante i generadas en el transporte de crudo.

$E_{i,j,k,l}$ = emisiones totales del contaminante i debido al uso del combustible j en un buque de la clase k con un motor tipo l .

¹ Methodology for calculating transport emissions and energy consumption



$S_{jk}(GT)$ = consumo diario del combustible j en un buque de la clase k en función de la carga transportada (GT).

t_{jk} = días de navegación del buque k con el motor l utilizando el combustible j.

F_{ij} = factor de emisión para el contaminante i del combustible j en motores l. Los factores de emisión más usados son: 3200 kgCO₂/ton_{combustible}. 5 kgCH₄/TJ_{crudo} y 0.6 kg N₂O/TJ_{crudo}

$$S_{j,k}(GT) = 0.8 C_{jk}(GT)$$

$$C_{jk}(GT) = 14.685 + 7.9 \times 10^{-4} GT$$

Ecuación 2.2 Energía consumida en el transporte de crudo.

$S_{jk}(GT)$ = energía consumida en el transporte de crudo

$C_{jk}(GT)$ = consumo del combustible j en t, en función de la carga, considerando que el buque tipo k viaja siempre a la velocidad máxima (7).

2.3 Impactos causados por las fuentes convencionales de energía:

Los combustibles provenientes de fuentes renovables de energía ocasionan bajos impactos ambientales, lo que les da el nombre de energías limpias o verdes, por aludir a la creciente conciencia ambiental que existe en la población.

En cambio, la generación, transporte y consumo de energía por fuentes convencionales (petróleo, carbón y gas natural) tienen, como toda actividad antropológica, impacto sobre el medio; incluso se estima que están en el origen de los problemas que sufre el planeta, los cuales se observan en la Tabla 2.3. Estas afectaciones también existen en el uso de las fuentes renovables, sin embargo son menores y casi siempre son reversibles (1) (6) (8).

Tabla 2.3 Consecuencias del uso de fuentes convencionales de energía.

Impacto Ambiental	
Efecto Invernadero (CO ₂ , CH ₄ y CO)	La quema de carbón para producir calor y energía eléctrica, emite a la atmósfera gases que provocan el efecto invernadero.
Lluvia ácida (SO _x y NO _x)	Ciertos carbones durante su quemado desprenden óxidos de azufre y nitrógeno. Éstos al reaccionar con vapor de agua forman compuestos ácidos que caen a la tierra en forma de lluvia.
Disminución de la capa de ozono (clorofluorocarbonos)	El uso de compuestos en aerosoles, espumas sintéticas, refrigerantes y disolventes destruye la capa de ozono que protege la Tierra de las radiaciones solares. Los CFC fueron prohibidos desde 1993, mediante el Protocolo de Montreal.
Pérdida de biodiversidad	La emisión de gases y partículas provocadas al quemar ciertos combustibles, las reacciones químicas derivadas, los vertidos incontrolados en el transporte de combustibles y el asentamiento industrial en algunas zonas, pueden causar efectos negativos en plantas y animales, llegando a ocasionar su extinción.



Durante las reacciones de combustión de los compuestos fósiles se aprovecha la energía interna de los mismos, ésta se transforma en energía térmica, eléctrica, cinética (mediante motores de combustión interna), etc.; pudiendo utilizarse en aplicaciones domésticas e industriales. En la Tabla 2.4 se comparan las ventajas y desventajas de usar fuentes convencionales.

Tabla 2.4 Ventajas y desventajas del uso de fuentes convencionales.

Ventajas	Limitantes
Además de servir como fuentes energéticas; durante los procesos de separación se obtienen materias primas para la industria química, la medicina y la alimentación.	Recursos no renovables que causan graves impactos ambientales
	Presentan elevados costos de transporte.
	Su almacenamiento suele ser difícil y peligroso.
En la mayoría de los casos la extracción es fácil, por contar con tecnología desarrollada.	Vuelve vulnerable a los países sin reservas.
	Tienden a la alza en su precio.

2.4 Otras fuentes de energía

Existen procesos para obtener energía a partir de reacciones nucleares espontáneas o no espontáneas; no pertenecen a las fuentes convencionales ya que son procesos nuevos, cuya tecnología está en I&D, pero tampoco se consideran renovables ya que no se regeneran por sí mismas y su impacto ambiental es alto. Los sistemas mayormente investigados son la fisión y la fusión nuclear. En la Tabla 2.5 se muestran las ventajas y desventajas de sus usos.

Energía nuclear de fusión: surge de la reacción en la que dos núcleos de carga similar se unen para formar uno más pesado y estable, con gran absorción o desprendimiento de energía, poniendo a la materia en estado de plasma.

Energía nuclear de fisión: Es la energía interna de los núcleos de elementos como el uranio. Gran parte de la de electricidad de los países desarrollados tiene su origen en esta energía.



Tabla 2.5 Ventajas y desventajas del uso de energía nuclear.

Ventajas	Limitantes
<i>Energía nuclear de fusión</i>	
♦ La contaminación provocada es mínima.	♦ Se encuentra en fase de I&D, su desarrollo tecnológico es difícil.
♦ Sus recursos son prácticamente ilimitados	♦ Se desconoce si genera residuos peligrosos
<i>Energía nuclear de fisión</i>	
♦ Existen grandes reservas de uranio.	♦ Alto riesgo de contaminación en caso de accidente.
♦ Se cuenta con tecnología bien desarrollada.	♦ Posibilidad de aplicación en actividades bélicas
♦ La producción de energía es muy grande y se consumen pequeñas cantidades de materia	♦ Generación de residuos radiactivos peligrosos de difícil almacenamiento.
♦ Sus aplicaciones son pacíficas y médicas.	♦ Costos de instalaciones y mantenimiento elevados.

En México la energía nuclear no ha sido profundamente explotada ya que existen diversos grupos de controversia respecto a la generación y uso de este tipo de energía. La desinformación en la población provoca que se asocie la energía nuclear con la bomba atómica, considerándose que es la misma tecnología; se teme que una central nuclear pueda explotar igual que una bomba; además de los peligros causados por las radiaciones emitidas y los desechos radioactivos generados. Sin embargo, debería considerarse la construcción de centrales nucleares (adicionales a Central de Laguna Verde) ya que serían una gran fuente de energía sin la emisión de gases de efecto invernadero.

2.5 Fuentes de generación nacional.

Las fuentes no renovables proporcionan actualmente el 87 % de la oferta primaria de energía a nivel mundial, en México el porcentaje es del 89 %. A través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la generación de energía, el país cuenta con la tecnología disponible para centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, geotermoeléctricas, nucleoeeléctricas, eoloeléctricas, turbogas, ciclo combinado y diesel, en la Tabla 2.6 se muestran las centrales instaladas y la capacidad efectiva con la que cuentan, según la Gerencia Regional de Producción (9) (10).



Tabla 2.6 Generación de electricidad en México.

Gerencia Regional de Producción	Noroeste	Norte	Occidente	Central	Sureste	Unidades generadoras
Centrales Termoeléctricas tipo Vapor Convencional	7	6	3	3	7	87
Centrales carboeléctricas ²	-	2	1	-	-	15
Centrales Ciclo Combinado	3	6	-	2	2	59
Centrales Geotermoeléctricas	5	-	1	-	1	38
Centrales Hidroeléctricas ³	5	2	5	2	6	181
Centrales Turbogas	9	13	1	1	7	76 ⁴
Centrales eólicas	1	-	-	-	1	2
Capacidad efectiva instalada [MW]	5 923.257	6 826.441	9 257.890	5 921.080	10 252.138	38 180.806

2.6 Precios de electricidad

Las tarifas eléctricas se encuentran sujetas a adecuaciones mensuales. Algunas como la residencial (excepto la DAC – doméstica de alto consumo), la agrícola y la de servicio público, se ajustan por factores fijos, el resto con factores variables.

Los factores fijos se autorizan anualmente mediante acuerdos específicos y se relacionan con las estimaciones de la evolución inflacionaria esperada. Los factores variables representan incrementos o decrementos en los cargos tarifarios, derivados de los movimientos del costo total, considerando el precio de los combustibles fósiles utilizados en la generación de electricidad y un promedio ponderado de los Índices de Precios al Productor de siete esferas industriales seleccionadas: madera, química, minerales, no metálicos, metálica básica, maquinaria y la construcción.

En el Gráfico 2.1 se muestra la relación precio/costo de las tarifas residenciales y agrícolas durante el periodo 1994 y 2018, la cual se obtienen estimando los incrementos asociados a la evolución del Índice Nacional de Precios al Consumidor, y considerando una leve racionalización de los subsidios; aunque en términos reales los precios son similares (11).

² 2 Centrales Carboeléctricas y 1 Central Dual.

³ Se indican las principales 20 Hidroeléctricas. Entre todas las centrales suman 181 unidades generadoras.

⁴ 69 unidades fijas y 8 unidades móviles.

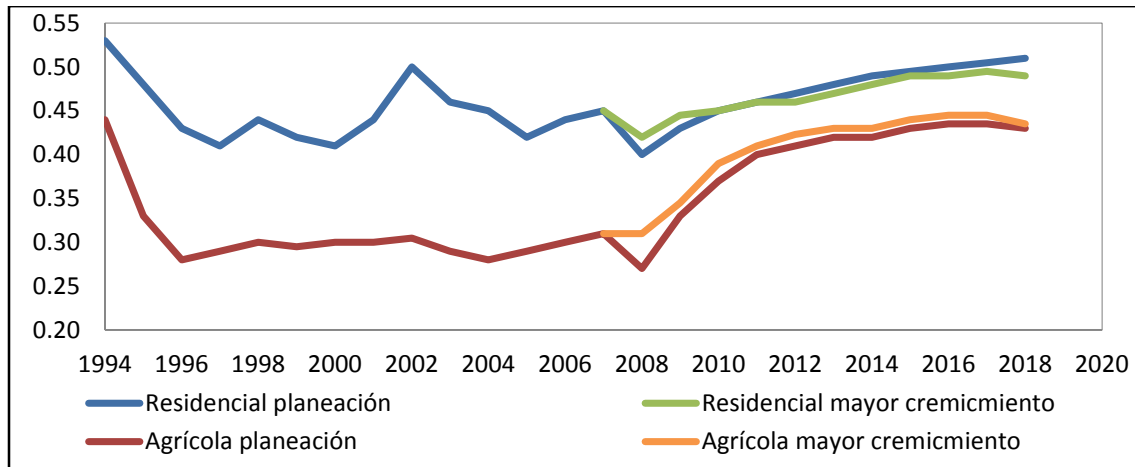


Gráfico 2.1 Relaciones precio/costo de tarifas residenciales y agrícolas.

El mercado eléctrico funciona de manera eficiente y transparente si los precios finales de la electricidad reflejan los costos asociados a su producción, así como el costo de los daños ambientales y sociales provocados. Sin embargo, actualmente no funciona así, ya que las fuentes energéticas convencionales sólo incorporan en sus precios finales los costos de la fase de generación, como son combustible, costos de capital y operación, mano de obra, impuestos y seguros (7).

2.7 Estructura energética nacional actual

El sistema de electricidad mexicano es coordinado por la Secretaría de Energía (SENER), organismo que tiene a su cargo la coordinación de la política nacional de electricidad; la Comisión Reguladora de Energía (CRE), cuya función es regular la participación privada en los sectores eléctrico y de gas natural; y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) que fomenta el ahorro y la eficiencia energética y promueve el uso de energías renovables. La actual generación, transmisión, suministro y distribución de la energía eléctrica se encuentran bajo un régimen monopólico, por la Comisión Federal de Electricidad.

Desde 1992 se permite la participación de inversionistas extranjeros para instalaciones mayores a 30 MW y de pequeños productores para instalaciones menores, estableciéndose los términos auto proveedores y auto generadores; quienes sólo pueden vender la electricidad a CFE, y ésta se encargará de su distribución. En el año 2008, se logró una importante participación extranjera en el



ámbito energético, incrementando la generación de electricidad, en el Gráfico 2.2 se muestra el porcentaje generado en relación a su fuente de origen.

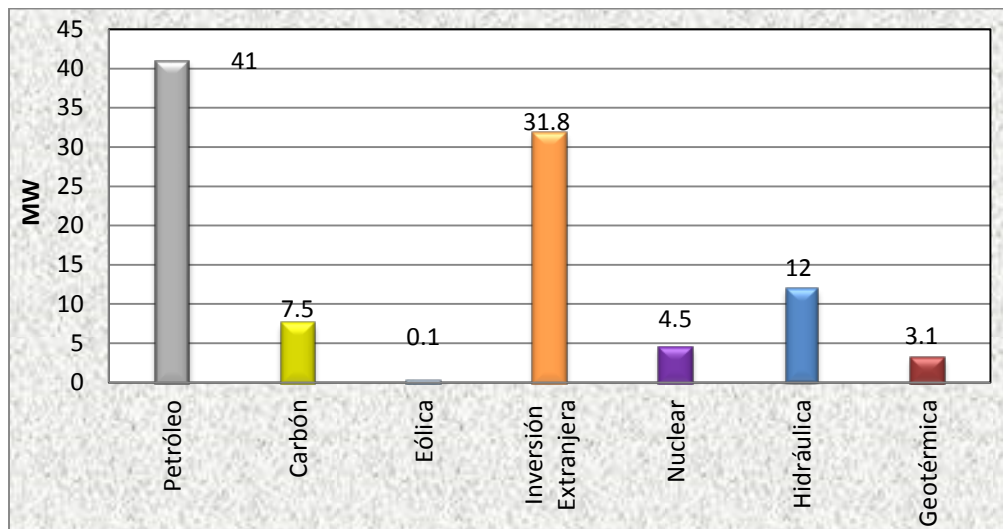


Gráfico 2.2 Generación de electricidad por fuente

Actualmente el 97 % de los hogares están conectados a la red pública, esto coloca al país en un nivel cercano a los países desarrollados. Sin embargo, los más de 3 millones de habitantes que viven en zonas de difícil acceso, carecen de electricidad, por lo que es necesario extender el suministro, usando fuentes renovables, donde no es económicamente factible conectarse a la red. Así, el aprovechamiento de las ER será un motor para el desarrollo social.

2.8 Consumo y generación

El mercado de electricidad se divide en cinco regiones como se observa en la Figura 2.2. La **región noroeste** que incluye a los estados de Baja California Norte y Sur, Sonora y Sinaloa; la **noreste** que incluye a Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango y Tamaulipas; la del **centro-oeste** que incluye Michoacán, Nayarit, Colima, Querétaro, Jalisco, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes y Guanajuato; la **centro** que incluye al Edo. De México, Morelos, Hidalgo, D.F., Puebla y Tlaxcala; y la **sur-sureste** que incluye Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Veracruz, Yucatán y Tabasco. La de mayor consumo de energía es la noroeste, debido principalmente a su clima. Le siguen la del centro, las regiones centro-oeste y sur-sureste, y la de menor consumo de energía es la del noreste (2).

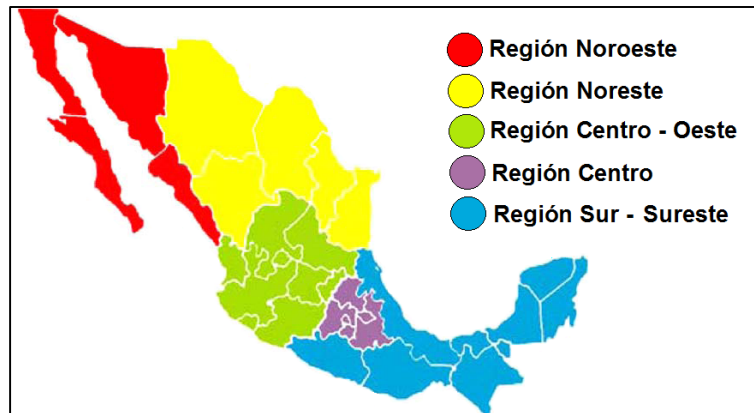


Figura 2.2 Mercado de Electricidad Nacional.

El consumo energético nacional, se divide en cinco sectores, como se observa en el Gráfico 2.3. Siendo el industrial el principal consumidor, dividido en grandes industrias y pequeñas y medianas empresas, las cuales tienen autorización para ser auto abastecedores. La industria de mayor consumo es la de vidrio, seguida por las industrias: acero, cemento, sustitutos de azúcar, minería, celulosa y papel, petroquímica, cervecera, agua embotellada, construcción de autos, plástico, aluminio, fertilizantes y tabaco, entre otras (el orden indica su nivel de consumo). En segundo lugar, se encuentra el sector residencial, cuyos usos doméstico refieren a la cocción de alimentos, calentamiento de agua, y sistemas de calefacción e iluminación. En tercer lugar se encuentra el sector comercial, donde se incluyen los hoteles y hospitales privados. Finalmente las cuarta y quinta posiciones son para el sector agrícola, relacionado con actividades de agricultura y cría de ganado, y el servicio público, que incluye el alumbrado eléctrico (2).

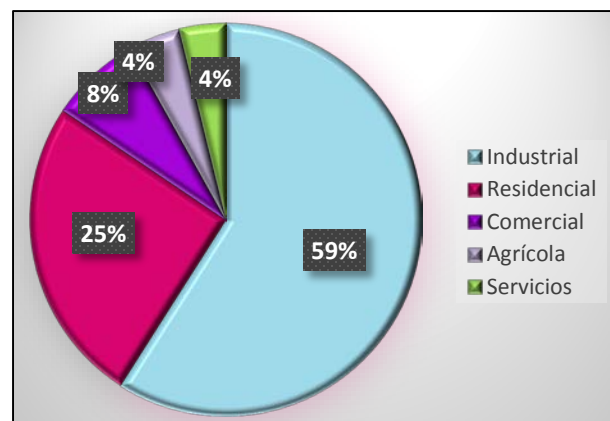


Gráfico 2.3 Consumo de electricidad por sectores



2.9 Crecimiento

Actualmente la tasa de crecimiento de la población es del 0.8 % y la tasa de generación de electricidad es del 4.4 %. El Consejo Nacional de Población calcula que el crecimiento en la demanda energética será del 4.9 % al año 2020, 3.5 % al año 2030 y 2.1 % para el año 2050, alcanzando un consumo total de 900 TWh.

En el Gráfico 2.4 se observa un histórico del crecimiento de los sectores energéticos en el periodo 2005-2013 y en la Tabla 2.7 se muestra una estimación de generación a los años 2020 y 2030. Estas proyecciones se logran gracias a los datos obtenidos por la SENER con la herramienta LEAP⁵, plataforma computacional diseñada para llevar a cabo estudios energético-ambientales en forma integrada, usando datos del OECD⁶ como base (2).

Las estimaciones actuales consideran precios nivelados del gas natural de alrededor de 10 dólares/MMBtu, el combustóleo nacional de 10 a 12 dólares/MMBtu y el carbón importado alrededor de 120 dólares/tonelada.

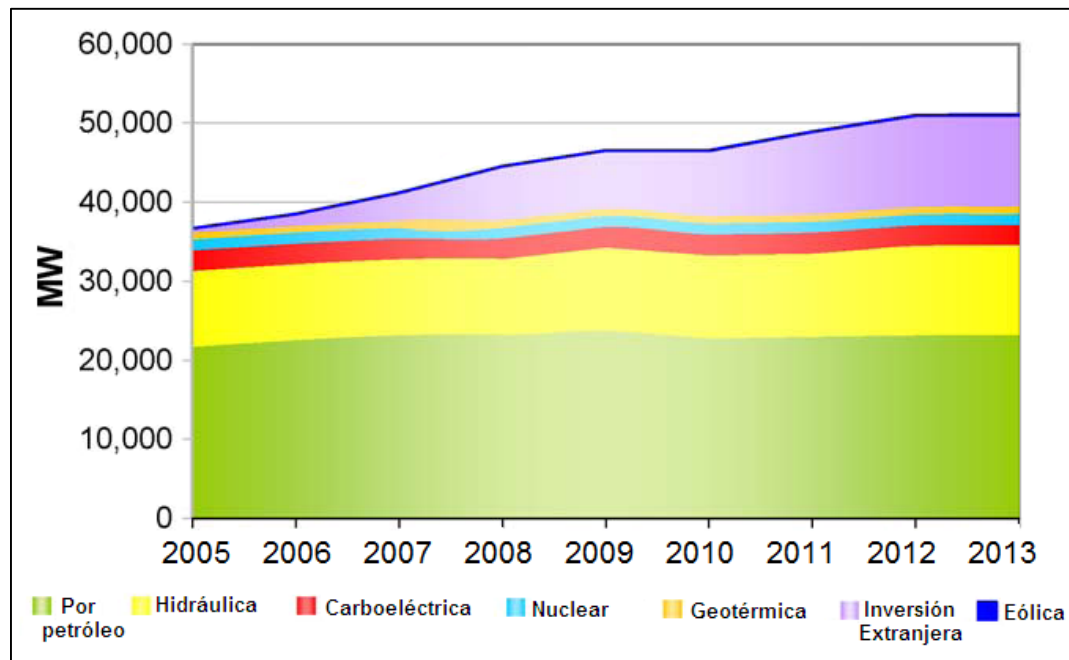


Gráfico 2.4 Crecimiento de los sectores eléctricos

⁵ Sistema LEAP: Long-range Energy Alternatives Planning System. Modelo de simulación para el desarrollo de estudios de planeamiento energético ambiental basado en escenarios (recursos, impactos y costos).

⁶ OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development.



Tabla 2.7 Proyección de Generación Eléctrica

GWh	2020	2030
Petróleo	123 000	130 000
Gas Natural	187 000	292 000
Carbón	30 000	35 000
Hidro	47 000	47 000
Nuclear	10 000	10 000
Biomasa	6 000	15 000
Geotermia	11 000	15 000
Eólica	4 000	8 000
MiniHidro	0.109	3.250
Solar	1 000	3 000
Total	419 000	555 000

Se estima además, que el consumo autoabastecido crecerá 26.1 % y llegará a 30.1 TWh en 2018. En cuanto al desarrollo de sistemas de transmisión, se construirán 20 664 km de líneas 69 a 400 kV y se instalarán 54 183 MVA de capacidad de transformación en subestaciones, así como 11 051 MVAr en equipo de compensación reactiva.

Para los sistemas de interconexiones, se tiene el proyecto de interconexión del sistema eléctrico de Baja California al Sistema Interconectado Nacional (SIN), el cual permitirá aprovechar la diversidad en los patrones de demanda entre los sistemas, con lo cual se utilizará de mejor manera la infraestructura de generación y será posible el intercambio económico de energía en diferentes horas del día y épocas del año, obteniendo importantes beneficios económicos en la operación del sistema. La interconexión se desarrollará en dos etapas de 30 MW cada una: la primera está programada para iniciar su operación en 2014 y la segunda dependerá del crecimiento de la demanda en el sector norte.

Para llevar a cabo los programas de la CFE es necesaria una inversión de 737 224 millones de pesos, 44.8 % para generación, 19.4 % en obras de transmisión, 22.3 % para distribución, 12.8 % en el mantenimiento de centrales y 0.7 % para otras inversiones. Se estima que 42.2 % del monto total de inversiones se cubrirá con recursos presupuestales; y el 57.8 % se llevará a cabo a través del esquema de obra pública financiada o bajo la modalidad de producción independiente (11).



La SENER ha proyectado específicamente para biomasa, el consumo por tecnología hasta el año 2030. Como se observa en el Gráfico 2.5.

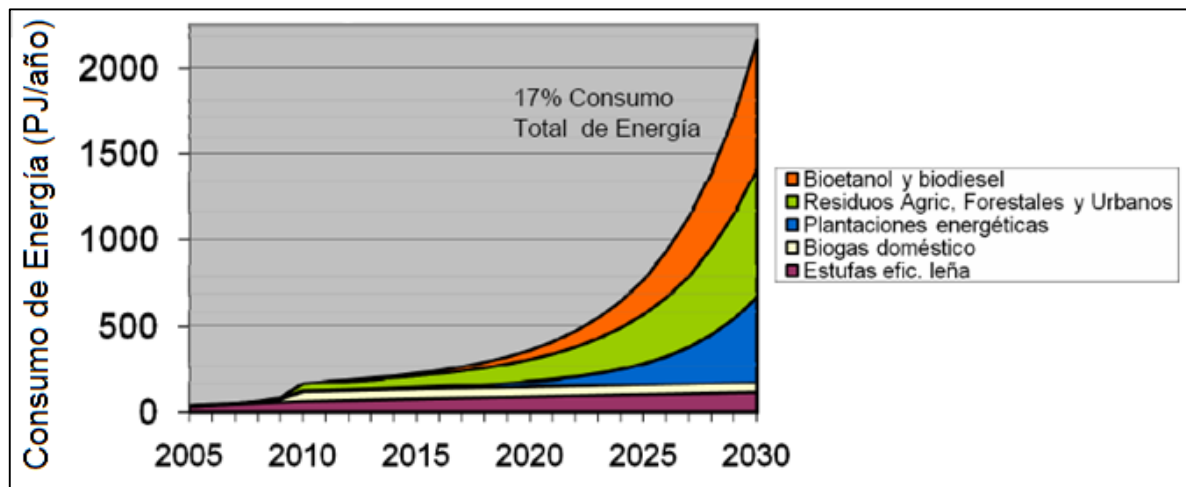


Gráfico 2.5 Tecnologías Bioenergéticas, México 2005 - 2030

2.10 Comercialización

El volumen total de la energía eléctrica vendida por la CFE durante el año 2010 a nivel nacional es de 65 687.856 MWh. Considerando un consumo promedio mensual por usuario de 462 kWh/mes/usuario. En la Tabla 2.8 se indican los costos de generación de electricidad por tecnología, dichos costos contemplan energéticos y fuerza comprada, mantenimiento y servicios generales por contrato, materiales de mantenimiento y consumo, remuneraciones y prestaciones al personal, impuestos y derechos, costo de obligaciones laborales, depreciación de la maquinaria, costos indirectos del corporativo, entre otros.

Tabla 2.8 Costos federales de electricidad.

Tecnología	Costos unitarios [MX\$/kWh - año 2013]
Turbogas y Ciclo Combinado	\$ 1.55
Diesel	\$ 14.66
Vapor (combustóleo)	\$ 2.66
Carboeléctrica y Dual (carbón y combustóleo)	\$ 1.73
Geotermoeléctrica	\$ 0.85
Energía eólica	\$ 1.23
Nuclear	\$ 1.87
Generación Hidroeléctrica	\$ 1.12



Actualmente el servicio de energía eléctrica llega al 96.84 % de la población nacional, sin embargo brindar el servicio al 3.16 % restante es sumamente costoso debido a la lejanía que presentan las comunidades con la red eléctrica nacional.

Debido a la diversidad en las formas de producción de energía eléctrica, México cuenta con la viabilidad de exportarla. Del total destinado para exportación, alrededor del 29 % se proporciona Guatemala, el 20 % a Belice y el 51 % a USA. En el primer semestre del 2012 la exportación fue de 720 GWh (10).

2.11 Energías Renovables (ER).

Desde tiempos remotos, el hombre ha utilizado energía para aumentar su capacidad de trabajo, convirtiéndola en la base para consolidar el sedentarismo, y crear las sociedades. Sucesos como la Revolución Industrial generaron cambios importantes en los procesos productivos, desencadenando un creciente uso de la energía, lo que resultó peligroso para el ambiente y la sociedad actual. Esta situación de peligro ha ocasionado que la utilización eficiente de los recursos de energía se convierta en una necesidad imperante de la comunidad mundial, para evitar el desastre ecológico que deviene en el futuro no muy lejano.

El petróleo ha fungido como el principal recurso de energía desde que fue descubierto en 1859. Como consecuencia de su excesivo consumo, a fines del siglo XX, se empezó a hablar de la dicotomía renovable/no renovable, al nacer la conciencia de que el principal combustible (gasolina), no se puede crear tan rápido como se consume. Los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural) son recursos finitos; de ahí su denominación "recursos no renovables". Con el intensivo uso actual de los hidrocarburos, se estima que las reservas se acabarán en aproximadamente 42 años (6) (12).

La combustión del petróleo y sus derivados son las principales causas de daño al ambiente, ya que producen gases que contribuyen al efecto invernadero, con el calentamiento global y la lluvia ácida consecuente. La ocurrencia de derrames y la contaminación causada por la industria petrolera dañan los ecosistemas y provocan mortalidad en comunidades aledañas. En el aspecto económico los costos de



acceso a los combustibles fósiles son elevados y existe un potencial de inestabilidad en el precio del petróleo al ser producido por países cuyos gobiernos pueden ser inestables, causando una intermitente vulnerabilidad económica mundial.

Lejos de ser inagotables, los combustibles fósiles se están acabando. Hasta el punto de que su control estratégico provoca conflictos políticos y sociales en el mundo, como se plasmó en la guerra de Irak o en el corte del suministro de gas ruso en 2006. Lo que lleva a pensar que la adicción al petróleo y al gas natural que padecen los países industrializados tenderá a agravar estos problemas (8).

Las desventajas del uso del petróleo; aunadas al riesgo de contaminación por accidentes, los residuos radiactivos y el elevado costo de inversión, operación y mantenimiento (O&M) que conlleva el uso de energía nuclear como recurso secundario; han resultado en la búsqueda y desarrollo de recursos alternativos como fuentes de energía limpias y renovables que sustituyan a los combustibles fósiles; así como una utilización más racional de la energía (6) (5).

La energía renovable ha probado ser una alternativa adecuada hacia un desarrollo de sustentabilidad ambiental. Sin embargo, en la mayoría de los países todavía queda un largo camino para destituir los hábitos energéticos dañinos existentes e implementar alternativas de energía que sean saludables y económicas (6).

El término energías renovables, se refiere a aquellas cuya fuente son fenómenos, flujos y ciclos implícitos en la naturaleza y en los procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad; que se regeneran naturalmente; y que por su cantidad, en relación con los consumos que los humanos pueden hacer de ellas, son virtualmente inagotables, por lo que su disponibilidad no será interrumpida durante el tiempo de vida de una persona, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque pueden regenerarse por medios naturales; se distribuyen en amplias y variadas zonas, su aprovechamiento es técnicamente viable y no causan afectaciones al ambiente (3) (13) (14).



La Environmental Protection Agency (EPA) define este tipo de energías como renovables ya que se reponen continuamente; y como sostenibles porque la naturaleza las repondrá más rápido de lo que pueden ser utilizadas. Además se encuentran descritas en la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) y son las mencionadas en la Tabla 2.9. (9) (15):

Tabla 2.9 Energías Renovables.

Energía Renovable		Descripción
1	Energía eólica	Energía por el movimiento del viento.
2	Energía solar	Radiación solar.
3	Energía hidráulica	Movimiento del agua en cauces naturales o artificiales.
4	Energía mareomotriz o mareomotérmica	Energía oceánica, de las olas, de las corrientes marinas y del gradiente de concentración de sal.
5	Energía geotérmica	Calor de los yacimientos geotérmicos.
6	Bioenergía	Materia orgánica de los desechos rurales y urbanos.
7	Todas aquellas que determine la Secretaría de Energía (SE), cuya fuente sea naturalmente inagotable.	

Las energías renovables ofrecen la obtención de energía útil para diversas aplicaciones, su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que los de las fuentes convencionales, poseen el potencial suficiente para satisfacer todas las necesidades de energía presentes y futuras, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables, y propicia el desarrollo regional (12).

Se pueden clasificar por su origen, por el nivel de desarrollo de las tecnologías y por la aplicación de la energía generada; como se observa en la Tabla 2.10 (16).

Las nuevas tecnologías que explotan estos recursos pueden generar calor o combustibles, pero todas pueden ser utilizadas para generar electricidad y a partir de ésta producir calor u otro tipo de energía.

Por la facilidad para transportarla, convertirla y producirla en otras formas de energía, la energía eléctrica producida con recursos renovables puede sustituir de manera lenta pero permanente, a la energía producida por combustión del petróleo y reacción nuclear (6).



Tabla 2.10 Clasificación de las Energías Renovables.

Fuente de energía renovable	Origen primario de la energía			Nivel de desarrollo de las tecnologías			Aplicaciones		
	Energía Solar	Calor de la corteza terrestre	Movimiento relativo de la luna y el sol	Convencional	Nueva	En desarrollo	Electricidad	Calor	Combustibles líquidos
Eólica	✓				✓	✓	✓		
Solar	✓				✓	✓	✓	✓	
Hidráulica	✓			✓			✓		
Bioenergía	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
Geotérmica		✓		✓		✓	✓	✓	
Olas	✓					✓	✓		
Mareas			✓			✓	✓		
Corrientes oceánicas	✓		✓			✓	✓		
Otras energías oceánicas	✓					✓	✓		

2.12 Fuentes o energías renovables y su utilidad.

La primera ley de la termodinámica indica que la energía en cualquiera de sus formas no puede crearse ni destruirse, sino sólo transformarse de una forma de energía a otra. La segunda ley de la termodinámica dice que, aunque la energía no se destruye ni se pierde, sí se degrada en un proceso irreversible.

Asociando estas dos leyes se concluye que la energía no puede considerarse renovable. Lo que puede renovarse es su fuente de origen. Por lo que el término energías renovables es incorrecto. Sin embargo, el uso común lo ha contemplado como aceptable para referirse a las fuentes renovables de energía⁷ (16).

Las fuentes renovables son consideradas fuentes de abastecimiento sustentables por que respetan el ambiente. Lo cual, no significa que no provoquen efectos adversos al entorno, sino que dichos efectos son infinitamente menores con respecto a los causados por la energía obtenida por combustibles fósiles (petróleo,

⁷ En el presente documento se utilizarán ambos términos.



gas y carbón); y energía nuclear, entre otras. Además los efectos dañinos de las energías renovables son por lo general reversibles (4).

Entre las ventajas ambientales importantes en el uso de energías renovables se destacan la no emisión de gases contaminantes resultantes de la quema de combustibles fósiles, responsables del calentamiento global del planeta (CO₂) y de la lluvia ácida (SO_x y NO_x); y la no generación de residuos peligrosos de difícil tratamiento que son durante mucho tiempo una amenaza para el ambiente, como los residuos radiactivos relacionados con el uso de la energía nuclear. Según el estudio "Impactos Ambientales de la Producción de Electricidad", realizado por la IDAE, el impacto ambiental en la generación de electricidad por fuentes convencionales es 31 veces superior al de las energías renovables. En la Tabla 2.11 se observa una comparación del impacto ambiental de las diferentes formas de producir electricidad (9) (16).

Tabla 2.11 Impactos ambientales por fuente de generación energética [g/kWh]

Fuente	CO	CO ₂	NO _x	SO ₂	Hidrocarburos	Partículas sólidas en suspensión	Residuos Nucleares	Total
Carbón	0.27	1058	2.99	2.97	0.10	1.63	-	1 066.2
Gas natural en ciclo combinado	Trazas	824	0.25	0.34	Trazas	1.18	-	825.7
Nuclear	0.02	8.6	0.03	0.03	0.001	0.003	3.64	12.3
Solar térmica	Trazas	3.6	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	-	3.6
Fotovoltaica	0.003	5.9	0.01	0.03	0.002	0.02	-	5.95
Eólica	Trazas	7.4	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	-	7.4
Biomasa	11.4	0.0	0.61	0.15	0.77	0.51	-	13.4
Geotérmica	Trazas	56.8	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	-	56.8
Hidráulica	Trazas	6.6	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	-	6.6

Además, las energías renovables contribuyen al equilibrio y a la conservación de los recursos naturales, ya que pueden instalarse en zonas rurales y aisladas de las grandes urbes; disminuyen la dependencia de los suministros energéticos externos; y a diferencia de los combustibles fósiles que sólo se encuentran en ciertas zonas a nivel mundial, las energías renovables son autóctonas (8) (9).



Así mismo, al uso de energías renovables se le estima una importante contribución económica, ya que su desarrollo representa la creación de pequeñas y medianas empresas, la generación de empleos directos e indirectos, un mayor desarrollo científico y tecnológico, y la posibilidad de generar intercambio comercial con los países que impulsan la utilización de este tipo de energías (8).

El estudio "Impactos Ambientales de la Producción de Electricidad", se realizó para comparar los efectos nocivos que causan las fuentes de energía al ambiente, evaluando ocho sistemas principales de producción de electricidad, mediante el método del ACV (Análisis de Ciclo de Vida) como se muestra en la Figura 2.3: Térmico de lignito, Térmico de carbón, Térmico de fuel-oil, Térmico de gas natural, y Térmico nuclear (sistemas convencionales); eólico, minihidráulico, y fotovoltaico (sistemas renovables). Los impactos ambientales analizados fueron: calentamiento global, disminución de la capa de ozono, acidificación, eutrofización, contaminación por metales pesados, sustancias carcinógenas, niebla de invierno, niebla fotoquímica de verano, generación de residuos industriales, radiactividad, residuos radiactivos, y agotamiento de recursos energéticos. (Ver en los Anexos las definiciones de los términos utilizados en este apartado).

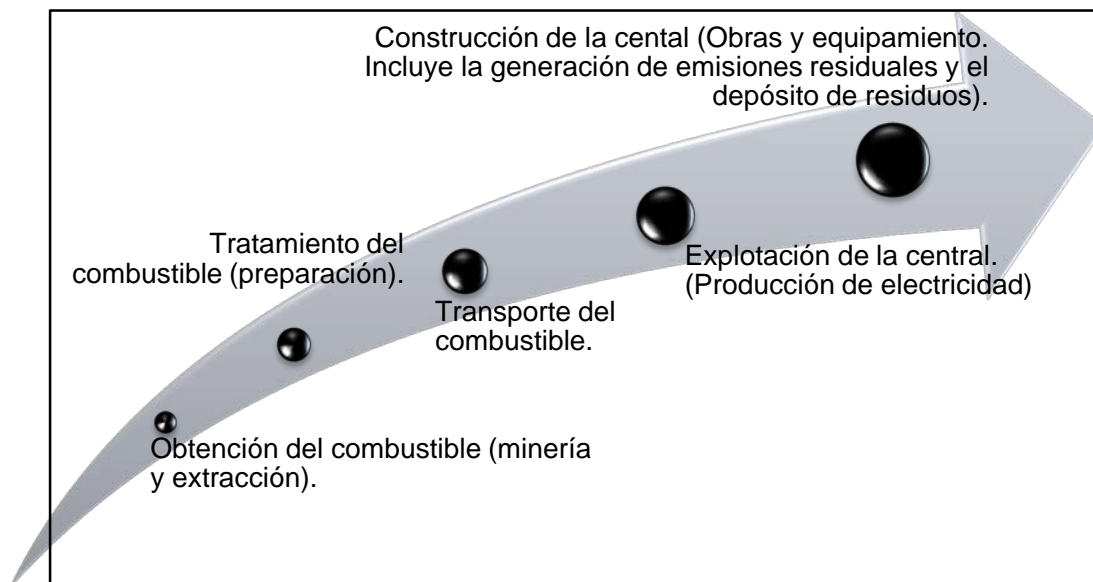


Figura 2.3 ACV de los sistemas de producción de electricidad



La unidad utilizada para medir el impacto ambiental es el Ecopunto de Impacto (Ver en Anexos: definición, metodología, cálculo y ponderación). Los sistemas basados en los combustibles fósiles tradicionales (lignito, petróleo y carbón) son los únicos que superan los 1000 ecopuntos, por lo que se les considera como los de mayor impacto ambiental. Los sistemas basados en la energía nuclear y en el gas natural se sitúan entre los 100 y los 1000 ecopuntos, lo que indica una posición intermedia de impacto; y los sistemas basados en fuentes renovables ocasionan un menor impacto ambiental, con una puntuación inferior a los 100 ecopuntos. En el Gráfico 2.6 se muestran los resultados obtenidos (7).

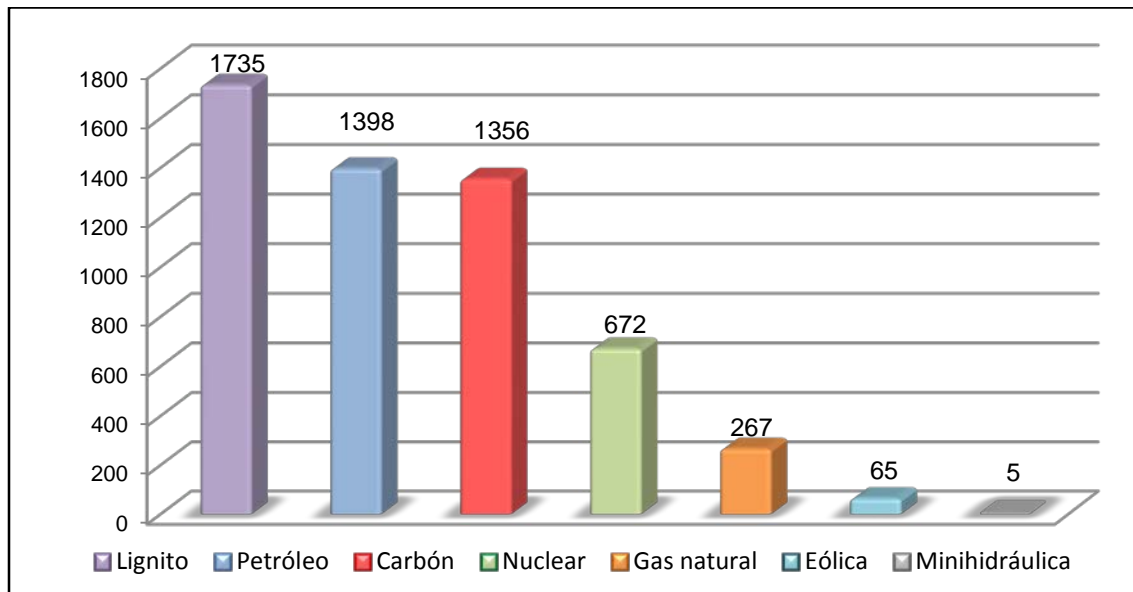


Gráfico 2.6 Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica.

El promedio de las tecnologías convencionales es 1 496.3 ecopuntos, y el de las tecnologías renovables es de 35. Lo que da una relación 42:1 a favor de las energías renovables.

El reducido impacto ambiental de los sistemas renovables se explica ya que estos sistemas no requieren ningún proceso de combustión para su funcionamiento (excepto la biomasa, cuya explicación es por el balance neto de dióxido de carbono) y son recursos inagotables. En la Tabla 2.12 se muestra el impacto ambiental en relación al sistema de generación (7).



Tabla 2.12 Impacto ambiental según el sistema de generación utilizado.

Impacto Ambiental	Sistemas con mayor impacto		Sistemas con menor impacto			
	Sistema	Porcentaje	Sistema	Porcentaje	Sistema	Porcentaje
Calentamiento global [Toneladas de CO ₂ equivalentes]	Lignito Carbón Gas natural Petróleo	30 % 25 % 22 % 22 %	Minihidráulico Nuclear	0 % 0 %	Eólico	1 %
Disminución de la capa de ozono [kg de CFC equivalentes]	Petróleo	85 %	Minihidráulico Gas natural Lignito	0 % 1 % 1 %	Eólico Carbón Nuclear	3 % 3 % 7 %
Acidificación [kg de SO ₂ equivalentes]	Lignito Carbón Petróleo	62 % 18 % 18 %	Nuclear Eólica	0 % 0 %	Minihidráulico Gas natural	0 % 2 %
Eutrofización [kg de fosfatos equivalentes]	Carbón Petróleo Lignito Gas natural	30 % 25 % 25 % 18 %	Minihidráulico Eólico	0 % 1 %	Nuclear	1 %
Contaminación por metales pesados [kg de plomo equivalentes]	Carbón Petróleo	64 % 21 %	Minihidráulico Nuclear Gas natural	0 % 2 % 4 %	Eólica Lignito	4 % 5 %
Sustancias carcinógenas [kg de PAH equivalentes]	Petróleo Carbón	80 % 12 %	Nuclear Minihidráulico Eólico	0 % 0 % 1 %	Gas natural Lignito	3 % 4 %
Niebla de invierno [kg de SO ₂ equivalentes]	Lignito Petróleo Carbón	67 % 17 % 16 %	Gas natural Nuclear	0 % 0 %	Eólica Minihidráulico	0 % 0 %
Niebla de verano [kg de eteno equivalentes]	Petróleo	80 %	Minihidráulico Nuclear Lignito	0 % 1 % 1 %	Eólica Carbón Gas natural	3 % 7 % 8 %
Radiactividad [m ³ de residuos]	Nuclear	96 %	Minihidráulico Eólica Gas natural	0 % 0 % 0 %	Lignito Petróleo Carbón	1 % 1 % 2 %
Residuos industriales [kg de residuos]	Lignito Carbón	77 % 20 %	Nuclear Eólica Minihidráulico	0 % 0 % 1 %	Gas natural Petróleo	1 % 1 %
Agotamiento de recursos energéticos [Toneladas equivalentes de petróleo]	Nuclear Gas natural	44 % 38 %	Minihidráulico Eólica Gas natural	0 % 1 % 0 %	Lignito Carbón Petróleo	4 % 4 % 9 %

Tomando en cuenta el agotamiento de las reservas nacionales de petróleo, los impactos ambientales causados en su aprovechamiento y el constante incremento en la demanda mundial de energía, México debe promover el uso racional y eficiente de las actuales fuentes energéticas, e impulsar la investigación, introducción y desarrollo de nuevas y renovables formas de energía, conservando al mismo tiempo el ambiente para un desarrollo sustentable (6) (17).



La situación actual de México justifica la búsqueda de la sustitución de las fuentes energéticas convencionales por fuentes renovables mediante cinco razones:

Razón 1: La calidad del aire regional en las grandes y medianas ciudades del país es una de las peores a nivel mundial. Las tendencias actuales de quema de combustibles fósiles para transporte y generación de electricidad en las ciudades deben cambiar, sin embargo, no podrá ser repentino, por lo que introducir métodos de energía renovable menos contaminantes, ayudará eventualmente a aminorar el riesgo a la salud que implica una mala calidad de aire (6).

Razón 2: El nivel de GEI emitidos, es uno de los más altos entre los países latinoamericanos, como se observa en el Gráfico 2.7. La instalación de tecnología renovable disminuirá radicalmente la contribución nacional al sobrecalentamiento terrestre, al mismo tiempo que ayudará al desarrollo sustentable del país, mejorando la calidad de vida de miles de comunidades rurales (6).

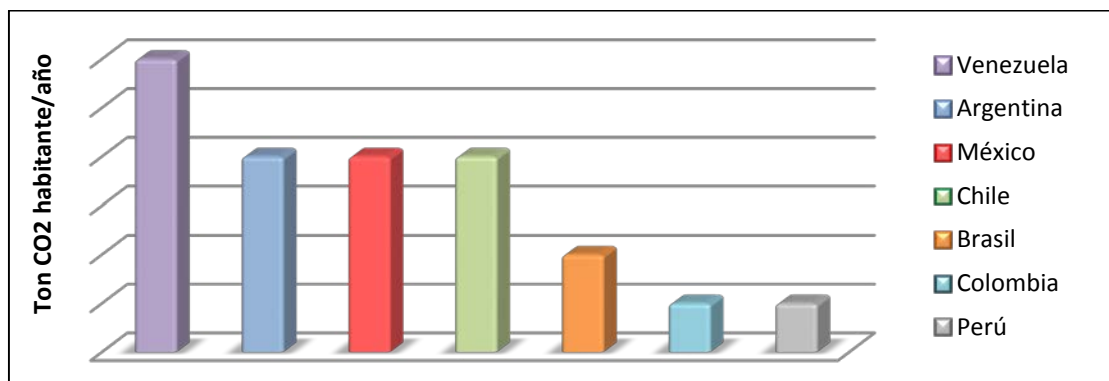


Gráfico 2.7 Emisiones de CO₂ en América Latina.

Razón 3: La extensa zona rural, carece de servicios básicos como energía eléctrica. Las energías renovables son una buena opción para este sector, ya que, para brindarle energía eléctrica, la alternativa actual es agrandar la red eléctrica existente, proceso sumamente costoso, especialmente en zonas alejadas donde radican estas comunidades. La implementación y producción de tecnologías para energías renovables disminuyen la centralización actual, ya que, por su naturaleza tienen que construirse en regiones geográficas específicas, permitiendo proyectos de electrificación independientes de la red actual. Además promueven el desarrollo local de la zona rural y mejoran la regulación por parte de la red central, pues una



planta regional es más fácil de regular al no ser la responsable de proveer electricidad a zonas lejanas ni a una demanda demasiado alta (6).

Razón 4: La falta de energía conlleva a la falta de: comunicación con otras entidades, educación, servicios de salud, y agua potable, por mencionar algunos aspectos; es decir, a la falta de desarrollo social en general. Proveer a las zonas marginadas del país con energía, es una estrategia directa e indirecta hacia el cumplimiento de las “Metas Mundiales para el Desarrollo del Milenio.⁸” Y simultáneamente ayuda a las comunidades a adaptarse al cambio climático, teniendo infraestructura con la que puedan enfrentar los posibles desastres (6).

Razón 5: Para la industria mexicana es viable fabricar los componentes de algunas tecnologías, así que se puede crear un mercado de exportación de materiales y/o tecnologías a otros países latinoamericanos, reforzando la economía nacional. El sector energético en México representa entre el 4 y 7 % del PIB, 40 % del total de los ingresos del sector público y el 8 % de las exportaciones, por lo que constituye una buena parte de la actividad económica del país. Si se logra impulsar las energías renovables a gran escala, México tiene buenas oportunidades de aumentar su competitividad regional, con el consecuente aumento del Producto Nacional Bruto (PNB) y del crecimiento económico (6).

2.13 Ventajas de utilizar fuentes renovables:

El sorprendente potencial en la reducción de costos por el uso de tecnologías limpias, junto con el incremento de precios de los hidrocarburos en el presente y el futuro, y los costos ambientales ocasionados por el uso de sistemas de suministro convencionales, resaltan el hecho de que el uso masivo de energías renovables se está volviendo muy competitivo (14).

- Son renovables, es decir, se están produciendo continuamente.
- Pueden instalarse en zonas rurales y aisladas.

⁸ (1) Erradicar la pobreza extrema y el hambre. (2) Lograr la enseñanza primaria universal. (3) Promover la igualdad entre los géneros y la autonomía de la mujer. (4) Reducir la mortalidad de los niños. (5) Mejorar la salud materna. (6) Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades. (7) Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente. (8) Crear una alianza mundial para el desarrollo.



- Permiten la conservación de recursos naturales no renovables y tienen un impacto ambiental menor que las energías convencionales.
- Tienen grandes ventajas sociales ya que generan trabajo para las personas que colocan la instalación y operan los sistemas (en caso de requerirse).
- No generan emisiones de dióxido de carbono ni de otros gases contaminantes; si durante su construcción, operación y mantenimiento se usan otras energías entonces sí se podrían estar emitiendo contaminantes en pequeñas cantidades.
- Son autóctonas, en cada territorio hay un tipo diferente de energía. En los desiertos, se tiene energía solar; en las selvas se aprovecha la energía de la biomasa, en los sitios montañosos se tiene energía eólica, y en zonas lluviosas se aprovecha la energía hidráulica. Mientras que los combustibles fósiles sólo se encuentran en un número limitado de zonas, las fuentes renovables por ser autóctonas disminuyen la dependencia de suministros externos.
- Representan la vía más factible para lograr el desarrollo sostenible y el desarrollo de los países de escasos recursos económicos (1) (13).

Con el fin de proveer un abastecimiento energético seguro y diverso; producir energía con un impacto ambiental bajo (sin generación de emisiones para mitigar el cambio climático y la degradación del ambiente); impulsar la competitividad económica y generar beneficios para la sociedad; se justifica la urgencia de realizar investigación básica, aplicada y desarrollo tecnológico, así como la promoción de proyectos demostrativos y de mercados en tecnologías limpias (14).

Para favorecer el desarrollo de un mercado de fuentes de energía renovables, México debe considerar las repercusiones positivas sobre la factibilidad de desarrollo regional y local, las perspectivas de exportación, la cohesión social y las oportunidades de empleo que se generarían, especialmente por lo que se refiere a las PYME y a los productores de energía independientes. Así mismo, debe dedicar un porcentaje significativo de los recursos financieros a la investigación y el desarrollo en materia de tecnologías de energías renovables (12).



3. Marco legal en materia de Energías Renovables.

A lo largo de la realización de estudios en materia de fuentes renovables, así como para la implementación de proyectos, se ha requerido de un conjunto de estrategias políticas y comerciales para su fomento, promoción e implementación, además del conocimiento de normas y tratados, que brindan los criterios, especificaciones, y procedimientos para que los proyectos cumplan sus objetivos.

En este capítulo se presentan las características de la política energética, y la legislación en materia de generación, producción, consumo, venta y propiedad de electricidad. Se exponen artículos, leyes y normas relacionados con las diferentes fuentes de energía, los mecanismos reguladores de las mismas, y los medios de suministro y distribución. La organización del apartado es de lo general a lo particular, es decir se presentan en un primer apartado los acuerdos, protocolos y documentos regulatorios en materia de sustentabilidad a nivel internacional.

Como un segundo apartado se exponen los documentos regulatorios nacionales, iniciando por los Artículos Constitucionales, posteriormente los apartados de Legislación Energética en general y finalmente los apartados de Producción Energética por fuentes renovables. Considerando el tema de la presente de tesis, las Leyes y Normas referentes a generación e implementación de proyectos por fuentes de energías renovables, serán descritas. Las leyes que podrían utilizarse en el caso de realizar un proyecto energético con fuentes renovables, pero de temática particular; reglamentos y acuerdos complementarios; y las disposiciones en materia de valores mínimos de eficiencia de equipos que requieran energía eléctrica y sus métodos de prueba, serán solamente mencionadas en una lista.

3.1 Política energética

La política energética para la promoción internacional de las energías renovables tiene un propósito triple.

- Reconocer y valorar los beneficios de las energías renovables.
- Adaptar los sistemas y mercados energéticos a las particularidades de las energías renovables.



- Reducir riesgos y costos en el aprovechamiento de las energías renovables, fomentando el flujo de información en tema de potenciales, tecnologías, costos y beneficios ambientales, sociales y económicos.

Estos propósitos confieren determinadas características a las políticas para el fomento de las energías renovables:

En los mercados energéticos se debe permitir la participación de actores a cualquier escala, debido a la dispersión geográfica de las fuentes renovables de energía, por lo general, los proyectos a realizar son de menor escala que los proyectos de tecnologías convencionales; esto, aunado a los altos costos de inversión requeridos, hacen necesaria la participación de actores públicos y privados para el financiamiento, la ejecución y la operación de los proyectos de energías renovables. Esta participación de actores variables solicita que las políticas garanticen procedimientos administrativos sencillos y transparentes, ofreciendo certidumbre a mediano y largo plazo mediante la reducción de los riesgos económicos en el desarrollo de los proyectos, así como en los instrumentos relacionados con el ordenamiento territorial y tipo de uso de suelo a nivel federal, estatal y municipal, considerando los procesos productivos que podrían verse afectados. Se deben crear políticas públicas que permitan la valorización de los beneficios que los proyectos de energías renovables ocasionan, mediante incentivos financieros. En el caso de los sistemas eléctricos se deben establecer procedimientos de planeación y operación que se ajusten a patrones de generación más distribuida con tecnologías variables de generación.

Uno de los aspectos más importantes a considerar en la realización de proyectos es el factor económico; es decir, las inversiones y costos que el proyecto genere; por lo que se ha determinado un instrumento financiero de promoción que consiste en la depreciación acelerada para inversiones en energías renovables, que implica depreciar el 100 % de las inversiones en maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables, siempre y cuando el sistema continúe en operación por al menos 5 años después de la depreciación, garantizando así calidad en tecnologías y servicio.



Debido a la “novedad” que presentan los proyectos de fuentes renovables, se creó el Fondo Sectorial CONACYT – Secretaría de Energía – Sustentabilidad Energética, con el objetivo de impulsar la investigación científica y tecnología aplicada; así como la innovación y desarrollo tecnológico en materia de fuentes renovables, eficiencia energética y uso de tecnologías limpias.

En la iniciativa de ley de la LAERFTE se prevé que aproximadamente 60 millones de dólares al año de destinarán a la inversión en proyectos para generar electricidad para su uso público con tecnologías competitivas; y 30 millones de dólares más al año se utilizarán en la promoción de tecnologías menos desarrolladas y para fomentar el desarrollo tecnológico nacional, la investigación y el desarrollo económico y social.

● ***DOCUMENTOS RELATIVOS A LA POLÍTICA ENERGÉTICA NACIONAL Y AL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES.***

Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2009 - 2018.

Describe el progreso del mercado eléctrico desde los puntos de vista macroeconómicos en estudios regionales, autoabastecimiento, precios de electricidad, etc. La capacidad de generación y transmisión para atender la demanda de electricidad actual y futura. En él se definen las inversiones para las nuevas centrales, las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica, el mantenimiento de la infraestructura, los efectos de los costos de combustibles y las acciones para incrementar los límites de transmisión. Su principal objetivo es brindar un servicio público de electricidad seguro y eficiente (18).

Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2013 - 2016.

Identifica oportunidades para lograr un óptimo aprovechamiento de energía y generar ahorros sustanciales para el país, así como, defina una estrategia integral para capturar el impacto mediante acciones identificadas en el consumo final de la energía. Dicho consumo final se identifica dentro siete sectores de oportunidad: transporte, iluminación, equipos del hogar e inmuebles, cogeneración, edificaciones, motores industriales y bombes de agua (19).



Programa Especial para el Aprovechamiento de la Energías Renovables.

Instrumento que permite incrementar la seguridad energética, mediante el establecimiento de la sustentabilidad en el país. Indica costos de referencia en el empleo de las distintas fuentes renovables de energía, así como un mapeo de la situación actual que se tiene en el uso de cada una de ellas, mediante la elaboración de un diagnóstico de uso, las acciones gubernamentales que las impulsan y los retos a futuro para incrementar su aprovechamiento.

Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México.

Muestra la situación actual de las tecnologías renovables, así como los beneficios obtenidos de su aplicación y propone estrategias de fomento para potenciar los beneficios tecnológicos que el país tendría al aprovechar las energías renovables.

Plan Nacional de Desarrollo 2012 – 2018.

Hace referencia a la “economía competitiva y generadora de empleos” y a la “sustentabilidad ambiental”, en el manejo de estrategias de promoción, como impulsar la eficiencia y las tecnologías limpias para la generación de energía; diversificar las fuentes primarias de generación; ampliar la cobertura del servicio eléctrico en comunidades remotas y en los casos en que no sea económicamente factible la conexión a la red, se utilizarían energías renovables; entre otras.

Programa Sectorial de Energía 2007 – 2012.

Equilibra el portafolio de fuentes primarias de energía, fomenta el aprovechamiento de fuentes renovables de energía y biocombustibles, y mitiga el incremento en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Guía de gestiones para implementar en México plantas de generación eléctrica que utilicen energías renovables.

Provee a desarrolladores de proyectos, usuarios de energía eléctrica y dueños de recursos renovables, de información acerca de las principales gestiones, como: expedición de actas constitutivas, estudios de factibilidad de interconexión, permisos de autoabastecimiento de energía eléctrica, permisos de exportación de energía, contrato de interconexión, convenio de compra – venta de excedentes de energía y manifestaciones de impacto ambiental; entre otras.



3.2 Consideraciones para lograr la estructura energética

Existen organismos internacionales que permiten que México proyecte, en un horizonte de 11 años (2025), su situación energética. Entre ellas se encuentran:

- IEO/OEI: Independent Evaluation Office / Oficina de Evaluación Independiente, creado en 2001 para realizar evaluaciones independientes y objetivas de las políticas y actividades del FMI.
- IMF/FMI: International Monetary Fund / Fondo Monetario Internacional, creado por la ONU en 1945 para la promoción de políticas cambiarias sustentables a nivel internacional, facilitar el comercio internacional y reducir la pobreza.

La CRE ha proyectado el uso de los diferentes tipos de energías para satisfacer la demanda energética al año 2017. En el Gráfico 3.1 y el Gráfico 3.2, se muestra la demanda energética para los años 1997, 2005 y la proyección para el año 2017.

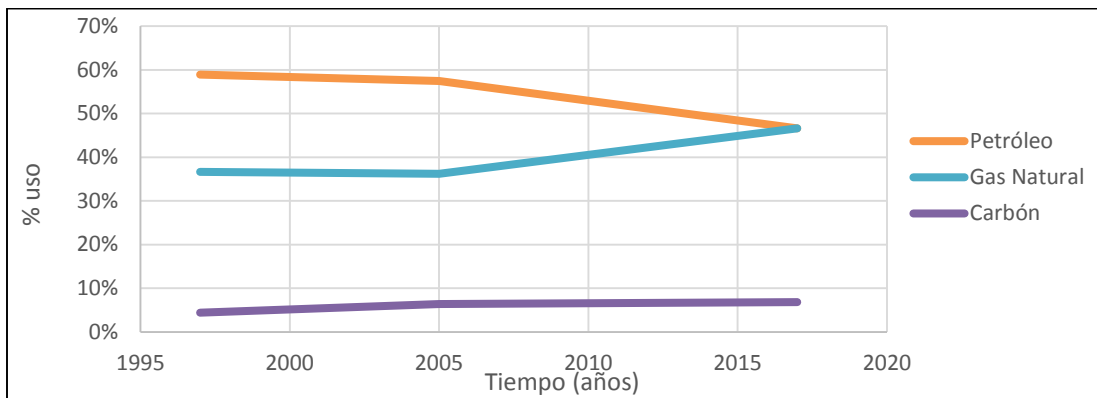


Gráfico 3.1 Distribución de la demanda energética usando energías convencionales.

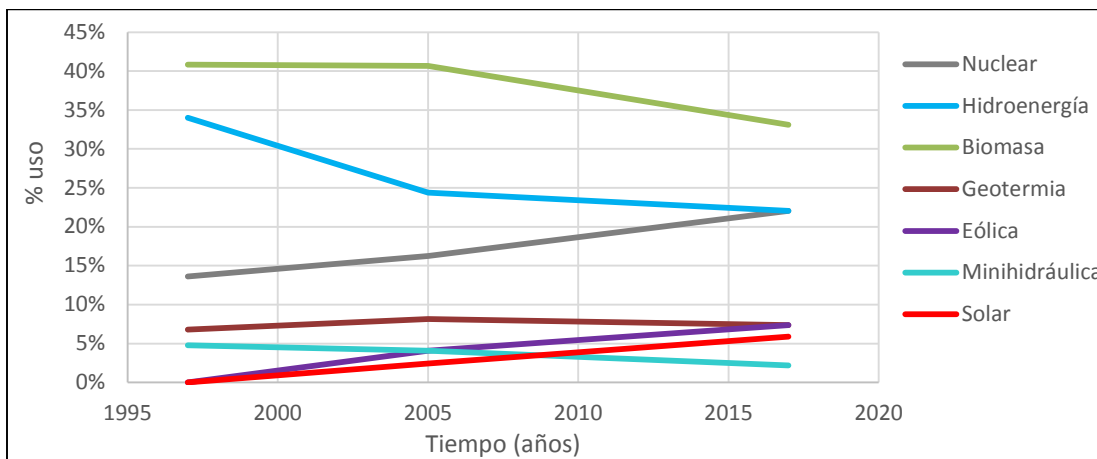


Gráfico 3.2 Distribución de la demanda energética usando energías alternativas.



Derivado de la crisis financiera y económica a nivel mundial, la SENER y la CFE acordaron los siguientes escenarios:

Base: en este escenario se considera que las ventas de electricidad, más autoabastecimiento, crecerán en promedio 3.33 % cada año como se observa en la Figura 3.1, derivado de un incremento medio del PIB del 2.3 %

Mayor crecimiento: es el escenario alternativo en el cual el autoabastecimiento crece en promedio 4 % al año (11).

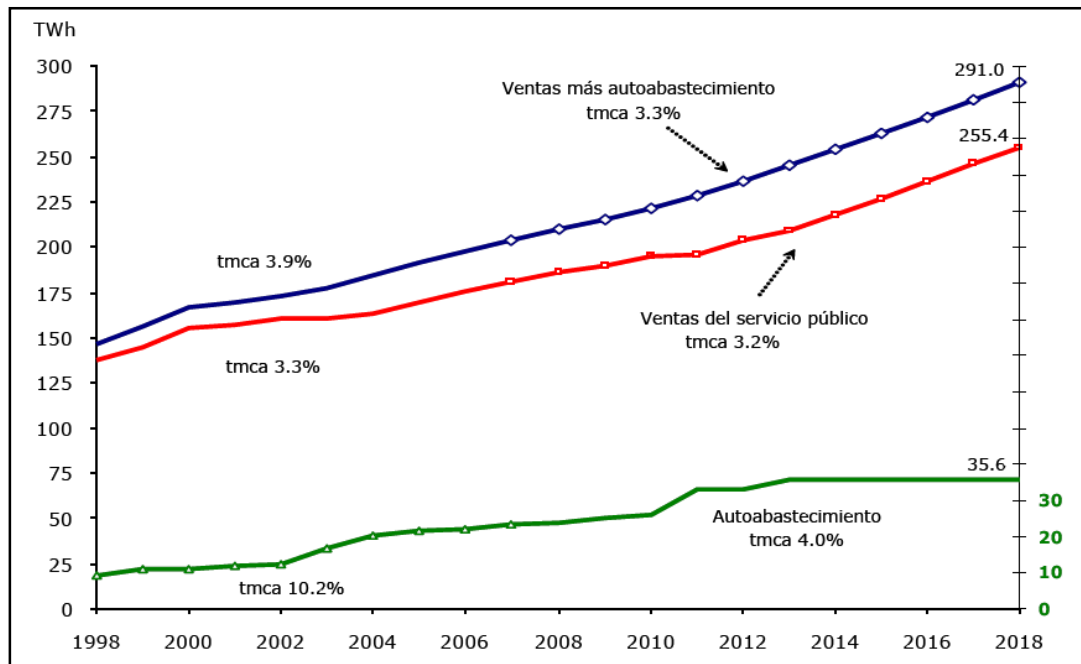


Figura 3.1 Ventas más autoabastecimiento durante el periodo 1998 – 2018.

En lo que refiere a las ventas para el servicio público de electricidad, se consideran las efectuadas a la industria (grandes y medianas empresas) y al denominado Desarrollo Normal (sectores residencial, comercial y de servicios). En el Gráfico 3.3 se observan los porcentajes equivalentes según las ventas totales.

El Gobierno Federal, y los gobiernos estatales y municipales tienen un papel fundamental en el desarrollo de la estructura política administrativa, la cual debe realizarse en una acción coordinada para lograr los resultados de difusión y cobertura en el uso de tecnologías renovables.

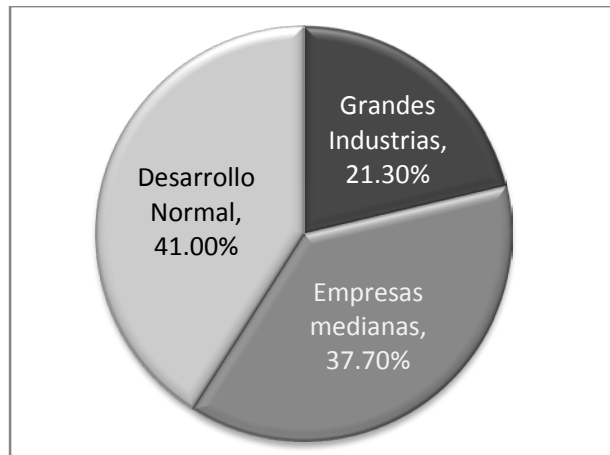


Gráfico 3.3 Porcentajes de venta del servicio público de electricidad.

3.3 Legislación vigente

Ante las crisis de aumento en los precios del petróleo, la mayoría de los países desarrollados han adoptado una serie de acciones y marcos regulatorios que promueven el uso de fuentes de energías renovables, a diferentes niveles (12).

Uno de los ejes centrales para el progreso del país y del mundo, es el desarrollo sustentable, por lo que debe fomentarse el uso eficiente de la energía y el uso de tecnologías que mitiguen el impacto ambiental. Para lograr este objetivo se debe crear un marco jurídico que lo impulse y vuelva factible.

La generación eléctrica distribuida requiere de legislación específica para hacerla viable, así como de normas técnicas que aseguren su penetración al sistema eléctrico sin causar problemas de gestión y control. Además se requiere de un marco específico que fomente la competitividad de las energías renovables (20).

Desafortunadamente la legislación nacional actual no excluye completamente la consideración de las hidroeléctricas, no especifica reglas de despacho de electricidad que favorezcan a las renovables, no especifica reglas claras para la distribución del fideicomiso de apoyo financiero y no pone una cuota de participación industrial nacional mínima en la manufactura de tecnologías (6).

3.3.1 Regulación Internacional

En la Tabla 3.1 se presenta un listado de los principales acuerdos, documentos y acciones internacionales relacionadas con el medio ambiente y cuyas medidas



consideran el desarrollo sustentable. En la elaboración de proyectos de energías renovables, debe verificarse el cumplimiento de los objetivos de estos documentos, o bien, con el fin de cumplir y satisfacer los acuerdos internacionales de la tabla, deben impulsarse proyectos con fuentes renovables.

Tabla 3.1 Regulación Internacional

ACUERDOS BASE	
1972	Declaración sobre medio humano (presencia de 113 países) aprobada en la conferencia de Estocolmo de la ONU Creación del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) en Kenia.
1982	Primer programa de la ONU sobre el ambiente - Carta mundial de la naturaleza - proclamada como instrumento ambiental jurídicamente no obligatorio.
1984	Conformación de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo
1987	Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo "Nuestro futuro común" (informe Bruntland). En él se utilizó por primera vez el término desarrollo sostenible.
1988	Se establece el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC)
1989	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo realizada en Río de Janeiro
1992	La conferencia de Río generó los siguientes acuerdos:
	Declaración de Río: define los derechos y obligación de los Estados en cuanto al desarrollo sustentable.
	Declaración de principios de florestas
	Convenio marco sobre cambio climático (UNFCCC)
	Convenio sobre biodiversidad
	Agenda 21: plan de acción con metas ambientales y de desarrollo en siglo XXI.
1995	Cumbre de Copenhague: reducción de emisiones para que la temperatura del planeta no supere los 2°C con respecto a los niveles preindustriales, las economías emergentes deben reportar sus movimientos cada dos años, promueve la búsqueda de incentivos económicos como los bonos de carbono, etc.
2001	Plataforma de acción - Río de Janeiro. Elaborada por la Conferencia Regional de América Latina y el Caribe preparatoria de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible
2002	Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, en Johannesburgo (RIO+10): entre otros aspectos, se instó que el sector privado tiene el deber de contribuir al desarrollo sostenible.
CAMBIO CLIMATICO	
1998	El PNUMA y la OMM (Organización Meteorológica Mundial) crean el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para evaluar el estado de conocimiento existente sobre el sistema climático; los impactos sobre el ambiente, economía y sociedad del cambio climático y las posibles estrategias de respuesta.
2008/ 2012	Primer período de compromiso: los países industrializados deben reducir 5 % de los gases causantes del efecto invernadero que generaban en 1990. (Kioto)
PROTECCION DE LA CAPA DE OZONO	
1989	Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono
1988	Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono
GESTION DE LAS TECNOLOGIAS	
2004	Conferencia de las Partes sobre compuestos orgánicos persistentes (COPs).
AGUAS INTERNACIONALES	
1933	Declaración de Montevideo: ampliar los esfuerzos de aumentar la participación de las energías renovables en la oferta de energía y de mejorar la eficiencia energética.
1971	Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación
OTROS ACUERDOS	
Objetivos, metas e indicadores de Desarrollo del Milenio: respeto de la naturaleza, y garantizar la sostenibilidad del medio ambiente	
Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos	



Entre los documentos y acciones internacionales más importantes se encuentran el Protocolo de Kioto y los Mecanismos de Desarrollo Limpio.

Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto es un acuerdo internacional asumido en 1997 en la Convención Marco de las Naciones Unidas que trata de frenar el cambio climático. Ha sido aceptado por 163 países. Busca reducir 6 gases de efecto invernadero: CO₂, N₂O, metano CH₄, HFCs, PFC y SF₆. Los países industrializados se comprometieron a reducir la emisión de gases causantes del efecto invernadero en un 5.2 % tomando como base los niveles de 1990. Para facilitar la reducción de emisiones se incluyeron tres mecanismos: de desarrollo limpio, de comercialización de emisiones y de implementación conjunta.

Este acuerdo impone para 39 países que se consideran desarrollados la contención o reducción de sus emisiones de GEI. En él se establece que México no tiene la obligación de reducir sus emisiones de GEI, pero puede vender certificados de reducción de emisiones, a los países obligados por medio del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). El Protocolo de Kioto inicia así un sistema de carbono capaz de incentivar el uso de energías renovables (6).

Mecanismo De Desarrollo Limpio MDL

El MDL está regido por el Protocolo a través de la Junta Ejecutiva. Este mecanismo ofrece a los países industrializados la posibilidad de diferir tecnologías limpias a países en vías de desarrollo, mediante inversiones en proyectos de reducción de emisiones o sumideros, recibiendo a cambio certificados de emisión que servirán como suplemento a sus reducciones internas, dichas reducciones deberán ser verificadas y certificadas por entidades independientes. Para obtener la certificación de las emisiones, tanto el país industrializado como el país en desarrollo receptor del proyecto, deberán demostrar una reducción de emisiones, en el tiempo real, medible y prolongado. Este mecanismo tiene una especial sensibilidad dado que puede contribuir a reducir emisiones futuras en los países en desarrollo y potenciar la capacidad de transferencia de tecnologías limpias.



México:

México ha participado en diferentes conferencias sobre energías renovables, en el 2004 en Berlín, en el 2006 en Pekín y en el 2008 en Washington, así mismo tiene participación activa con instituciones financieras multilaterales como el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo; además de tener una cooperación con agencias bilaterales, especialmente la embajada británica y con la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). Ésta última tiene tres líneas de acción: asesorar en la mejora del marco regulatorio, asesorar en el desarrollo e implementación de programas de promoción, y la capacitación organizacional en los sectores público y privado.

Unión Europea:

DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO: El control del consumo de energía en Europa, la mayor utilización de la energía procedente de fuentes renovables, el ahorro energético y la eficiencia energética, constituyen gran parte de las medidas necesarias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y para cumplir el Protocolo de Kioto. Los costos de conexión a la red eléctrica y de gas de los productores de electricidad y gas procedentes de fuentes de energía renovables deben ser objetivos, transparentes y no discriminatorios, y reflejar los beneficios que aportan a las mismas (12).

Estados Unidos de Norte América:

Ley de Recuperación y Reinversión de 2009 (American Recovery and Reinvestment Act of 2009): impulsa la economía norteamericana, crea y mantiene fuentes de empleo. Es una respuesta a la crisis mundial e incluye medidas para modernizar la infraestructura, fortalecer la independencia energética y fomentar oportunidades educativas. Implementa un programa económico y de comercio de amplia cobertura que reduzca en un 80 % la emisión de gases de efecto invernadero para el año 2050 (12).

Canadá:

Ley Canadiense de Protección al Ambiente (Canadian Environmental Protection Act): protege al ambiente a través de la prevención de la contaminación. Los principios que inspiran la ley son los siguientes: (1) Desarrollo sustentable.



(2) Prevención de la contaminación. (3) Principio de prevención. (4) Principio de “el contaminador paga”. (5) Eliminación de las amenazas a la diversidad biológica.

Ley Canadiense de los Incentivos para la Reducción de Emisiones (Canadian Emission Reduction Incentives Agency Act): promueve incentivos para la reducción o mitigación de gases de efecto invernadero a través de la adquisición, a favor del Gobierno del Canadá, de créditos creados como resultado de la reducción o mitigación de dichos gases (12).

3.3.2 Regulación Nacional

● **MARCO JURÍDICO BÁSICO, LEGAL Y REGULATORIO DEL SECTOR ENERGÉTICO**

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Artículo 115, fracción III: Los municipios, con el concurso de los Estados cuando así fuere necesario y lo determinen las leyes, tendrán a su cargo los siguientes servicios públicos: agua potable y alcantarillado; alumbrado público; limpia; mercados y centrales de abasto; panteones; rastro; calles, parques y jardines; seguridad pública y tránsito; y los demás servicios que las legislaturas locales determinen según las condiciones territoriales y socio-económicas de los municipios, así como su capacidad administrativa y financiera.

Artículo 27: Corresponde exclusivamente a la Nación generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público. No se otorgarán concesiones a los particulares y la Nación aprovechará los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines. Le corresponde también el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y la regulación de sus aplicaciones en otros propósitos. El uso de la energía nuclear sólo podrá tener fines pacíficos.

Artículo 73, fracción XXIX-A: El Congreso tiene facultad para establecer las contribuciones de energía eléctrica. Las legislaturas locales fijarán el porcentaje correspondiente a los Municipios en sus ingresos por concepto del impuesto sobre energía eléctrica (9).



Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.

Artículo 26: Para el despacho de los asuntos del orden administrativo en tema energético, el Poder Ejecutivo de la Unión contará con la Secretaría de Energía.

Artículo 33: Establece los asuntos correspondientes a la Secretaría de Energía, como definir y conducir la política energética del país, llevar a cabo la planeación energética, ejercer los derechos de la Nación en materia de hidrocarburos, minerales y recursos naturales requeridos para la gestión integral de la energía eléctrica. Aprobar los proyectos de exploración y explotación de hidrocarburos elaborados por PEMEX, promover el ahorro de energía y expedir las normas oficiales mexicanas sobre eficiencia energética, etc (9).

Ley de la Comisión Reguladora de Energía

La Comisión Reguladora de Energía (CRE) es un órgano federal desconcentrado de la Secretaría de Energía, a cargo de la regulación energética y es responsable de la concesión de licencias para el desarrollo de energía. Sus objetivos radican en promover el desarrollo eficiente del suministro y venta de energía eléctrica a los usuarios del servicio público; generación, exportación e importación de la energía eléctrica que realicen los particulares; servicios de conducción, transformación y entrega de energía eléctrica, entre las entidades que prestan el servicio público de energía eléctrica y los titulares de permisos para la generación, exportación e importación de energía eléctrica; transporte y distribución de gas; transporte y distribución de bioenergéticos; entre otros. La Ley establece las atribuciones, medio de organización y financiamiento para cumplir dichos objetivos (9).

La CRE ha expedido tres documentos relacionados con proyectos de aprovechamiento de energía renovables para la generación de electricidad.

Contrato de interconexión para fuente de energía renovable de tipo intermitente (CIEI), aplicable a contratos de autoabastecimiento que utilizan fuentes renovables intermitentes (eólica, solar e hidráulica –si no se puede regular el flujo de agua-) donde el punto de generación se ubica en un sitio distinto del punto de consumo.



Contrato de interconexión para fuente de energía solar en pequeña escala, permite a casas habitación y comercios pequeños conectados a la red eléctrica, generar su propia energía eléctrica aprovechando la energía solar; en caso de haber excedentes de producción, el particular puede intercambiarla por el consumo en un momento futuro; aplica para proyectos menores a 30 kW.

Modelo de contrato de compromiso de compraventa de energía eléctrica para pequeño productor en el Sistema Interconectado Nacional, se aplica en proyecto que generan electricidad para su venta a la red eléctrica, con capacidad menor de 30 MW, recibiendo beneficios en los pagos si se utilizan energías renovables.

Ley de la Comisión Nacional de Hidrocarburos

La Comisión Nacional de Hidrocarburos es un órgano desconcentrado de la Secretaría de energía, cuyo objetivo principal es regular y supervisar la exploración y extracción de hidrocarburos, que se encuentren en mantos o yacimientos, cualquiera que fuere su estado físico, y que compongan o se deriven del aceite mineral crudo, así como de las actividades de proceso, transporte y almacenamiento que se relacionen directamente con los proyectos de exploración y extracción de hidrocarburos. La Ley establece las atribuciones de la Comisión y la forma de integración y funcionamiento de su Órgano de Gobierno (9).

Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE)

Corresponde a la Nación, generar, conducir, transformar, distribuir, abastecer y cualquier acto relacionado con la prestación del servicio público de energía eléctrica. La Ley establece los actos que no son considerados servicio público; indica los objetivos de la CFE, la forma de integrar la Junta de Gobierno, la composición del patrimonio de la CFE; regula la participación y capacitación de los trabajadores electricistas; implementa las bases para las instalaciones y mantenimiento de obras eléctricas; indica el medio y las condiciones de suministro de energía eléctrica, las causas de suspensión del servicio; las sanciones que habrá en caso de cumplir infracciones como consumir energía eléctrica sin haber celebrado algún contrato; indica los recursos administrativos, el nivel de competencia y el aprovechamiento para las obras de infraestructura con las que cuenta el sector eléctrico para lograr



sus objetivos; define las condiciones para otorgar permisos de autoabastecimiento, cogeneración, producción independiente, importación y exportación de energía eléctrica, así como las causales de revocación de los permisos correspondientes. (Esta Ley no permite la compra-venta libre, pero si la generación de electricidad entre particulares, para autoabastecimiento o para complementar el servicio ordinario con cogeneración; siempre y cuando los usuarios participen en el capital accionario de la empresa generadora y obtengan un permiso de CFE) (9).

Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear.

Regula la exploración, explotación y beneficio de minerales radiactivos, así como el aprovechamiento de los combustibles nucleares, los usos de la energía nuclear, la investigación de la ciencia y técnicas nucleares y la industria nuclear, considerando que el uso sólo podrá tener fines pacíficos. La Ley define los tipos de instalaciones y materiales a utilizar, establece las fases de refinación y quemado para la fabricación de combustibles, así como las medidas de seguridad en el diseño, construcción, operación, cierre y desmantelamiento de las plantas; establece los objetivos y actividades del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (9).

Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares.

Regula la responsabilidad civil por los daños que pueden causarse por el empleo de reactores nucleares y la utilización de sustancias y combustibles nucleares y/o desechos de estos. La ley establece los límites y niveles de la responsabilidad por el empleo de sustancias nucleares y por accidentes ocasionados durante el manejo de los mismos (9).

En la Tabla 3.2 se enlistan los Reglamentos, Decretos, Acuerdos y Disposiciones Administrativas vigentes en materia del Marco Jurídico Básico, Legal y Regulatorio del Sector Energético y en la Tabla 3.3 se enlistan las Leyes, Reglamentos, Decretos, Acuerdos y Disposiciones Administrativas vigentes en materia de Hidrocarburos (21).



Tabla 3.2 Marco Jurídico del Sector Energético

Reglamentos	Decretos	Acuerdos	Disposiciones Administrativas
Reglamento Interior de la Secretaría de Energía.	Decreto por el que se aprueba el Programa Sectorial de Energía 2007-2012.	Acuerdo por el que se establecen los Lineamientos para la emisión del dictamen a que hace referencia el artículo 193 A del Reglamento de la Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria sobre los proyectos de infraestructura productiva de largo plazo del Sector Energía.	Aviso que da a conocer la lista general de unidades de verificación acreditadas por la Entidad Mexicana de Acreditación, A.C. en las áreas de instalaciones eléctricas, eficiencia energética, gas natural, gas L.P., medio ambiente, etc.
Reglamento Interior de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. (2006)	Decreto por el que se crea la Comisión Reguladora de Energía.	Guía para la Presentación de Proyectos de Infraestructura Productiva de Largo Plazo Exploración y Explotación de Hidrocarburos.	Aviso que comunica que todos los trámites y servicios que aplica la Secretaría de Energía, han quedado inscritos en el Registro Federal de Trámites y Servicios de la Comisión Federal de Mejora Regulatoria.
Reglamento Interno de la Comisión Nacional de Hidrocarburos. (2012)	Decreto por el que se crea la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.	Guía para la Presentación de Proyectos de Infraestructura Productiva de Largo Plazo, Sector Eléctrico.	Lineamientos para la integración y funcionamiento de los Comités de Auditoría Independientes en Petróleos Mexicanos, en la CFE.
Reglas de funcionamiento del Consejo Nacional de Energía. (2009)	DECRETO por el que se extingue el organismo descentralizado Luz y Fuerza del Centro	Guía para la Presentación de Proyectos de Infraestructura Productiva de Largo Plazo, Sector Hidrocarburos, Transformación Industrial y Actividades Conexas.	Manual de Servicios al Público en Materia de Energía Eléctrica
Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (2011)		Acuerdo que establece las disposiciones generales para el Programa de Ahorro de Energía en la Administración Pública Federal	Manual de Disposiciones Relativas al Suministro y Venta de Energía Eléctrica destinada al Servicio Público
Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica en Materia de Aportaciones (2011)	Decreto por el que se crea el Instituto de Investigaciones Eléctricas	Acuerdo por el que se aprueban los formatos de solicitud de: permiso de generación e importación; autorización para modificar las condiciones de generación o importación; de informe estadístico de operación eléctrica; de autorización para la	Resolución por la que se aprueba la metodología para la determinación del costo total de corto plazo que se utilizará para el pago de la energía eléctrica que entreguen los permisionarios a la Comisión Federal de Electricidad.



Reglamentos	Decretos	Acuerdos	Disposiciones Administrativas
Reglamento General de Seguridad Radiológica (2003)		transferencia y renovación de los derechos derivados del permiso de producción independiente, a que se refieren la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su Reglamento.	Resolución por la que se aprueban modificaciones a los modelos de Contratos de Interconexión y de Compromiso de Compraventa de Energía Eléctrica para Pequeño Productor en el Sistema Interconectado Nacional, así como al Convenio de Compraventa de Excedentes de Energía Eléctrica.

Tabla 3.3 Marco Legal en materia de Hidrocarburos

Leyes	Reglamentos	Decretos	Acuerdos	Disposiciones Administrativas
Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo (2008)	Reglamento de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo	Decreto que crea el Instituto Mexicano del Petróleo como Organismo Descentralizado	Acuerdo por el que se establecen los Lineamientos por los cuales la Secretaría de Energía vigilará y verificará el cumplimiento, implementación y ejecución de la normativa de Petróleos Mexicanos y sus Organismos Subsidiarios, en relación con las condiciones de seguridad industrial en materia de transformación de hidrocarburos.	RESOLUCION por la que la Comisión Reguladora de Energía establece la metodología para la determinación del precio del metano objeto de venta de primera mano.
Ley Minera (2006)	Reglamento de la Ley Minera, en materia de gas asociado a los yacimientos de carbón mineral.			
Ley de Petróleos Mexicanos (2008)	Reglamento de la Ley de Petróleos Mexicanos	Decreto por el que se sujeta el gas licuado de petróleo a precios máximos de venta de primera mano y de venta a usuarios finales.		
	Reglamento de Gas Natural			
	Reglamento de Gas Licuado de Petróleo			



● **MARCO LEGAL Y REGULATORIO DEL SUBSECTOR DE PLANEACIÓN
ENERGÉTICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO.**

Ley de Ciencia y Tecnología (2014)

Es reglamentaria de la fracción V del artículo 3º constitucional. Sus objetivos consisten en regular los apoyos que otorga el Gobierno Federal para impulsar, desarrollar y consolidar la investigación científica, y el desarrollo tecnológico; establecer las instancias y mecanismos, así como la vinculación y participación de la comunidad científica y académica de las instituciones de educación superior, para la promoción, difusión, desarrollo y aplicación de la ciencia y la tecnología; apoyar la capacidad y fortalecimiento de los grupos de investigación científica y tecnológica, determinar las bases para que las entidades paraestatales realicen investigación. Establece la integración del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación; así como la integración y facultades del Consejo General de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación. Indica los principios, instrumentos y fondos de apoyo para investigación e innovación tecnológica, científica; y las responsabilidades del CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología). Formula las bases para el Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación; y la vinculación de la Educación y del Sector Productivo y de Servicios con la Investigación Científica, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (9).

Ley Orgánica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (2014)

El CONACYT es un organismo descentralizado y autónomo cuyos objetivos son formular y proponer las políticas nacionales en materia de ciencia y tecnología; apoyar la investigación científica y consolidar grupos investigadores; impulsar la innovación y el desarrollo tecnológico, así como fortalecer las capacidades tecnológicas de la planta productiva nacional; proponer al Consejo General de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico el programa especial de ciencia y tecnología; asesorar en materia de ciencia y tecnología a dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, Municipal y sectores sociales o privados; proponer los criterios de asignación del gasto para ciencia y tecnología; emitir los criterios generales, términos de referencia y parámetros de evaluación para medir el impacto, los resultados y beneficios de los recursos asignados a los programas



de las dependencias que realicen investigación científica y tecnológica; apoyar la conformación de una Red Nacional de Grupos y Centros de Investigación para definir estrategias y programas conjuntos; aportar recursos a los centros de investigación en función de programas de la misma Ley; formular y financiar programas de becas y en general de apoyo a la formación de recursos humanos; promover las publicaciones científicas mexicanas y fomentar la difusión sistemática de los trabajos realizados; etc (9).

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (2014)

Reglamenta las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos referidos a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción; mediante evaluaciones de Impacto Ambiental. Tiene por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para: definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación; la preservación, restauración y mejoramiento del ambiente; el aprovechamiento sustentable, la preservación y la restauración del suelo, agua y demás recursos naturales, haciendo compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas; por mencionar los principales aspectos. Establece que los recursos naturales renovables deben aprovecharse asegurando el mantenimiento de su diversidad y renovabilidad. En algunas zonas el aprovechamiento y manejo de recursos renovables se permitirá sólo si genera beneficios para los pobladores locales, la investigación científica, la educación ambiental y el desarrollo de actividades turísticas de bajo impacto ambiental (9).



Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2008)

Objetivo: promoción y desarrollo de los bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo sustentable como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano; establece las bases para:

1. Promover la producción de insumos para bioenergéticos a partir de diversas actividades, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país.
2. Desarrollar producción, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos.
3. Promover el desarrollo regional y el de las comunidades rurales.
4. Reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera y los GEI.

Se crea la Comisión de Bioenergéticos integrada por titulares de SE, SAGARPA, SENER, SEMARNAT, y SHCP; para participar en el Plan Nacional de Desarrollo en la elaboración de programas de producción, comercialización de insumos, almacenamiento, transporte, distribución, y uso de los bioenergéticos; establecer los indicadores para determinar su cumplimiento; fomentar la agroindustria, la inversión en infraestructura y el uso de tecnologías eficientes; aportar elementos para impulsar el desarrollo de energías renovables en la formulación de políticas nacionales; definir criterios para la asignación del gasto público federal para la promoción y desarrollo de los bioenergéticos, incluyendo áreas estratégicas, programas a los que se les otorgará especial atención y apoyo presupuestal. En la **Tabla 3.4**⁹ se indican algunas de las actividades de las distintas Dependencias.

⁹ Elaboración propia



Tabla 3.4 Responsabilidades en materia de bioenergéticos.

SAGARPA	SENER	SEMARNAT
Producción y comercialización sustentable de insumos para la producción de bioenergéticos.	Producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de bioenergéticos.	Controlar la contaminación del agua, suelo y atmósfera, originada por actividades de producción de insumos y bioenergéticos.
Elaborar programas sectoriales y anuales y expedir las NOM.	Elaborar programas sectoriales y anuales y expedir los NOM, criterios, lineamientos y regulaciones.	Expedir NOM relativas a los requisitos, características y medidas de seguridad para certificar la protección al ambiente.
Evaluar el impacto en materia de seguridad, desarrollo rural y soberanía alimentaria.	Proponer a la SE, las políticas, instrumentos, criterios y acciones para desarrollar bioenergéticos.	Evaluar en materia de impacto ambiental las instalaciones para producción, almacenamiento, transporte, distribución y comercialización de bioenergéticos.
Elaborar el Programa de producción sustentable de Insumos para Bioenergéticos y Desarrollo Científico y Tecnológico	Elaborar el Programa de Introducción de Bioenergéticos, considerando la producción nacional sobre la importación, definiendo plazos y regiones para adicionar etanol como componente de la gasolina, e incorporar biodiesel al consumo.	Aplicar regulaciones en materia forestal, de vida silvestre y bioseguridad de organismos modificados genéticamente (Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados) para asegurar la preservación, restauración, aprovechamiento sustentable y biodiversidad de los recursos naturales.
Imponer sanciones por infracción a las leyes y disposiciones aplicables	Imponer sanciones por infracción a las leyes y disposiciones aplicables	Vigilar el cumplimiento de las leyes y disposiciones ambientales; ordenar medidas de seguridad y sancionar por su incumplimiento.
Asesorar a los productores para el desarrollo de bio-cultivos	Evaluar el impacto, sobre el balance energético, incluyendo un ACB.	Evaluar aspectos de sustentabilidad para el desarrollo de la producción de insumos y bioenergéticos.
Otorgar permisos para la producción de bioenergéticos a partir del grano de maíz	Emitir NOM y lineamientos, que establezcan características y calidad de los bioenergéticos para su mezcla con gasolina y diesel, así como etanol y biodiesel sin mezclar cuando sean tecnológica y ambientalmente recomendables.	Vigilar que no se realice el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola con el fin de establecer cultivos para la producción de Bioenergéticos.



Instrumentos para desarrollo y promoción de bioenergéticos

Las Dependencias emitirán instrumentos, procedimientos y reglas para impulsar el desarrollo sustentable de la producción, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de los insumos y los bioenergéticos. Se dirigen a los productores de insumos, para impulsar la productividad, fomentar la generación de empleos, motivar la creación, consolidación de empresas rurales (cuya participación deberá ser de al menos 30 %) y garantizar la protección de los recursos naturales. Para cuantificar y seleccionar el tipo de incentivo más adecuado entre los instrumentos de apoyo que se otorgará para hacer competitiva la producción de insumos agrícolas, las Secretarías consideran el comportamiento de los precios¹⁰.

Las Secretarías y los Gobiernos, promoverán el desarrollo industrial y de infraestructura para la obtención de bioenergéticos, mediante incentivos dirigidos a quienes contribuyan a través de la fabricación, adquisición, instalación, operación y mantenimiento de maquinaria. Igualmente, considerarán a quienes realicen investigaciones técnicas, cuya aplicación disminuya la generación de emisiones contaminantes a la atmósfera, agua, suelos, y sitios, así como a la innovación tecnológica en las plantas de producción.

Investigación y capacitación

La SAGARPA y la SENER ofrecen apoyo a la investigación científica y tecnológica para la producción y uso de los bioenergéticos; capacitan a las autoridades competentes; establecen los procedimientos de evaluación para determinar la viabilidad de los proyectos de producción; brindan las condiciones para llevar a cabo la producción en equilibrio con el ambiente.

La Comisión de Bioenergéticos establece las bases y capacitación para impulsar la investigación científica y tecnológica. El Sistema Nacional de Investigación y Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Rural Sustentable, será la instancia encargada de coordinar y orientar dicha investigación en materia de insumos, así como el desarrollo, innovación y transferencia tecnológica que requiera el sector.

¹⁰ Costos de insumos, tipos de cambio, tasa de rentabilidad anual promedio del cultivo correspondiente.



Procedimientos, infracciones, sanciones y permisos.

Las actividades y servicios relacionados con producción, almacenamiento, transporte y distribución por ductos, así como la comercialización de bioenergéticos, se sujetarán a permiso previo de la SENER quien informará a la Comisión de Bioenergéticos sobre los permisos otorgados. Se debe garantizar la transparencia en los procedimientos administrativos e incorporar mecanismos de control accesibles a los productores.

Se considera infracciones a la ley: la realización de actividades sin contar con el permiso correspondiente; el incumplimiento de los términos y condiciones establecidos por los permisos, incumplimiento de disposiciones aplicables en materia de bioenergéticos. Por las cuales se sancionará con: multa de 1 000 a 100 000 salarios mínimos, revocación de permisos, y clausura total o parcial, permanente o temporal de las instalaciones.

Las controversias ocurridas durante las transacciones a lo largo de las cadenas productivas de insumos, en materia de calidad, cantidad y oportunidad de los productos, servicios financieros, servicios técnicos, equipos, tecnología y bienes de producción, se resolverán a través del Servicio Nacional de Arbitraje. Las que se susciten respecto de las transacciones y actividades relacionadas con producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de bioenergéticos, se resolverán a través de un procedimiento de arbitraje opcional ante la Secretaría de Energía (9).

Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) (2013)

Objetivo: regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética. Excluye minerales radioactivos, energía hidráulica con capacidad de generar más de 30 MW, residuos que reciban tratamiento térmico y aprovechamiento de rellenos que no cumplan con la normatividad. En la Tabla 3.5 se indican algunas de las actividades



de las distintas Autoridades competentes en materia de aprovechamiento de Energías Renovables, la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE)

Tabla 3.5 Responsabilidades en materia de energías renovables

SENER		CRE
Elaborar el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables.	Promueve acciones de apoyo al desarrollo industrial para el aprovechamiento de las ER.	Expedir disposiciones administrativas que regulen la generación de electricidad a partir de ER.
Junto con la SE define las políticas para fomentar la integración nacional de equipos y componentes para el aprovechamiento de las ER	Facilita el acceso a las zonas con alto potencial de fuentes renovables para su aprovechamiento, y promueven la compatibilidad de uso de suelo para esos fines.	Establecer los instrumentos de regulación para el cálculo de las contraprestaciones por los servicios que se presten entre sí los suministradores y generadores.
Observa los compromisos internacionales adquiridos por México en materia de aprovechamiento de energías renovables y el cambio climático.	Define junto con la SE políticas y medidas para fomentar mayor integración nacional de equipos y componentes para el aprovechamiento de las ER y su transformación eficiente.	Expedir las metodologías para determinar la aportación de capacidad de generación de las tecnologías de energías renovables al Sistema Eléctrico Nacional.
Establece el Inventario Nacional de las Energías Renovables con programas y planes a corto, mediano y largo plazo, comprendidos en Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables.	Elabora junto con SHCP, SS y SEMARNAT, metodologías para valorar las externalidades asociadas con la generación de electricidad, basada en ER. Con las metodologías la SEMARNAT diseñará mecanismos de regulación ambiental	Expedir procedimientos de intercambio de energía y las compensaciones, para proyectos y sistemas de autoabastecimiento, cogeneración o pequeña producción por energías renovables, que estén conectados con las redes del Sistema Eléctrico Nacional

Planeación y Regulación.

La SENER promueve la participación durante la planeación, aplicación y evaluación del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables; para lo cual establece los objetivos y las metas de los Suministradores y Generadores, considera la construcción de obras de infraestructura, la diversidad y disponibilidad de las ER, fomenta proyectos en materia de ER para proveer energía eléctrica a comunidades rurales, etc.

Durante la elaboración del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables se deben considerar los beneficios económicos netos potenciales y los pagos y costos derivados de la capacidad de generación de energía asociada a los proyectos de aprovechamiento de ER.



La Comisión Reguladora de Energía expedirá las directrices de los modelos de contrato entre los Suministradores y Generadores que utilicen ER; fijará las contraprestaciones en el caso de venta de energía sobrante después del autoconsumo; y establecerá las condiciones para los servicios de conducción, transformación y entrega de la energía eléctrica.

Para proyectos de 2.5 MW se asegurará la participación de las comunidades locales y regionales a fin de propiciar el desarrollo social de la comunidad, conforme a las prácticas internacionales y a la normatividad aplicable en tema de desarrollo rural sustentable, protección ambiental y derechos agrarios; si se acuerda en el contrato, se pagará el arrendamiento de los terrenos ocupados por proyectos de ER.

Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

Existe un Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, con un comité integrado por representantes de la SENER, SHCP, SEMARNAT, CFE, IMP, IIE y CONACYT. El cual para potenciar el financiamiento disponible para la transición energética, el ahorro de energía, las tecnologías limpias y el aprovechamiento de las energías renovables, podrá acordar que con cargo al Fondo se utilicen recursos no recuperables para el otorgamiento de garantías de crédito u otro tipo de apoyos financieros para los proyectos. Esto se controlará con auditorías, evaluaciones y rendiciones de cuentas (9).

Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (LASE) (2008)

Objetivo: propiciar el aprovechamiento sustentable de la energía mediante el uso óptimo de la misma en todos sus procesos y actividades, desde su explotación hasta su consumo.

Planeación y participación social.

Se promoverá la participación social, con el fin de vincular instituciones académicas y del sector público, organizaciones de la sociedad civil y del sector privado y a la población en general; para el diseño y aplicación de los programas de aprovechamiento sustentable de la energía.



Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (2009)

Programa mediante el cual el Ejecutivo Federal establece estrategias, objetivos, acciones y metas que permitan alcanzar el uso óptimo de la energía en los procesos y actividades de su explotación, producción, transformación, distribución y consumo. El Programa debe propiciar la investigación científica y tecnológica para aprovechar sustentablemente la energía.

Para apoyo al cumplimiento al marco legal, el gobierno federal ha creado la **Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE)**, que es un órgano administrativo que promueve la eficiencia energética, y de carácter técnico en materia de aprovechamiento de energía; cuyas facultades son: emitir metodologías para cuantificar las emisiones de GEI por la explotación, producción, transformación, distribución y consumo de energía así como cuantificar el uso de energéticos y determinar el valor económico del aprovechamiento sustentable de la energía consumida; implementa la información de los fondos y fideicomisos que apoyen el aprovechamiento sustentable de la energía y que reciban recursos federales; supervisa la ejecución de los procesos voluntarios que desarrollen los particulares para mejorar su eficiencia energética; entre otras.

Consejo Consultivo para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

Instancia de la CONUEE que evalúa el cumplimiento de los objetivos, estrategias, acciones y metas establecidas en el Programa, promueve la participación del sector privado en la aplicación de los programas en materia de aprovechamiento sustentable de la energía; propone mecanismos para la planeación, desarrollo y ejecución de los programas de eficiencia energética, por mencionar algunos.

Subsistema Nacional de Información sobre el Aprovechamiento de la Energía.

Registra, organiza, actualiza y difunde la información sobre: el consumo de energía en las distintas regiones geográficas del país y para los diferentes usos; indicadores de eficiencia energética que describen la relación en los usos finales y los factores que los impulsan, así como la comparación con otros países.



Para la integración de la información, todos los usuarios de alto consumo de energía deberán proporcionar a la Comisión información sobre la producción, exportación, importación y consumo de energía según el energético; eficiencia energética; y las medidas y resultados de la conservación de energía.

Información en Materia de Eficiencia Energética.

Los equipos y aparatos que requieren del suministro de energía para su funcionamiento, deben incluir de forma clara y visible la información sobre su consumo energético. Los organismos públicos y empresariales del sector energético deben incluir en sus recibos de pago, leyendas para incentivar el uso eficiente de la energía y sus beneficios en la preservación del medio ambiente.

Procesos Voluntarios para la Eficiencia Energética.

Los particulares pueden realizar el examen metodológico de sus operaciones respecto del grado de información de la eficiencia energética, del grado de cumplimiento de la normatividad, de los parámetros internacionales y de las prácticas de operación e ingeniería aplicables, con el objeto de definir las medidas preventivas y correctivas necesarias para optimizar la eficiencia energética.

La CONUEE para fomentar la certificación de procesos, productos y servicios, debe elaborar los términos de referencia que establezcan la metodología para la realización de la certificación; establecer un sistema de aprobación y acreditación de peritos y auditores; desarrollar programas de capacitación; e instrumentar sistemas de reconocimientos para identificar a las industrias certificadas.

Responsabilidades administrativas de los servidores públicos y sanciones.

El incumplimiento de las obligaciones establecidas en esta Ley para los servidores públicos, será sancionado en términos de la Ley Federal de Responsabilidades Administrativas de los Servidores Públicos, y son independientes de las del orden civil o penal que procedan.

Sanción de cien a mil veces el salario mínimo a los usuarios de alto consumo de energía que no proporcionen información correcta al Subsistema.



Sanción de cien a diez mil veces el salario mínimo a quien fabrique o comercialice equipos que requieran suministro de energía, no cuenten con la información de su consumo energético y no constituya una práctica que induzca a error; de tres a catorce mil veces si la información proporcionada es falsa o incompleta y que constituya una práctica que induzca a error; de cinco mil a veinte mil a quien comercialice con equipos de información falsa o incompleta y que induzca a prácticas erróneas. Para imponer las multas debe considerarse si es reincidencia, el daño causado, la duración de la conducta y los antecedentes del infractor (9).

Ley de Aguas Nacionales (2013)

En términos de esta Ley (artículo 81) las personas físicas o morales, solicitan la concesión a la CFE cuando requieren explotar y hacer uso de las aguas del subsuelo en estado de vapor o con temperatura superior a 80 °C, cuando pueda afectarse un acuífero, con el objeto de generar energía eléctrica (energía geotérmica). La concesión no se requerirá si el uso es para generación hidroeléctrica en pequeña escala (9) (22).

En la **Tabla 3.6** se enlistan los Reglamentos, Decretos, y Disposiciones Administrativas vigentes en materia del Marco Legal y Regulatorio del Sector Energético, en el Subsector de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. En la Tabla 3.7 se enlistan otras Disposiciones Jurídicas Aplicables en materia de Desarrollo Sustentable y uso de Energías Renovables (21).

La generación eléctrica producida por fuentes geotérmicas es regulada por el artículo 81 de esta Ley, el cual establece que “La explotación, el uso o aprovechamiento de aguas de subsuelo en estado de vapor o con temperatura superior a 80 °C, cuando se pueda afectar un acuífero, requerirán de la concesión previa para generación geotérmica u otros usos, además de evaluar el impacto ambiental”, sin embargo, este artículo carece de reglamento (22).



Tabla 3.6 Subsector de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico.

Reglamentos	Decretos	Disposiciones Administrativas
Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.	Decreto por el que se aprueba el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables	LINEAMIENTOS para la entrega de información, por parte de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, sobre los usuarios con un patrón de alto consumo de energía.
Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.		
Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergético.		
Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Impacto Ambiental	Decreto por el que se aprueba el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.	LINEAMIENTOS de eficiencia energética para la Administración Pública Federal.
Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales		

Tabla 3.7 Leyes en materia de Desarrollo Rural Sustentable mediante ER.

Leyes	
Ley de Energía para el Campo	Ley General de Bienes Nacionales
Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar	Ley de Desarrollo Rural Sustentable

Metodología para la Determinación de los Cargos por Servicios de Transmisión de Energía Eléctrica para Fuentes de Energía Renovable. Convenio para el Servicio de Transmisión (2010)

Establece la Metodología de Transmisión para Fuentes de Energía Renovable que debe seguir la Comisión Federal de Electricidad al calcular los cargos correspondientes a solicitudes de Servicios de Transmisión. Esta Metodología sirve para cumplir con los objetivos de cumplir con la política energética del país, promover el desarrollo de proyectos a partir de fuentes renovables de energía y cogeneración eficiente, mejorar la eficiencia global de uso del sistema, asegurar pagos justos y proporcionales por parte de los permisionarios que utilicen los servicios de transmisión; promover la participación social y privada en el desarrollo eficiente de proyectos de generación; entre otros. Establece las bases,



procedimientos, términos y condiciones para que el suministrador proporcione al permisionario el servicio de transmisión (23) (24).

Contrato de Interconexión para fuentes de Energías Renovables (2010)

Realiza y mantiene la interconexión entre el Sistema y la Fuente de Energía Renovable, así mismo establece las condiciones para los actos jurídicos que celebren las partes relacionadas con la generación y transmisión a los puntos de carga. Es aplicable para los permisionarios que entreguen energía eléctrica exclusivamente a instalaciones de municipios, de entidades federativas o del gobierno federal, con energía renovable del tipo intermitente o continua (25).

Las **Normas Oficiales Mexicanas (NOM)** para cuestiones ambientales son una herramienta que permite a la autoridad correspondiente establecer obligaciones, especificaciones, condiciones y procedimientos, para regular la explotación de los recursos naturales para el desarrollo económico. Las NOM desempeñan un papel esencial en la creación de un ambiente de seguridad jurídica y en la promoción del cambio tecnológico para lograr una protección ambiental más eficiente.

● **NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE ELECTRICIDAD.**

NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas (utilización).

Establece las especificaciones y lineamientos de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas a la utilización de la energía eléctrica, a fin de que ofrezcan las condiciones adecuadas de seguridad para las personas y sus propiedades, en lo referente a la protección contra choques eléctricos, efectos térmicos, sobrecorrientes, corrientes de falla y sobretensiones. La Norma cubre los circuitos alimentados con una tensión nominal de hasta 600 V de corriente alterna, 1500 V de corriente continua y algunas especificadas por arriba de estos valores; circuitos que no sean los internos de aparatos; todas las instalaciones del usuario situadas fuera de edificios; alambrado fijo para telecomunicaciones; señalización y control; y modificaciones a las instalaciones (26).



NOM-002-SEDE-1999, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.

Establece los requisitos mínimos de seguridad y eficiencia energética que deben cumplir los transformadores de distribución (de los tipos: poste, subestación, pedestal y sumergible, y autoenfriados en líquido aislante) y establece los métodos de prueba que deben realizarse para evaluar estos requisitos (27).

NOM-003-SCFI-2000, Productos eléctricos-Especificaciones de seguridad.

Establece las especificaciones de seguridad que deben cumplir los aparatos y productos eléctricos, con el propósito de prevenir y eliminar peligro de daño corporal de los usuarios y para la conservación de sus bienes (28).

NOM-022-STPS-2008, Electricidad estática en los centros de trabajo- Condiciones de seguridad.

Establece las condiciones de seguridad en los centros de trabajo para prevenir los riesgos por electricidad estática. Indica las obligaciones del patrón y de los trabajadores. Así como las condiciones de seguridad, la instalación de pararrayos, y el tipo de vigilancia entre otros (29).



● **NOM – Eficiencia Energética.**

En la Tabla 3.8 se enlistan las NOM en materia de ahorro de energía, preservación y uso racional de los recursos energéticos (21) (30) (31) (32).

Tabla 3.8 NOM en materia de ahorro, preservación y uso racional de energía.

Norma	Descripción
NOM-001-ENER-2000	Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical.
NOM-004-ENER-2008	Eficiencia energética de bombas y conjunto motor-bomba, para bombeo de agua limpia, en potencias de 0.187 a 0.746 kW.
NOM-005-ENER-2010	Eficiencia energética de lavadoras de ropa electrodomésticas.
NOM-006-ENER-1995	Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba.
NOM-007-ENER-2004	Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales.
NOM-008-ENER-2001	Eficiencia energética en edificaciones, envolventes de edificios no residenciales.
NOM-009-ENER-1995	Eficiencia energética en aislamientos térmicos industriales.
NOM-010-ENER-2004	Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y método de prueba.
NOM-011-ENER-2006	Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo central paquete o dividido.
NOM-013-ENER-2004	Eficiencia energética en sistemas de alumbrado en vialidades y áreas exteriores públicas
NOM-014-ENER-2004	Eficiencia energética de motores de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0.180 a 1.500 kW.
NOM-015-ENER-2002	Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos.
NOM-016-ENER-2002	Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0.746 a 373 kW.
NOM-017-ENER-1997	Eficiencia energética de lámparas fluorescentes compactas.
NOM-021-ENER/SCFI-2008	Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto.
NOM-022-ENER/SCFI/ECOL-2008	Eficiencia energética, requisitos de seguridad para aparatos de refrigeración comercial.
NOM-113-SEMARNAT-1998	Establece las especificaciones de protección ambiental para la planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de subestaciones eléctricas de potencia o de distribución que se pretendan ubicar en áreas urbanas, suburbanas, agropecuarias, rurales, industriales, de equipamiento urbano o de servicios y turísticas
NOM-114-SEMARNAT-1998	Establece las especificaciones de protección ambiental para la planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de líneas de transmisión y de subtransmisión eléctrica que se pretendan ubicar en áreas urbanas, suburbanas, rurales, agropecuarias, industriales, de equipamiento urbano o de servicios y turísticas.



● **NOM y Especificaciones Relativas a Proyectos de Energías Renovables.**

En la Tabla 3.9 se enlistan las NOMs que podrían tener inferencia en proyectos particulares de las distintas fuentes de energías renovables (33) (34) (35).

Tabla 3.9 NOM en materia de ejecución de proyectos de ER.

Norma	Descripción	
Energía eólica		
NOM-011-STPS-2001	Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido.	
NOM-081-SEMARNAT-1994	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.	
En el caso de implementación de proyectos de energía eólica y en el diseño de aerogeneradores. Se debe consultar la NOM-011-STPS-2001, para verificar las medidas de seguridad que deben considerarse para que el ruido producido por las máquinas eólicas no cause afectaciones a los trabajadores del parque eólico, a la población circundante ni a la fauna que habite ese lugar; y la NOM-081-SEMARNAT-1994 que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido generadas por fuentes fijas en la pequeña, mediana y gran industria, comercios establecidos, servicios públicos y privados y actividades en la vía pública.		
NOM-151-SEMARNAT-2006	Que establece las especificaciones técnicas para la protección del medio ambiente durante la construcción, operación y abandono de instalaciones eoloelectricas en zonas agrícolas, ganaderas y en zonas sin cultivar.	
Normas Mexicanas	NMX-AA-40 NMX-AA-43 NMX-AA-62	Clasificación de ruidos. Determinación del nivel sonoro emitido por fuentes fijas. Determinación de los niveles de ruido ambiental.
Bioenergía		
NOM-021-SSA1-1993	Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.	
En todos los procesos de generación de energía eléctrica donde ocurran emisiones contaminantes a la atmósfera debe consultarse la NOM-021-SSA1-1993 para verificar que la emisión de CO esté dentro de los límites permisibles.		
NOM-041-SEMARNAT-1999	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases de contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.	
NOM-042-SEMARNAT-1999	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas provenientes del escape de vehículos automotores nuevos en planta, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel de los mismos, con peso bruto vehicular que no exceda los 3.856 kilogramos.	
Deben considerarse estos límites de emisiones (de hidrocarburos, monóxido de carbono, oxígeno, niveles de dilución, medición de óxidos de nitrógeno) en el caso de utilización de gasolina en combinación con bioetanol o de diesel en combinación con biodiesel, como fuentes combustibles para autotransporte		



Norma	Descripción
NOM-007-SEMARNAT-1997.	Que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de ramas, hojas o pencas, flores, frutos y semillas.
Geotermia	
NOM-150-SEMARNAT-2006	Que establece las especificaciones técnicas de protección ambiental que deben observarse en las actividades de construcción y evaluación preliminar de pozos geotérmicos para exploración, ubicados en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, fuera de áreas naturales protegidas y terrenos forestales.
NOM-023-RECNAT-2001	Que establece las especificaciones técnicas que deberán contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelos.

Especificaciones Técnicas.

Requerimientos para interconexión de aerogeneradores.

Establece los términos y condiciones para la interconexión de aerogeneradores al Sistema Eléctrico Nacional.

Especificación de interconexión en baja tensión de sistemas fotovoltaicos con capacidad de hasta 30 kW.

Define los requerimientos para el diseño, instalación, inspección, autorización y utilización de sistemas fotovoltaicos interconectados con la red eléctrica; garantiza la calidad de la energía y la integridad física y operacional tanto del personal de la CFE como de los usuarios y de los sistemas fotovoltaicos.



4. Metodología

La metodología utilizada para la elaboración del presente estudio de fuentes renovables de energía, se muestra en la Figura 4.1.

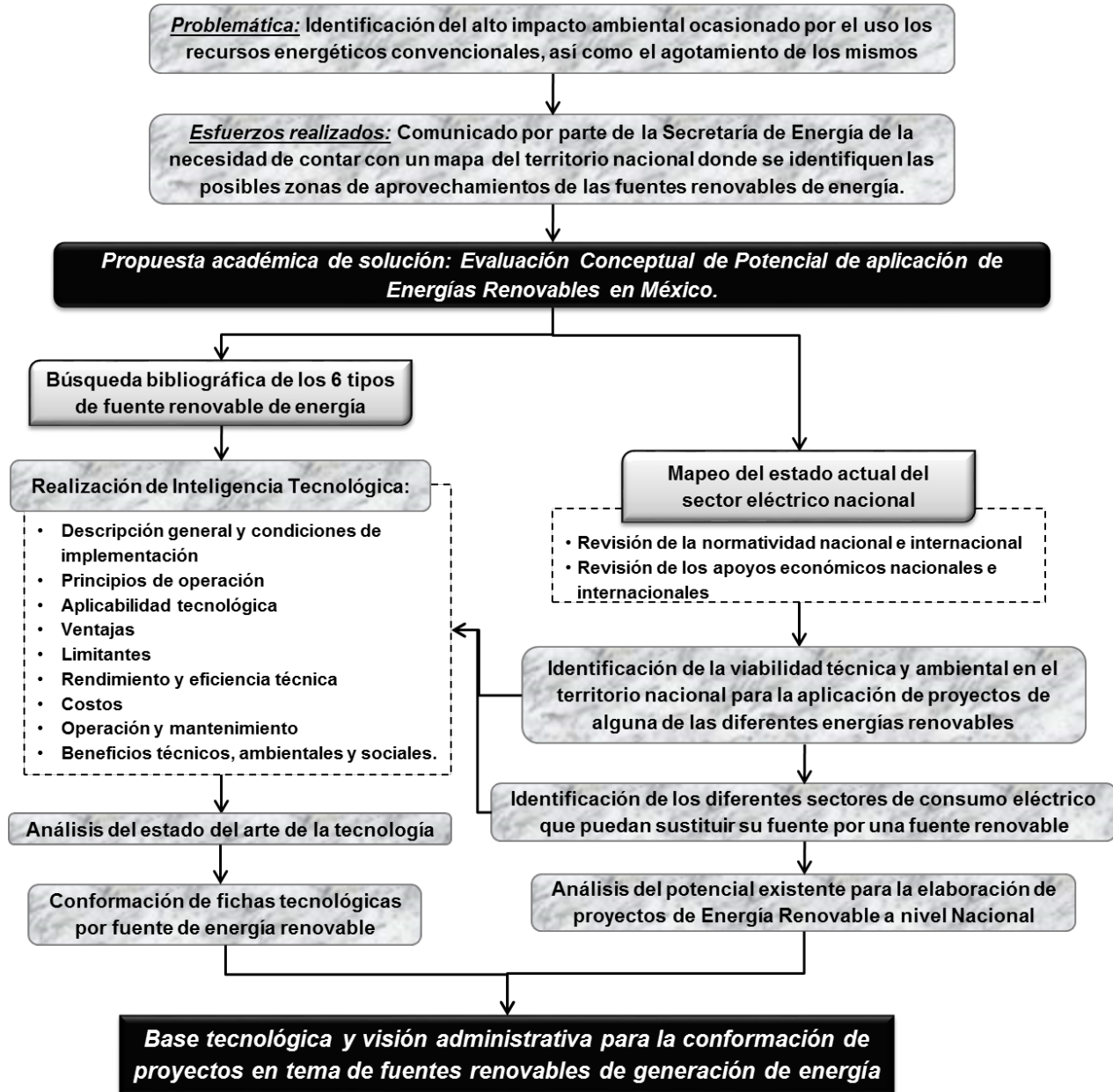


Figura 4.1 Metodología aplicada.



5. Establecimiento del potencial de aplicación de las ER en México.

5.1 Energía Solar

Es la energía que proporciona el sol a través de sus radiaciones, se propaga difusa o directamente en la atmósfera; y se obtiene mediante la captación de la luz y el calor que emite el sol.



La reacción básica en el interior del Sol es la fusión nuclear de cuatro protones de Hidrógeno para formar un átomo de Helio; como consecuencia de ello, se genera energía en forma de radiación. Este proceso tienen lugar en el núcleo de la esfera solar para luego ser transferida a la superficie a través de una sucesión de procesos de radiación y convección, incluidos los fenómenos de emisión, absorción y “re-radiación”; así, la energía solar que llega a la Tierra es radiada por el Sol, desde la parte más externa de la esfera solar, a una razón de 64 MW/m^2 .

La luz solar encuentra primero la atmósfera; su absorción es directamente proporcional a la cantidad de atmósfera que los rayos solares tengan que atravesar para llegar a la superficie terrestre. Si los rayos llegan en el exacto punto perpendicular a la atmósfera, (Ecuador), la cantidad de energía absorbida por la atmósfera será mínima, ya que atravesará una capa más delgada. Del 100 % de la luz que llega a la atmósfera en este punto, como promedio a mediodía, 71 % alcanza a llegar a la superficie terrestre. Por el contrario, si los rayos llegan en un punto tangente tienen que atravesar una mayor parte de la atmósfera para llegar a la superficie, por lo que ésta recibirá una energía solar menor. La absorción de la luz solar está determinada también por otros factores, como la contaminación atmosférica y las condiciones climáticas; en un día nublado, se puede absorber solamente el 80 % de la energía que se absorbería en un día claro (6).

Esta energía se encuentra presente de forma directa o indirecta en el origen de la mayoría de las demás energías renovables; en el caso de la eólica, la radiación solar calienta masas de aire y provoca diferencias de presión, lo cual induce el movimiento y se generan los vientos. En cuanto a la hidráulica y mareomotriz, la



energía solar regula el ciclo del agua, causa la evaporación que provoca la formación de nubes y las precipitaciones, también ocasiona las corrientes oceánicas por la diferencia de temperaturas en las masas de agua, proceso que se da de forma similar que en el caso de la energía eólica. Para el caso de la Biomasa, la energía solar sirve a las plantas para su vida y crecimiento (6) (14).

En un periodo de tan sólo dos días, el planeta recibe una cantidad de energía equivalente a todas las reservas probadas que existen de petróleo, gas y carbón; es decir, 60 veces el consumo humano anual. Esto se debe a que continuamente el sol emite una potencia de 62 mil 600 kW/m² de su superficie. Para calcular la cantidad de energía solar o radiación por unidad de área que recibe la Tierra durante un periodo corto de tiempo, se utiliza la Ecuación 5.1 (14) (36).

$$dG = \frac{I_0 \cos(\lambda_z)}{\varepsilon^2} dt$$

Ecuación 5.1 Ecuación diferencial de la cantidad de energía solar por unidad de área

Donde:

G = cantidad de energía solar por unidad de área

I₀ = constante solar, 4921 kJ m⁻² h⁻¹

$$\cos(\lambda_z) = \text{sen}\delta \text{sen}\theta + \text{cos}\delta \text{cos}\theta \text{cos}\omega$$

θ = latitud del lugar.

δ = declinación solar = 0.006918 - 0.399912 cos(β) + 0.070257 sen(β) - 0.006758 cos(2β) + 0.000907 sen(2β) - 0.002697 cos(3β) + 0.00148 sen(3β)

$$\beta = \left(\frac{2\pi \cdot n}{365} \right)$$

$$\varepsilon^2 = [1 + 0.033 \text{cos}\beta]$$

n = día al año: 1 ≤ n ≤ 365

$$dt = \left(\frac{12}{\pi} \right) d\omega$$

Sustituyendo en la Ecuación 5.1, se obtiene la Ecuación 5.2:

$$dG = \frac{\left(\frac{12}{\pi} \right) I_0 (\text{sen}\delta \text{sen}\theta + \text{cos}\delta \text{cos}\theta \text{cos}\omega)}{\varepsilon^2} d\omega$$

Ecuación 5.2 Radiación con respecto al ángulo horario

Donde:

ω = ángulo horario, ángulo medido en el polo celestial entre el meridiano del observador y el meridiano del sol. Cambia 15° por hora.



Integrando la Ecuación 5.2 se obtiene la Ecuación 5.3:

$$G \left[\frac{Wh}{m^2} \right] = \frac{I_0}{\varepsilon^2} \left[\text{sen} \delta \text{sen} \theta + \left(\frac{24}{\pi} \right) \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{24} \right) \cos \delta \cos \theta \cos \omega_i \right] \quad \text{Ecuación 5.3} \quad \text{Cantidad de energía solar por unidad de área.}$$

En el caso de la República Mexicana, la radiación se recibe como se muestra en la Tabla 5.1. Las zonas de incidencia se muestran en la Figura 5.1, como se puede observar, la mitad del territorio nacional presenta una insolación promedio de 5 kWh/m²día, suficiente energía para satisfacer la necesidad de un hogar mexicano promedio. Se estima que México produjo de 10 MW por tecnología termosolar en el año 2012 (20) (37) (38).

Tabla 5.1 Radiación recibida en la República Mexicana

% De superficie	Promedio de radiación recibida [kWh/m ² día]
5 %	4.44
57 %	4.44 - 5.55
38 %	Mayor a 5.55

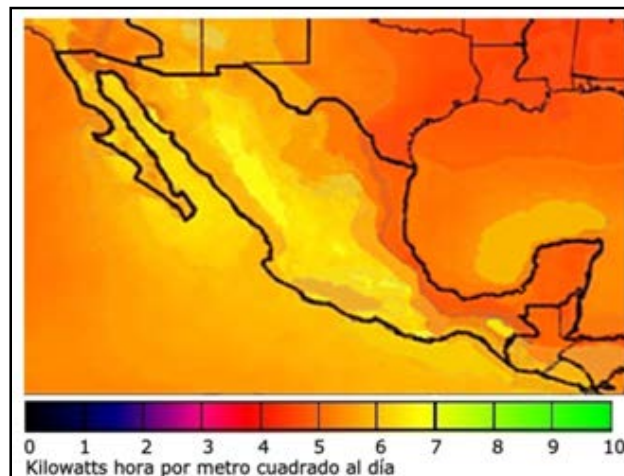


Figura 5.1 Incidencia de la radiación solar en la República Mexicana.

El 75 % del territorio recibe, en promedio, 5 kWh/m²día, pero a pesar del gran potencial con que se cuenta, no es el tipo de energía mayormente instalado. Los estados cercanos a la costa del Océano Pacífico reciben mayor radiación, alcanzando valores de hasta 7 kWh/m² día, comparado con los 3 kWh/m² que reciben el resto de los estados. México cuenta con uno de los mejores niveles de insolación a nivel mundial. En un cuadrado de 65 kilómetros de lado, colocado en los estados de Sonora o Chihuahua, usando tecnologías termosolares de potencia



y celdas fotovoltaicas, y con factores de planta del 25 %, se podrían instalar los aproximadamente 50 GW que tiene el país para satisfacer las necesidades del fluido eléctrico (2) (5) (14).

Retomando el concepto de que México recibe una radiación promedio de $5 \frac{kWh}{m^2 día}$, para conocer el potencial existente, es decir la cantidad de energía solar con la que se dispone por m^2 , se realiza la siguiente conversión:

$$5 \frac{kWh}{m^2 día} \left| \frac{1 día}{24 horas} \right| = 0.2083\bar{3} \frac{kW}{m^2}$$

Considerando que la celda alcanza hasta el 39 % de eficiencia, se tendría una producción de energía de:

$$0.2083\bar{3} \frac{kW}{m^2} \times 39 \% = 0.08125 \frac{kW}{m^2}$$

La radiación solar puede convertirse en energía térmica y/o eléctrica mediante (3):

- Tecnología solar térmica.
- Tecnología solar fotovoltaica.

● Tecnologías Solares Térmicas

I. Descripción y principio de operación

El aprovechamiento de la energía solar térmica requiere de colectores, concentradores y calentadores solares. Estos tienen como principio de operación el efecto invernadero para generar calor. La radiación electromagnética del sol, penetra al colector y es absorbida por las superficies del interior; una vez que la radiación es absorbida, la temperatura se incrementa.

Este principio de operación es la base del funcionamiento de los calentadores y concentradores, en los primeros se alcanzan temperaturas mayores a 120 °C, aunque en la mayoría de los casos la sustancia a calentar lo hace hasta los 70 °C y en los concentradores se alcanzan temperaturas mayores a los 140 °C.

Los calentadores comerciales existentes tienen una capacidad promedio que va desde el calentamiento de 132 hasta 1 083 litros, en sistemas por gravedad y para redes presurizadas la capacidad va desde 217 hasta 1,053 litros de agua (39).



En México, hasta el año 2003 se tenía un registro de 50 fabricantes de dispositivos termosolares, y 573 919 m² instalados de calentadores solares planos. Se conoce que el mercado nacional se incrementa a una Tmca del orden del 15 % (20).

Calentadores, colectores y concentradores tipo cuerpo negro:

El vidrio es un material cuya capacidad calorífica es de 0.84 kJ/kgK por lo cual se utiliza para retener el calor en habitaciones e invernaderos. Es transparente a la luz solar, permitiendo que ésta lo atraviese y caliente el interior de los cuartos (considerados como cuerpos negros); simultáneamente el vidrio reduce el escape de energía, evitando que el aire caliente del interior del cuarto sea liberado a la atmósfera y reduciendo el escape de la radiación infrarroja emitida por la superficie caliente, ya que el material no es transparente a dicho tipo de radiación. En la Figura 5.2 se muestra el esquema básico de los calentadores solares tipo cuerpo negro, en los cuales la energía recibida es almacenada en forma de calor. (40)

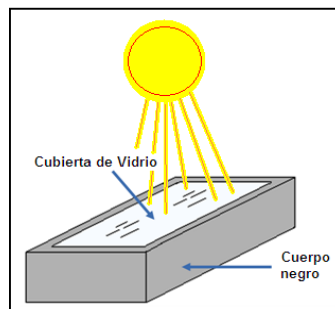


Figura 5.2 Colector solar básico del tipo cuerpo negro.

Calentadores solares planos

También conocidos como colectores de placa plana, consisten en una caja herméticamente cerrada con una cubierta de vidrio o algún otro material transparente. En su interior se ubica una placa de absorción de color oscuro, generalmente metálica, la cual está en contacto con tubos por los que circula el líquido que transporta el calor. La placa de absorción se aísla de la pared exterior con material aislante para evitar pérdidas de calor. Existen un gran número de diferentes configuraciones de los tubos internos en los colectores de placa plana, los más usados son los de tipo serpentín y tubos paralelos. En la Figura 5.3 se muestra el esquema básico de los calentadores planos, en los cuales la energía recibida es transportada por un líquido, mediante tubos dentro del calentador. En el



caso de los colectores de tubos paralelos, se colocan tubos de mayor sección en la parte inferior y superior, para asistir a la extracción de agua caliente y al ingreso de agua fría para su calefacción. En los últimos años se han desarrollado platos compuestos de superficies de absorción selectiva, hechos de materiales con fuerte absorción de la radiación electromagnética y baja emisión.

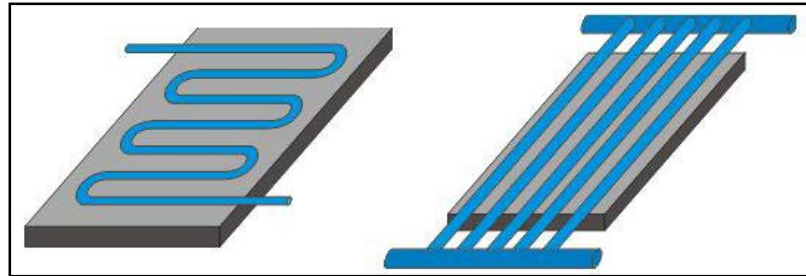


Figura 5.3 Colectores de placa plana: Tipo serpentin y Tubos paralelos.

Colectores de tubo de vacío

Los colectores de tubo de vacío se encuentran entre los más eficientes y costosos. Estos se aprovechan al máximo en aplicaciones que requieren temperaturas moderadas, entre 50 y 95 °C. Poseen un absorbedor, para capturar la radiación del sol, que está sellado al vacío dentro de un tubo. Las pérdidas térmicas de estos sistemas son muy bajas incluso en climas fríos, un esquema básico de los calentadores de tubos de vacío, se observa en la Figura 5.4.

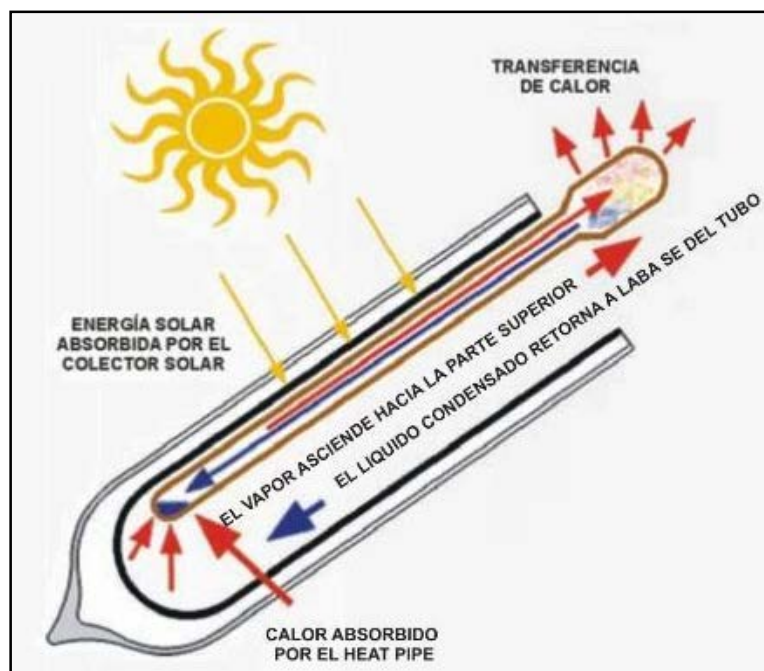


Figura 5.4 Colector solar de tubos de vacío.



II. Aplicación de la tecnología

1) Cocción de Alimentos y secado de productos agrícolas

Al primer modelo para esta aplicación se le conoce como cocina solar, de caja o de acumulación. Los productos a secar se introducen en un cuerpo negro, pudiendo ser éste una caja aislada con tapa de vidrio, como se observa en la Figura 5.5. Un segundo modelo de cocina solar, es un sistema de concentración de geometría parabólica, éste intercepta la energía solar llevándola a su zona focal. Como se observa en la Figura 5.6 (40).

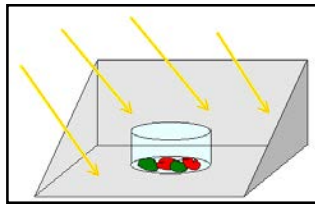


Figura 5.5 Cocina solar de caja

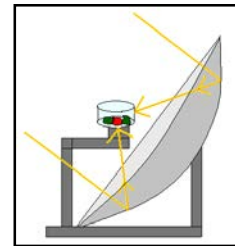


Figura 5.6 Cocina solar parabólica de concentración

En la Tabla 5.2 se muestra la comparación de características entre las cocinas de acumulación y las de concentración.

Tabla 5.2 Cocinas solares de acumulación y de concentración

Características	Cocina de acumulación	Cocina de concentración
Necesidad de reorientación	Media	Alta
Facilidad de manejo	Sencilla	Regular
Estabilidad frente al viento	Buena	Baja
Temperaturas alcanzables	Regulares	Altas
Velocidad de cocción	Baja	Alta
Necesidad de vigilancia	Reducida	Elevada
Riesgo de incendio	Nulo	Posible
Precio	Bajo	Más elevado
Mantenimiento	Reducido – Nulo	Regular
Facilidad de acceso al recipiente contenedor del alimento	Reducido	Fácil
Auto construcción	Fácil	Requiere asesoría
Limpieza del contenedor de alimento	Sencilla	Normal
Facilidad de almacenaje	Bueno	Regular
Posibilidad de freír y/o asar	No	Sí

Ambos tipos de cocina, tienen las siguientes características:

- No requieren instalación eléctrica o combustible para su funcionamiento.
- No requieren insumos, alternos a la energía solar.



- Tienen un periodo de vida útil de 10 años.
- Comercialmente tienen diferentes tamaños, en relación a la necesidad del consumidor.

2) Calentamiento de agua para su uso en residencias, clínicas, hoteles, albercas, restaurantes, tintorerías, centros deportivos, gimnasios, etc.

La energía térmica del sol, se usa para calentar agua a temperaturas inferiores a los 100 °C. En la Figura 5.7 se muestra un sistema doméstico de calentadores planos de agua, los cuales están compuestos por los siguientes elementos:

- Uno o más colectores para capturar la energía del sol.
- Tanque de almacenamiento, ubicado sobre los colectores, generalmente sobre el techo de la infraestructura.
- Sistema de calefacción auxiliar.
- Sistema de circulación para mover el fluido entre los colectores y el tanque de almacenamiento.
- Sistema de control para regular la operación del sistema.
- Tienen un periodo de vida útil de 15 años.

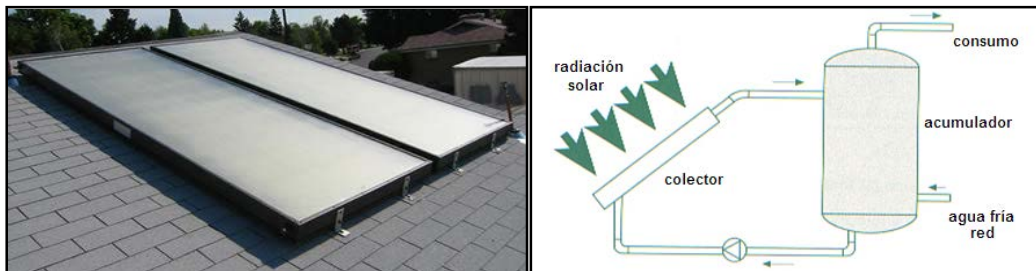


Figura 5.7 Calentador solar de agua para uso doméstico

3) Calentamiento de agua para climatización de espacios.

Su uso es el suelo radiante, éste aporta calor uniforme en toda la vivienda, brindando confort, ya que la diferencia de temperaturas entre el punto más caliente y más frío de la casa, es de máximo 5 °C. El sistema consiste en instalar tubos de polietileno reticulado. Los tubos se colocan de 3 a 5 cm por debajo de la superficie con una separación de 10 a 30 cm entre ellos. Como se muestra en la Figura 5.8. El agua se calienta mediante un calentador solar plano, ubicado en el techo, con lo que se obtiene una temperatura del agua de entre 35 y 45 °C, para mantener el suelo entre 20 y 28 °C y el ambiente del interior entre 18 y 22 °C. El calor emana



del suelo y llega hasta una altura de 2 a 3 m. Con tecnologías convencionales para obtener una temperatura de 20 °C en el interior de la vivienda se requiere quemar combustible a temperaturas superiores a los 800 °C (41).



Figura 5.8 Suelo Radiante

4) Calentamiento o enfriamiento de aire para climatización de espacios.

Calentamiento: Los sistemas de calentamiento de aire, son similares a los de calentamiento de agua, incluso hay equipos que pueden utilizarse indistintamente. Los calentadores de aire, se pueden instalar en edificios con techos planos. Su operación consiste en que los dispositivos utilizan la energía solar para calentar el aire, antes de que éste entre al espacio, como se observa en la Figura 5.9 (42).

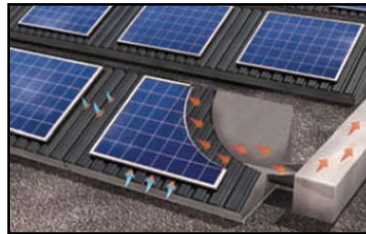


Figura 5.9 Conducto solar.

Enfriamiento: Este proceso se da por un fenómeno de absorción (el fluido se evapora y absorbe calor, se condensa y cede calor). Se hace pasar vapor a baja presión por un compresor térmico, compuesto por un absorbedor y un concentrador, lo cual incrementa su presión y temperatura hasta el punto en el que el vapor se licua y cede el calor al medio a calentar utilizando en el condensador. El líquido refrigerante va desde el condensador a un expansor en el que su presión y temperatura se reducen. En el ciclo con agua y bromuro de Litio como refrigerante y absorbedor respectivamente; el vapor del refrigerante liberado en el evaporador, se absorbe en la solución absorbente y se diluye. Para recuperar el refrigerante y reconcentrar la solución, ésta se bombea al generador, donde mediante el aporte de calor se libera el refrigerante por destilación. La solución concentrada se envía



al absorbedor para volver a absorber refrigerante. El proceso se observa en la Figura 5.10. Este tipo de refrigeración solar puede utilizarse por ejemplo en refrigeradores para producción de hielo, así como en aires acondicionados y enfriamiento de fluidos en procesos industriales (14).

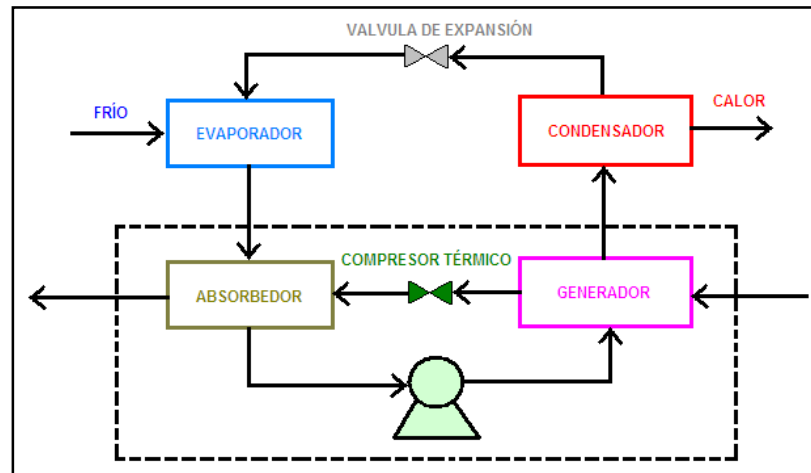


Figura 5.10 Refrigeración por absorción.

5) Destilación de agua de mar, para la producción de agua potable

Los destiladores solares operan de forma similar al ciclo hidrológico natural de evaporación y condensación. Como parte de su estructura tienen una cavidad donde se coloca el agua impura, la cavidad cuenta con una cubierta de cristal a través de la cual los rayos del sol pasan para calentar el agua. El agua en el interior del destilador solar se evapora por efecto del calentamiento, dejando en el piso de la cavidad todos los contaminantes y microorganismos. El vapor de agua purificada se condensa en la parte interna del vidrio, y pasa por la parte inferior del recipiente. Finalmente se recoge en un recipiente cerrado. Un esquema de funcionamiento del destilador solar, se puede observar en la Figura 5.11. (43)

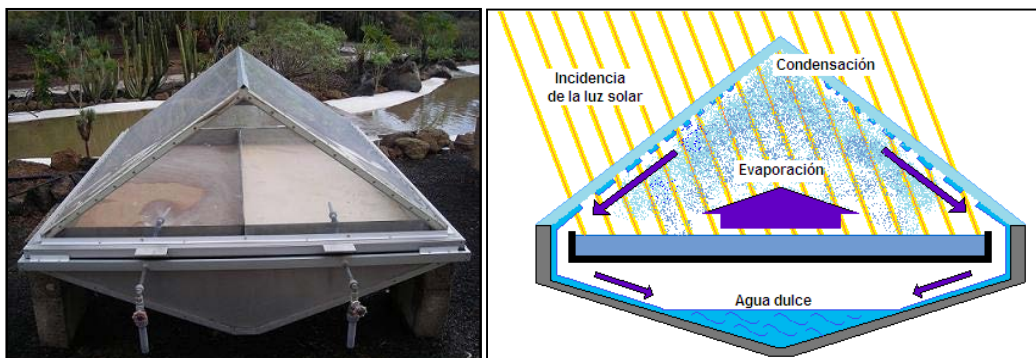


Figura 5.11 Destilador solar



El sistema presentado, refiere a un sistema solar pasivo, sin embargo, la necesidad de producir agua potable, ha impulsado la adición de equipos al destilador, conformando sistemas solares activos; entre los cuales se encuentran:

- a) *Destilación a temperaturas altas:* la temperatura que alcanza el agua en un destilador solar convencional se incrementa mediante el suministro de energía térmica a través de colectores solares dirigidos a la cavidad. El incremento va de 20 - 50 °C hasta 70–80 °C, lo cual genera un proceso de evaporación mejor al de los destiladores pasivos. Otra forma de lograr la destilación, es recirculación del agua, en este sistema se utiliza una bomba que impulse el agua de la cavidad hacia un colector de placa plana y de éste nuevamente a la cavidad. El efecto puede lograrse naturalmente si el agua fluye por gravedad. A estos sistemas se les añade una criba para separar la sal, pues su acumulación incrementa la tensión superficial y disminuye la tasa de evaporación. Finalmente este proceso de destilación a temperaturas altas, se puede lograr adicionando un concentrador parabólico.
- b) *Pre calentamiento de agua:* En este sistema el agua se calienta por otros medios, como intercambiadores, plantas termoeléctricas, en otros. Posteriormente se introduce en la cavidad del destilador solar con un caudal constante. Este sistema opera en menor tiempo que el destilador solar pasivo.
- c) *Sistema Nocturno:* también utiliza un destilador, pero en ausencia de luz solar. Esto se logra, cuando la energía almacenada durante el día se utiliza durante la noche. En un destilador convencional, el agua es expuesta al sol durante el día, y la mayor parte de la energía térmica que adquiere la masa de agua, se almacena en su interior. Dicha energía se utiliza durante la noche, y posteriormente se condensa el agua evaporada. Puede adicionarse al sistema un caudal de agua caliente con lo que se obtiene una mayor producción de agua potable (43).

6) Producción de combustibles solares

La operación de turbinas y motores requiere de la quema de combustibles, usualmente se utilizan combustibles fósiles, pero su quema genera emisiones nocivas a la atmósfera. La energía solar puede aprovecharse para la producción de combustibles sustentables, y para el reciclado de combustibles existentes. En la



Figura 5.12 se muestra un experimento de producción de combustibles. Estos métodos se encuentran en fase de crecimiento, ya que aunque han dado buenos resultados, la cantidad de producto generado es baja.

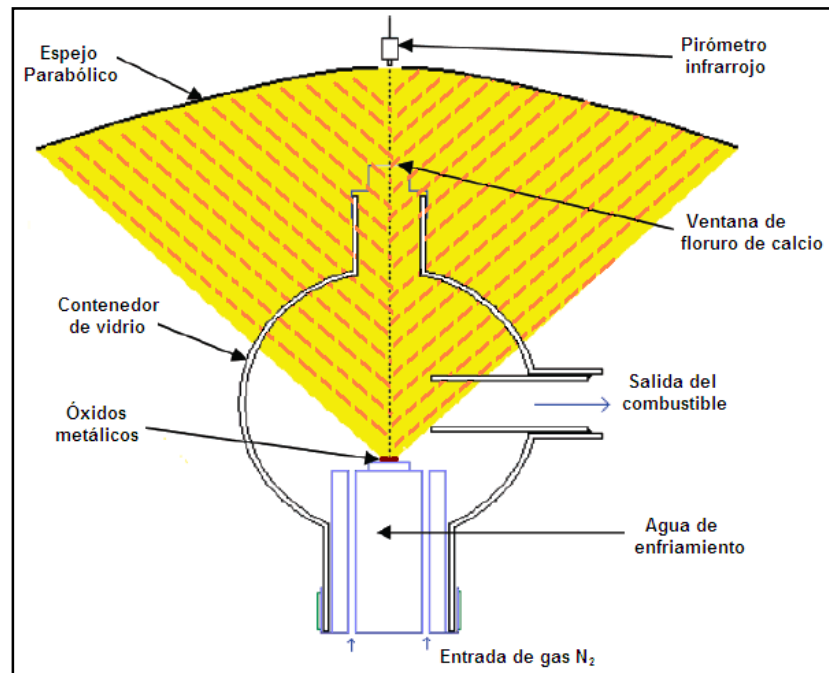


Figura 5.12 Producción de Combustible

Producción de Hidrógeno (44): puede obtenerse H₂ mediante tres procesos solares: procesos fotoquímicos, electroquímicos y termoquímicos, o mediante combinaciones de éstos: fotoelectrolíticos y electrólisis a alta temperatura del vapor. Los métodos que hacen uso de la energía solar concentrada son los siguientes:

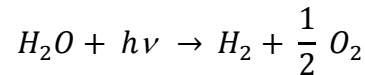
Electrólisis: usa energía eléctrica para separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. En este caso puede generarse la energía eléctrica mediante la energía solar. El calor y la electricidad pueden ser suministrados a partir de colectores cilíndrico – parabólicos, discos parabólicos e instalaciones de torre central.

Métodos termoquímicos: entre los que se incluyen la termólisis directa del agua y los ciclos termoquímicos, preferentemente de dos pasos, basados en la reducción de óxidos metálicos, así como la desintegración (cracking), el reformado y la gasificación de hidrocarburos. Para conseguir razones de concentración elevadas se hace uso de discos parabólicos y sistemas de torre, ya que los colectores cilíndricos – parabólicos no alcanzan el nivel de temperatura necesario.

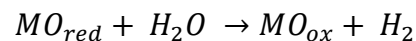
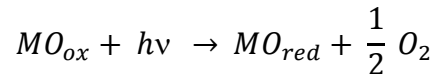


Los ciclos termoquímicos con energía solar de alta temperatura ofrecen mayores conversiones de energía que la electrólisis, que exige la conversión del calor a electricidad antes de la electrólisis del agua.

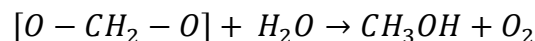
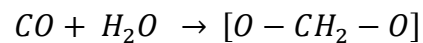
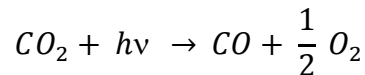
El reparto termodinámico del agua, consiste en la disociación del agua en hidrógeno y oxígeno mediante una serie de reacciones exotérmicas y endotérmicas, donde los productos intermedios se reciclan dentro del proceso.



- Los dos ciclos termodinámicos usando óxidos metálicos son atractivos para el acoplamiento con la energía solar. La temperatura para lograr la reacción de reducción debe ser mayor a 900 °C.



Producción de Monóxido de carbono (45): Consiste en invertir el proceso de combustión de los hidrocarburos, permitiendo así sintetizar combustibles líquidos como metanol o gasolina. Esto se logra mediante un reactor solar, que divide el dióxido de carbono en monóxido de carbono y oxígeno.



Con el monóxido de carbono se pueden producir combustibles como el metanol y la gasolina. Una de sus aplicaciones sería usándolo en centrales termoeléctricas de carbón. El CO₂ emitido del proceso de combustión del mineral podría ser capturado y reducido a CO en el reactor solar, como el de la Figura 5.13. De esta manera, se aprovecharía en crear combustibles para la planta los cuales reducirían las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Dicho combustible sería además plenamente compatible con las infraestructuras petrolíferas: Una vez sintetizado y en estado líquido, podría ser transportado por los oleoductos y suministrado a las gasolineras como cualquier combustible.



Figura 5.13 Reactor Solar.

7) Plantas termosolares de potencia eléctrica o centrales eléctricas.

Se produce electricidad pasando vapor a través de turbinas. El aire transporta el calor desde el receptor a un generador de vapor; donde se produce vapor de agua sobrecalentado, el cual acciona una turbina y un generador eléctrico.

Canal parabólico: la tecnología usada es un canal parabólico. Como se observa en la Figura 5.14. (Similar a las cocinas solares parabólicas). La radiación solar es enfocada por espejos alargados en forma de una canaleta con perfil parabólico. El receptor es un tubo Dewar que corre a lo largo del foco del concentrador. La energía solar es absorbida y transformada en calor, el cual se transfiere a un fluido que circula en el interior del tubo. Este fluido es una sustancia con buena capacidad calorífica, buena estabilidad a alta temperatura y con la suficiente fluidez para poder ser bombeado a lo largo de grandes longitudes de tubo (14).

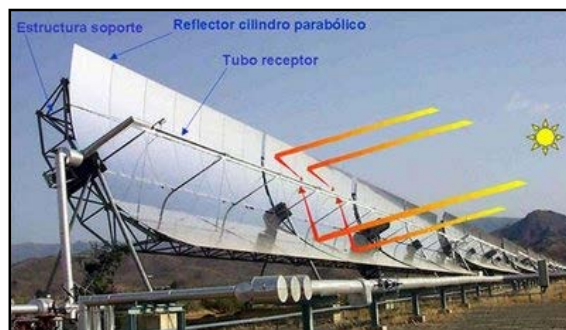


Figura 5.14 Canal parabólico

Torre Central: consiste en un campo de helióstatos que concentran la radiación solar en lo alto de una torre, como se observa en la Figura 5.15. Los helióstatos son espejos planos que se mueven continuamente para dirigir el reflejo solar hacia la torre, y cuyos tamaños máximos llegan a ser de alrededor de 120 m². Deben ser



instalados en sitios donde el sol brille continuamente; es decir, en zonas desérticas o semidesérticas. Una de las aplicaciones de las centrales eléctricas es satisfacer el pico de demanda eléctrica que ocurre en las primeras horas de la noche, por lo que es necesario mantener parte del calor generado con el sol almacenando, colocando el fluido que se ha calentado (aceite, sales fundidas) en un tanque perfectamente aislado.

Existen dos tipos de torres, la de receptor volumétrico abierto (un soplador transporta el aire del ambiente a través del receptor, el cual es calentado por la luz solar reflejada, alcanzando temperaturas entre 650 y 859 °C); y la de receptor de aire presurizado (un compresor presuriza el aire hasta cerca de 14.8 atm, una bóveda de cristal cubre el receptor y separa el absorbedor del ambiente, el aire se calienta por la luz solar hasta 1,100 °C, con lo que acciona una turbina de gas, que conectada a un compresor y un generador, produce electricidad. El exceso de calor de la turbina va a una caldera que impulsa un proceso de ciclo de vapor (14).



Figura 5.15 Torre Central

Disco o plato parabólico: Su escala es menor comparado con las dos tecnologías anteriores. La generación de electricidad con este tipo de concentradores se basa en el uso del motor Stirling (motor de ciclo cerrado). En este motor se calienta un gas que se expande, y al hacerlo empuja un pistón conectado a un alternador eléctrico; luego, al enfriarse, se contrae; y la electricidad sale directamente del motor a través de cables eléctricos; es decir, el calor solar es convertido en energía cinética y ésta en electricidad. Un modelo de los sistemas de disco y plato parabólico se observa en la Figura 5.16 (14).

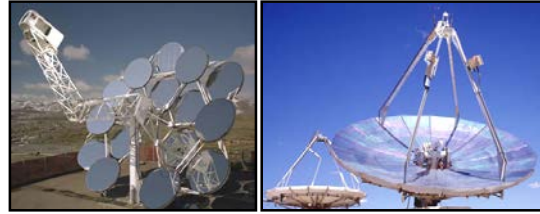


Figura 5.16 Sistema de disco y sistema de plato parabólico.

8) Arquitectura Solar pasiva o arquitectura bioclimática.

El aprovechamiento de la energía del sol puede conseguirse sin el uso de elementos mecánicos que la transformen en electricidad, es decir, de forma pasiva, recibiendo directamente la radiación solar en una determinada zona.

Los motivos principales para incluir la iluminación natural dentro de la arquitectura, hacen referencia al ahorro energético, relacionado con la reducción de las necesidades de luz artificial en los edificios y la contribución para mejorar el confort lumínico. Para hacer un buen uso de la luz natural dentro de los edificios, los puntos clave que hay que remarcar son la introducción de luz natural, en forma directa o reflejada; la gradación de la luz en cada espacio de la vivienda, en función de la actividad que se va a realizar; la protección de aberturas, de manera que sea posible reducir la luz en caso de sobrecalentamientos y demasiada luz, y la disposición de las aberturas, de manera que se pueda captar la luz desde dos o más orientaciones diferentes. Esto es importante en verano, cuando hay que sombrear ciertas zonas, con lo que se reduce el uso de luz artificial en pleno día.

La arquitectura bioclimática diseña y aporta soluciones constructivas, que permitan que un edificio determinado capte o rechace energía solar, según la época del año, a fin de regularla de acuerdo a las necesidades de calefacción, refrigeración o de luz. El aprovechamiento de la radiación que llega al edificio se basa en la optimización de la orientación; la definición de volúmenes y aberturas de los edificios; la selección de materiales; la utilización de elementos de diseño específicos y adecuados: el entorno físico relacionado con el clima como: altitud (la temperatura atmosférica disminuye entre 0.5 y 1 °C cada 100 m), distancia del mar (el mar eleva el nivel de humedad y crea regímenes especiales de vientos), orografía (los sitios más elevados están más ventilados, reciben mayor radiación



solar, y tienen menos humedad que los valles y depresiones), proximidad de vegetación (actúa como filtro de polvo, ruido y contaminantes), emplazamientos urbanos (presencia de microclimas, con aumento de temperatura y contaminación, y posibles obstrucciones de la insolación por las construcciones vecinas) y morfología de la construcción. (46) Esto se puede observar en la Figura 5.17 (14).

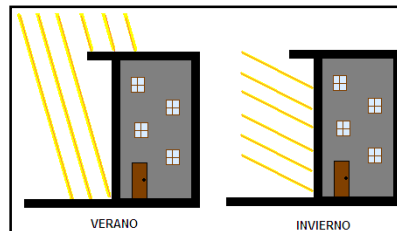


Figura 5.17 Arquitectura Solar Pasiva

III. Ventajas de la aplicación de las tecnologías solares térmicas

- No se requiere el consumo de electricidad, gas LP, ni algún otro combustible que genere gases de efecto invernadero, para ponerla en operación.
- El proceso no genera emisiones tóxicas ni residuos de ningún tipo.
- Son resistentes a los golpes y las vibraciones.
- En zonas rurales resuelve la necesidad de proveerse de leña, reduciendo esfuerzos excesivos en las mujeres y la deforestación. Puede usarse también en la cocción de cerámica y barro
- En zonas donde han ocurrido desastres naturales o circunstancias bélicas, resuelve la necesidad de insumos como carbón o gas para cocción de alimentos, y la obtención de agua potable, incluso se utiliza para la esterilización de materiales clínicos.
- Se reducen las afecciones respiratorias por la presencia de humos y las quemaduras, peligros a los que estadísticamente son vulnerables los niños.
- Los valores nutricionales de los alimentos se conservan durante la cocción.
- Las plantas termosolares de disco o plato parabólico no requieren que un fluido caliente se transporte por tuberías. (40)
- El suelo radiante y los acondicionadores de aire reducen el consumo de calefactores o refrigeradores tradicionales que generan emisiones atmosféricas.



IV. Limitantes o desventajas de la aplicación de las tecnologías

- Se debe adicionar al sistema un proceso de calentamiento convencional, que respalde el calentamiento de agua, en temporadas largas de clima frío o lluvioso, ya que los sistemas de calentamiento solar, sólo soportan estas condiciones climáticas por 1 o 2 días.
- Las plantas termosolares comerciales que utilizan canales requieren de combustibles fósiles que se utilizan durante la noche, la cantidad se limita a un 27 % máximo relativo a la producción de electricidad, permitiendo que la planta califique como fuente de energía renovable. Este requerimiento se basa en el uso de refrigerantes, condensadores, acumuladores, motores y otros equipos además de los colectores solares reales.
- En las centrales eléctricas debe existir un respaldo por medio de combustibles, que permitan que la planta opere aún en ausencia de luz solar.
- En el caso de las plantas termoeléctricas, para una producción considerable, deben situarse en desiertos, por lo que el consumo de agua es el impacto ambiental más importante que debe plantearse.
- En cuestión de aprovechamiento de hidrógeno como combustible, no se cuenta con un diseño adecuado para su almacenamiento. (47) (48)

V. Rendimiento y/o eficiencia

Las cocinas solares parabólicas ofrecen una potencia de 1 kW con un rendimiento del 50 %. Alcanzan temperaturas mayores respecto a las cocinas de acumulación, como mínimo 200 grados, con lo que se pueden realizar no sólo operaciones de hervir, estofar y cocer al vapor, sino además freír y asar.

Los calentadores solares de tubos son más eficientes que los calentadores solares planos, ya que los tubos de cristal de borosilicato al alto vacío no son afectados por condiciones climáticas tales como: lluvia, viento, nubes, etc.; su forma y recubrimiento, ayudan a evitar la refracción y a tener un inmejorable aprovechamiento solar. En comparación, el sistema de serpentín de cobre y placas de cristal o policarbonato, sólo absorbe los rayos solares cuando estos son perpendiculares a su superficie plana; por lo que la refracción a la radiación solar



es permanente, resultando en energía solar no aprovechada. Un calentador solar de agua estándar con un tanque de 150 litros tiene una eficiencia del 50% (41).

La eficiencia de una central eléctrica es el producto de la eficiencia del colector, del campo y del ciclo de vapor. La eficiencia del colector depende del ángulo de incidencia de la luz del sol y de la temperatura en el tubo de absorción, puede alcanzar valores de hasta el 75 %, y las pérdidas en el campo son generalmente menores al 10 %. En conjunto, las centrales eléctricas pueden alcanzar eficiencias anuales de cerca del 15 % (Similares a las celdas fotovoltaicas). La eficiencia del ciclo de vapor está cerca del 35 % y tiene la influencia más significativa.

En las plantas de torre central solar, el proceso combinado de la turbina de gas y de vapor puede alcanzar eficiencias por encima del 50 %, mientras que la eficiencia de un ciclo de turbina de vapor simple es de solamente el 35 %. Esto permite obtener sistema solares con eficiencias superiores al 20 %, igual que en el caso de los sistemas de plato parabólico.

Las plantas generadoras de hidrógeno mediante energía solar, tienen una producción de 3 kg/h.

En la Tabla 5.3 se comparan la eficiencia, el coeficiente general de pérdidas y el rango de temperaturas que pueden manejar en promedios los modelos de los colectores comercialmente disponibles.

Tabla 5.3 Rendimiento y eficiencia de los colectores solares

Colector	Rango de temperatura [°C]	Eficiencia η	Coeficiente general de pérdidas $U_L \left[\frac{W}{^{\circ}C \cdot m^2} \right]$
Sin cubierta de vidrio	10 – 40	0.9	15 - 25
Con cubierta de vidrio	10-80	0.8	6
De tubos de vacío	10 - 130	0.7	2

El rendimiento térmico de un colector solar se determina mediante la obtención de valores de eficiencia instantánea de una combinación de valores de radiación incidente, y las temperaturas ambiente y del agua de entrada. También, se debe medir experimentalmente la radiación solar incidente sobre el colector solar, y la



tasa de incremento de la energía calorífica en el agua mientras pasa a través del colector, todos los valores deben estar bajo condiciones de estado estacionario.

Deben realizarse pruebas para determinar las características del tiempo de respuesta del colector solar, y la manera en que su eficiencia térmica en estado estacionario varía según los diferentes ángulos con los que incide la radiación.

Las ecuaciones básicas de la eficiencia térmica de un colector solar son la Ecuación 5.4, la Ecuación 5.5 y la Ecuación 5.6. (49)

$$\frac{q_u}{A_a} = GtF_R(\tau\alpha)_e - F_RU_L(tf, i - ta) = \frac{m}{A_a}C_p(tf, e - tf, i)$$

Ecuación 5.4
Rendimiento de un colector solar

$$\eta_g = \frac{\text{Energía Entregada por el Colector}}{\text{Energía Solar Incidente sobre el Colector}}$$

Ecuación 5.5
Eficiencia de un colector solar.

$$\eta_g = \left(\frac{A_a}{A_g}\right)F_R \left[(\tau\alpha)_e - U_L \frac{(tf, i - ta)}{Gt} \right] = \frac{mC_p(tf, e - tf, i)}{AgGt}$$

Ecuación 5.6
Eficiencia de un colector solar.

Donde:

Gt = radiación solar global incidente sobre el área de apertura del colector [W/m^2]

F_R = factor de eficiencia de absorción de la placa absorbidora.

α = absortancia de la superficie absorbidora de la radiación solar del colector.

τ = transmitancia de la cubierta del colector solar.

$(\tau\alpha)_e$ = producto efectivo de la transmitancia por la absortancia.

U_L = coeficiente para estimar las pérdidas durante la transferencia de calor en el colector solar [$W/m^2/^\circ C$]

ta = temperatura del aire o temperatura del ambiente [$^\circ C$].

tf, i = temperatura del fluido de transferencia de calor entrando al colector [$^\circ C$]

tf, e = temperatura del fluido de transferencia de calor saliendo del colector [$^\circ C$]

m = flujo másico del aire [kg/s].

C_p = calor específico del fluido de transferencia de calor [$J/kg^\circ C$].

q_u = tasa de extracción de energía útil del colector [W]



A_a = constante usada en ecuaciones modificadoras por efecto del ángulo de la radiación solar directa incidente.

η_g = eficiencia del colector basada en el área bruta del colector [%].

A_g = área bruta del colector.

En el Gráfico 5.1 se muestran los resultados típicos de una curva de eficiencia térmica, obtenida de graficar la eficiencia η_g contra $\frac{(t_{f,i} - t_a)}{G_t}$; los valores típicos indican que U_L es una constante, que la pendiente de las rectas es igual a $\left(\frac{A_a}{A_g}\right) F_R U_L$ y que la ordenada es $\left(\frac{A_a}{A_g}\right) F_R (\tau\alpha)_e$. La serie de datos identificada con cuadro azul es para un absorbedor de cobre con cromo selectivo negro, una cubierta de vidrio y agua; la serie de datos identificada con triángulo rojo es para un absorbedor con pintura negra, una cubierta de vidrio y agua.

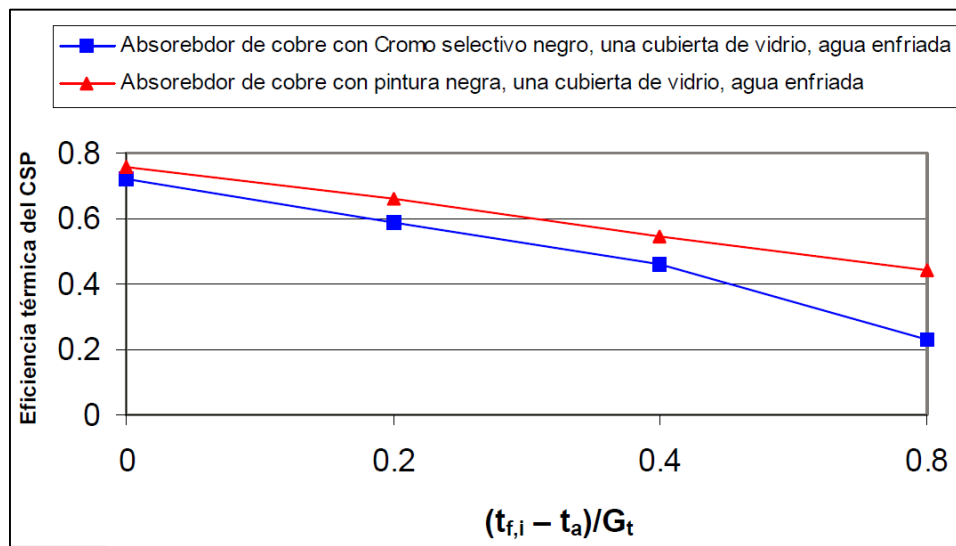


Gráfico 5.1 Curva de eficiencia térmica.

VI. Costos

Un calentador solar de agua con un tanque de 150 litros cuesta alrededor de USD\$ 1 050.20. Los costos por unidad de energía dependen del tamaño del sistema y varían entre 1 y 20 US¢/kWh. Un sistema de canal parabólico, cuya temperatura de fluido de trabajo es de 390 °C tiene un costo aproximado de 3 000 USD/kWe y 0.12 - 0.15 USD/kWh. Un sistema de recepción y concentración, cuya temperatura de fluido es de 565 °C tiene un costo aproximado de 5 000 USD/kWe y 0.15 -



0.20 USD/kWh. Un sistema de plato parabólico, cuya temperatura de operación es de 750 °C tiene un costo de 10 000 USdls/kWe y 0.20 – 0.25 USdls/kWh (20).

En la Tabla 5.4 se muestran los costos reportados por una empresa desarrolladora de tecnologías solares térmicas para el año 2013 (50).

Tabla 5.4 Costos de tecnologías solares térmicas.

Sistema	Costo (\$USD)
Cocinas de Caja (Dependiendo de su tamaño).	30 a 60
Colector solar tipo cuerpo negro para calentamiento de agua. (Capacidad 100 litros.)	200
Calentador solar plano. (Capacidad 110 litros).	200
Calentador solar plano y tanque de almacenamiento de agua. (Capacidad 110 litros).	350
Calentador solar plano y tanque de almacenamiento de agua. (Capacidad 150 litros).	450
Calentador solar plano y tanque de almacenamiento de agua. (Capacidad 500 litros).	1 200

En México las centrales de concentración solar tienen los menores costos de inversión, alrededor de US\$ 2 200/kW. Los costos de la electricidad generada son altos para poder ser competitivos con otras tecnologías, entre 12 y 18 US¢/kWh.

El potencial económico de la energía solar de una región es el valor de la producción anual de energía térmica y eléctrica, cuya obtención es económicamente viable para la región. Esta viabilidad se determina comparando la implementación de energía solar en el sistema eléctrico en relación al nivel actual de precios de energía obtenida de fuentes convencionales (51).

El potencial económico de la energía solar se obtiene sumando los potenciales de la energía térmica y la energía eléctrica, como se observa en la Ecuación 5.7.

$$W_E = W_{ET} + W_{EP}$$

Ecuación 5.7 Potencial económico de la energía solar

Donde:

W_E : potencial económico de la energía solar.

W_{ET} o W_{EP} : potencial económico de la energía térmica o energía eléctrica.

Ambos obtenidos mediante la Ecuación 5.8.



$$W_{ET \circ EP} = \sum_i W_{ET_i \circ EP_i}$$

Ecuación 5.8 Potencial económico
de las energías térmica y eléctrica

Donde:

i : es la suma de todos los meses de un año [1, 2, ..., 12]

$W_{ET_i \circ EP_i}$: es el potencial económico del mes i , obtenido por la Ecuación 5.9.

$$W_{ET_i \circ EP_i} = V_{T_i \circ P_i} S_{ET \circ EP}$$

Ecuación 5.9 Potencial económico
de la energía solar en el mes i

Donde

$V_{T_i \circ P_i}$: es el rendimiento de la energía generada por la unidad de superficie de un colector térmico (T_i) o de una celda fotovoltaica (P_i) en el mes. [kWh/m²mes]

S_{ET} : es el área económicamente factible para instalar los colectores térmicos o las celdas solares. [m²]

VII. Operación y mantenimiento

La instalación para calentamiento de agua para uso doméstico, se hace en serie entre el calentador solar y el boiler, así éste respalda al calentador solar, y el flujo de agua caliente se mantiene, en el caso de continuos días nublados o lluviosos.

Bajo condiciones normales, la lluvia y el viento mantienen limpios a los calentadores, por lo que no se requiere de un mantenimiento específico.

Para las cocinas solares de acumulación se debe cuidar la calidad de la superficie transparente a la radiación, y de la superficie aislante, evitando perder calor no sólo por fugas en su estructura, sino también por excesivas acciones de abrirla.

VIII. Beneficios económicos

Para cocción y secado de alimentos, el uso de la energía solar en colectores del tipo cuerpo negro, representan el sistema más económico del mercado. Con la instalación de un sistema adecuado a las necesidades específicas, se puede satisfacer la mayor parte de los requerimientos de agua caliente en cualquier aplicación, sin tener que pagar el uso de un combustible. Aunque el costo inicial de un calentador solar es mayor que el de un boiler, con los ahorros que se obtienen por dejar de consumir gas, se recupera la inversión a corto plazo. Con un equipo adecuado a la demanda, el ahorro es de hasta 80 % en gas.



● Tecnologías Solares Fotovoltaicas

I. Descripción y principio de operación

En las celdas solares la radiación solar no se transforma en calor, sino que se convierte directamente en electricidad, mediante el efecto fotovoltaico (14).

El efecto fotovoltaico consiste en que la luz puede generar una corriente eléctrica al iluminar materiales semiconductores. Estos conducen la electricidad mejor que un aislante y menos efectivamente que un metal, y se caracterizan por que mejoran su capacidad para conducir electricidad al ser iluminados. Cuando incide la luz sobre un semiconductor, la energía suministrada ayuda a darle mayor movilidad a algunos de los electrones presentes en el material, por lo que su capacidad para conducir la electricidad aumenta. El material más usado es el silicio puro (uno de los elementos más abundantes, componente principal de la arena) adicionado de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), los cuales activan la celda al ser expuesta al sol (6) (39).

El contacto frontal es una rejilla metálica, para que la luz penetre entre los contactos hasta el silicio. Las celdas Foto Voltaicas (FV) para proteger la celda y reducir las pérdidas por reflexión son recubiertas con una capa antirreflejante. Esta capa es la que confiere a las celdas FV su típica apariencia de color azulado o negro (39).

Para producir el efecto fotovoltaico, es necesario que aparezca un voltaje que mueva a estos electrones en una dirección preferencial, generando una corriente eléctrica. Esto es, unir dos materiales semiconductores de características diferentes: uno de ellos debe ser capaz de ceder parte de sus electrones con facilidad (se le llama material tipo N), mientras que el otro debe aceptar fácilmente electrones adicionales (material tipo P). El efecto fotovoltaico se produce precisamente al iluminar la superficie de unión entre los dos diferentes materiales. Se adiciona un inversor que convierta la corriente continua en corriente alterna. Esto puede observarse en la Figura 5.18 (14).

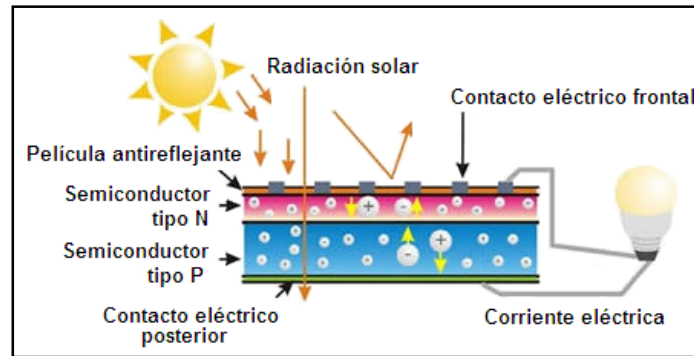


Figura 5.18 Estructura básica de una celda fotovoltaica.

Modelo matemático para una celda, un módulo o un panel solar¹¹.

El modelo presentado expresa la relación entre el voltaje y la corriente que se obtendrá, tiene la ventaja de que los parámetros necesarios para caracterizar una celda fotovoltaica se obtienen de la hojas de datos entregadas por el fabricante, además de ser continuo y diferenciable. La descripción del modelo se hace mediante la Ecuación 5.10 (52) (53) (54) (55) (56).

$$I = \frac{I_x}{1 - \exp\left(\frac{-1}{b}\right)} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{V}{b \cdot V_x} - \frac{1}{b}\right)\right] \quad \text{Ecuación 5.10} \quad \text{Corriente en función del voltaje de la celda}$$

Donde:

I= corriente en función del voltaje [A], obtenida por la Ecuación 5.10

I_x= corriente de cortocircuito, obtenido por la Ecuación 5.11

V= voltaje [V]

V_x= voltaje de circuito abierto, obtenido por la Ecuación 5.12

b= constante característica del módulo, es adimensional, y sus valores están en el rango de 0.01 a 0.18., se obtiene por la Ecuación 5.13

$$I_x = p \cdot \frac{E_i}{E_{iN}} \cdot [I_{sc} + T C_i \cdot (T - T_N)] \quad \text{Ecuación 5.11} \quad \text{Corriente de cortocircuito}$$

Donde:

I_x= corriente de cortocircuito.

p= número entero que representa la cantidad de módulos en paralelo de un arreglo

E_i= radiación efectiva incidente sobre el área del panel o la celda [W/m²]

E_{iN}= 1000 W/m²

¹¹ Dado que este modelo matemático se aplica para celdas, módulos y paneles, debe establecerse un criterio de niveles de variables, según se requieran.



I_{sc} = corriente de cortocircuito en condiciones estándar de prueba; las cuales son: irradiación de 1000 W/m^2 , temperatura de $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, y espectro estándar de referencia de AM 1.5¹². Esta es la máxima corriente que produce el panel para cierto valor de irradiación y temperatura

TC_v = coeficiente de temperatura del voltaje

T = temperatura de operación de la celda [$^\circ\text{C}$]

$T_N = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$V_x = s \cdot \frac{E_i}{E_{iN}} \cdot TC_v \cdot (T - T_N) + s \cdot V_{max} - s \cdot (V_{max} - V_{min}) \cdot \exp \left[\frac{E_i}{E_{iN}} \ln \left(\frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} - V_{oc}} \right) \right]$$

Ecuación 5.12
Voltaje de
circuito abierto

Donde:

s = número entero que representa la cantidad de módulos en serie de un arreglo.

TC_v = coeficiente de temperatura del voltaje

V_{max} y V_{min} = representan el voltaje de circuito abierto para valores de irradiación mayores a 1200 W/m^2 y menores a 200 W/m^2 , a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos valores rondan el 85 % de V_{oc} para el caso de V_{min} , y el 103 % de V_{oc} para el caso de V_{max} . El V_{min} se obtiene de las hojas de datos del fabricante, el V_{max} debe medirse o estimarse.

V_{oc} : voltaje de cortocircuito en condiciones estándar de prueba.

$$|b_{n+1} - b_n| > \varepsilon$$

$$b_{n+1} = \frac{V_{op} - V_{oc}}{V_{oc} \cdot \ln \left[1 - \frac{I_{op}}{I_{sc}} \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{-1}{b_n} \right) \right) \right]}$$

Ecuación 5.13
Constante b

Donde:

V o I_{op} = Voltaje óptimo o corriente óptima

La Ecuación 5.13 utiliza el teorema del punto fijo, el valor de ε es el error máximo permitido para detener la iteración. El desempeño de la celda tiene una relación inversa con la constante b, cuanto menor sea b, mayor será la energía producida.

El efecto que se tiene en el voltaje debido a la capacidad interna del módulo, está expresado por la Ecuación 5.14 y se obtiene conectando un condensador en paralelo en la salida de la fuente de corriente.

¹² Este espectro se obtiene bajo las condiciones atmosféricas: vapor de agua precipitable 14.2 mm, ozono total 3.4 mm y turbidez 0.27



$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{I(V) - I_i}{C_x} = \frac{I_x - I_x \cdot \exp\left(\frac{V}{b \cdot V_x} - \frac{1}{b}\right)}{C_x - C_x \cdot \exp\left(\frac{-1}{b}\right)} - \frac{I_i}{C_x}$$

Ecuación 5.14 Efecto de la capacitancia interna del panel fotovoltaico

Donde:

C_x = condensador, cuyo voltaje por lo general es V_x .

I_i = intensidad solar máxima producida por el panel, se obtiene por la Ecuación 5.18

La corriente de salida de la celda está dada por la Ecuación 5.15, sin embargo, se tiene la desventaja de requerir métodos iterativos y valores ideales del equipo en cuestión, para obtener el resultado.

$$I_{celda} = I_{ph} - I_d \left\{ \exp \left[\frac{e(V + I_{ph}R_s)}{mkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I_{ph}R_s}{R_p}$$

Ecuación 5.15 Corriente de salida de una celda fotovoltaica

Donde:

I ó I_{celda} = Corriente generada por la celda [A]

I_{ph} = Corriente producida por el efecto fotoeléctrico

I_d = Corriente de saturación u oscuridad que circula por el diodo paralelo

e = Constante que representa la carga del electrón $-1.6 \times 10^{-19}C$ -

V = Voltaje generado por el panel [V]

R_s ó R_p = Resistencia en serie o en paralelo

m = Valor ideal

k = Constante de Boltzmann 1.38×10^{-23} [J/K]

T = Temperatura [K]

Valor $\frac{mkT}{e} \approx 25$ mV a 300 K

Considerando que los efectos de la resistencia en paralelo son despreciables, igualando la corriente de cortocircuito a la corriente generada, despreciando los elementos resistivos de interconexión entre celdas, suponiendo celdas idénticas en el panel solar y considerando que $\frac{e(V+I_{ph}R_s)}{mkT} > 1$, se reduce la Ecuación 5.15 a la Ecuación 5.16.

$$I_{celda} = I_{ph} - I_d \cdot \exp \left[\frac{e(V + I_{ph}R_s)}{mkT} \right]$$

Ecuación 5.16 Ecuación reducida de la corriente de salida de una celda.



Para calcular la potencia entregada por el panel, se evalúa la Ecuación 5.16 en el voltaje, obteniéndose la Ecuación 5.17; para la obtención de la potencia máxima, se evalúa la misma ecuación pero en el voltaje óptimo.

$$P(V) = \frac{V \cdot I_x}{1 - \exp\left(\frac{-1}{b}\right)} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{V}{b \cdot V_x} - \frac{1}{b}\right)\right] \quad \text{Ecuación 5.17 Potencia del panel fotovoltaico}$$

Las celdas solares son generalmente de 10 cm por 10 cm y la potencia que generan es pequeña, por lo que se deben conectar varias entre sí para aumentar el voltaje o la corriente. A un conjunto de celdas conectadas se le llama panel o módulo fotovoltaico y se forman por 30 o 40 celdas. Con un intervalo de 10 a 20 paneles se provee de suficiente electricidad a una casa habitación. La configuración de los conjuntos de celdas se explica en la Figura 5.19 (6) (14).

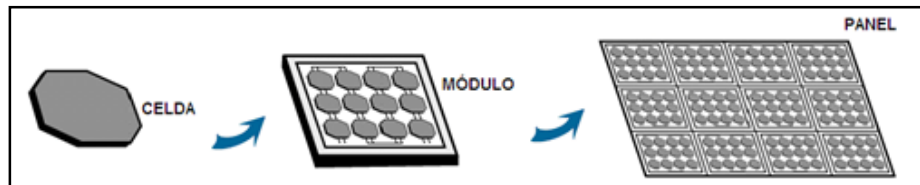


Figura 5.19 Conformación de un panel solar

Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión y la otra parte por transmisión (atraviesa la celda). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente (14).

Los sistemas fotovoltaicos tienen dos configuraciones:

Sistema FV del tipo isla: son especialmente diseñados para aplicaciones en donde no se tenga acceso a la red eléctrica de distribución pública. Durante el día la energía eléctrica generada es consumida por el usuario y almacenada en un banco de baterías. Por la noche el usuario hace uso de la energía almacenada en el banco de baterías.

Sistema FV del tipo interconectado: son especialmente diseñados para interactuar con la red eléctrica de distribución pública. Durante el día, la energía eléctrica generada es consumida directamente por el usuario y el excedente de la misma es inyectado a la red de distribución. Durante la noche el sistema no genera



energía y por lo tanto el usuario hace el consumo directamente de la red pública. Estos sistemas no utilizan baterías (39).

Para calcular el valor máximo de intensidad solar producida por un módulo fotovoltaico, se utiliza la expresión Ecuación 5.18 (56).

$$I_i = I_{celda} \cdot N_{paralelo}$$

Ecuación 5.18 Intensidad máxima de un módulo fotovoltaico

Donde:

I ó I_{celda} : Corriente generada por la celda [A]

$N_{paralelo}$: número de celdas o módulos en paralelo

El Balance de Energía en los módulos se expresa por la Ecuación 5.19 y se lleva a cabo de dos formas: condición dinámica si una parte de la energía se irradia en forma de calor a la atmósfera y el resto se convierte en electricidad (Ecuación 5.20); y en condición estática, si no provee energía eléctrica (Ecuación 5.21) (52).

$$\begin{aligned} & \text{Energía Absorbida} \\ & = \text{Energía Eléctrica Generada} \\ & + \text{Calor irradiado} \end{aligned}$$

Ecuación 5.19 Balance de energía en módulos fotovoltaicos

$$\beta = \frac{\eta_{CD} \cdot E_{iT} + \lambda \cdot (T_{CD} - T_A)}{\theta \cdot E_{iT}}$$

Ecuación 5.20 BE en módulos fotovoltaicos en condición dinámica.

$$\beta = \frac{\lambda \cdot (T_{CE} - T_A)}{\theta \cdot E_{iT}}$$

Ecuación 5.21 BE en módulos fotovoltaicos en condición estática

Donde:

β = energía

θ = porcentaje de absorción

E_{iT} = irradiación total que incide sobre el panel [W/m^2]

η_{CD} = eficiencia del panel a la temperatura T_{CD} .

λ = coeficiente de radiación de calor [$W/m^2\text{°C}$]

T_{CD} = temperatura del panel en condición dinámica [$^{\circ}C$]

T_{CE} = temperatura del panel en condición estática [$^{\circ}C$]

T_A = temperatura ambiente [$^{\circ}C$]



II. Aplicación de la tecnología

Usando módulos solares es posible dar energía a aplicaciones aisladas como telefonía rural, antenas de telecomunicaciones, boyas marítimas, televisión educativa rural, estaciones meteorológicas remotas, bombeo de agua rural, señalizaciones en carreteras, escuelas y centros de salud rurales, etc.

Otros usos menos convencionales son: en excursiones a través del desierto. A los camellos se les acondicionan paneles con baterías, y van recogiendo la energía solar a medida que van andando. Así, por la noche los excursionistas pueden escuchar el radio, o recargar el teléfono móvil y ver televisiones portátiles.

Los paneles solares FV también son capaces de mover coches. Los coches solares funcionan con la energía eléctrica generada por celdas fotovoltaicas incorporadas en su techo. La electricidad se carga en unas baterías y éstas alimentan los motores eléctricos. Esto se observa en la Figura 5.20.



Figura 5.20 Carros solares utilizados en rallies.

Los sistemas fotovoltaicos son la base energética de satélites artificiales así como de pequeños utensilios cotidianos que funcionan por la radiación solar, como calculadoras, y de los lugares de socorro situados en carreteras y autopistas.

Una aplicación urbana, es el adicionar paneles y baterías a las casas habitación, con lo que pueden producir electricidad para satisfacer la necesidad de consumo eléctrico como la televisión. Una casa solar se observa en la Figura 5.21 (1).



Figura 5.21 Casa solar.



En el caso particular de México, se tienen instalados 14.17 MWp en el sector doméstico y 4.01 MWp en otros sectores. La fabricación de estos dispositivos de celdas corresponde en un 49 % a Japón y en un 41.7 % en EUA y la UE (20).

III. Ventajas de la aplicación de las tecnologías solares fotovoltaicas

- Su funcionamiento es totalmente limpio al no emitir gases de efecto invernadero, ya que no utiliza ningún combustible para su funcionamiento.
- Los sistemas FV tienen un periodo de vida promedio de 25 años.
- La integración al diseño arquitectónico y su instalación resultan fáciles.
- Son resistentes a los golpes y vibraciones.
- Los paneles son duraderos y requieren poco mantenimiento.
- Son prácticos de tamaño y manejo y se pueden instalar en lugares remotos.
- La tecnología no es muy complicada o técnica, por lo que la capacitación e implementación resulta accesible a la mayoría de la gente. (6) (39)

IV. Limitantes de la aplicación de las tecnologías

- La energía diaria es limitada por lo que los sistemas fotovoltaicos deben de ser usados eficientemente para poder proveer electricidad durante todo el día.
- La inversión inicial de los paneles es alta.
- Se pueden usar para cualquier aparato electrodoméstico o de oficina pero sólo si son de bajo consumo.
- No hay infraestructura comercial y capacidad técnica local a gran escala actualmente en muchas regiones. (6)

V. Rendimiento y/o eficiencia

Una celda fotovoltaica produce de 0.46 a 0.48 volts. Un panel solar es capaz de producir voltajes de 12 o 24 volts de corriente directa.

Los sistemas FV tienen una eficiencia promedio de hasta el 39 % y una eficacia del 18 % Lo que ha impulsado reducciones en sus costos, así como incrementos en su producción. La tasa de crecimiento del uso de la tecnología se sitúa entre el 40 y 50 % anual en la última década (14).



En la Tabla 5.5 se observa la producción de electricidad en sistemas fotovoltaicos, para la producción que se reporta se considera el uso de accesorio como: baterías, inversores, controladores, etc.

Tabla 5.5 Sistemas FV

Sistema FV (isla e interconexión)	Casa Solar	Residencia Solar	Comercio Solar
Panel Solar [W]	6 x 120	8 x 200	16 x 200
Producción promedio por día [kWh]	3.06	6.8	13.6

VI. Costos

En México los sistemas fotovoltaicos en conexión con la red cuestan alrededor de US\$ 8 000/kW, y los sistemas fuera de red el doble. Los costos de la electricidad generada son demasiado altos para poder ser competitivos con otras tecnologías: entre 0.26 US¢/kWh (Mx\$ 2.85) y 0.36 US¢/kWh (Mx\$ 3.94) para sistemas fotovoltaicos en conexión a la red eléctrica, suponiendo un costo de inversión de US\$ 7 490.90/kW (Mx\$ 82 400) y entre 40 y 60 US¢/kWh para sistemas rurales fotovoltaicos. El empleo de esta tecnología no genera mayores costos ya que su mantenimiento sólo consiste en mantener aseado el panel solar (16) (14).

VII. Beneficios económicos especiales

Sistemas fotovoltaicos interconectados: en México al final del periodo de facturación que elabora la CFE, se realiza un balance entre la energía consumida y la energía inyectada. De manera que sólo se paga por la diferencia de la energía consumida. El excedente de energía inyectada, es abonado por la compañía eléctrica para el siguiente periodo de facturación.

Actualmente la ley permite contratos de interconexión de hasta 30 kWh/día, suficiente cantidad para abastecer hasta el 100 % del consumo en el sector residencial y cubrir una parte considerable del gasto energético en los sectores comercial e industrial (39).



5.2 Energía Eólica

El viento es una de las fuentes renovables de energía. La energía cinética del viento es transformada en energía mecánica y eléctrica a través de turbinas eólicas o aerogeneradores. La utilización de la energía del viento es antigua, se tienen datos históricos de que los sumerios armaron las primeras embarcaciones de vela. El término se acuñó a la palabra en latín *aeilicus*, relativo a Eolo, dios del viento en la mitología griega (5) (12) (14) (57).



Alrededor del año 1900, los molinos de viento se utilizaron para la molienda y el bombeo de agua. El inventor danés Poul la Cour realizó experimentos con éstos molinos para generar electricidad. Así, con la electrificación de Dinamarca se creó el primer mercado de generación eléctrica a partir del viento. Sin embargo, el crecimiento de esta tecnología se dificultó durante las guerras mundiales y fue hasta la década de los 60's, con la crisis mundial del petróleo, que se reactivó su expansión. Actualmente entre las fuentes renovables, es la de mayor crecimiento.

La energía eólica es consecuencia de la energía que irradia el Sol, entre el 1 y 2 % de esa energía se transforma en energía eólica, y eso supone una energía alrededor de 50 a 100 veces superior a la que se obtendría de que todas las plantas de la Tierra se convirtieran en biomasa. En la formación de corrientes eólicas interviene la diferencia de presiones en las distintas regiones terrestres y la densidad del viento; la circulación del mismo se da desde las regiones de alta presión hacia las de baja presión y la densidad, relacionada con la temperatura del viento, influye en la altura a la que se mueve (12) (13) (14) (58).

Las diferentes temperaturas, causadas por el calentamiento desigual de las latitudes hasta los polos, provocan que se cree la circulación de grandes masas de aire. El aire caliente es más ligero que el frío, se eleva hasta alcanzar una altura aproximada de 10 kilómetros y se extiende desde el Ecuador hacia los polos; debido a la rotación de la Tierra, los vientos sufren desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur, sin éstas el aire llegaría a los polos, para posteriormente descender y volver (14) (58) (59).



En el Ecuador el viento encuentra un área de bajas presiones cerca del nivel del suelo, y se extiende hacia los polos mientras se enfría gradualmente, cerca de los 30° de latitud, en ambos hemisferios, la Fuerza de Coriolis¹³, debida a la rotación, evita que el viento se desplace demasiado, en esa latitud se encuentra un área de altas presiones, por lo que una parte de la corriente desciende y la otra continúa su extensión hacia los polos, posteriormente en los polos se tienen regiones de altas presiones, por lo que el aire empieza a descender nuevamente al Ecuador. Sin embargo la rapidez y la dirección del viento están influenciadas por la suma de los efectos globales y locales (12) (14) (59) (57).



En la Figura 5.22 se muestra un ejemplo de cómo se ocasionan los vientos, desde una zona de alta presión hasta una de baja presión.



Figura 5.22 Formación de vientos en el Suroeste de la República Mexicana.

La rugosidad del terreno y los obstáculos adyacentes influyen en la velocidad del viento, tanto en su rapidez como en su dirección. Un parámetro para caracterizar la topología del terreno es su *factor de rugosidad*, que describe qué tan fácilmente pasa el viento sobre el terreno. Cuanto más pronunciada es la rugosidad, mayor es la ralentización que experimenta el viento. Su velocidad se puede calcular mediante la Ecuación 5.22:

¹³ Un objeto que se mueve sobre el radio de un disco en rotación, tiende a acelerarse con respecto a ese disco según si el movimiento es hacia el eje de giro o alejándose de éste. Debido a la rotación de la Tierra, todo lo que se mueve en su superficie no sigue una línea recta, sino que tiende a girarse hacia un lado.



$$v = \frac{v_{ref} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]}{\ln \left(\frac{z_{ref}}{z_0} \right)}$$

Ecuación 5.22 Velocidad del viento en función del terreno.

Donde

v = velocidad del viento

z = altura sobre el nivel del suelo para la velocidad deseada.

v_{ref} = velocidad de referencia a una altura de referencia z_{ref}.

z₀ = longitud de rugosidad en la dirección de viento (60) (61).

Tabla 5.6 Valores de z₀ para la Ecuación 5.22

Longitud de rugosidad [m]	Índice de energía [%]	Tipo de terreno
10 ⁻⁴	100	Superficie del agua (lagos, mar).
3 x 10 ⁻⁴		Superficies de arena (liso).
10 ⁻³		Superficies de nieve (crecimiento suave)
5 x 10 ⁻³		Superficie de tierra (lisa).
2.4 x 10 ⁻³ → 1 x 10 ⁻²	73	Terreno completamente abierto, con una superficie lisa (pistas de hormigón en los aeropuertos).
0.03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios y árboles dispersos. Colinas ligeramente redondeadas.
0.05 - 0.055	45	Terreno agrícola con algunas casas y cercados de 8 m de altura con una distancia aproximada de 1 250 m.
0.1	39	Terreno agrícola con algunas casas y cercados de 8 m de altura con una distancia aproximada de 500 m.
0.2	31	Terreno agrícola con árboles y plantas, o cercados de 8 m de altura con una distancia aproximada de 250 m.
0.3		Terreno con construcciones pequeñas.
0.4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos cercados, bosques y terreno accidentado.
0.5		Poblaciones fuera de la ciudad o suburbios
0.8	18	Ciudades grandes con edificios altos.
1.0		Ciudades y bosques, con una distancia corta entre las construcciones y los árboles.
1.6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

En la Figura 5.1 se muestran 3 esquemas de la República Mexicana, el primero muestra los estudios realizados en zonas de vientos aprovechables, así como una estimación del potencial de cada zona. El segundo presenta la clasificación de la energía eólica para aplicaciones en energía rural, las regiones más oscuras promedian 5 000 MW_e cada una, resultando una potencia total de entre 40 000 y 50 000 MW en México. En el tercero se observan los parques eólicos instalados, así como el potencial eólico a lo largo del Territorio Nacional (6) (20) (37) (62).

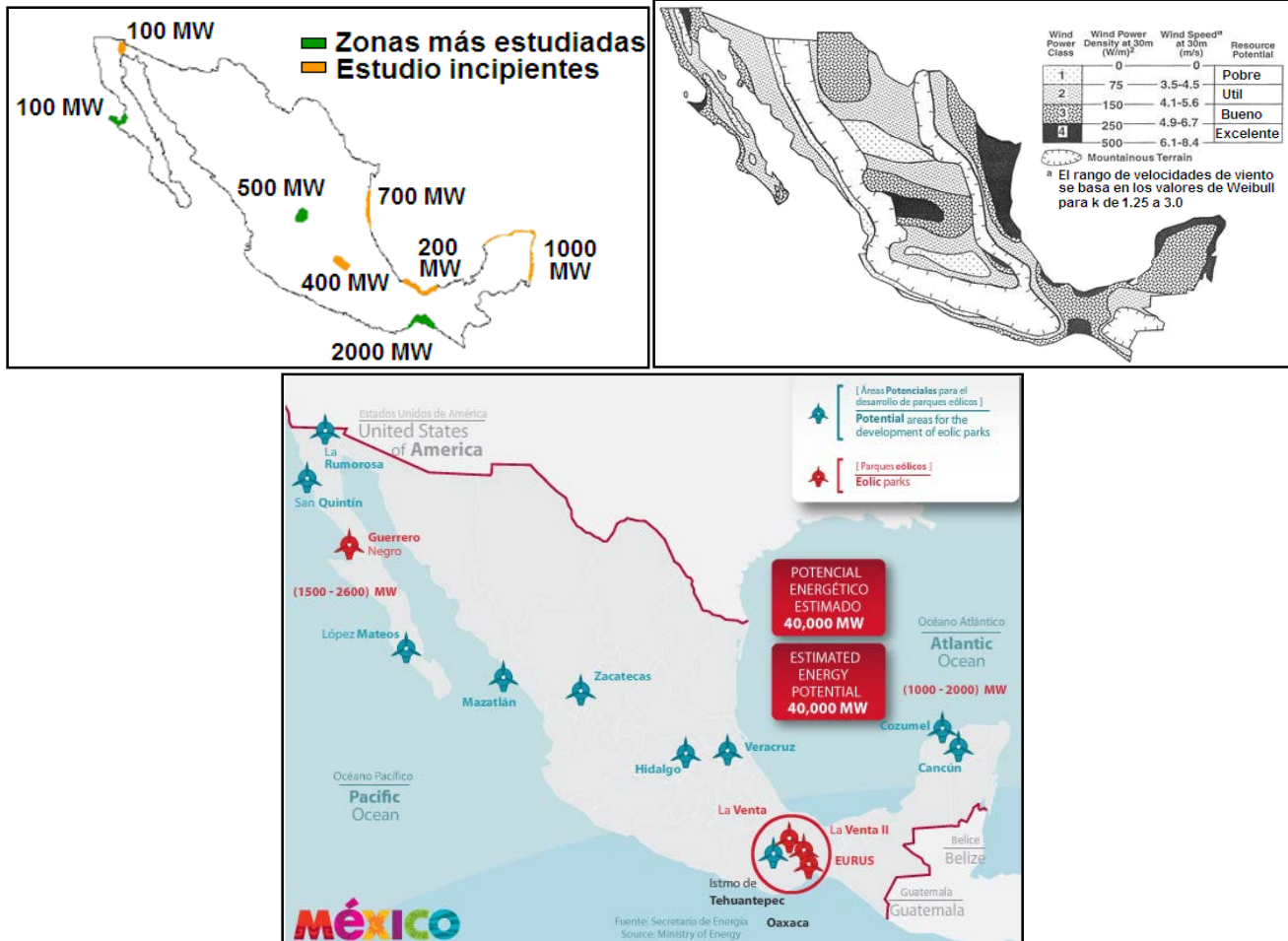


Figura 5.23 Capacidad eólica en la República Mexicana.

De acuerdo con el National Renewable Energy Laboratory de USA (NREL), se estima que el potencial que tiene México en el caso de la energía eólica es superior a los 40 mil MW. En la actualidad, México cuenta con al menos 28 proyectos, entre ellos se encuentra Eurus, uno de los proyectos eólicos más grandes de Latinoamérica, con una capacidad instalada de 250 MW, repartida en 167 aerogeneradores de cuya potencia es de 1.5 MW. El NREL ha coordinado la realización de mapas eólicos para Oaxaca, Baja California Sur, Yucatán, Quintana Roo y las franjas fronterizas de los estados de Baja California, Sonora y Chihuahua. Estos mapas se han realizado conjuntando información de estaciones meteorológicas con técnicas de prospección remota (5) (16) (37).



● Tecnología Eólica. Aerogeneradores.

I. Descripción y principio de operación

La tecnología actual son molinos (aerogeneradores) con aspas horizontales que aprovechan el viento como vela de barco; al girar, las aspas mueven una turbina que genera electricidad. Los aerogeneradores transforman la energía cinética del viento en energía mecánica primero y posteriormente en energía eléctrica. Por la facilidad con la que el viento se puede aprovechar, este tipo de energía está creciendo con gran rapidez a nivel mundial (6).

La potencia E que existe en el viento es igual al flujo de energía cinética por unidad de área perpendicular al flujo y está dada por la Ecuación 5.23:

$$E = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad \text{Ecuación 5.23} \quad \text{Potencia en el viento.}$$

Donde E es la potencia del viento, ρ [kg/m³] es la densidad del aire y v [m/s] es la rapidez del viento.

La potencia que se va por el rotor se define por la Ecuación 5.24 y se obtiene considerando que la velocidad del viento que entra al aerogenerador es v_1 y la velocidad del viento a la que sale el aerogenerador es v_2 . Resultando:

$$v_{aerogenerador} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

El flujo másico que entra al rotor se define como:

$$M = \rho A \frac{v_1 + v_2}{2}$$

La potencia que entra a velocidad v_1 es la suma de la potencia que sale a la velocidad v_2 y la potencia que se va por el rotor. Sustituyendo el flujo másico:

$$P_{rotor} = \frac{1}{2} M (v_2^2 - v_1^2)$$
$$P_{rotor} = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_2^2 - v_1^2) \quad \text{Ecuación 5.24} \quad \text{Potencia del rotor.}$$

Cuando la energía eólica es convertida en electricidad por medio de un aerogenerador, la potencia de salida se estima mediante la Ecuación 5.25:



$$P = EAC_p$$

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 AC_p$$

Ecuación 5.25 Potencia de salida del aerogenerador.

Donde P [W] es la potencia de salida del aerogenerador, A [m²] es el área de barrido del rotor y C_p es el factor de eficiencia.

El factor de eficiencia, está definido por la Ecuación 5.26 que representa la potencia disponible en el aire y es el producto de las eficiencias de conversión eléctrica, mecánica y aerodinámica del aerogenerador.

$$C_p = 4a(1 - a)^2$$

Ecuación 5.26 Factor de eficiencia de un aerogenerador.

El límite termodinámico como máximo posible de conversión se establece por la ley de Betz, el cual se obtiene derivando la Ecuación 5.26 e igualándolo a cero.

$$\frac{dC_p}{da} [4a(1 - a)^2] = 4(a - 1)(3a - 1)$$
$$4(a - 1)(3a - 1) = 0$$

Resolviendo la ecuación, se obtienen los valores de a = 1 y a = 1/3

Sustituyendo el valor de a = 1/3 en la Ecuación 5.26, se obtiene el valor teórico máximo de eficiencia.

$$C_p = \left[4 \left(\frac{1}{3} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{1}{3} \right) \right]^2$$
$$C_{p_{m\acute{a}x}} = \frac{16}{27} = 0.593$$

Como se observa, el factor de eficiencia máxima se obtiene cuando el aerogenerador reduce a un tercio la velocidad original del viento (63).

Lo habitual es que los aerogeneradores tengan tres palas aerodinámicas (de forma alargada y aerodinámica y que se sitúen sobre una torre) para la extracción de la energía cinética del viento a través del movimiento en sentido de las agujas del reloj (visto desde la dirección del viento). En general presentan sistemas de control de velocidad, sistema de orientación hacia la dirección predominante del viento, sistemas eléctricos para la generación, sistema de transmisión, y sistemas auxiliares de control e interconexión a la red. En la Figura 5.24 se muestra un esquema de los componentes principales de un aerogenerador (1) (14).

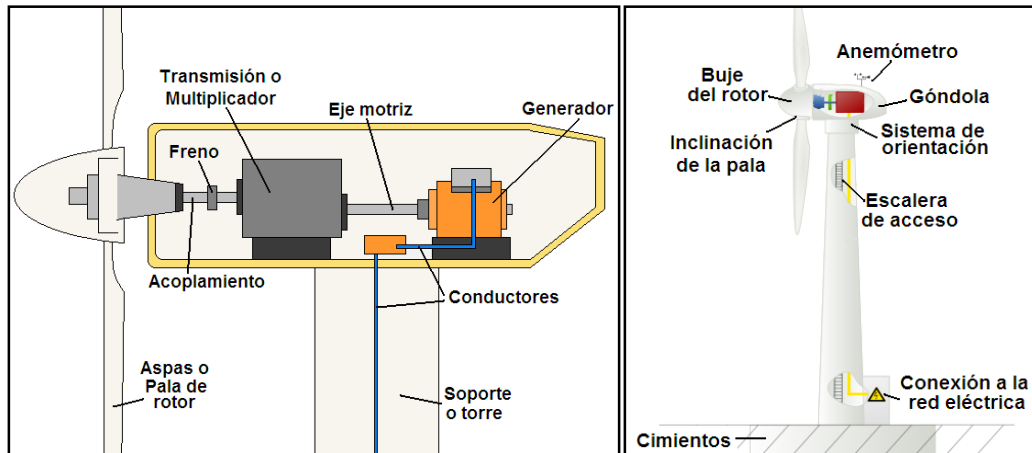


Figura 5.24 Aerogenerador básico

Una turbina típica contiene alrededor de 8 000 componentes diferentes, los cuales son sometidos a multitud de pruebas para determinar su rendimiento y fiabilidad; a continuación se definen los elementos principales en cuanto a su participación en el funcionamiento (13) (14) (58) (61) (64).

Armazón principal: la unión de la góndola y la torre, está confeccionado en acero y debe ser lo suficientemente robusto para soportar el tren de la turbina, pero no demasiado pesado.

Torre: soporta la góndola y el rotor. Puede ser tubular o de celosía (estas últimas, aunque resultan más baratas, están en desuso por ser menos seguras). El grosor y la altura de la torre varían en función de las características de la turbina, bajo un intervalo que va desde los 40 a más de 100 m de altura, intervalo usado ya que la velocidad del viento aumenta con la altura. Se fabrican en secciones de acero laminado (las tubulares) o de estructuras de rejilla y cemento (las de celosía).

Góndola: conjunto de buje y carcasa. La carcasa, generalmente de fibra de vidrio y poliéster, reforzada con perfiles de acero inoxidable protege al bastidor, pieza sobre la que se acoplan los elementos mecánicos principales (rotor, multiplicador, generador, y los sistemas hidráulicos de control, orientación y freno) y que está situada sobre la torre. La góndola cuenta con un bypass que hace girar la posición de las palas de manera que recojan el viento de la forma óptima en cada momento, sistema que se utiliza también para frenar el rotor.



Rotor: es el conjunto formado por las palas y el eje al que van unidas, a través del buje. Su función es transformar la energía del viento en energía mecánica. Las palas capturan el viento de manera perpendicular a su dirección, gracias a un sistema que coloca automáticamente el rotor en esa posición, y transmite su potencia hacia el buje. El buje fabricado en hierro fundido está conectado, a su vez, mediante otro eje al multiplicador, incluido dentro de la góndola. Las piezas deben resistir las fuerzas y cargas variables causadas por el viento.

Palas o aspas: captan la energía cinética del viento. Es uno de los componentes más críticos de la máquina, ya que en palas de gran longitud, las altas velocidades que se consiguen en los extremos llevan al límite la resistencia de los materiales con que están fabricados (resinas epoxy reforzadas con fibra de vidrio, también pueden fabricarse en poliéster y fibra de carbono, para añadirles firmeza y rigidez). Aumentando el diámetro de las palas, se puede aumentar la superficie de captación de viento y la potencia proporcionada por la máquina. La potencia que suministra el viento por unidad de superficie barrida se conoce como intensidad de potencia del viento. Por encima de una intensidad de potencia de 200 W/m^2 , ya puede ser rentable generar energía eléctrica a partir de aerogeneradores.

Eje motriz: transfiere la fuerza de giro del rotor a la caja de cambios o multiplicador y de éste al generador.

Multiplicador: forma parte del sistema de transmisión, multiplica en varias etapas, mediante un sistema de engranajes, comunicado al eje que hace girar el generador, transformando la baja velocidad a la que gira el eje del rotor hasta la velocidad alta que requiere el generador.

Generador: transforma la energía mecánica del giro de su eje, procedente del rotor de la máquina, en energía eléctrica. Los generadores comúnmente usados son los de tipo “jaula de ardilla” o rotor devanado. Si se utiliza un generador síncrono de baja velocidad no se ocupa la caja de engranes.



Sistema de frenado: frenos de disco que detienen la turbina si la velocidad del viento supera su capacidad, evitando que el buje se desprenda de la carcasa.

Sistema de orientación o sistema Yaw: mecanismo que orienta la góndola con respecto a la dirección del viento para que el rotor lo capture adecuadamente; los ángulos de desviación entre el eje del rotor y la dirección del viento ocasionan pérdidas de energía y disminución en la eficiencia del proceso.

Veleta y anemómetro: situados en la parte posterior de la góndola, miden dirección y velocidad del viento en cada instante y mandan señales a los sistemas de control y orientación, que accionan el equipo para que el rotor y las aspas se sitúen en la posición óptima contra el viento. Al inicio los aerogeneradores debían ser orientados manualmente hacia el viento, los equipos actuales emplean los sistemas mostrados en la Figura 5.25, una veleta que encara el viento y mueve el aerogenerador y un sensor de viento con un servomecanismo para direccionar al equipo. (13) (57).

- En las máquinas de pequeña potencia el sistema de orientación está formado por una aleta estabilizadora situada en la parte posterior del rotor, de manera que encara el viento como una veleta.
- En los grandes generadores se tiene un servomecanismo automático, compuestos por un sensor que recoge la dirección del viento y que gobierna el servomecanismo girando el rotor hasta situarlo en la dirección adecuada.

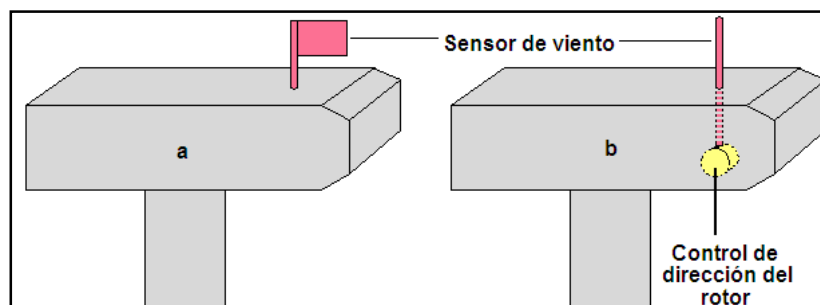


Figura 5.25 (a) veleta. (b) sensor de viento.

Convertidor de potencia: convierte la corriente continua del generador en corriente alterna a fin de que pueda ser inyectada a la red eléctrica.

Transformador: transforma la electricidad de la turbina al voltaje requerido.



Cables y tornillos: los cables conectan a los aerogeneradores del parque con la subestación eléctrica, llevando la electricidad producida en el generador hasta un convertidor, donde es transformada y enviada a la red. Los tornillos unen los componentes del aerogenerador, están diseñados para soportar cargas extremas.

Centrales eoloeléctricas

Para producir suficiente cantidad de energía, se requieren de varios aerogeneradores, al conjunto de éstos conectados entre sí a baja tensión, se les denomina centrales eoloeléctricas, coloquialmente llamados “parques eólicos” o “granjas de viento”, toda la energía generada en el parque eólico se vierte a la red eléctrica; de manera que se consigue producir en un espacio pequeño de terreno una gran cantidad de electricidad limpia. Cada parque cuenta con una central de control de funcionamiento que regula la puesta en marcha de los aerogeneradores y controla la energía generada en cada momento.

En algunos casos la energía no se vierte a la red eléctrica, sino que se utilizan aerogeneradores pequeños para generar la electricidad que necesita una vivienda aislada o una embarcación chica, para hacer funcionar aparatos eléctricos, o para extraer agua del subsuelo y regar con ella campos de cultivo. La Tabla 5.7 muestra las características de los aerogeneradores más usados comercialmente y en el Gráfico 5.2 se muestra la curva típica de generación de potencia en relación a la velocidad a la que opera el equipo (14) (58) (1) (65) (64).

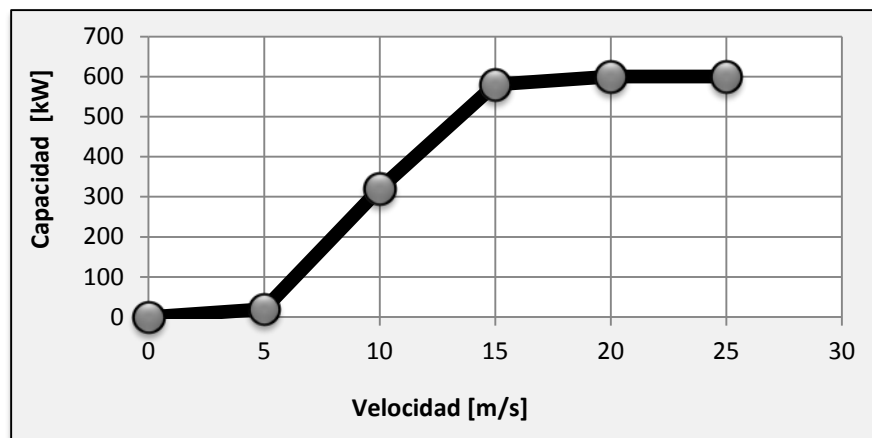


Gráfico 5.2 Generación en relación a la Velocidad del aerogenerador.

Gráfico obtenido de (14) (58) (1) (65) (64)



Tabla 5.7 Características de algunos aerogeneradores


Diámetro [m] 	$\Phi = 20$	$\Phi = 42$	$\Phi = 60$	$\Phi = 80$
Capacidad [kW]	100	600	1 300	2 000
Altura [m] ¹⁴	24	39-50	60-69	78-100
Peso total [ton]	12	49	125	225
Velocidad del viento [m/s]				
De arranque	4	5	4	4
A potencia nominal	14	17	15	15
De paro	26	25	25	25
Área barrida [m ²]	314	1 385	2 826	5 024
MWh/año a 9 m/s	410	2 332	4 867	8 230
MWh/m ²	1.3	1.7	1.7	1.6

Tabla obtenida de (14) (58) (1) (65) (64)

II. Aplicación de la tecnología.

El número de aerogeneradores que componen un parque eólico es muy variable, y depende fundamentalmente de la superficie disponible y de las características del viento en el emplazamiento.

Cualquier proyecto eólico necesita de la evaluación del recurso disponible (densidad del aire). Se emplean anemómetros y veletas, para registrar la rapidez y dirección del viento, respectivamente. Estos son colocados a diferentes alturas respecto al nivel del terreno, desde 10 hasta 80 metros de altura. Los datos se toman cada segundo y se promedian cada 10 minutos, ya que las variaciones en la rapidez del viento con periodos mayores que un segundo y menores que 10 minutos presentan un carácter aleatorio y se considera que son turbulencia. Para las aplicaciones de la energía eólica, las turbulencias en el flujo deben ser cuantificadas para diseñar la turbina, considerando carga máxima, fatiga estructural, control, operación del sistema y calidad de la potencia generada (14).

Durante la instalación de una central es importante el espacio que se asignará entre cada uno de los aerogeneradores y de éstos con otros obstáculos, ya que la presencia continua de objetos disminuye la velocidad del viento y con esto se reduce

¹⁴ La altura reportada no es la de la torre, sino la de la distancia del suelo hasta el inicio del diámetro de barrido del rotor, siendo éste entre el 40 y 50 % de la altura total del aerogenerador



el potencial de generación eléctrica, por lo que debe considerarse una distancia aproximada de entre 2 y 3 veces el diámetro de las palas (64).

Los tipos de centrales eoloeléctricas son (14) (66):

Centrales desarrolladas tierra adentro en superficies escarpadas.	
Centrales desarrolladas cerca de la costa.	
Centrales desarrolladas fuera de la costa o mar adentro. Conocidas como parques “offshore”, para que sea adecuado el desarrollo eólico, la instalación en debe estar a 10 kilómetros o más de tierra firme.	
Centrales desarrolladas tierra adentro en superficies planas. Si el terreno es llano y la dirección de viento dominante definida, los aerogeneradores se disponen en filas alineadas; si el viento presenta frecuentes cambios de dirección, los aerogeneradores se suelen disponer al tresbolillo.	

La electricidad generada por un parque eólico se inyecta a la red de transmisión de energía eléctrica. Los aerogeneradores individualmente están interconectados a media tensión (≈ 345 kW). En una subestación los transformadores incrementan el voltaje para su conexión a la red de transmisión a alta tensión.

Las configuraciones del sistema eléctrico dependen fundamentalmente del tipo de generador que se emplea y del subsistema de acondicionamiento de potencia. Algunas configuraciones presentan ventajas en costo, otras presentan ventajas en su desempeño y grado de compatibilidad con las redes eléctricas (14).

Existen actualmente dos técnicas principales a partir de las cuales se ha buscado transformar la energía eólica en electricidad:

- La primera, utiliza un generador de eje vertical apoyado en el suelo con un rotor igualmente provisto de álabes que le permiten capturar la energía.



- La segunda, utiliza una máquina generadora de eje horizontal apoyada en lo alto de una estructura, cuyo rotor está provisto con álabes o palas que le permiten capturar la energía cinética del viento. Esta es la tecnología más estudiada y utilizada dado que permite capturar vientos de alturas superiores, donde son más intensos, y su instalación y mantenimiento presenta complicaciones menores (3).

Los tipos de aerogeneradores eoloeléctricos son los siguientes, los primeros cuatro son tecnologías en desuso por su baja eficiencia comparada con los modernos aerogeneradores, pero se incluyen para uso doméstico (57) (58):

1) Multipala Americano o Molineta: Son máquinas de eje horizontal. Primer molino eólico en ser desarrollado y su uso se centró en el bombeo de agua, contaba con 144 palas fabricadas en madera de cedro. Fue la base para el diseño de los modernos generadores eólicos. Actualmente tienen desde 12 hasta 24 palas en el rotor, lo que les permite aprovechar vientos de velocidades bajas.

2) Rotor Savonius: Rotor de eje vertical, compuesto por dos semicilindros colocados a cierta distancia uno del otro de manera que el aire puede circular entre ellos. Es un dispositivo sencillo, de fácil construcción y de pequeña potencia.

3) Darrieus: Consta de dos o tres aspas en forma de parábola unidas a un eje vertical por sus extremos, a pesar de no poder ponerse en marcha sólo, es uno de los rotores de eje vertical más avanzado. Recibe su nombre por el ingeniero francés Darrieus, quien lo patentó en 1931 y fue producido por la firma estadounidense Flo Wind hasta 1997. Presenta las ventajas de que los equipos de conversión y control están en la base y el aerogenerador no tiene que orientar su posición según la dirección del viento. Tienen la limitante de que la velocidad de viento es menor al nivel del suelo, lo que provoca que su rendimiento sea bajo.

4) Dironil: Es semejante al Darrieus, con la particularidad de que sus aspas modifican automáticamente su inclinación en función de la dirección del viento. Lo que produce un mejor rendimiento, además de poder arrancar sólo.

5) Tripala o Bipala: Rotores de eje horizontal, formados por 2 o 3 palas, tienen un alto rendimiento aerodinámico, con una potencia unitaria que oscila entre los 600

y los 1 500 kW. Los tripala necesitan un viento con una velocidad del orden de 5 m/s (relativamente elevada) para que comiencen a funcionar y son los equipos que mayormente se instalan en la actualidad. Son de paso variable (este sistema permite una producción óptima con vientos bajos y una reducción de cargas con vientos altos), de alta calidad en el suministro eléctrico y bajo mantenimiento. Los bipala ahorran el costo y peso de una pala. Necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida que los tripala, lo que supone una desventaja en lo que respecta al impacto auditivo. Presentan la ventaja de que pueden ser muy adecuados cuando se requieren potencias nominales pequeñas, como en el caso de la minieólica, y en aplicaciones aisladas de la red. Aún son pocos los modelos que se ofrecen en el mercado.

6) Aerogeneradores de “diseño”: Actualmente se producen turbinas con diseños poco “convencionales”. Es el caso, por ejemplo, de la máquina “quietrevolution”, de eje vertical, creada para ser instalada incluso sobre el tejado de las casas, al igual que pasa con el generador Enflo. En la Figura 5.26 se muestran estos aerogeneradores.

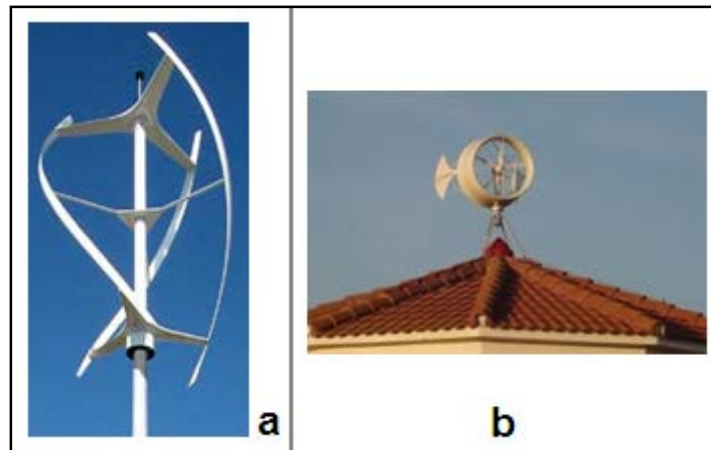


Figura 5.26 aerogeneradores (a) quietrevolution (b) Enflo

En el Gráfico 5.3 se muestra un análisis comparativo del rendimiento de los distintos tipos de rotores, el cual ilustra gráficamente, cómo desde los molinos tradicionales los rotores han ido acercando su rendimiento al considerado óptimo o ideal. La escala de velocidad típica sólo representa valores comparativos (57).

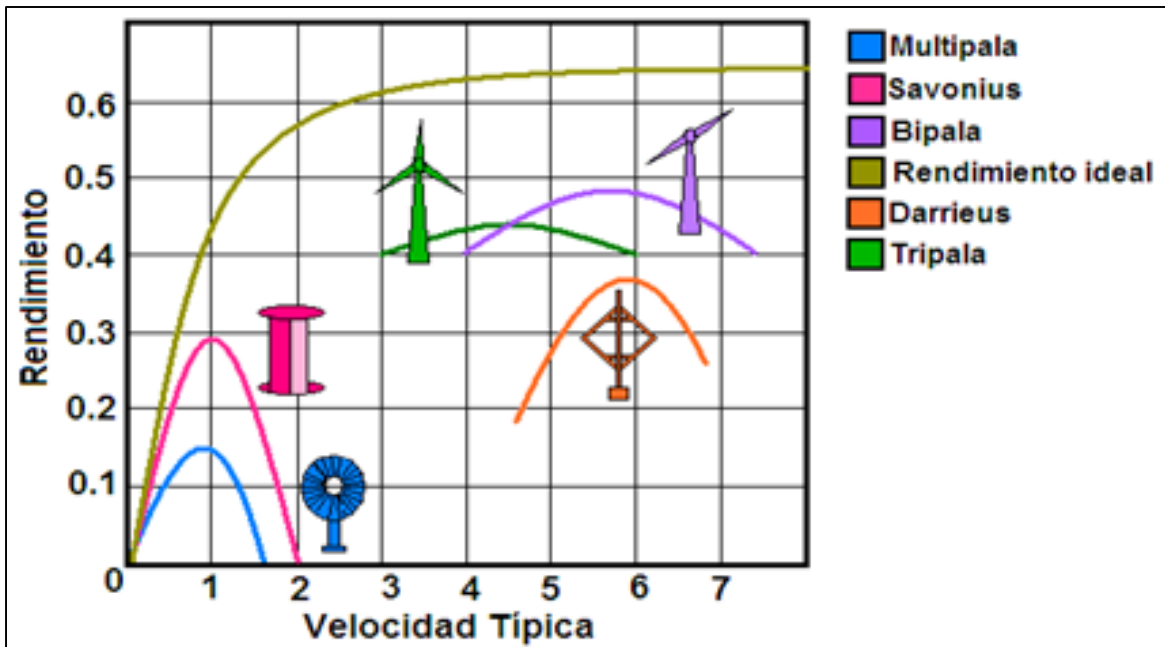


Gráfico 5.3 Comparación del rendimiento de los diferentes rotores.

Los aerogeneradores de pequeña o mediana potencia se utilizan para generar electricidad en lugares aislados de la red (casas, explotaciones agrarias, refugios de alta montaña, etc.), en pequeñas instalaciones industriales, para bombeo y riego, para alimentar sistemas aislados de telefonía o televisión, cargar baterías o faros, mover embarcaciones, en sistemas de alarma, etc. Los aerogeneradores de gran potencia se utilizan para conectar la energía producida a la red eléctrica (58).

III. Ventajas de la aplicación de la tecnología

- Consumen muy pequeñas cantidades de agua.
- El uso de la energía eólica reduce la emisión de gases de efecto invernadero, lo que permite mitigar el calentamiento global por la disminución del CO₂.
- La tecnología es modular y rápida de instalar, además no emiten óxidos de nitrógeno, ozono, partículas, ni otras sustancias dañinas al medio ambiente.
- El uso de suelo de una central es de 1 % del terreno, por lo que las actividades agropecuarias pueden proseguir su curso sin mayor inconveniente.
- Tecnología libre de costos de combustible, sólo emplea el recurso renovable.
- Es un resguardo contra la volatilidad del precio de los combustibles fósiles.
- Mejora la independencia energética, evitando la importación de combustibles.



- La contaminación por ruido no es significativa ya que está entre los 35 y 40 dBa¹⁵, sin embargo, existen equipos modernos de 1 MW, cuyos niveles de potencia de ruido varía entre los 100 y 106 dBa.
- Tiene un periodo de vida útil de entre 20 y 25 años.
- Su implementación es compatible con otras fuentes convencionales.
- Cuenta con un amplio potencial para fomentar el desarrollo regional y la generación de nuevos empleos.
- Después del costo inicial, los servicios subsecuentes son económicos.
- Mejora en el acceso a los predios, así como de las vías de transporte.
- Es la energía renovable más madura tecnológicamente, por lo que su inversión inicial es actualmente la más accesible de todas las tecnologías.
- Los parques eólicos permiten evacuar la energía desde un sólo punto, reduciendo el número de líneas de transporte y los impactos ambientales.
- Promueve la regularización de tierras sin costo para el propietario, así como la obtención de títulos de propiedad. (6) (14) (58) (57)

IV. Limitantes o desventajas de su aplicación

- Para que el viento pueda aprovecharse en una central eólica, se requiere una velocidad mínima de $v_{\text{viento}} = 5 \text{ m/s}$ y por debajo de los 25 m/s, así como que sea consistente en intensidad y a régimen regular.
- El potencial de aprovechamiento del recurso es específico de cada sitio de la Tierra, por lo que no se puede estimar un valor promedio global.
- Con respecto al impacto visual, las centrales son visibles a varios kilómetros de distancia, sin embargo algunos países cuentan con marcos regulatorios para evitar la contaminación visual, sobre todo en zonas turísticas.
- Existe la posibilidad de que ocasionen efectos sobre las aves. Desde modificar sus patrones de vuelo y su hábitat hasta las colisiones (ya que no logran ver el aspa cuándo ésta está girando). Se tienen estudios donde se muestra que las aves migratorias superan las alturas de la mayoría de los aerogeneradores y que las aves locales tienen vuelos a alturas bajas debido a que la vegetación es baja.

¹⁵ El límite máximo deseable para el oído humano es de 50 decibeles. dBa = decibeles audibles.



El desarrollo de los parques eólicos debe acompañarse de estudios sobre la avifauna para establecer medidas de prevención y mitigación necesarias.

- No puede ser almacenada como energía eólica, aspecto que encarece el costo.
- Uno de los mayores inconvenientes consiste en que es intermitente y no siempre puede obtenerse la potencia deseable.
- Fuente dispersa que necesita grandes superficies, esto no afecta al terreno ya que puede ser aprovechado para actividades agrícolas y zonas de recreo.
- Se requieren grandes superficies para la instalación de los parques. Obstáculos como edificios, árboles, muros, etc. disminuyen la velocidad del viento y a menudo crean turbulencias en torno a ellos; ésta puede extenderse hasta una altura de alrededor de 3 veces superior a la del obstáculo, por lo cual deben evitarse las interferencias entre aerogeneradores y otros objetos.
- Los insectos se colocan en el borde anterior de la pala, provocando que en vez de que el viento siga el contorno de la misma, la golpea, da la vuelta y se aleja, perdiendo impulso, disminuyendo la eficiencia de por ejemplo 750 kW a 400 kW. En algunos parques se ha implementado un sistema de dispersión de agua desde la torre hacia la pala para ahuyentar los insectos.
- El precio inicial de los aerogeneradores es elevado (aunque no tanto como en otras formas de energía renovable). (6) (13) (14) (57) (48)

V. Rendimiento y/o eficiencia

Al comparar las primeras instalaciones eolieléctricas con las actuales, se hacen evidentes las mejoras en la tecnología, como es el aumento en la capacidad de generación eléctrica, el incremento en la eficiencia de la conversión de la energía, la confiabilidad y el grado de seguridad en los sistemas. Los primeros aerogeneradores tenían rendimientos del orden del 10 %, pero los actuales tienen sofisticados sistemas de control que les permiten alcanzar rendimientos próximos al 50 %. Un porcentaje muy alto, teniendo en cuenta que la fracción máxima de la energía del viento que puede capturar un aerogenerador es del 59 % (14) (58).

La energía producida en el aerogenerador se estima sobre un año típico de funcionamiento. La estimación implica la reducción estadística de los datos de



viento a través de la función de densidad de probabilidad de Weibull¹⁶ (Ecuación 5.27). Las distribuciones de viento son sesgadas y varían de un lugar a otro del globo (14) (67).

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right]}$$

Ecuación 5.27 Densidad de probabilidad de Weibull.

Donde:

t_0 = parámetro de posición (vida mínima) y define el punto de partida u origen de la distribución [tiempo].

η = parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo del eje de los tiempos. Cuando $(t - t_0) = \eta$ la fiabilidad viene dada por $R(t) = \frac{1}{e}$

β = parámetro de forma y representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallos $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^{\beta-1}$

Un aerogenerador admisible tiene entre 20 y 50 rev/min, y son convertidas en aproximadamente 1 500 a 1 800 rev/min por el multiplicador. Este incremento es lo que provoca electricidad y que el viento sea una opción viable de suministro de energía. Al final de la torre los conductores están conectados a un transformador que rebota la electricidad entre dos imanes de intensidades diferentes, resultando una corriente que aumenta de 25 000 a 450 000 voltios (57) (58).

Por ejemplo, con un aerogenerador cuyas aspas tienen un diámetro de 40 metros y sujeto a vientos con velocidad promedio de 8 m/s, se pueden tener 600 kW de capacidad, lo cual es suficiente para proveer de electricidad a un conjunto habitacional de aproximadamente 200 departamentos (13).

La producción de la corriente eléctrica que tenga la tecnología está determinada por la fuerza y el tiempo en que sopla el viento. Por lo general los equipos comerciales actuales, tienen una potencia de 1.5 MW_e (6) (20).

¹⁶ En análisis de fiabilidad permite establecer el periodo de vida de un sistema hasta que presenta una falla.



Los aerogeneradores mar adentro son de mayor tamaño que los de tierra y presentan un mayor rendimiento, ya que la velocidad media del viento es ampliamente más alta, además de que operan durante más horas en el año (14).

Para que los sistemas eólicos tengan un mejor rendimiento, deben mantener una velocidad de rotación constante, corrigiendo variaciones en la velocidad del viento y parando de rotar cuando la velocidad supera los límites de seguridad del diseño.

Los modernos aerogeneradores tienen, un factor de disponibilidad de alrededor del 98 %. Es decir, están operando y preparados para funcionar durante una media superior al 98 % de las horas del año, y sólo necesitan una revisión de mantenimiento cada seis meses. Están diseñados para trabajar alrededor de 120 mil horas de operación a lo largo de los 20 años de su vida útil. Esto supone mucho más que un motor de automóvil, que dura generalmente alrededor de 4 a 6 mil horas. Durante esta vida útil los aerogeneradores producen entre 40 y 80 veces la cantidad de energía usada en su construcción.

VI. Costos

Los costos de inversión de las grandes centrales eólicas son de US \$ 1 800 a USD \$ 3 000 (al año 2013) por kW de potencia instalada. En el transcurso de las últimas dos décadas la tecnología de las turbinas eólicas ha avanzado radicalmente y sus costos se han reducido hasta hacerse competitivos con las tecnologías convencionales en contextos geográficos favorables (14) (16).

Los costos de inversión en las centrales eoloelectricas pueden variar en función de factores como: ubicación geográfica del proyecto, infraestructura disponible (camino de acceso, distancia a la red eléctrica), características del suelo, tipo de terreno, contingencias previstas, etc. Además de factores como el tipo de contrato, garantías solicitadas, refacciones solicitadas, nivel de detalle de las pruebas de aceptación y pólizas de servicio posventa (68).

Para la instalación de una central eléctrica, debe evaluarse el coste de usar grandes grúas, así como la construcción de carreteras adecuadas para la transportación de



las turbinas, lo cual, aumenta el costo de los proyectos eólicos. Esta evaluación determina si resulta más económico adquirir una mayor cantidad de máquinas pequeñas o una menor cantidad de máquinas de gran potencia. En el Gráfico 5.4 se muestra la participación en términos porcentuales, de los componentes principales, en el precio total de un aerogenerador (58).

Los desarrollos eólicos mar adentro son más costosos que los terrestres, ya que las cimentaciones son más difíciles de construir. Además la transmisión de la energía generada se realiza a través de cable submarino, que es más costoso que el cable de tierra, sin contar que el ambiente marino incrementa los costos, por requerir protección anticorrosión y protección contra la fatiga de los equipos y maquinaria. Los desarrollos eólicos en superficies planas son los menos costosos ya que la inversión de obra civil es baja. En el Gráfico 5.5 se muestran los costos de inversión generalizados, en porcentaje de las centrales eoloelectricas (14).

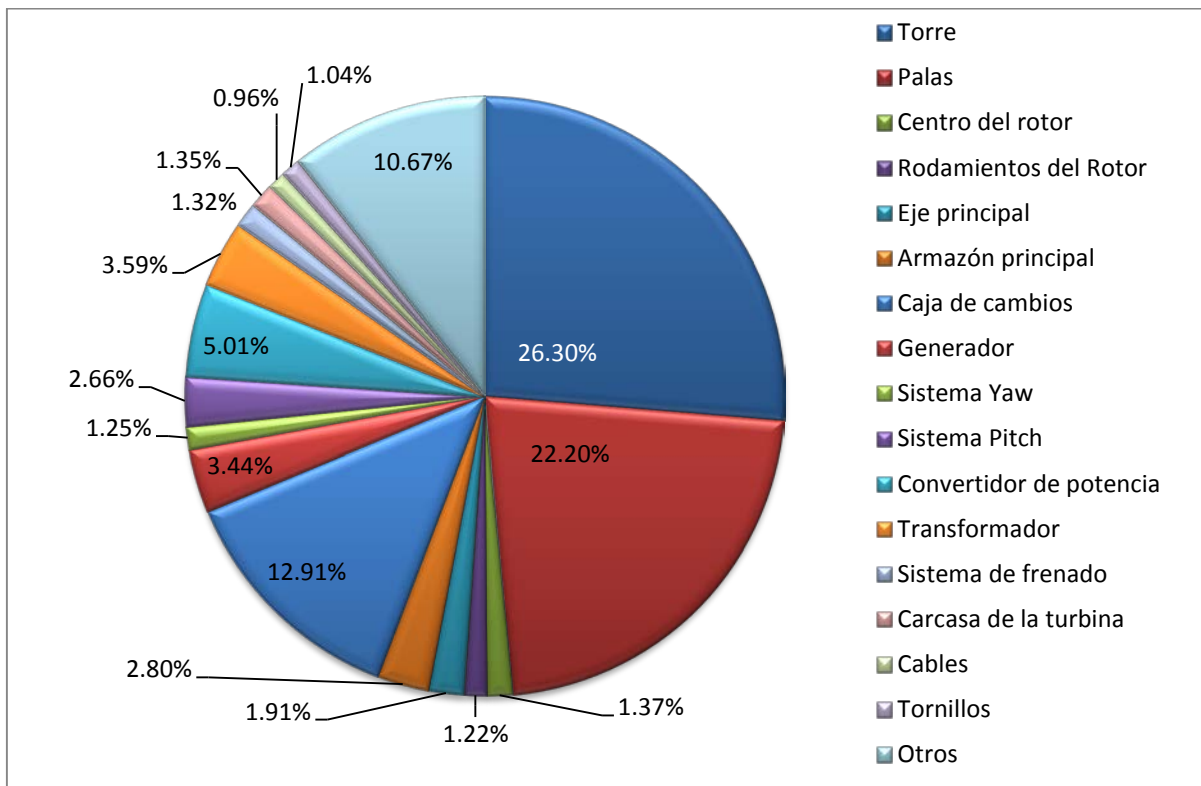


Gráfico 5.4 Participación en porcentual, en el precio total del aerogenerador

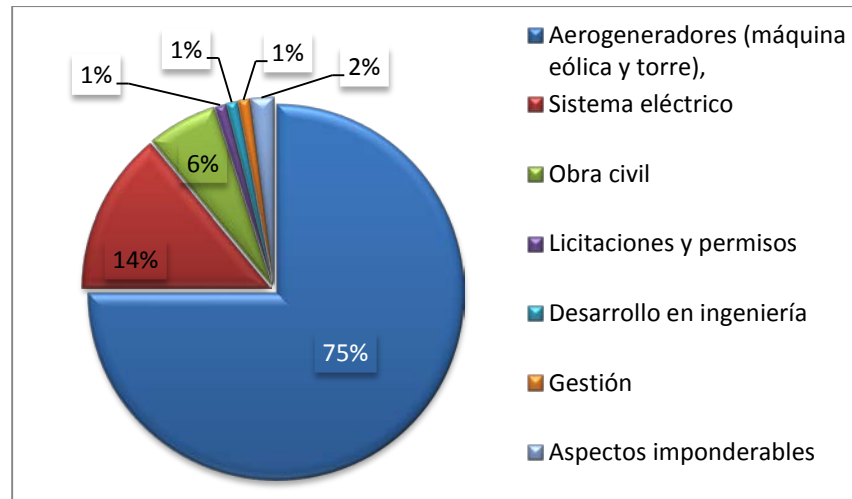


Gráfico 5.5 Costos de inversión en una central eoloeléctrica

El costo de la electricidad generada depende de la velocidad del viento y de su distribución a lo largo del año, pero se estima de 0.05 a 0.06 UDS/kWh generado, lo que sitúa a la tecnología en un nivel competitivo con relación a las tecnologías convencionales cuyos costos son de 2.5 UDS/kWh (16) (20).

El costo nivelado de producción de electricidad depende del factor de planta; es decir, la relación entre la energía eléctrica generada y la energía que el sistema hipotéticamente generaría si operara todo el tiempo a su capacidad nominal; y los costos asociados a su operación y mantenimiento (14).

Para determinar la selección de la mejor opción en las propuestas económicas de inversión para centrales eoloeléctricas, se utiliza un parámetro para comparar económicamente los proyectos, llamado costo nivelado de generación (Ver Glosario y acotaciones), definido por la Ecuación 5.28 (68).

$$CN = \frac{I + \sum_{t=1}^n (OM_t + RC_t)(1+r)^{-t} - SV(1+r)^{-n}}{\sum_{t=1}^n PAE_t(1+r)^{-t}}$$

Ecuación 5.28 Costo Nivelado de Generación.

Donde:

CN = Costo nivelado

I = monto de inversión.

OM_t = costos de operación y mantenimiento durante el año t.

RC_t = costos de mantenimiento mayor durante el año t.



r = tasa de descuento.

SV = valor de rescate después de n años.

n = número de años de vida útil.

PAE_t = electricidad entregable en el punto de interconexión durante el año t .

Actualmente los costos promedio de la energía eoloelectrónica se ubican entre 4 y 8 ¢USD/kWh generado, los cuales ya están muy cerca de los 2.5 ¢USD/kWh que cuesta la generación convencional mediante tecnología de punta (13).

VII. Operación y mantenimiento

Los sistemas de control de velocidad de los aerogeneradores permiten regular la generación de potencia y son los siguientes (14) (68):

1. Desprendimiento de flujo pasivo (stall pasivo): las palas se encuentran fijas al cubo y con un ángulo fijo. Por lo que en ciertas velocidades y ángulos de ataque del viento, la pala del aerogenerador pierde sustentación.
2. Regulación del ángulo de paso del viento (pitch): control activo que cambia el ángulo de paso de las aspas. Es decir, las palas de los aerogeneradores pueden moverse para obtener un ángulo en el que la cuerda del perfil aerodinámico sea paralela a la dirección del viento. Este tipo de control permite que el aerogenerador conceda una potencia prácticamente constante cuando opera a su velocidad nominal o por arriba de ella.
3. Desprendimiento de flujo activo (stall activo): las palas presentan movimiento que asegura la máxima fuerza de sustentación. Cuando se requiere controlar la velocidad de las palas, éstas rotan ligeramente para incrementar el ángulo de ataque. A velocidades bajas este sistema opera igual que el control pitch.

En 1987 el Comité Electrotécnico Internacional, a través del Comité Técnico IEC-TC-88. De Turbinas Eólicas, estandarizó los aerogeneradores para que operaran bajo condiciones seguras y adecuadas. Mediante la creación de normas de diseño, técnicas de medición del ruido acústico, medición de cargas mecánicas y comunicaciones para el monitoreo y control de parques eólicos.



En las redes eléctricas se deben controlar las variaciones de potencia y voltaje, así como las de frecuencia, para mantener el balance de potencia real y reactiva, además de evitar la generación de armónicos indeseables en el suministro eléctrico. Se debe dotar a los aerogeneradores de capacidad para mantenerse en línea ante una falla transitoria de la red eléctrica y aportar potencia reactiva para contribuir a la recuperación de la operación nominal. Para asegurar la calidad del suministro eléctrico se debe supervisar y controlar constantemente la potencia suministrada por los aerogeneradores (14).

VIII. Beneficios

El mayor beneficio económico por la construcción de centrales eólicas está asociado con la producción industrial de los subsistemas, componentes e integración de los mismos. El mayor beneficio social es la generación de nuevos empleos. El número de empleos directos en la fabricación de aerogeneradores para una central eoloeléctrica típica de 25 MW es de alrededor de 125, y por cada uno se crean entre 5 y 7 empleos indirectos. Asimismo, Los aerogeneradores no requieren un suministro de combustible posterior. Por tanto, son idóneos para los países en vías de desarrollo, contribuyendo a su crecimiento (14).

En cuanto a beneficios ambientales, la energía eólica no deja residuos ni emisiones dañinas para el ambiente. Además por cada kWh producido con energía eólica se tienen 26 veces menos impactos que el producido con lignito, 21 veces menos que el producido con petróleo, 10 veces menos que el producido con energía nuclear y 5 veces menos que el producido por gas (58) (69).

Los modernos aerogeneradores recuperan rápidamente toda la energía gastada en su fabricación, instalación, mantenimiento y desmantelamiento. Bajo condiciones de viento normales, a una turbina le cuesta entre dos y tres meses recuperar esa energía. Además los parques eólicos son compatibles con otros usos y son instalaciones que, tras su clausura y desmantelamiento, no dejan huella y el suelo recupera su apariencia original (58).



5.3 Bioenergía



La Bioenergía es la energía que se obtiene cuando los combustibles de la biomasa (masa biológica) son empleados con fines energéticos. El recurso renovable está compuesto por material orgánico, cuyo origen puede ser un proceso biológico, espontáneo o provocado (14).

Es el combustible más utilizado en la historia, iniciando con la quema de madera para producir fuego. La biomasa es toda la materia orgánica (terrestre o acuática) formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de éste. Así como la materia orgánica de las aguas residuales, lodos de depuradoras y la fracción orgánica de los RSU. La biomasa puede utilizarse para la producción de energéticos, materias primas y bienes de consumo (14) (70) (71).

Tiene carácter de energía renovable debido a que su contenido energético procede de la energía solar principalmente, y del agua y dióxido de carbono, fijados por las plantas mediante el proceso fotosintético, la energía se almacena en forma de enlaces químicos y es liberada por procesos como hidrólisis, fermentación, combustión, descomposición, pirólisis, biodigestión anaerobia, etc., donde se separan las moléculas de CO₂, reservando el carbono en forma de hidrocarburos y liberando el oxígeno. La eficiencia de conversión de la energía solar en energía almacenada en forma de materia orgánica es baja, estimándose un límite máximo cercano al 3 %. Por lo general la biomasa se expresa en términos de materia seca por unidad de área [g/m²]. La bioenergía, aunque es una fuente impulsada por actividades del hombre, se considera renovable, porque su generación se da de manera ininterrumpida (5) (13) (9) (14) (70).

Esta fuente de energía alternativa, a diferencia de las convencionales, no somete a combustión recursos fósiles, sino que quema desechos orgánicos de bosques, madera y residuos agrícolas, industriales y alimenticios. Motivo por el cual los productos obtenidos se denominan biocombustibles (6) (12) (70) (72).

En México existe la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos, la cual define a los bioenergéticos como los combustibles obtenidos de la biomasa proveniente de



materia orgánica de las actividades, agrícola, pecuaria, silvícola, acuicultura, agricultura, residuos de la pesca, domésticos, industriales, comerciales, de microorganismos y enzimas, así como sus derivados, producidos, por procesos sustentables que cumplan con las especificaciones de calidad establecidas en los términos de la misma Ley (9) (14).

Se estiman entre 70 y 73 millones de toneladas anuales de residuos agrícolas y forestales (estiércol, aserrín, aceites y grasas) con potencial energético, los cuales sumados a los RSU de las 10 principales ciudades, y destinados a la generación de electricidad a partir de su transformación térmica, proveen la posibilidad de instalar una capacidad nacional de 803 MW y generar 4 507 MWh/año (73) (74).

El potencial de la bioenergía en México se estima entre 83 500 y 119 500 MW al año, localizado en los sectores mostrados en el Gráfico 5.6. Suficiente para cubrir 60 % de la demanda energética, actualmente los bioenergéticos representan el 8 % del consumo de energía primaria en el país. En la Tabla 5.8 y en la Figura 5.27 se muestra la clasificación del potencial de biomasa en México (5) (72) (74).

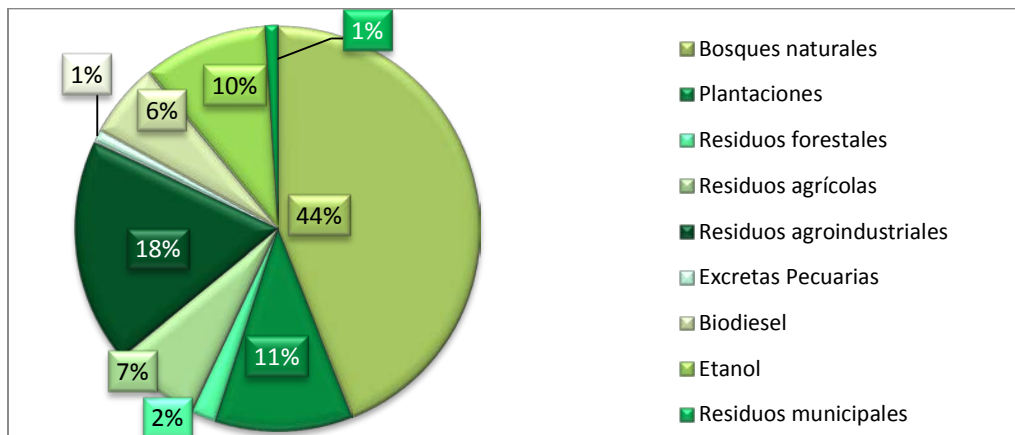


Gráfico 5.6 Potencial Bioenergético en México

Tabla 5.8 Biomasa en la República Mexicana

Bueno		Medio	Pobre	
Aguascalientes	Distrito Federal	Chiapas San Luis Potosí	Baja California Norte	Puebla
Chihuahua	Michoacán		Baja California Sur	Querétaro
Coahuila	Morelos		Campeche	Sinaloa
Durango	Nuevo León		Colima	Sonora
Hidalgo	Quintana Roo		Guanajuato	Tabasco
Jalisco	Tamaulipas		Guerrero	Tlaxcala
Edo. De México	Veracruz		Nayarit	Yucatán
			Oaxaca	Zacatecas

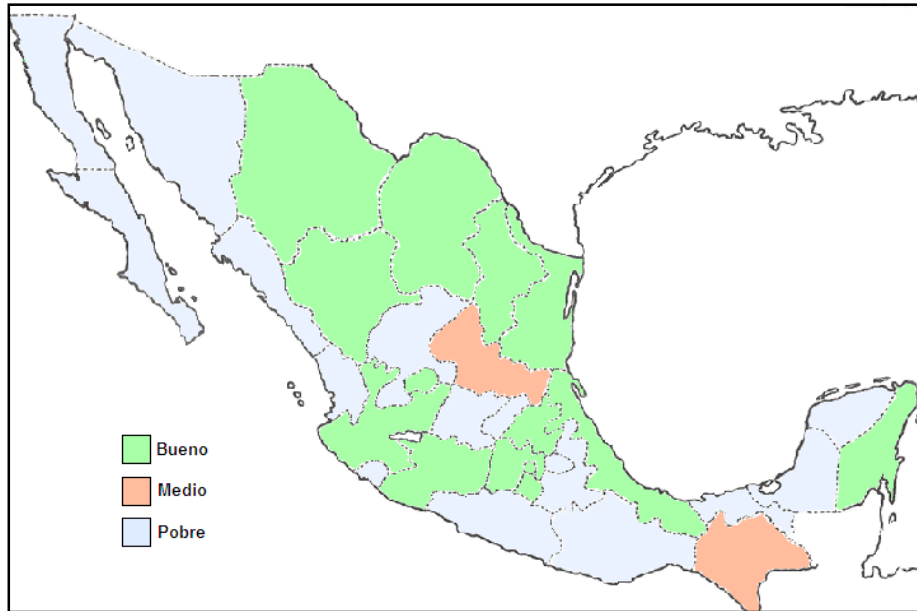


Figura 5.27 Biomasa en la República Mexicana

La búsqueda de fuentes energéticas alternas y la estimación del potencial nacional, ha promovido el desarrollo de estudios y proyectos en materia de bioenergía, en la Figura 5.28 se observan los proyectos que actualmente se encuentran en operación y en la Figura 5.29 se muestran los grupos de trabajo que realizan investigaciones en bioenergía (37) (71) (74).

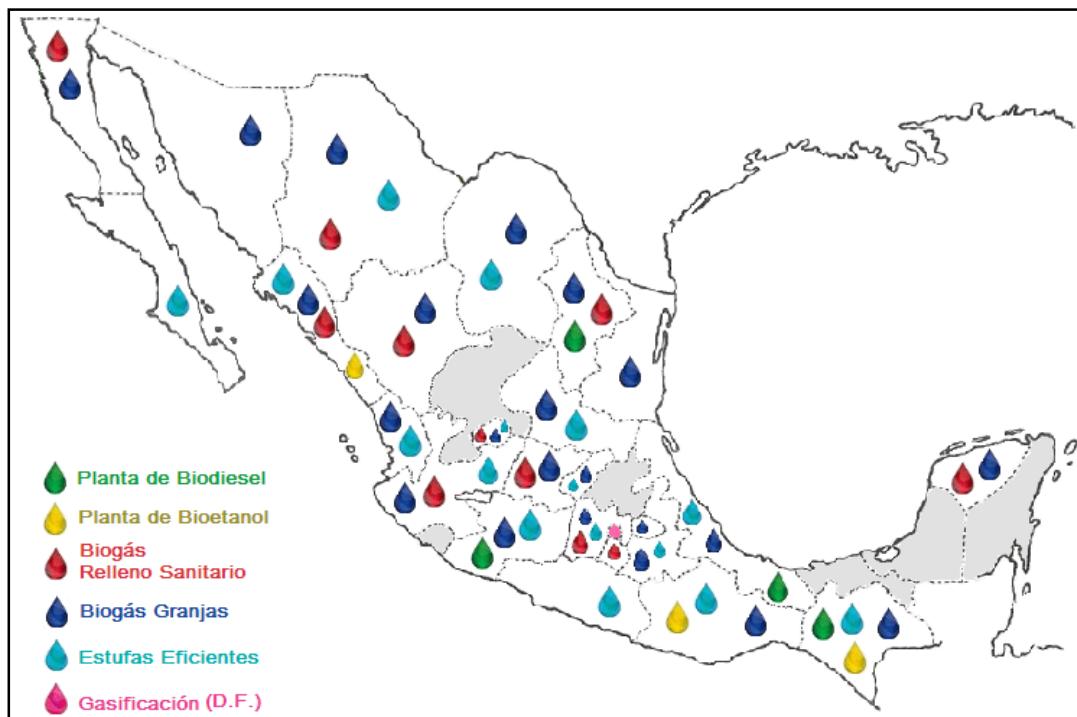


Figura 5.28 Proyectos de bioenergía

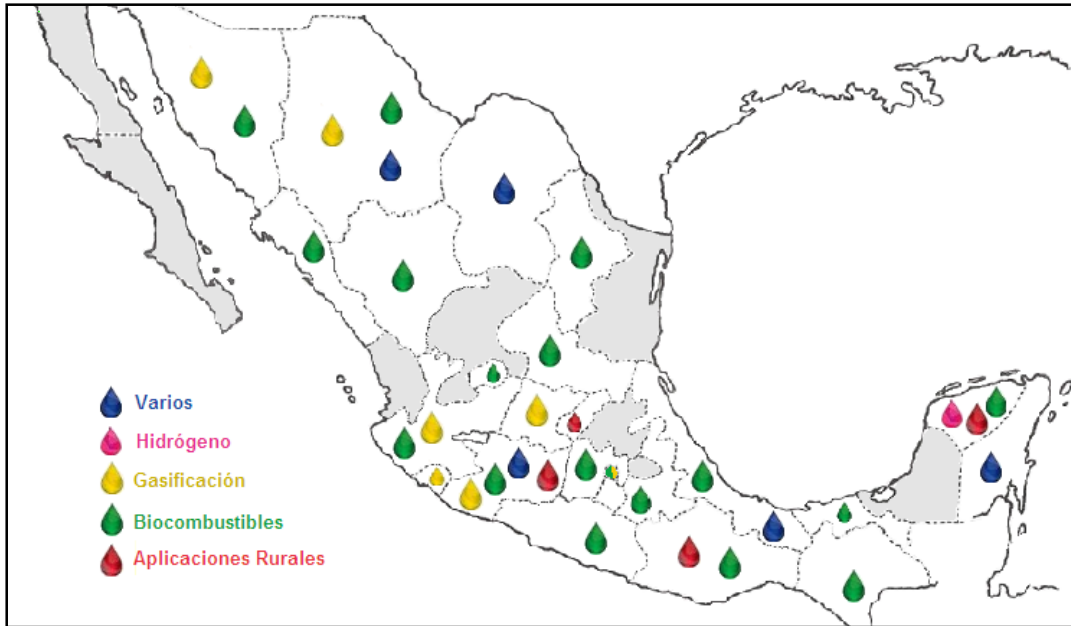


Figura 5.29 Investigación en bioenergía

I. Descripción y aplicación de la tecnología

► **Categorías del material orgánico**

La utilización de la bioenergía para la producción energética, distingue dos categorías de material orgánico aprovechable, residuos orgánicos y plantaciones agroenergéticas; en ambos casos si el residuo contiene humedad, debe secarse, para no disminuir su poder calorífico¹⁷. En la Tabla 5.9 se comparan los poderes caloríficos de la biomasa en relación a su porcentaje de humedad (70) (72).

Tabla 5.9 Poder calorífico de la biomasa en función del porcentaje de humedad

Tipo de Biomasa	PCI [kJ/kg]			PCS [kJ/kg]
	0	10	15	0
Restos de cultivos herbáceos (paja y tallos)	16 244.8	14 528.2	13 376.3	17 752.0
Restos de cultivos leñosos (sarmientos y ramas)	17 668.3	13 544.3	9 307.3	19 175.5
Residuos forestales (leñas, coníferas, cortezas)	18 643.8	14 570.0	10 383.3	20 151.1
Restos de agroindustrias (cáscaras de almendra, avellana, piñón, cacahuete y cascarilla de arroz)	17 345.9	16 303.4	14971.9	18 028.4
Restos de industrias forestales (serrines y virutas de coníferas y frondosas de climas tropical y templado)	20 067.3	18 576.8	15 562.3	20 067.3

¹⁷ Poder calórico superior (PCS). Poder calórico inferior (PCI)



Residuos orgánicos:

Residuos naturales y de origen antropogénico, que sin otra utilización liberan energía en el proceso de descomposición, produciendo dióxido de carbono y metano. Los residuos de origen antropogénico, se consideran biomasa si son residuos orgánicos, no sanitarios, ni peligrosos. En la Tabla 5.10 se muestra la distribución de estos residuos (6) (14).

Tabla 5.10 Distribución de residuos orgánicos según su origen.

Residuos orgánicos naturales	Residuos de origen antropogénico
Se generan anualmente en los bosques.	Se generan en grandes cantidades en el sistema económico y en la sociedad en general.
Su cantidad es enorme, y es factible usarlos para fines energéticos, mediante un aprovechamiento dentro del marco de un manejo sustentable, que conserve el equilibrio de los nutrientes del suelo y los ecosistemas.	Están constituidos por desperdicios provenientes del estiércol de animales y humanos, desechos agrícolas, rastros municipales, basura orgánica, paja, cascarilla de trigo y arroz, rastrojo de maíz, virutas y desechos de madera y papel, entre otros.

En la actualidad todos estos materiales orgánicos se revelan como combustibles alternativos de uso comercial e industrial, que producidos bajo criterios de sustentabilidad ofrecen importantes cantidades de energía renovable.

En la Tabla 5.11 se muestra el potencial energético a partir de los RSU, en la Tabla 5.12 se muestra el potencial energético a partir de las excretas de ganado bovino lechero y en la Tabla 5.13 se muestra el potencial energético a partir de las excretas de ganado porcino. En cuanto al ganado vacuno, en México se estima una población de más de 3.5 millones de cabezas (cárnicas y lecheras) y que cada cabeza genera alrededor de 10 kg al día de excretas con un alto contenido energético (5) (14) (72) (75) (76).

Nota: Los valores totales reportados en las siguientes tablas, se obtuvieron calculando el promedio entre los valores mínimo y máximo, y multiplicando este valor por la cantidad de estados en lo que se presenta esa condición. El total es la suma de las multiplicaciones.



Tabla 5.11 Potencial energético a partir de los RSU

Zona	Generación [miles ton/año]	Potencial de generación de CH ₄ [miles ton/año]	Potencial Generación Eléctrica [MW]	
			Biogás	Térmico
	0 - 550	0 - 25	0 - 10	0 - 20
	550 - 1 000	25 - 50	10 - 20	21 - 50
	1 000 - 2 000	50 - 100	20 - 35	51 - 80
	2 000 - 2 500	100 - 150	35 - 50	81 - 120
	2 500 - 5 000	150 - 300	50 - 110	120 - 270
Total	28 125	1 463	630	1 300

Tabla 5.12 Potencial energético a partir de excretas de ganado bovino lechero

Zona	Cabezas [miles]	Potencial de generación de CH ₄ [miles ton/año]	Potencial Generación Eléctrica [MW] Biogás
	0 - 100	0 - 70	0 - 40
	100 - 200	70 - 140	40 - 80
	200 - 300	140 - 200	80 - 120
	300 - 500	200 - 300	120 - 180
	500 - 700	300 - 440	180 - 260
	700 - 1 100	440 - 700	260 - 400
Total	7 000	4 530	2 660

Tabla 5.13 Potencial energético a partir de excretas de ganado porcino

Zona	Cabezas [miles]	Potencial de generación de CH ₄ [miles ton/año]	Potencial Generación Eléctrica [MW] Biogás
	0 - 250	0 - 15	0 - 10
	250 - 500	15 - 30	10 - 20
	500 - 1 000	30 - 60	20 - 40
	1 000 - 1 500	60 - 90	40 - 80
	1500 - 2500	90 - 160	80 - 140
Total	17 000	1 025	770

Plantaciones o cultivos agroenergéticos:

Son inducidos por el ser humano con vistas a su utilización energética o como materia prima para otras industrias. Van desde plantaciones forestales de aprovechamiento rápido, pasando por plantaciones de palmeras, pastos de crecimiento rápido y cultivos de caña de azúcar, y colza, entre otros (14).



El empleo y la selección de plantas para producción de energía ocasionan problemas comparables a los que se dan en la agricultura intensiva: empleo de grandes cantidades de fertilizantes y plaguicidas nocivos para la naturaleza, efectos adversos sobre la biodiversidad y degradación de la calidad del agua; lo cual exige el desarrollo y el uso de biofertilizantes y diversos métodos biológicos para controlar las plagas. Si no está regulado el uso de suelo, puede llevarse a la deforestación y a la pérdida de biodiversidad; de no establecerse políticas adecuadas en la repartición de la renta agrícola–energética, los aprovechamientos pudieran no contribuir a mejorar la equidad en las zonas agrícolas (14).

En México, las plantaciones agroforestales y las de aprovechamiento múltiple, en las que los trabajadores del campo se puedan asociar para ser dueños de la producción, son más conciliadoras con la biodiversidad y el desarrollo económico, que aquellas con inversión y operación extranjera (14).

Tipos de plantaciones energéticas:

Silvicultura: ofrece alternativas para la producción de biomasa mediante plantaciones de especies perennes leñosas, conocidas como plantaciones energéticas o dendroenergéticas (14).

Las especies perennes leñosas son más adecuadas para la producción de bioenergía porque requieren una menor cantidad de suplementos para su crecimiento y porque aprovechan de forma más eficiente los recursos naturales (suelo y agua). Es preferible usar las especies de mayor productividad primaria neta en rotaciones cortas, para que los co-productos puedan aprovecharse económicamente, mejorando la rentabilidad de los sistemas silvícolas. Estas plantaciones pueden ser mucho más productivas que la mayoría de los bosques naturales y ofrecen servicios ambientales para contrarrestar la erosión y la contaminación del suelo, mitigar el daño a los mantos acuíferos y otros efectos adversos de la agricultura y la forestería convencionales (14).

Silvicultura intensiva industrial: prefiere las especies de crecimiento rápido, como eucaliptos, pinos, acacias y leucaenas en las zonas tropical y subtropical, mientras



que en las zonas templadas y boreales se utilizan principalmente álamos, sauces y coníferas. El uso de especies exóticas ofrece ventajas que han incentivado su introducción en diferentes países, sin embargo pueden inducir a la pérdida de biodiversidad y fomentar el desarrollo de plagas y enfermedades. Por lo que para el sector de la bioenergía se recomienda el uso de especies nativas evitando así el uso excesivo de plaguicidas (14).

El avance en las técnicas para domesticar, mejorar y propagar especies nativas minimiza riesgos ambientales, preserva la biodiversidad y fortalece la autonomía para contar con las fuentes originales de germoplasma. Lo que debería ser una prioridad para el progreso de la bioenergía (14).

Características que deben tener los cultivos energéticos (70):

- ▣ Altos niveles de productividad en biomasa con bajos costos de producción, para que la generación de biocombustibles sea económicamente viable en relación a la producción de combustibles de origen fósil.
- ▣ Posibilidad de desarrollarse en tierras agrícolas marginalizadas, por falta de mercado para los productos tradicionalmente cultivados.
- ▣ Solicitud de maquinaria agrícola convencional, disponible por los agricultores.
- ▣ No contribuir a la degradación del medio, el balance ambiental producido por el cultivo debe ser superior al que se tendría si la tierra estuviese ocupada por un cultivo tradicional, además de la posibilidad de recuperar fácilmente las tierras después de finalizado el cultivo energético para realizar otros cultivos.
- ▣ Balance energético positivo, la energía contenida en la biomasa producida debe ser superior a la gastada en el cultivo.

Una de las principales especies cultivadas es la *Jatropha curcas*, oleaginosa conocida como piñón de tempate, de porte arbustivo capaz de combatir la desertificación, ya que sobrevive y crece en tierras marginales, necesitando poca agua para su crecimiento. Sus semillas son tóxicas, por lo que no son comestibles ni compiten con algún uso alimenticio; su uso se basa en la obtención del aceite susceptible de ser procesado y transformado en biodiesel. De su tallo se extrae el látex y de sus hojas y cortezas se obtienen sustancias de aplicación en insecticidas



y en medicinas. De la cáscara y las semillas se obtiene biogás; mientras que de los desechos de su procesamiento devuelven calidad agrícola a tierras degradadas, beneficio que sirve para recuperar suelos erosionados (77).

La sustentabilidad social para la producción de biomasa a partir de cultivos energéticos implica el acuerdo de intereses entre diferentes actores sociales en temas de distribución de beneficios, cambios de derechos de propiedad de tierra, competencia y consecuencias de la bioenergía con otros usos del suelo, como el alimenticio; programas de extensión rural (agrícolas y forestales), preservación de biodiversidad y ecosistemas, así como el cuidado del paisaje y la hidrografía (14).

► **Estados físicos de la biomasa**

La biomasa proporciona, según su origen y procesamiento, energía útil y de aprovechamiento factible desde el punto de vista económico, en los estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. Esto le confiere a la bioenergía características de recurso energético universal, limpio y de gran alcance, si se aprovecha su capacidad de regeneración y si se explota con criterios de sustentabilidad. La bioenergía contribuye de manera importante a sustituir las fuentes de energía fósil y nuclear, dando lugar a energéticos útiles para los seres humanos, los cuales se obtienen sometiendo la biomasa a diversos procesos de transformación (1) (14).

Estado sólido

Los biocombustibles sólidos son utilizados para fines térmicos y eléctricos. Se encuentran en residuos forestales, astillas, pellets, briquetas, lechos artificiales¹⁸, carbón vegetal, bagazos y residuos de cosechas como tallos, pajas de trigo, arroz, y maíz. La forma más común de biocombustibles sólidos es la leña, que actualmente cubre casi el 50 % de las necesidades energéticas en países en vías de desarrollo, incluso se han desarrollado plantaciones energéticas que son árboles de rápido crecimiento, como el eucalipto, cuyo propósito es producir madera para combustible (1) (3) (13) (14) (70).

¹⁸ Pellets: Cigarrillos hechos con biomasa compactada; Briquetas: Cilindros de biomasa compactada; Lechos artificiales: Fabricados por la aglomeración y compresión de astillas y pajas



El carbón vegetal se obtiene por combustión lenta y parcial de la biomasa leñosa con cierto contenido de humedad, a una temperatura entre 250 y 600 °C. Se produce en hornos tradicionales de tierra, que tienen baja eficiencia en la transformación de leña a carbón (12 - 20 % del peso seco de la leña) y que generan daños a la salud de los operadores. La producción eficiente se logra mediante hornos de ladrillo o metálicos. El poder calorífico del carbón vegetal es de 25 000 a 33 000 kJ/kg, según su contenido en cenizas. En el proceso de transformación se forma un conjunto de aceites pesados llamados aceites de pirólisis que pueden utilizarse como sustitutos de combustibles líquidos (70) (71).

El bagazo de la caña de azúcar tiene un poder calorífico de 8 kJ/g, en México se estima que la cantidad anual de energía potencial a partir del bagazo es de 3 700 TJ, y considerando una turbina cuya eficiencia térmica sea del 40 %, y una caldera con una eficiencia del 80 %, se tendría un potencial de 1 185 TJ. Actualmente se aprovechan 100 PJ al año, equivalentes al 1.2 % de la oferta interna bruta de energía. El estado de mayor producción es Veracruz con más de 5.5 Mton/año, le siguen los estados de Jalisco y San Luis Potosí con 1.5 Mton/año, el resto de los estados tienen una producción menor a 1.0 Mton/año, el estado de menor producción es Campeche con 0.2 Mton/año (16) (78).

Estado líquido

Son los biocombustibles líquidos o biocarburantes, se utilizan en sustitución de los derivados del petróleo o como aditivos de éstos para su uso en motores de explosión de encendido de chispa (ciclo Otto) y en los motores de combustión interna por compresión (ciclo Diesel). Proviene de una gran variedad de cultivos, como la caña de azúcar, maíz, betabel, colza¹⁹, soya y aceite de palma²⁰, entre otros. Se considera que en un futuro provengan de cultivos no comestibles como higuera²¹, jatropha, residuos agroindustriales y material lignocelulósico de plantaciones energéticas forestales. Se dividen en dos grupos (1) (12) (70) (77):

¹⁹ Variedad de planta de la que se extrae un aceite rico en ácidos grasos monoinsaturados.

²⁰ Aceite de origen vegetal obtenido del mesocarpio de la fruta de la palma.

²¹ Oleaginosa, también conocido como ricino.



El primero formado por alcoholes, aldehídos y cetonas convertidos en bioetanol o etanol de biomasa para su uso en motores de gasolina. El producto se obtiene partir de una reacción de fermentación con levaduras (79).

El segundo formado por aceites vegetales, aceites vegetales puros, residuos de aceite de cocina, biocarburantes y ácidos orgánicos, que son convertidos en biodiesel y se utilizan en motores diesel en sustitución parcial o total del gasóleo de automoción, en autobuses y camiones de carga, o bien para producción de trabajo mecánico y electricidad y calor en generadores (14) (80).

Los biocombustibles líquidos se explican en el apartado de Biocarburantes.

Estado gaseoso

En la actualidad se han desarrollado diversos biocombustibles gaseosos para su uso en turbinas de gas para producción de electricidad, como lo son biogás, hidrógeno, metano y gas de gasógeno, por mencionar los principales (79).

Bio-hidrógeno: se considera un “vector energético” de enorme potencial. Es un combustible gaseoso obtenido por medio de procesos fotobiológicos o mediante la transformación de recursos orgánicos, éste último consiste en romper las moléculas orgánicas en sus componentes elementales mediante reacciones con vapor de agua en presencia de un catalizador. Su combustión produce agua y gran cantidad de energía, del orden de 113.04 kJ/g (14) (70).

Gas de gasógeno: al someter la brea resultante de la pirólisis a temperaturas de entre 800 y 1 500 °C, en ausencia de oxígeno, se originan productos gaseosos (N₂, CO, H₂, CH₄, y CO₂ en proporciones variables) con un poder calorífico de entre 4 187y 5 024 kJ/m³. El destino del gas es la producción de calor por combustión directa en un quemador o la generación de electricidad por medio de un motor o turbina. Actualmente se tiene procesos de gasificación basados en sistemas de lecho fluidizado, con alta eficiencia con base en ciclos combinados de turbina de gas y ciclos de vapor, para la generación de electricidad, por lo que es importante la obtención de gases limpios (70).

Biogás o metano: gas combustible, producto de la fermentación y reacciones de biodegradación de residuos orgánicos de bosques, campos agrícolas y desechos de animales de crianza como vacas, cerdos, borregos, cabras, caballos y aves, mediante bacterias metanogénicas, y ambientes anaeróbicos (13) (80).

En la biometanación, la biomasa húmeda se alimenta al digestor biológico, donde por la acción de microorganismos se transforma en biogás y se producen lodos residuales usables como fertilizantes o mejoradores de suelos (13) (81).

El biogás se puede obtener también a partir de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, ya que contienen gran proporción de desechos orgánicos húmedos y se tienen las condiciones adecuadas para que proliferen las bacterias anaerobias, que al digerir los desechos producen metano y bióxido de carbono en el interior del relleno. El metano se emplea para producir energía térmica, mecánica o eléctrica. En la Tabla 5.14 se observa la composición del gas producido, y en la Figura 5.30 se muestra la captura del biogás en el relleno y su transformación en energía eléctrica (12) (14) (20) (82).

Tabla 5.14 Composición del biogás.

Componente	% volumen	% vol. en México	Característica
Metano	40 – 75	55	Explosivo
Dióxido de carbono	25 – 60	35	Acidez
Óxido de nitrógeno	0 – 7	< 5	Explosivo
Oxígeno	0 – 2	< 5	Inocuo
Hidrógeno	0 – 1	1.1	Mal olor
Sulfuro de hidrogeno	0 - 1	< 2	Mal olor
Benceno, toluenos y bisulfatos	Trazas	Trazas	

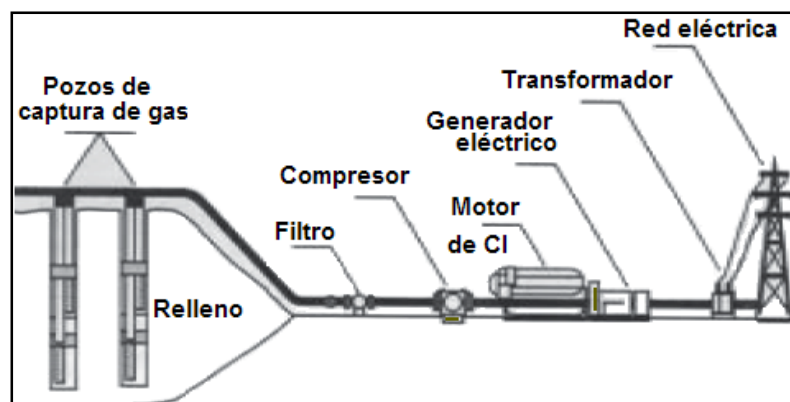


Figura 5.30 Investigación en bioenergía



Para calcular la generación anual de metano se utiliza la Ecuación 5.22.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

Ecuación 5.29
Generación anual de metano.

Donde:

Q_{CH_4} = generación de metano en el año de cálculo [$m^3/año$]

i = 1 año de incremento

j = 0.1 años de incremento

n = (año de cálculo – año inicial de recepción de residuos)

k = constante dependiente de: humedad y pH en la mezcla de residuos, disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, y temperatura promedio del relleno sanitario. En el LandGem por convención toma un valor de $0.05 [año^{-1}]$

L_0 = es la capacidad potencial de generar metano y depende del tipo y composición de la basura colocada en el relleno [$10^3 m^3/Mg$ de RSU].

M_i = son las toneladas anuales de residuos arrojadas al relleno sanitario.

t_{ij} = edad de la sección j -ésima de la masa de residuos M_i recibida al año i -ésimo.

Beneficios de los rellenos sanitarios (6) (15).

- ☐ Recolección del metano para su quema: liberar el metano a la atmósfera tiene un potencial de calentamiento global equivalente (a 100 años) a liberar 34 veces la misma cantidad de CO_2 , (a 20 años, el potencial de calentamiento sería de 86 veces). Si el metano se quema, el impacto de las emisiones globales de GEI sería 86 veces menor en un periodo de 20 años y 34 veces menor en 100 años.
- ☐ Emplear el metano como combustible para generar energía desplaza a los combustibles fósiles.
- ☐ Producción de energía eléctrica por la quema del biogás en calderas, motores alternativos y turbinas de combustión.

Debido a que el metano se genera de los desechos orgánicos, se considera que no existen emisiones globales de CO_2 durante la generación de energía (78).



● Biocarburantes

Biodiesel

Los aceites vegetales utilizados directamente en motores sin precámara de inyección no resultan adecuados como biocombustibles por que producen residuos carbonosos y afectan al sistema de inyección. Si se utilizan en motores de inyección indirecta o precámara, resultan eficaces (77).

Es factible utilizar aceites sin modificación, mezclados en diversas proporciones con gasóleo. Aunque la tendencia actual es usar aceites modificados en forma de biodiesel, cuyas propiedades físico-químicas son similares a las del gasóleo. En la Figura 5.31 se muestra el proceso de producción del biodiesel.

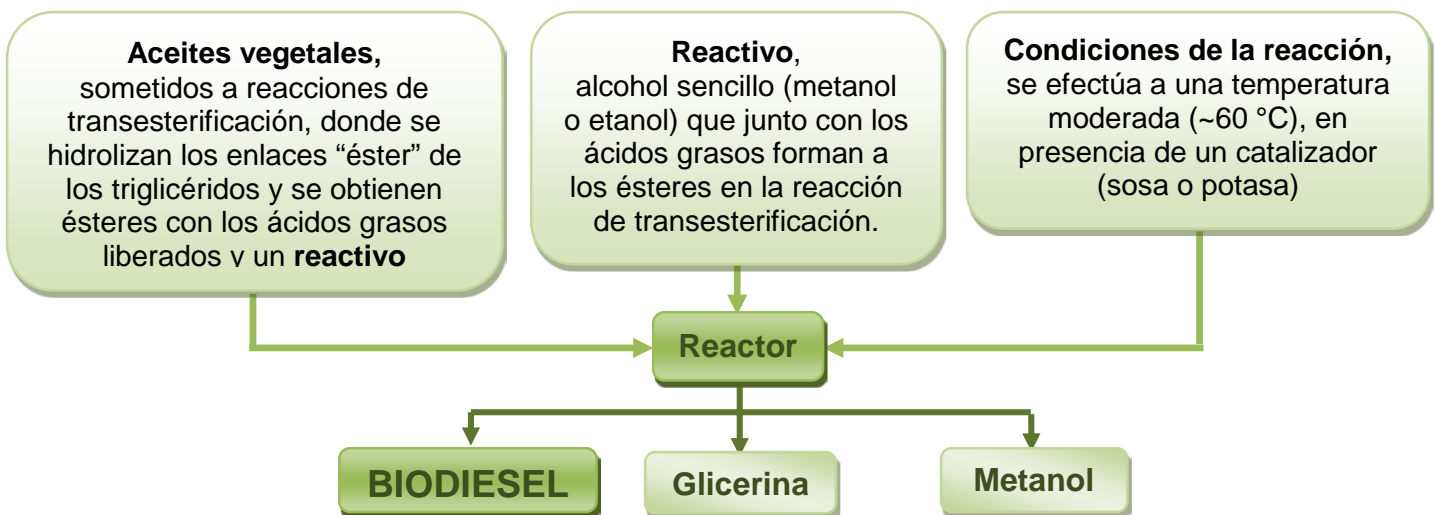


Figura 5.31 Producción de Biodiesel

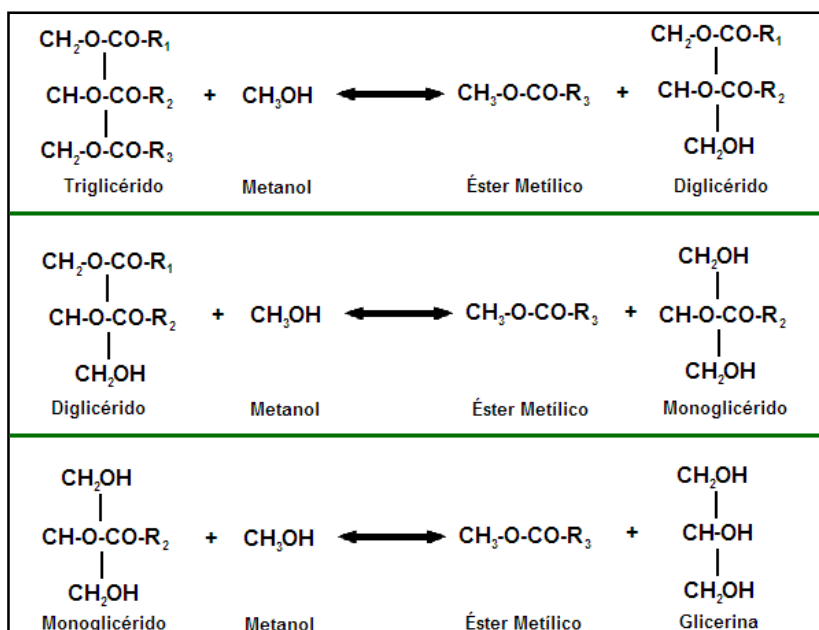
El proceso de producción tiene dos etapas (83):

1. Pretratamiento o refino: Los aceites vegetales llegan a la planta en camiones cisterna, y son descargados en tanques de almacenamiento. Se introducen en la nave de refinado, donde se lleva a cabo la neutralización, desgomado, blanqueo y descerado de los aceites crudos. Se eliminan los ácidos grasos, fosfáticos y ceras contenidas, obteniéndose un aceite refinado (producto) y pastas jabonosas (subproductos). Los principales procesos de refinamiento son:



- Neutralización: los ácidos grasos se eliminan neutralizándolos con una base fuerte (sosa cáustica), que forma pastas jabonosas solubles en agua; las cuales se lavan y se separan por gravedad.
 - Blanqueo: los pigmentos e impurezas son eliminados mediante la adición de absorbentes (bentonita cálcica). El proceso se efectúa en un tanque hermético sometido a vacío y posteriormente se pasa por un filtro.
2. Proceso de transesterificación: El producto se obtiene a partir de una reacción de transesterificación de aceites, también llamada alcoholólisis, como se muestra en la Ecuación 5.30. El proceso se lleva a cabo al reaccionar el triglicérido con un alcohol, en presencia de un catalizador, produciendo una mezcla de alquil ésteres de ácidos grasos (biodiesel) y glicerina.

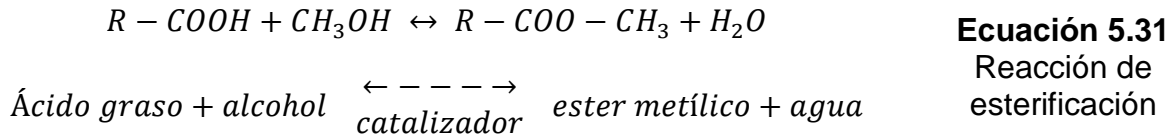
Al aceite vegetal refinado se le adiciona metanol y en presencia de metóxido de sodio (catalizador), se transforma en metilester (éster metílico). Se lava para eliminar restos de metanol, glicerina, catalizador, etc. Posteriormente se seca para obtener el biodiesel. En la Ecuación 5.30 se presentan las diferentes reacciones que tienen lugar en la transesterificación, químicamente son tres reacciones reversibles y consecutivas, donde el triglicérido es convertido en diglicérido, monoglicérido y glicerina (glicerol), liberando un mol de éster metílico en cada reacción (9) (84).



Ecuación 5.30
Reacción de transesterificación



En la actualidad se ha utilizado también la reacción de esterificación de Fischer para aprovechar el subproducto de los ácidos grasos y producir biodiesel al mismo tiempo, en la Ecuación 5.31 se observa la reacción de esterificación (77) (12).



Usualmente los catalizadores son enzimáticos o ácidos, por lo que no se necesitan temperaturas elevadas ni largos tiempos de retención en los reactores.

Rendimiento y aplicación de los biocarburantes: A partir de 1 000 kg de aceite, 156 kg de metanol y 9.2 kg de potasa se pueden obtener 965 kg de biodiesel y 178 kg de glicerina con recuperación de 23 kg de metanol. En la Tabla 5.15 se muestran los biocarburantes más comunes en la actualidad.

Tabla 5.15 Biocarburantes actuales.

Biocarburante	Descripción	Aplicación	País
E95	95 % de etanol	Flotas de autobuses	Suecia, Italia, Holanda y España.
E100	100 % de bioetanol	Motores especiales	Brasil
E-diésel	Bioetanol mezclado con gasoil usando un aditivo.	Mejora la combustión y reduce las emisiones.	USA y Brasil, próxima intrusión en Europa
B20	Mezcla de 80 % diesel convencional y 20 % biodiesel.	Sustancia más utilizada. Otras proporciones presentes en el mercado son B5 y B10	Alemania y Austria
B100	Biodiesel al 100 % sin mezcla con diesel.	Precisa modificaciones del motor en coches antiguos.	USA

Bioetanol o Alcohol Etilico de Origen Vegetal

En la Figura 5.32 se muestra el proceso de producción del etanol, que puede usarse como oxigenante de la gasolina, lo que reduce el uso de oxigenantes sintéticos, y permite disminuir la emisión de una amplia gama de contaminantes.

El producto de la fermentación es un “vino” de diferentes grados alcohólicos (10 a 15 %); agua, etanol, compuestos orgánicos y células de levaduras, las cuales mueren al alcanzar su límite máximo de tolerancia al etanol (14).

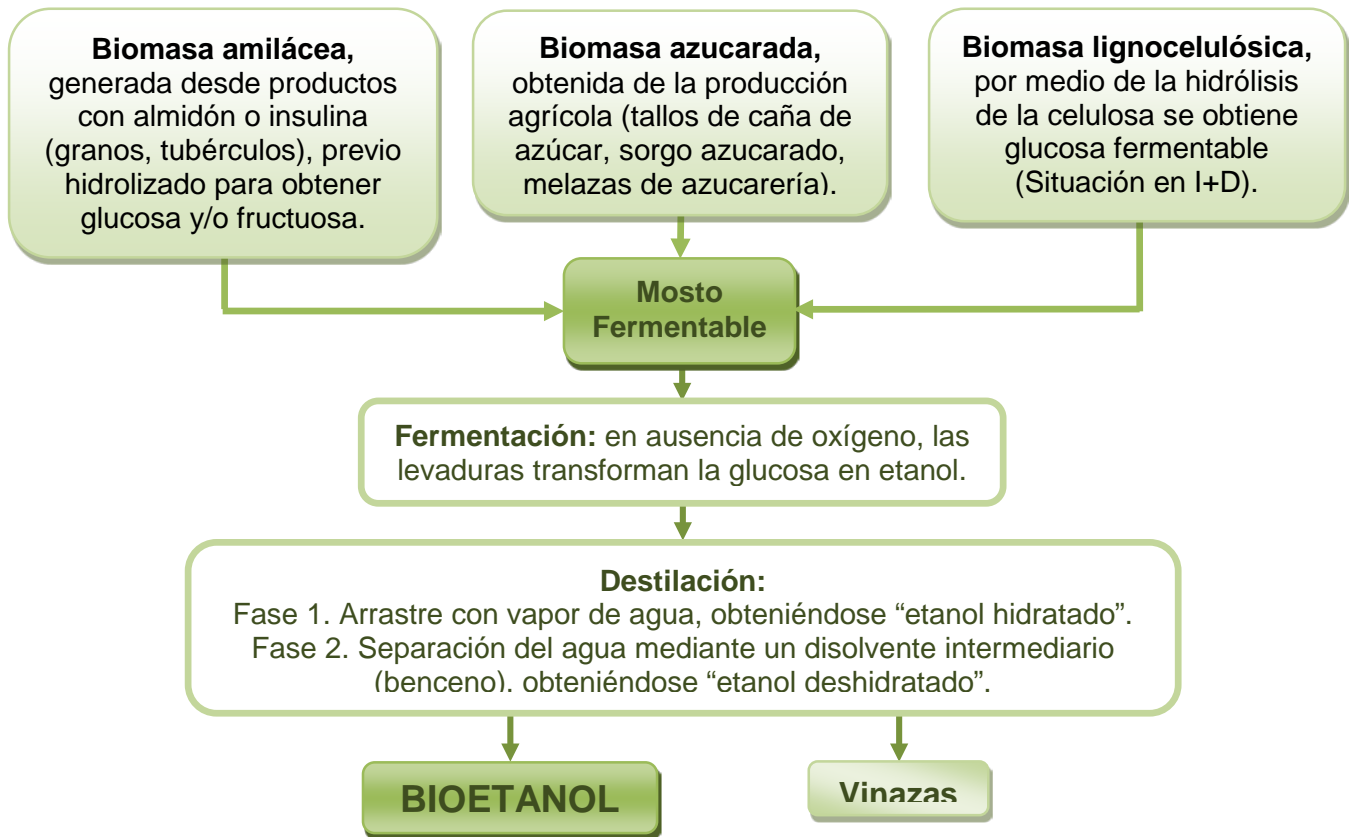


Figura 5.32 Producción de Etanol

- Etanol hidratado: su contenido de agua es de entre 4 y 5 %. Se puede utilizar en motores de explosión convencionales con ligeras modificaciones, obteniéndose rendimientos análogos a los logrados con gasolina²².
- Etanol absoluto, deshidratado o anhidro: tiene un contenido de agua muy bajo y una pureza superior al 99.8 %, en volumen. Se puede utilizar mezclándose con gasolina para aumentar el índice de octano y producir “supercarburantes sin plomo”, que reducen las emisiones. También se puede utilizar en motores diesel en mezclas con gasóleo de automoción (10 a 15 % de etanol) y aditivos especiales. A estos biocarburantes se les conoce como “gasoholes” (9).

En la fermentación alcohólica de la glucosa ocurren dos etapas: glucólisis y fermentación, como se observa en la Figura 5.33.

²² NOM-041-SEMARNAT-2004 → Establece los límites máximos permisibles de emisiones de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores que usan gasolina como combustible.

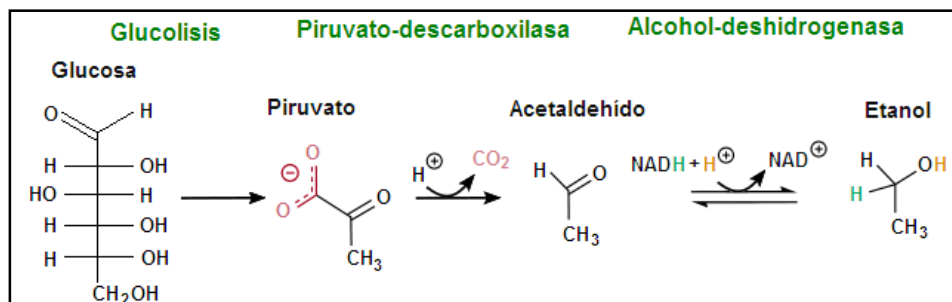


Figura 5.33 Obtención de etanol a partir de la glucosa

Aplicaciones del etanol (14)

- ☐ Vehículos de gasolina, en una mezcla con 90 % v/v de gasolina y 10 % v/v de etanol, esto se puede aplicar sin modificar el motor.
- ☐ Sustituto de la gasolina, en una mezcla de máximo 85 % etanol y gasolina (E85); es un combustible viable para vehículos ligeros, y autobuses y camiones que con la adecuada modificación a sus motores diesel²³ pueden operar con etanol prácticamente puro.

Otra aplicación es la síntesis de diversos compuestos:

ETBE (5-etil-ter-butil-eter): el bioetanol se utiliza en la síntesis del ETBE, el cual es un sustituto del MTBE (metil-ter-butil-eter), aditivo de las gasolinas, cuya función es incrementar el número de octano. Se emplea en las gasolinas sin plomo²⁴ y en mezclas que alcanzan el 25 %. En la Tabla 5.16 se muestra la comparación entre el ETBE y el MTBE; y en la Tabla 5.16 se muestran la comparación entre el bioetanol y la gasolina convencional (77) (85).

²³ NOM-044-SEMARNAT-2006 → Establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, CO, NOx, partículas y opacidad de humo proveniente del escape de motores nuevos que usan diesel.

²⁴ Toda gasolina cuyo grado de contaminación por los compuestos de plomo no exceda 0.013 gPb/l



Tabla 5.16 Ventajas y limitantes del uso de ETBE en relación al MTBE

Características	ETBE	MTBE
Volatilidad	Menor	Mayor
Solubilidad en agua	Menor	Mayor
Poder de corrosión	Menor	Mayor
Eficiencia térmica	Mayor	Menor
Índice de octano	Mayor	Menor
Poder calorífico	Mayor	Menor
Toxicidad y corrosión	Evita problemas asociados al metanol	
Producción	Su síntesis exige un proceso extra a la fabricación del etanol. Depende del isobutileno para su fabricación.	

Tabla 5.17 Comparación del bioetanol y la gasolina convencional.

Características	Gasolina	Etanol anhidro	Etanol hidratado	ETBE
Densidad [kg/l]	0.75	0.79	0.81	0.74
Volatilidad [kg/cm ²]	0.75	1.52	1.18	0.34
Relación estequiométrica máxima [aire/combustible]	15.2	-	8.3	-
Calor latente de vaporización [kJ/kg]	376	903	1.141	-
Índice de octano [IOM] ²⁵	85	89	92	102
Índice de octano [IOR]	95	106	110	118
Auto ignición [°C]	367	550	560	570
Poder calorífico inferior PCI [kJ/kg]	42.9	26.8	24.9	36.0

Rendimiento del etanol: Durante la fermentación se tiene un rendimiento del 50 % aproximadamente, 100 g de glucosa equivalen a 51.1 g de etanol y 48.9 g de CO₂.

► Clasificación y evolución de los biocombustibles

En la Figura 5.34 se muestra que las tecnologías de producción de biocombustibles han evolucionado en diferentes etapas con base en la materia prima o fuente de carbono utilizada y los combustibles obtenidos. La primera generación corresponde a la producción de bioetanol a partir de almidón y sacarosa, y a la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales. En la segunda generación se obtiene bioetanol junto con biobutanol a partir de biomasa, y el biodiesel se obtiene a partir de oleaginosas no comestibles. En la tercera generación el CO₂ juega un papel fundamental debido a que se obtienen diversos biocombustibles a partir de sistemas biológicos (algas y cianobacterias) que utilizan el CO₂ para su crecimiento (14).

²⁵ Motor [IOM], medido en un motor. Research [IOR], medido en un laboratorio.

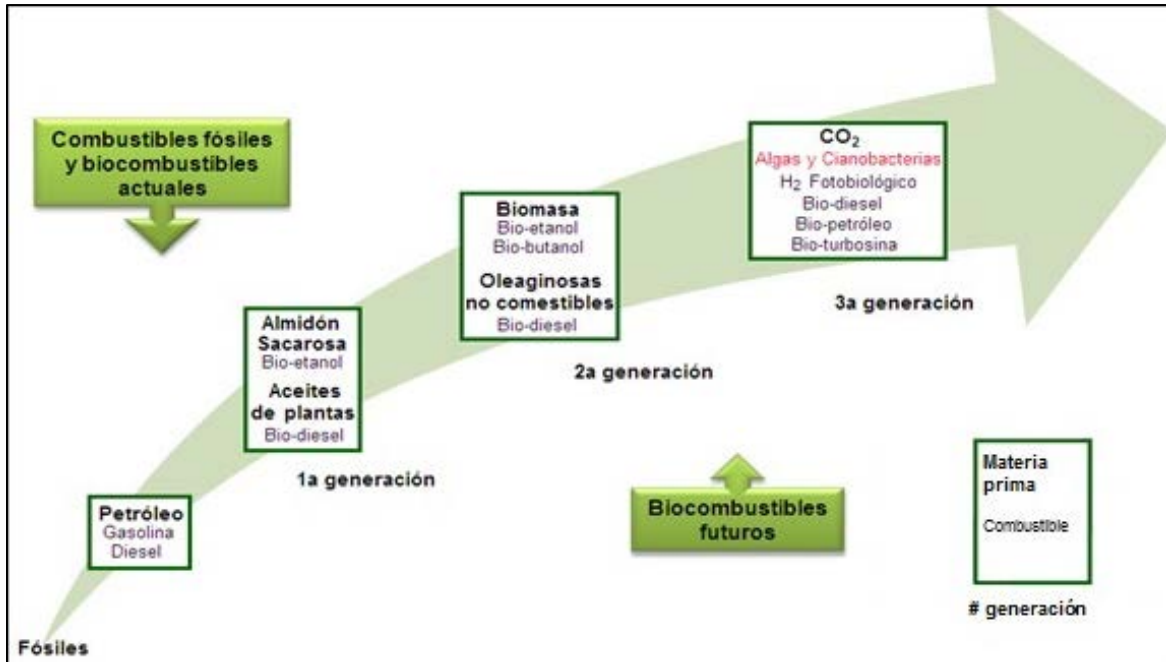


Figura 5.34 Clasificación y evolución de los biocombustibles.

Biocarburantes de primera generación:

Su producción se basa en azúcares, almidones y/o aceites, presentes en granos (bioetanol) y semillas (biodiesel). Materias primas utilizadas también como alimentos de consumo humano y animal. Ejemplos: Bioetanol producido a partir de caña de azúcar y biodiesel producido a partir de jatropha (14) (71).

Estos procesos de conversión existen a escala comercial y son tecnologías maduras. Para el etanol existen dos sectores: sacarosa y glucosa; como se observa en la Tabla 5.18, los azúcares base de la fermentación se obtienen con pretratamientos como prensado, corte o lavado de los cultivos (12) (13) (14) (80).

Tabla 5.18 Producción de bioetanol.

Sacarosa	Glucosa
Se obtiene principalmente de la caña de azúcar, el sorgo dulce y de la remolacha.	El azúcar se obtiene de sustancias amiláceas como maíz, trigo, arroz, cebada, yuca y girasol.
La sacarosa es fermentada por levaduras en grandes reactores continuos.	Los almidones son convertidos en glucosa por enzimas degradantes. La glucosa se fermenta por levaduras para ser convertida en etanol.
La corriente de fermentación rica en etanol es destilada para obtener alcohol al 96 %.	
A la corriente de fermentación se le elimina la mayor cantidad de agua, hasta llegar a una pureza de más del 99 %. Para este porcentaje de pureza, se requiere romper el azeótropo que se forma mediante los procesos de destilación, con una sustancia capaz de recuperarse el final del proceso, como el éter. Con esta pureza se puede considerar como carburante.	



La biomasa resultante de plantaciones forestales se conoce como tipo celulósico y la originada en cultivos agrícolas se conoce como tipo almidón o amilácea (14).

Los alcoholes obtenidos por fermentación y destilación pueden utilizarse como insumo en la obtención de productos químicos (antibióticos, solventes, etc.) (13).

Bioenergéticos de segunda generación:

Se obtienen de materiales lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) derivados de los residuos agroindustriales y de la biomasa leñosa (bosques). Se consideran una buena alternativa para la producción de etanol ya que los insumos son baratos y abundantes, que en ocasiones representan un problema para ser eliminados, y no compiten con la cadena de producción de alimentos (14) (71).

La lignocelulosa es un polímero natural que representa cerca del 50 % de la biomasa del planeta, y se encuentra en residuos agrícolas (bagazo de caña, rastrojo, olotes de maíz, paja de trigo, residuos de soya, cascarilla de arroz, etc.), en desechos forestales y municipales, y en pastos de crecimiento rápido (14) (80).

La complejidad y el grado de estructuración molecular de la lignocelulosa, en comparación con la sacarosa o el almidón, hacen más difícil su degradación en azúcares. Además los microorganismos etanológicos silvestres (levaduras), no tienen la capacidad de metabolizar todos los azúcares obtenidos de la biomasa. Lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías para obtener azúcares fermentables y construir microorganismos, por métodos biotecnológicos, que puedan convertir todos estos azúcares en etanol (14).

Bioenergéticos de tercera generación:

Se generan a partir de la captura y almacenamiento directo de dióxido de carbono y energía solar, en cultivos ex profeso para la producción de biocombustibles, como lo es el caso de cultivos de algas y microalgas (14) (71).

Las microalgas presentan una amplia variedad, pueden crecer en aguas salobres, dulces y de desecho, con alta cantidad de materia orgánica. Presentan propiedades muy variadas según las sustancias que acumulan: carbohidratos, proteínas, aceites,



hidrocarburos lineales (alcanos, alquenos), o hidrocarburos aromáticos; que pueden usarse en la obtención de insumos para la manufactura del etanol o butanol, alimento para ganado, biodiesel, bioturbosina y biopetróleo. Algunas microalgas acumulan grandes cantidades de compuestos similares a los que constituyen el petróleo, por lo que se plantea el cultivo de éstas para ser sometidas a un proceso de “craqueo” y obtener productos similares a los obtenidos en las refinerías. Existen investigaciones enfocadas en la mejora de cultivos “cuarta generación” para obtener biocarburantes que eliminen el CO₂ de la atmósfera (14) (77) (80).

● Tecnología para Biomasa.

▶ Procesos de transformación de la biomasa

Los procesos de transformación pueden ser del tipo físico, químico, biológico o termoquímico, o un conjunto de varios. El proceso se elige en relación al producto deseado así como a la viabilidad económica del proyecto. En la Tabla 5.19 se muestran los procesos de transformación de la biomasa (3) (12) (38) (70) (73).

En la Figura 5.35 se muestra un diagrama de las diferentes rutas de conversión de la biomasa para su aprovechamiento como combustible y generador de energía. La notación ** indica combustión no contempla; * indica que los RSU se incluyen en los recurso, y CHP es cogeneración, es decir, calor y electricidad (71).

Tabla 5.19 Procesos de transformación de la biomasa.

Tipo	Proceso
Físico	Actúan físicamente sobre la biomasa y están asociados a las fases primarias de la transformación (pretratamiento), los más usados son trituración, astillado, compactación, selección ²⁶ y secado.
Químico	Procesos relacionados con la digestión química, usualmente mediante hidrólisis, pirólisis y gasificación; así como con reacciones y mezclas de aditivos.
Biológico	(Fermentación). Transformaciones químicas que se llevan a cabo por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, para la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.
Termoquímico	Basados en la transformación química de la biomasa, al someterla a temperaturas de entre 300 y 1 500 °C. Al calentar la biomasa se produce un proceso de secado y evaporado de sus componentes volátiles, posteriormente ocurren reacciones de craqueo o descomposición de sus moléculas, seguidas por reacciones en la que los primeros productos reaccionan con los componentes de la atmósfera, dando los productos finales.

²⁶ Algunos quemadores requieren la previa eliminación de piezas metálicas, arena, piedras o vidrios.

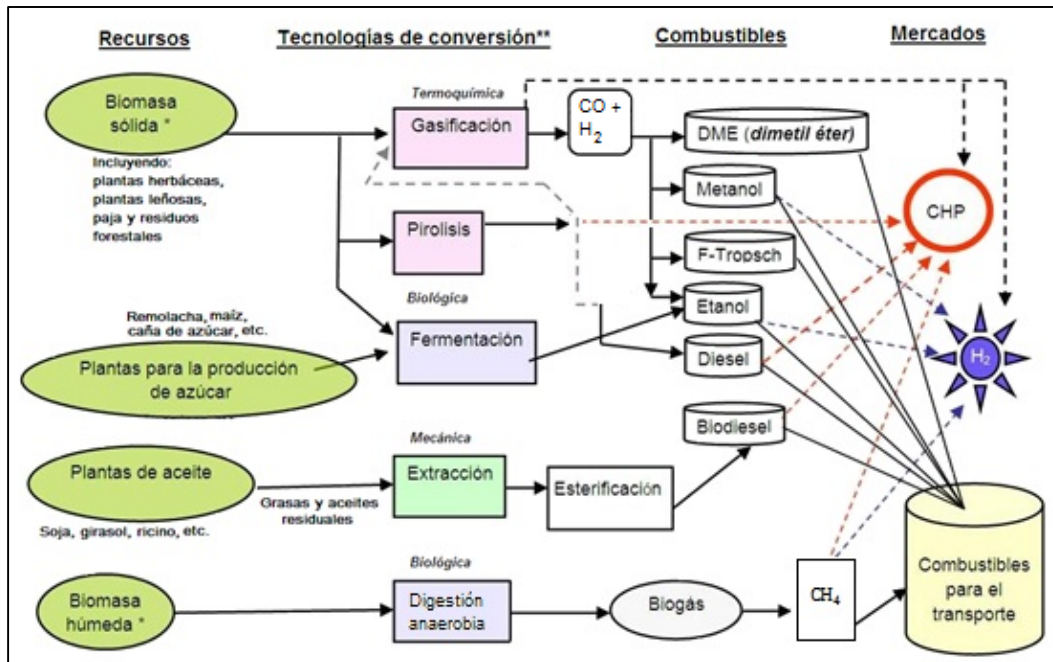


Figura 5.35 Rutas de conversión de biomasa.

Para generar electricidad se utilizan sistemas convencionales, ya sean calderas para producir vapor, conectadas a turbinas de vapor, o motores de combustión interna. Ambos se conectan mecánicamente con un generador eléctrico (73).

Existen tecnologías biológicas y termoquímicas relativamente nuevas sobre el aprovechamiento de la biomasa para generación de electricidad, las cuales se describen a continuación (20) (71) (72) (79):

Digestión anaerobia.

Proceso biológico, de cinco etapas, para la producción de biogás, llevada a cabo en función del pH, temperatura, contenido de humedad, composición de la biomasa, tiempo de retención, sustratos para la degradación microbiana, entre otros.

1. Descomposición aerobia. Los componentes orgánicos sufren descomposición microbiana en presencia de aire. Durante el consumo de oxígeno para convertirse en dióxido de carbono, se produce calor.
2. Acidogénesis. Disminuye la cantidad de O_2 , los nitratos y sulfatos, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno, y comienzan a desarrollarse las condiciones anaerobias, las cuales se pueden supervisar midiendo el potencial



de redox que tiene el residuo. Mientras éste disminuye, los microorganismos responsables de la conversión del material orgánico en metano y CO_2 empiezan un proceso de tres pasos, con la conversión de material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios. En esta fase, el pH del lixiviado comienza a disminuir debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de CO_2 . Los principales componentes producidos son H_2 , CO_2 , H_2O y ácidos orgánicos. Debido a las condiciones anaerobias, la rapidez de liberación de energía es baja. El primero de los tres pasos de conversión del material orgánico implica la transformación por enzimas (hidrólisis) de compuestos con alto peso molecular (lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y carbono celular. El segundo paso (acidogénesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso, en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como el ácido acético y pequeñas concentraciones de ácido fúlvico. Los microorganismos implicados en esta conversión son llamados colectivamente como acidogénicos y son bacterias anaerobias facultativas y obligadas.

3. Acetogénesis. Ocurre la oxidación de los ácidos y alcoholes para formar ácido acético, CO_2 e H_2 . La demanda química de oxígeno (DQO) aumenta debido a la disolución de los ácidos y de los lixiviados. En esta etapa se acelera la actividad microbiana iniciada en la acidogénesis con la producción de grandes cantidades de ácidos orgánicos y cantidades pequeñas de hidrógeno gaseoso.
4. Metanogénesis. Los productos de la acetogénesis se convierten en CH_4 y CO_2 , y el H_2 es consumido. El contenido de metano depende de la disponibilidad de sustrato. Los organismos responsables de la formación de los compuestos empiezan a desarrollarse al final de la acetogénesis, son anaerobios y se llaman metanogénicos. Debido a la formación de CH_4 y CO_2 , el pH dentro del reactor/relleno sanitario subirá a valores neutros, en el intervalo de 6.8 a 8.0. El pH del lixiviado sube y se reducen las concentraciones de DBO5 y DQO y el valor de conductividad del lixiviado. Con valores más altos de pH, quedan



menos constituyentes orgánicos en la disolución y, por lo tanto se reduce la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado.

5. Maduración. Esta etapa se da después de que el material inorgánico biodegradable se convirtió en CH₄ y CO₂. Durante la fase de maduración, la rapidez de generación de biogás disminuye significativamente porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el reactor/relleno sanitario son de lenta degradación. Los principales gases que han evolucionado son CH₄ y CO₂, se puede encontrar también pequeñas cantidades de N₂ y O₂. Durante la fase de maduración, el lixiviado a menudo contendrá ácidos húmicos y fúlvicos, que son difíciles de degradar biológicamente.

En la Tabla 5.1 se observan las ventajas y limitantes de esta tecnología y en la Figura 5.1 se muestra el diagrama de flujo del proceso.

Tabla 5.20 Digestión anaerobia

Ventajas	Desventajas
La digestión aerobia es más económica.	Debe tenerse un espacio libre de oxígeno
Se recupera energía en forma de biogás	Se requieren bacterias concretas y coordinadas
Produce bajas emisiones de aerosoles, gérmenes y olores.	Menor eficiencia que los sistemas aerobios
No requiere de grandes espacios, tiene bajos costos de mantenimiento y es aplicable a cualquier escala.	Se deben añadir grandes cantidades de agua a los residuos para que el contenido en sólidos llegue al intervalo requerido, lo que produce lodos diluidos.

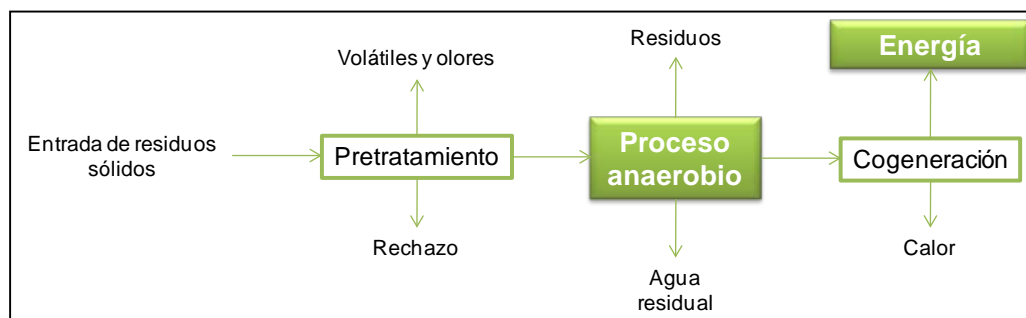


Figura 5.36 Obtención de energía mediante digestión anaerobia

El metano producido se puede utilizar (dependiendo de la cantidad de los residuos) como fuente de energía, combustible o para producción de gas natural. En la Tabla 5.21 se muestra la cantidad de biogás generado por kilogramo de RSU, mediante digestión anaerobia.



Tabla 5.21 Biogás generado por digestión anaerobia

Parámetros	Bajas concentraciones de fracción orgánica en los RSU.	Altas concentraciones de fracción orgánica en los RSU.
Producción de gas [m ³ /kg]	0.5 – 0.75	0.625 – 1.0
Composición del biogás	55 % CH ₄ y 45% CO ₂	50 % CH ₄ y 50 % CO ₂

Los costos de esta tecnología siguen una tendencia potencial basada en la capacidad anual instalada (Q) y se calculan por la Ecuación 5.32

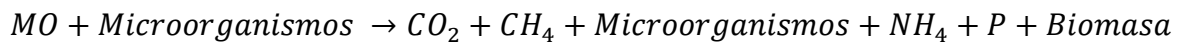
$$C_{inv} = 513\,627\,Q^{0.5581}$$

$$C_{O\&M} = 384\,299\,Q^{-0.617}$$

Ecuación 5.32 Costos de inversión y O&M en digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia, requiere un pH de 6.5 a 7.5; una temperatura de 30 a 38 °C (sistema mesofílico) y de 55 a 60 °C (sistema termofílico); un límite máximo de humedad del 60 %; y nutrientes como carbono, nitrógeno y fósforo.

Una aplicación de este proceso biológico es la Biometanización de estiércol: tratamiento anaerobio de los RSU y lodos de depuradoras, que producen metano y residuos orgánicos estabilizados. La reacción general que ocurre es:



La biomasa se quema usualmente en combinación con el carbón en las calderas de las centrales. Este proceso, llamado co-combustión, se utiliza normalmente para reducir las emisiones del aire y otros impactos ambientales de la quema de carbón. Cuando las calderas son co-alimentadas con carbón, se añade sólo una pequeña cantidad de biomasa (menos del 15 % de la cantidad total del combustible) para mantener la eficiencia de la caldera (9) (81) (86) (87) (88).

Gasificación.

Proceso de combustión parcial de un sustrato carbonoso que al contacto con un agente gasificante bajo condiciones de temperatura de entre 600 y 1 500 °C y altas presiones, se transforma en syngas, rico en contenido de monóxido de carbono, hidrógeno y metano. La combustión se lleva a cabo suministrando oxígeno en cantidades sub-estequiométricas (30 % menos del requerido) y vapor de agua. En la Tabla 5.22 se muestran los gasificadores más comunes.



Tabla 5.22 Gasificadores comunes

Gasificador a contracorriente.	Gasificador en paralelo.	Gasificador de lecho fluidizado
Tiene definidas las zonas de combustión parcial, reducción y pirólisis.	Configuración para aplicar el gas en turbinas y motores de combustión interna. Contiene cenizas y humedad.	Tiene la capacidad de operar con alimentaciones húmedas o secas, la temperatura del gas producido es alta.
El aire se alimenta por la zona inferior, se circula en contracorriente, y el gas se emite por la zona superior.	El aire se alimenta por la zona media, se circula en paralelo, y el gas es emitido por la parte baja.	Cama: masa de partículas similar a un movimiento fluido (logrado por el soplado de gas caliente a través de la cama de las partículas) que proporciona una buena mezcla y la transferencia de calor a los residuos.
Eficiencia 69 al 87 %		Eficiencia 75 al 89 %
Generación de gas ²⁷ de 2.0 a 2.2 Nm ³ /kg		Generación de gas de 2.1 a 2.4 Nm ³ /kg

En la Tabla 5.23 se observan las ventajas y limitantes de esta tecnología y en la Figura 5.37²⁸ se muestra el diagrama de flujo del proceso.

Tabla 5.23 Gasificación

Ventajas	Desventajas
Generación de combustibles como el syngas y el bioetanol.	Proceso con altos consumos de agua y energía
Menor impacto ambiental que la incineración.	Se generan dioxinas y furanos, NO _x ²⁹ y SO _x ³⁰ , cenizas y escorias.
Rendimiento térmico superior	

²⁷ Nm³/kg → N= Condiciones normales. kg → kilogramo alimentado

²⁸ Scrubber: los gases deben lavarse para remover los contaminantes, antes de su combustión.

²⁹ NOM-023-SSA1-1993 → Criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al NO₂. Valor normado para la concentración NO₂ en el aire como medida de protección a la salud de la población.

³⁰ NOM-022-SSA1-1993 → Criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al SO₂. Valor normado para la concentración de SO₂ en el aire como medida de protección a la salud de la población.

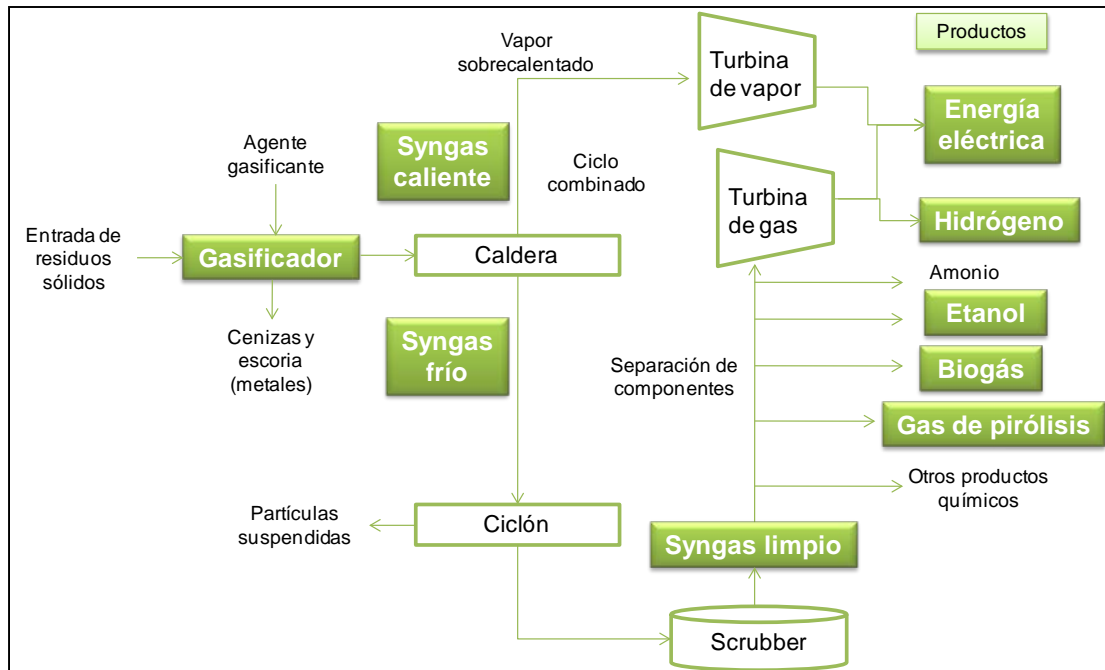


Figura 5.37 Obtención de energía y biocombustibles mediante gasificación

El agente gasificante se elige en relación a las necesidades y condiciones socioeconómicas del sitio. Dependiendo del que se utilice en el proceso, se obtienen diferentes aplicaciones del gas generado, como se observa en la Tabla 5.23.

Tabla 5.24 Aplicación de los productos de la gasificación

Agente gasificante	Poder calorífico [MJ/m3]	Composición del gas obtenido (% volumen)						Aplicación
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	< 6	16	20	12	2	50	-	Combustible
Oxígeno	10 a 20	32	48	15	2	3	-	Gas de síntesis
Vapor de agua	10 a 20	50	20	22	6	-	2	Gas de síntesis
Hidrógeno	> 30	No determinado						Gas natural

Cuando se integra la gasificación al proceso de ciclo combinado para generación de energía eléctrica, se considera de alto rendimiento, en la Tabla 5.25 se muestra la eficiencia en relación a la generación, en función del equipo utilizado.

Tabla 5.25 Eficiencia de generación de energía eléctrica

Sistema de generación	Eficiencias (%)
Caldera y turbina de vapor	10 – 20
Turbina de gas	13 – 28
Turbina de gas en ciclo combinado	30
Integrada a plantas de generación de energía	Mayor a 27



Los costos de esta tecnología varían de forma lineal respecto a la capacidad anual (Q) y se calculan por la Ecuación 5.33

$$C_{inv} = 11\,075\,Q + 3 \times 10^8$$

$$C_{O\&M} = 971.66\,Q + 4 \times 10^7$$

Ecuación 5.33 Costos de inversión y O&M en gasificación

El proceso requiere, como materia prima residuos con alto poder calorífico, un agente gasificante, combustible y energía eléctrica para el arranque y la operación de la planta), agua desmineralizada para la producción de vapor sobrecalentado, y agua para el lavado de los gases (87) (89) (90).

Pirólisis.

Proceso térmico en ausencia total de oxígeno que descompone los residuos sólidos en combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. Opera a temperaturas de entre 300 y 900 °C. Las tres fracciones producidas son las siguientes:

1. Corriente gaseosa: contiene hidrógeno, nitrógeno, metano, etano, monóxido y dióxido de carbono, hidrocarburos C₄ – C₇, amoníaco, oxígeno y diversos gases, dependiendo del material pirolizado.
2. Fracción líquida: contiene ácido acético, acetaldehído, ácido fórmico, acetona, metanol, fenol, etanol, e hidrocarburos oxigenados complejos, usada como sustituto del aceite combustible.
3. Fracción sólida que contiene coque inferior (carbono casi puro), o mezclas de carbón, sales, metales y cenizas

Se estima que el contenido energético de los aceites pirolíticos es de 20 394 kJ/kg. En la Tabla 5.26 se muestran los equipos más comunes.

Tabla 5.26 Equipos de pirólisis comunes

Horno Giratorio	Tubo con calefacción	Superficie de contacto
Opera a temperaturas de 400 a 600 °C y aloja material de gran tamaño (0.2m).	Se calienta el exterior hasta 800 °C	Opera a altas temperaturas
Se alimenta por un extremo y se calienta por el exterior. El horno gira lentamente formando volteretas, asegurando el contacto de los residuos con la superficie.	Permite piezas de gran tamaño y su velocidad garantiza el proceso	Maneja alimentaciones de tamaños pequeños, por lo que requiere pre-tratamientos

Dependiendo del residuo de entrada y los productos de salida; así como del calentamiento, el proceso se lleva a cabo en formas diferentes. (Tabla 5.27)



Tabla 5.27 Tipos de pirólisis

Proceso	Temperatura [°C]	Tiempo de residencia	Productos mayoritarios
Convencional	500	Gases: 5 s Sólidos: 2 hrs	Semicoque, carbón vegetal y condensables
Flash	400 – 800, en ocasiones se alcanzan los 1200	Gases < 2 s	Condensables (altas temperaturas), compuestos orgánicos de aspecto aceitoso y bajo pH, llamados aceites de pirólisis. Cuyos poderes caloríficos van de 37 600 a 42 800 kJ/L
Rápida	> 600	Gases < 0.5 s	Gases e hidrocarburos ligeros.

En sistemas flash puede elevarse la temperatura en 1000 °C durante 1 segundo, por lo que se produce una pirólisis total, con craqueo incluido, lo que evita la formación de alquitranes y mejora el rendimiento del gas. El PC del gas generado en un proceso convencional oscila entre 3.8 y 15.9 MJ/m³. En la pirólisis flash estos valores pueden aumentarse hasta 16.7 y 20.9 MJ/m³. En la Tabla 5.23 se observan las ventajas y limitantes de esta tecnología y en la Figura 5.38 se muestra el diagrama de flujo del proceso.

Tabla 5.28 Pirólisis

Ventajas	Desventajas
No genera gases contaminantes como NO _x y SO _x	Las cenizas generadas presentan características de residuos peligrosos
Recibe material orgánico, con PCI alto-medio, residuos peligrosos, y mezclas con gran cantidad de residuos inorgánicos.	La cantidad de desechos finales es mayor que la de un incinerador. (Producción de coque de difícil reutilización).

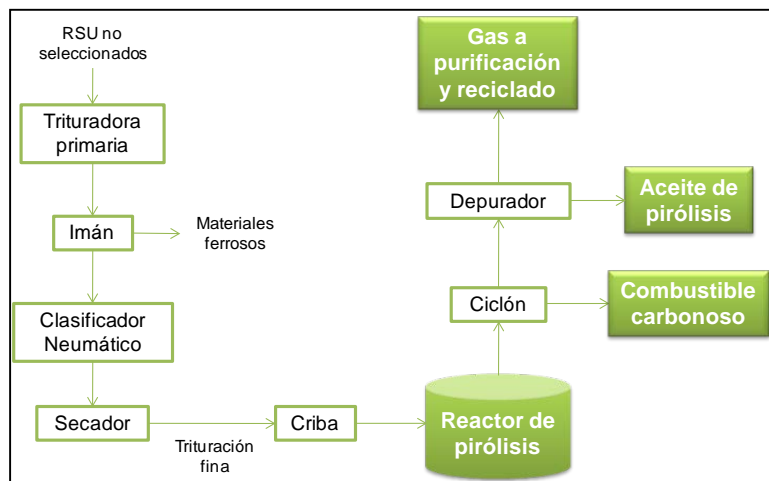


Figura 5.38 Obtención de energía y biocombustibles mediante pirólisis

Los costos de esta tecnología varían de forma lineal respecto a la capacidad anual (Q [ton/año]) y se calculan por la Ecuación 5.34



$$C_{inv} = 11\,131Q + 2 \times 10^8$$

$$C_{O\&M} = 782.57 Q + 2 \times 10^7$$

Ecuación 5.34 Costos de inversión y O&M en pirólisis

El proceso requiere gran cantidad de energía para el arranque y mantenimiento del proceso, ya que la mayoría de las reacciones son endotérmicas. Debe controlarse la temperatura y promover el contacto de los residuos con las paredes del reactor optimizando la transferencia de calor (87) (88) (90).

Incineración.

Proceso para la reducción del volumen de los RSU, que modifica su composición física, química o biológica mediante oxidación térmica, en la cual se controlan los factores de combustión (directa o en lecho fluidizado, temperatura 800 a 1200 °C, tiempo de retención, y turbulencia). Los productos obtenidos son gases de combustión compuestos de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua. Se recupera energía mediante el intercambio de calor procedente de éstos gases.

Las plantas de incineración se dividen en **residuos sólidos no seleccionados**, donde se reciben los RSU directamente de los camiones recolectores; y **quemado de residuos pre-tratados** u homogenizados, llamado quemado CDR³¹.

En la Tabla 5.29 se observan las ventajas y limitantes de esta tecnología y en la Figura 5.39 se muestra el diagrama de flujo del proceso.

Tabla 5.29 Incineración

Ventajas	Desventajas
Generación de energía en forma de calor, para producir vapor o electricidad.	Requiere el control de emisiones gaseosas, en función del tipo y toxicidad de los residuos.
Reducción de volumen y peso de los desechos sólidos hasta en un 90 %	Altos costos en infraestructura

³¹ Combustible Derivado de Residuos.

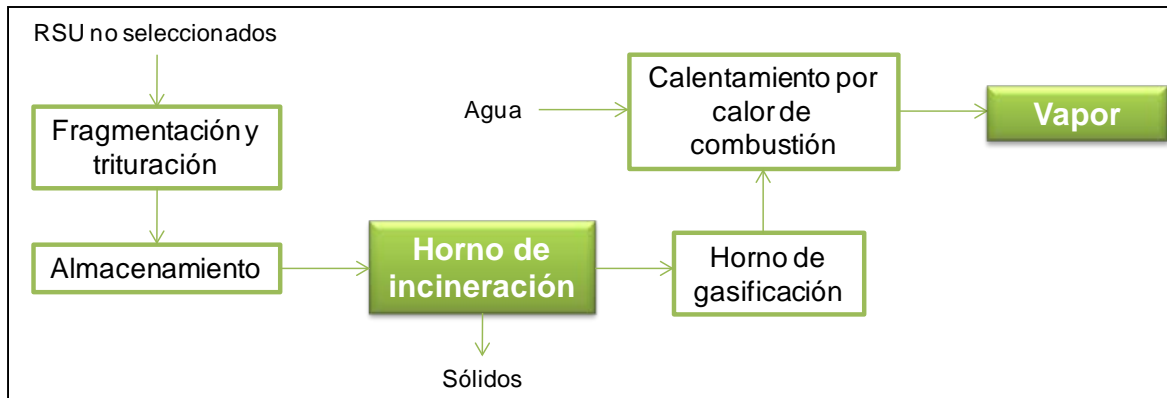


Figura 5.39 Obtención de energía mediante incineración

Existen dos tipos de incineradores, como se observa en la Tabla 5.30.

Tabla 5.30 Tipos de incineradores

Incinerador recuperativo	Incinerador regenerativo
Aprovecha el calor sensible de los gases de combustión, una vez que han recorrido la cámara postcombustión, para precalentar el aire de combustión; el cual puede tener sustancias volátiles contaminantes.	Dispone de un doble calentamiento del aire de combustión. Los gases atraviesan una torre donde ceden parte de su calor sensible. Posteriormente son conducidos a una torre de acondicionamiento para asegurar las emisiones a la atmósfera. Cuando la temperatura del recuperador cerámico se estabiliza, se invierte el ciclo.

Las plantas de incineración que cuentan con calderas y turbinas tienen una eficiencia del 19 al 24 % en generación eléctrica.

Para una planta típica de incineración con sistema integrado de recuperación de energía y un sistema de limpieza de los gases descargados a la atmósfera, tiene un costo de inversión típico de 1 400 000 a 2 000 000 MX\$/ton diaria, y un costo de operación y mantenimiento de 700 a 1 400 MX\$/ton tratada (90).

El proceso emite gases contaminantes como NO_x, SO_x, dioxinas, furanos, bifenilos policlorados, cenizas, trazas de escoria y sustancias líquidas. Cuya correcta disposición está regulada por la NOM-085-SEMARNAT-1994, contaminación atmosférica por fuentes fijas que utilicen combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos; y la NOM-043-SEMARNAT-1993, establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas, así como, la NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-incineración de residuos, especificaciones y límites de emisión de contaminantes.

En este proceso se debe preparar la alimentación en función del horno a utilizar, dar mantenimiento a las torres de enfriamiento y limpieza por las incrustaciones en las paredes del horno, garantizando una óptima transferencia de calor (33) (91).

Se obtienen ingresos económicos por la producción de vapor a partir de la recuperación de calor y la venta de energía eléctrica producida en motores de combustión interna con el gas generado en la incineración. En la Figura 5.40 se muestra un diagrama de los productos obtenidos con esta tecnología (87) (88).

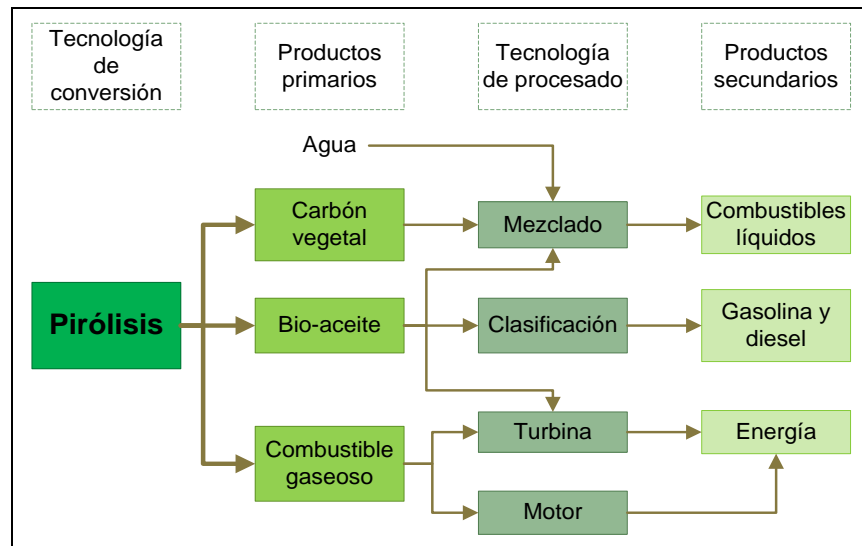


Figura 5.40 Productos de procesos pirolíticos.

Plasma.

Proceso térmico que transforma los residuos sólidos y líquidos en iones a través de un arco eléctrico generado por el paso de corriente entre un cátodo y un ánodo a través de un gas inyectado (O_2 , N_2 , He, Ar, o mezclas de éstos), el cual produce temperaturas de 3 000 a más de 7 000 °C y se proyecta sobre los residuos para el desglose de éstos en iones. El flujo de gas ionizado se conoce como plasma.

El plasma se genera por descargas eléctricas (corriente directa - CD) hasta de 1×10^6 A, por arco transferido o no transferido, corriente alterna CA, arcos transitorios y campos electromagnéticos RF.

En la Tabla 5.31 se observan las ventajas y limitantes de esta tecnología y en la Figura 5.41 se muestra el diagrama de flujo del proceso.

Tabla 5.31 Plasma

Ventajas	Desventajas
No produce contaminantes como dioxinas, furanos o CO ₂ .	Altos costo de inversión.
Mayor producción de energía eléctrica a partir de los RSU con respecto a otras tecnologías térmicas.	Altos consumos de energía eléctrica.

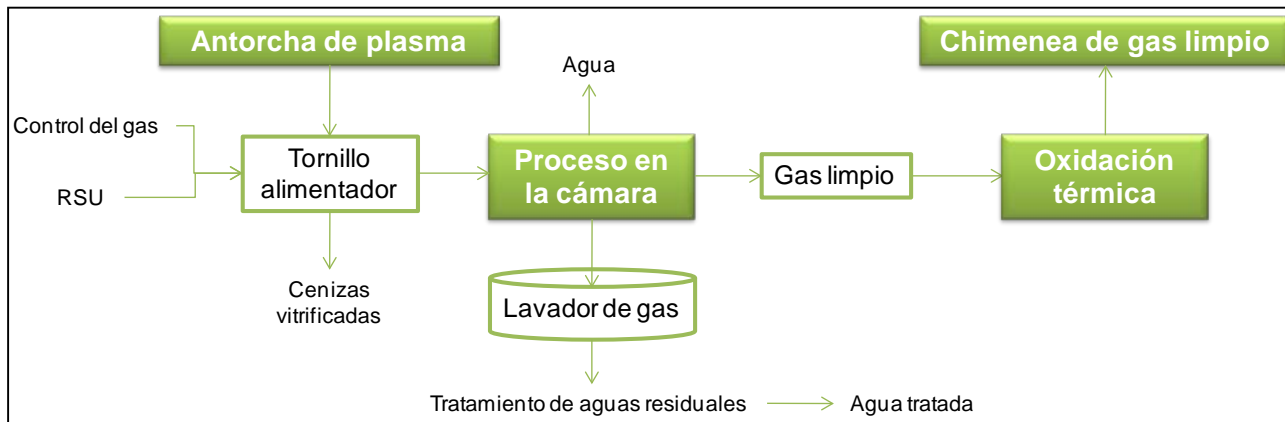


Figura 5.41 Obtención de energía mediante gasificación por plasma

Esta tecnología se emplea en la reducción y eliminación³² de elementos peligrosos y radiactivos, ya que a las temperaturas de operación se desintegran, se tiene la ventaja de que este proceso genera un gas prácticamente limpio, por lo que se vuelve una materia prima para usos múltiples en la producción de sustancias químicas, así como, la generación de energía eléctrica y vapor. Otra aplicación es la recuperación de metales preciosos a partir de catalizadores (87) (90).

El arco de plasma por corriente continua alcanza eficiencias del orden del 85 al 90 % de transformación de corriente en plasma, proceso que opera a temperaturas de 15 000 a 50 000 °C. La eficiencia de combustión se estima del 90 %, favoreciendo su rendimiento si los residuos son previamente secados. El mantenimiento consiste en la sustitución de consumibles, lo que se realiza a los 30 minutos de operación, requiere inspección de las bombas de agua y de los sopladores. Se tiene un factor de servicio de las plantas del 93 % (92).

³² La destrucción térmica ocurre ya que la alta energía rompe los enlaces, se puede trabajar en una atmósfera libre de oxígeno y ocurre vitrificación a altas temperaturas.



Pirólisis – Gasificación

El proceso de pirólisis se puede llevar a cabo en un reactor donde ocurren reacciones de gasificación. Los gases son liberados por la parte superior, donde culmina su oxidación y en la parte inferior se acopian los desechos (90).

Hidrogenación

Es la degradación térmica del residuo en presencia de hidrógeno, en condiciones de temperatura de 300 a 500 °C y de presión de 20 a 40 MPa. Las macromoléculas se rompen y los fragmentos se saturan con hidrógenos. En la Tabla 5.32 se observan las ventajas y limitantes de esta tecnología. Se aplica en sólidos con PCI alto, residuos de cables de PVC y plásticos residuales en general (90).

Tabla 5.32 Hidrogenación

Ventajas	Desventajas
Permite almacenar el producto resultante durante un periodo largo, hasta su posterior tratamiento químico	Problemas de corrosión derivados de los compuestos generados en el proceso.
Los metales y halógenos (Cl ₂ , N ₂ , O ₂) son transformados a sus formas hidrogenadas, las cuales son más fáciles de tratar.	

Oxidación catalítica

Proceso de combustión que utiliza catalizadores y se lleva a cabo a temperaturas variables. Se aplica en el tratamiento de compuestos clorados y CFC's. En la Tabla 5.33 se observan las ventajas y limitantes de esta tecnología (90).

Tabla 5.33 Oxidación catalítica

Ventajas	Desventajas
Gran eficacia en la destrucción térmica.	Posibilidad de envenenamiento del catalizador.
Costos de operación menores que los costos de los sistemas de incineración.	
Temperaturas de trabajo moderadas.	El costo de inversión es elevado.
El incremento de la inercia térmica debido al catalizador permite absorber las variaciones en el PCI del residuo.	

II. Aplicaciones

La biomasa es un material de aprovechamiento versátil, desde el punto de vista energético, se puede aprovechar (a) quemándola para producir calor -energía térmica-; (b) transformándola en combustible (sólido, líquido o gaseoso) para su transporte y/o almacenamiento; (c) producción de electricidad -energía eléctrica-; (d) movimiento -energía mecánica-; (e) e hidrógeno -materia prima- (73) (74).



Calor:

Las aplicaciones térmicas con producción de calor y agua caliente sanitaria son las más comunes en el sector de la biomasa. Incluyen su uso en calderas o estufas domésticas, para cocción de alimentos; así como calderas diseñadas para edificios de viviendas, donde proveen calefacción y agua caliente, hasta consumos térmicos industriales (12) (70).

Electricidad:

La producción de electricidad a partir de la biomasa implica sistemas complejos, turbinas de vapor, centrales con grandes calderas y grandes inversiones. Generalmente las industrias que aprovechan la biomasa utilizan los residuos generados con su propia producción para reutilizarlos a manera de combustible, como es el caso de las industrias papelera y agroalimentaria (12) (70).

Además de obtener calor y electricidad, se puede obtener gas de pirólisis, usado como energético en motores de combustión interna (12) (14).

Actualmente la biomasa se emplea ineficientemente en muchas comunidades rurales, lo cual puede crear mayores problemas de contaminación y salud que los que resuelve. Es por esto que para un uso sustentable, se requiere (6):

- Balance energético positivo: la energía al crear la biomasa deber ser mayor que la que se empleó durante su quema.
- Balance de carbono positivo: el carbono liberado debe ser menor al capturado.
- Mínima toxicidad en su combustión.

III. Ventajas de la aplicación de la tecnología

- Contribuye a la sustitución de fuentes de energía fósil y nuclear.
- Las emisiones de biocarburantes utilizados en motores, contienen menos partículas sólidas y menor toxicidad que las emitidas por carburantes procedentes del petróleo.
- La producción de biomasa en plantaciones forestales contribuye en la reducción de la erosión, por aportar cantidades significativas de cobertura vegetal. Esto beneficia a los países tropicales que cuentan con zonas deforestadas.



- Las plantaciones pequeñas permiten la recuperación de suelos degradados y la utilización de sitios agrícolas abandonados.
- Al no contener azufre, la combustión de biomasa no produce los óxidos causantes de lluvia ácida.
- Permite la recuperación en las cenizas de la combustión de elementos minerales de valor fertilizante como el fósforo y el potasio.
- Permite la eliminación de una buena porción de los desechos orgánicos rurales y urbanos, lo que convierte a los residuos en recursos.
- Es la única fuente energética capaz de retar al petróleo en el mercado de los combustibles líquidos para el sector transporte.
- Puede almacenarse tan fácilmente como el petróleo y el gas.
- En zonas rurales, este recurso se tiene en gran cantidad.
- Sus emisiones de cambio climático son neutras³³, es decir, no contribuyen en forma neta a aumentar la cantidad de gases de invernadero.
- Los residuos sólidos orgánicos que desechan las sociedades, pueden aprovecharse como biomasa en los rellenos sanitarios.
- La energía de la biomasa es: renovable (se produce de forma ininterrumpida siempre y cuando haya sol, agua y suelo fértil), autóctona (se produce en terrenos agrícolas y forestales), y capaz de absorber y fijar el CO₂.
- Los residuos sólidos orgánicos que desechan las sociedades, pueden aprovecharse como biomasa en los rellenos sanitarios.
- La producción de electricidad a partir de biogás evita la necesidad de utilizar recursos no renovables para la producción de la misma cantidad de electricidad, además de que impide la emisión de metano a la atmósfera.
- La obtención de biodiesel a partir de lípidos procedentes de microalgas puede satisfacer la demanda para el transporte.
- Cuanto mayor es la cantidad de bioetanol, en la mezcla bioetanol y gasolina, mayor es la reducción de emisiones.

³³ La combustión de biomasa produce CO₂ pero una cantidad análoga a la emitida fue captada por las plantas durante su crecimiento.



- El análisis de ciclo de vida de los biocarburantes concluye que cada kilómetro recorrido con biodiesel puro reduce las emisiones entre un 76 y 91 %.
- Presenta alto empleo de mano de obra local y apoyo a economías regionales
- Para las fases de producción, distribución y utilización, los biocarburantes requieren menor energía primaria que los combustibles convencionales.
- El potencial de obtención de biodiesel con microalgas es ilimitado, factible en su cultivo y utilización para cuando el petróleo supere los USD \$ 60 por barril.
- La tecnología con microalgas puede acoplarse al reciclaje del dióxido de carbono liberado por las industrias. (1) (6) (14) (15) (48) (70) (71) (74) (77)

IV. Limitantes o desventajas de su aplicación

- La tecnología debe aplicarse en el marco de la sustentabilidad para evitar la deforestación y la pérdida del equilibrio ecológico (pérdida de biodiversidad).
- Si la combustión no se lleva a cabo de forma sustentable y no es controlada afecta la calidad del aire local y regional.
- La combustión dentro de la casa en estufas ineficientes, es causa importante de morbilidad respiratoria en niños y mujeres.
- Producción de humos, como en cualquier central térmica convencional, lo cual es causa de contaminación y generación de malos olores.
- Las plantas de rápido crecimiento consumen los nutrientes de las plantas de crecimiento lento, lo que provoca un desplazamiento de las especies autóctonas, ocasionando desequilibrios ecológicos.
- Competencia con el uso de suelo para la producción de alimentos; la oposición social al uso de especies alimenticias exige mayor investigación para la producción de biomasa no involucrada en las cadenas alimenticias humanas³⁴.
- Si el cultivo se realiza en suelos que han sido previamente deforestados o transformados, se emiten gases de efecto invernadero, como el CO₂.
- La combustión dentro de la casa en estufas ineficientes, es causa importante de morbilidad respiratoria en niños y mujeres.

³⁴ El problema de sustentabilidad ambiental no puede afectar el problema mundial del hambre.



- No existe tecnología madura, ni económica que convierta la biomasa lignocelulósica, lo que limita el mercado del etanol de segunda generación.
- Falta de capital humano e institucional para asegurar que los proyectos de biocombustibles satisfagan las necesidades locales en vez de las prioridades requeridas por los créditos de los inversionistas extranjeros.
- El etanol como carburante tiene varias limitantes: su contenido energético es bajo, su presión de vapor favorece una mayor evaporación que la gasolina, y es higroscópico, lo cual lo hace incompatible con la mayor parte de la infraestructura que tiene PEMEX, ocasionando deterioro en tanques de almacenamiento, ductos, pipas y sistemas de confinamiento.
- El biodiesel obtenido de algas tiene límites en su potencial para desplazar el diesel: la superficie que requiere el cultivo, tiempo de producción (meses), y el bajo rendimiento obtenido en las plantas oleaginosas (menor al 20 %).
- La incineración de RSU es peligrosa por la expulsión de gases tóxicos, por lo que deben colocarse filtros, para evitar las emisiones.
- Se requiere de una gran inversión para implementar la tecnología de utilización de residuos sólidos orgánicos. (1) (6) (14) (48) (77) (79) (80)

V. Rendimiento y/o eficiencia

La bioenergía es la única energía renovable que puede almacenarse tan fácilmente como el petróleo y el gas, lo que representa una ventaja económica para el establecimiento del equilibrio oferta/demanda. Esta cualidad hace que la bioenergía para la producción de electricidad sea completamente viable, ya que las plantas de bioenergía constituyen capacidades “firmes” de potencia eléctrica.

Con las nuevas tecnologías, toda la biomasa puede convertirse en biocarburantes, biogás y biocombustibles para producir calor y electricidad. Se estima que una hectárea de tierra puede producir más biomasa forestal que agrícola. Los resultados muestran que en los cultivo anuales, la ganancia energética puede ser de 1 a 5, mientras que en las plantaciones forestales es de 10 a 25; incluyendo fertilizantes, pesticidas, herbicidas, fuerza de trabajo y combustible de la maquinaria. En la Tabla 1 se expresa el aporte anual aproximado de la energía de la biomasa obtenida de



recursos forestales y residuos agrícolas en México; así como de la energía aprovechable para la producción de combustibles (12).

Tabla 5.34 Aporte anual de la energía de la biomasa. [GW] (20)

Recursos Forestales		Residuos Agrícolas		Combustibles	
Madera directa natural	23.7 – 40.8	Suma de la contribución del bagazo de la caña, cascarilla de arroz, cáscara de coco y rastrojo de la milpa	28.1	Producción de biodiesel (palma, colza, soya, ricino, sorgo y girasol) y bioetanol (caña de azúcar y maíz).	6.3
Madera directa de plantaciones energéticas	22.7				
Madera indirecta natural (desperdicios)	1.7				
Total	48.1 – 65.3				

El potencial de plantaciones energéticas en suelos degradados, aún con rendimientos bajos, satisface hasta 25 % de la energía global primaria, con oportunidades de restauración ambiental e impulso a la economía de las comunidades rurales con escasos recursos. Por lo que se deben instituir políticas gubernamentales que obliguen al uso de tierras degradadas. En la Tabla 5.35 se muestran los rendimientos teóricos que se pueden lograr en la producción de bioetanol, en la Tabla 5.35 se muestran los rendimientos teóricos de diversos materiales para la producción de biodiesel, y en la Tabla 5.37 se muestran los cultivos en variedad y cantidad para la producción de aceite vegetal (14) (71) (93).

Tabla 5.35 Rendimientos teóricos en la producción de bioetanol.

Fuente de biomasa	Litros/ton biomasa	Fuente de biomasa	Litros/ton biomasa
Base húmeda		Base seca	
Jugo de caña	80	Bagazo de caña de azúcar	477
Maíz	400	Bagazo de agave	350
Trigo	400	Periódico	570
Sorgo	400	RSU	307
Papa	85	Pastizales	381

Tabla 5.36 Rendimientos teóricos en la producción de biodiesel.

Fuente de biomasa	Litros/hectárea	Fuente de biomasa	Litros/hectárea
Soya	420	Ricino	1320
Arroz	770	Jatropha	1590
Girasol	890	Aguacate	2460
Maní	990	Coco	2510
Colza	1100	Palma	5550



Tabla 5.37 Cultivo para la producción de aceite vegetal.

Variedad vegetal	kg aceite (Ha*año)	Variedad vegetal	kg aceite (Ha*año)
Maíz	145	Cacahuate	890
Algodón	273	Olivo	1019
Cáñamo	305	Ricino	1188
Soya	375	Nogal	1505
Linaza	402	Jatropha	1590
Arroz	696	Aguacate	2217
Girasol	800	Coco	2260
Cacao	863		

La producción actual de biogás se da a razón de 300 L/kg de materia seca, con un valor calórico de alrededor de 23 027.4 kJ/m³ (70).

Un metro cúbico de leña es suficiente para permitir que 5 personas tengan energía suficiente para calentar el agua de 105 baños de 15 minutos cada uno.

Bioetanol a partir de tecnologías de primera generación.

El contenido energético del etanol es del 70 % en relación con el de la gasolina, sin embargo, el volumen total producido por países como EUA y Brasil alcanzaría para satisfacer la demanda energética de combustibles líquidos en México.

La situación agropecuaria, de tenencia de tierra, incentivos para la producción de bioenergéticos, y las políticas públicas son diferentes entre estos países, por lo que no se pueden aplicar los mismos esquemas de producción. México no es autosuficiente en la producción de maíz que constituye el principal alimento de la población y del ganado. Por lo que no es conveniente establecer competencia directa entre la producción de bioetanol y la producción de alimentos. A diferencia de la situación en la producción de maíz, México es autosuficiente en la producción de azúcar a partir de caña, solo que los excedentes son muy pequeños como para ser considerados en la producción de bioetanol. Se mantiene la competencia con la producción alimenticia, el azúcar es usado en bebidas que constituyen un aporte energético importante para un gran sector de la población, principalmente de escasos recursos. La producción de caña en México es tres veces más costosa que



en Brasil, lo que genera un esquema inviable. Por lo anterior, en México no es atractivo producir bioetanol mediante tecnologías de primera generación (14).

Bioenergéticos a partir de tecnologías de tercera generación

Las microalgas presentan una capacidad fotosintética distinta a la de las plantas, por su crecimiento en medio acuoso son más fáciles para asimilar dióxido de carbono y otros nutrientes; ofrecen beneficios como el elevado contenido de lípidos (en algunas especies es mayor al 40 %), periodos cortos de producción (pocos meses) y menor superficie de cultivo (14).

VI. Costos

Costos del proceso de obtención de Biogás.

La economía de generación con el biogás de rellenos sanitarios depende fuertemente de las inversiones que para ello deban hacerse. Si el relleno ya existe, las inversiones consideran la perforación de los pozos de extracción, la construcción de la red de recolección de la planta de tratamiento del gas y del bloque de potencia. En esos casos, los costos de generación se estiman entre 3 y 6 ¢USD/kWh. Si el relleno no existe, la economía del proyecto debe analizarse tanto desde el punto de vista eléctrico como ambiental (73).

Bioetanol a partir de tecnologías de primera generación

En Brasil se tiene la mayor producción de etanol a partir de caña de azúcar, siendo de más de 50 millones de litros diarios. El precio de venta es de 40 % menor que el de la gasolina y su costo de producción es de 23 ¢USD/litro. EUA es el principal productor de etanol a partir de maíz, con más de 150 millones de litros diarios y un costo de producción de 39 ¢USD/litro (6).

Costos del proceso de obtención de biodiesel

En el proceso de refinado de aceites el co-producto obtenido -las pastas jabonosas- no tienen algún valor comercial. Sino que son transportadas a una instalación que las utiliza, generando un único costo por transporte. Durante la transesterificación se producen además del biodiesel, dos calidades de glicerina, la farmacéutica y la industrial, cuyos costos se presentan en la Tabla 5.38 (83).



Tabla 5.38 Costos del biodiesel y de los subproductos del proceso.

Precio	\$MX/kg
Biodiesel	13.61 – 14.03
Glicerina farma	6.35 – 6.52
Glicerina industrial	2.72

Las tecnologías para la generación de electricidad y/o calor a escala industrial a partir de la biomasa tienen un costo aproximado de entre 1 500 y 4 500 USD\$/kW. Los costos correspondientes de la energía son de entre 5 y 12 ¢USD/kWh para la electricidad, y de entre 1 y 5 ¢US/kWh para el calor.

Las estufas mejoradas de leña tienen un costo aproximado de 150 USD\$, que incluye los costos de capacitación y seguimiento.

Las plantas de producción de bioetanol y de biodiesel requieren respectivamente inversiones de 390 y 330 USD\$ por cada m³ al año de capacidad. Los costos de producción varían de acuerdo con las circunstancias locales, pero las referencias internacionales sugieren valores de entre 25 y 30 ¢USD/litro para el bioetanol, y de entre 40 y 80 ¢USD/litro para el biodiesel (16) (20).

VII. Generación de residuos

► Residuos sólidos

La quema de la biomasa en calderas genera cenizas con niveles extremadamente bajos de elementos peligrosos, pero que aún con ese índice de peligrosidad, deben eliminarse adecuadamente, según lo establecidos en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (15).

► Emisiones atmosféricas

El almacenamiento, la descomposición y los pretratamientos (secado, triturado, etc.) de la materia orgánica, ocasionan malos olores y humos contaminantes (79).

Durante la generación de biogás se emiten óxidos de nitrógeno y material tóxico en pequeñas cantidades. La proporción, composición y cantidad de estas emisiones dependen de la composición de los residuos.



Las centrales de biomasa emiten NO_x y SO_2 . La composición de las emisiones depende del tipo de biomasa y del generador eléctrico que se opere. En cuanto al dióxido de carbono emitido, se considera un balance neto (absorbido = emitido).

En comparación con el carbón, la biomasa contiene menos azufre y nitrógeno, por lo que sus emisiones son inferiores. Incluso si la sustancia a quemar es una mezcla carbón-biomasa, las emisiones son menores que las de carbón puro (15).

En la Tabla 5.39 se muestra una estimación de las emisiones de bioetanol en mezcla al 10 % con gasolina, en relación con las emisiones de la gasolina convencional, y en la Tabla 5.40 se muestra una estimación de las emisiones de biodiesel, en relación con las emisiones del gasóleo (77).

Tabla 5.39 Comparación de las emisiones del bioetanol y la gasolina.

Emisión	Bioetanol
Monóxido de carbono	Menos del 25 – 30 %
Dióxido de carbono (ciclo de vida completo)	Menos del 6 – 10 %
Óxidos de nitrógeno	Más del 5 %
Compuestos orgánicos volátiles del escape	Menos del 7 %
Dióxido de azufre	Menor con un valor indeterminado
Aldehídos (si el vehículo cuenta con un catalizador, la emisión es insignificante)	Mayor al 30 – 50 %
Compuestos aromáticos (benceno y butadieno)	Menor con un valor indeterminado

Tabla 5.40 Comparación de las emisiones del biodiesel y el gasóleo.

Emisión	Biodiesel
Monóxido de carbono	Menos del 12.6 %
Dióxido de carbono (ciclo de vida completo)	Menos del 15.7 %
Óxidos de nitrógeno	Más del 1.2 %
Partículas	Menos del 18 %
Otros compuestos tóxicos	Menos del 12 – 20 %
Mutagenicidad	Menos del 15.7 %

Los productos de la biomasa reducen el volumen total de CO_2 que se emite en la atmósfera, ya que las plantas lo absorben a medida que crecen y emiten prácticamente la misma cantidad que captaron (menor que la emitida por los combustibles convencionales) cuando son sometidos a combustión, por lo que se produce un proceso de ciclo cerrado.



Los biocombustibles generan CO₂ en todos los procesos para su elaboración, desde el cultivo hasta que se transportan a la planta de producción de los aceites, y de ésta hasta la planta donde los aceites son transformados en biodiesel.

Todos los biocombustibles generan emisiones de efecto invernadero, durante su cultivo y su proceso químico o transformación; sin embargo, dichas emisiones son siempre menores que las generadas con gasolina y diesel. En la Tabla 5.41 se muestran las emisiones de gases de efecto invernadero que tienen lugar en el ciclo de vida de la producción de los distintos vegetales crudos utilizados en la producción de biodiesel. En la Tabla 5.42 se observan las emisiones de gases de efecto invernadero que generan las mezclas de biodiesel y los efectos de utilizar la mezcla. En la Tabla 5.43 se muestran las emisiones de gases de efecto invernadero en las distintas etapas del ciclo de vida de las mezclas de biodiesel (83).

Tabla 5.41 Emisiones de GEI de aceites utilizados en la producción de biodiesel

Aceite	Emisiones de GEI [gCO₂equiv/kg]
Aceite de girasol crudo	1 190
Aceite de colza crudo	1 425
Aceite de colza española crudo	2 332
Aceite de soja crudo	2 140
Aceite de palma	1 600



Tabla 5.42 Emisiones de GEI por mezclas de biodiesel.

MEZCLA	Emisiones [gCO ₂ equiv/kg]				Descripción de la mezcla	Efectos de la mezcla ³⁵	PCI [MJ/kg]
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	TOTAL			
Diesel EN-590	157.92	4.45	0.875	163.25	---	---	41.85
BD5A1	151.76	5.62	1.01	158.39	Biodiesel de aceite vegetal crudo mezclado al 5 % con diesel.	Evita la emisión de 8 g de CO ₂ (5 %) por cada km recorrido.	41.62
BD10A1	145.6	6.8	1.15	153.55	Biodiesel de aceite vegetal crudo mezclado al 10 % con diesel.	Evita la emisión de 12 g de CO ₂ (8 %) por cada km recorrido.	41.38
BD100A1	38.06	29.2	3.59	70.85	Biodiesel de aceite vegetal crudo puro.	Evita la emisión de 92 g de GEI (57 %) por cada km recorrido.	37.31
BD5A2	150.06	4.45	0.849	155.36	Biodiesel de aceite vegetal usado mezclado al 5 % con diesel.	Evita la emisión de SO _x , disminuyendo la formación de lluvia ácida.	41.63
BD10A2	143.19	4.45	0.823	148.46	Biodiesel de aceite vegetal mezclado al 10 % con diesel.	Evita la emisión de 15 g de CO ₂ (9 %) por cada km recorrido.	41.42
BD100A2	14.31	4.46	0.237	19.01	Biodiesel de aceite vegetal usado puro.	Evita la emisión de 144 g de CO ₂ (84 %) y 144 g de GEI (88 %) por cada km recorrido.	37.70

³⁵ Contabilizados en relación al uso del Diesel EN-590



Tabla 5.43 Emisiones de GEI en las etapas del ciclo de vida de las mezclas BD.

gCO₂ equiv/km	Diesel EN-590	BD5 A1	BD10 A1	BD100 A1	BD5 A2	BD10 A2	BD100 A2
Producción de semilla		2.31	4.64	49.07			
Transporte de semilla		-0.01	-0.03	-0.3			
Extracción de aceites		0.93	1.87	19.8			
Transporte de aceites		0.29	0.58	6.16			
Refino de aceites		0.08	0.16	1.7			
Transesterificación		-0.53	-1.06	-11.2			
Extracción de crudo	2.01	1.92	1.82		1.9	1.82	
Transporte de crudo	1.7	1.62	1.54		1.61	1.54	
Refino	8.33	7.94	7.54		7.93	7.53	
Distribución de mezclas	4.09	4.17	4.25	1.43	4.17	4.13	2.87
Recolección de aceites usados					0.39	0.78	8.1
Reciclado					0.08	0.17	1.75
Transporte de aceites reciclados					0.15	0.29	3.03
Transesterificación de aceites usados	0	0	0	0	-0.05	-0.1	-1.07
Uso	146.87	139.29	132.68	4.13	139.81	132.85	4.32
Total	163	158.01	153.99	70.79	155.99	149.01	19

VIII. Insumos requeridos

Para la plantación de cultivos y el crecimiento de las plantas se requieren suelos fértiles, radiación solar, abastecimiento de grandes cantidades de agua, suplementos alimenticios, fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, y combustibles fósiles para los tractores y en general en todo el proceso, sobre todo en la extracción de aceites y la transportación de semillas y aceites, etc. En la Tabla 5.44 se observa el consumo de energía primaria y fósil de la generación de aceites utilizados en la producción de biodiesel (14) (83).



Tabla 5.44 Energía utilizada en la producción de aceites para biodiesel.

Tipo de energía [MJ/kg]	Aceite	Girasol crudo	Colza crudo	Colza española crudo	Soja crudo	Palma
Primaria	Generación	23.58	26.86	33.19	44.64	35.77
Fósil		14.34	15.58	18.54	25.63	16.31
Primaria	Extracción	12.15	18.71		25.66	28.98
Fósil		3.82	7.71		6.84	0.88

La electricidad y el gas natural son las fuentes de energía usadas durante el proceso de refino de aceites, en una planta de producción de biodiesel. En la Tabla 5.45 se indican los consumos de energía (así como su equivalente en energía primaria) asociados a la producción de 1 kg de aceite refinado.

Tabla 5.45 Consumos de energía en la producción de biodiesel.

	Consumo energético [MJ/kg aceite refinado]	Energía primaria [MJ/kg aceite refinado]
Electricidad	0.09	0.20
Gas natural	0.35	0.35

► Uso de suelo

Generar electricidad a partir de biomasa puede ocasionar diversos efectos en los recursos de la tierra:

1. Los cultivos para generación de combustibles, requieren grandes extensiones de tierra y con el tiempo, pueden agotar los nutrientes del suelo. Estos cultivos deben gestionarse de forma que estabilicen el suelo, reduzcan la erosión y sirvan como hábitat de vida silvestre o puedan utilizarse para fines recreativos.
2. Las centrales eléctricas de biomasa, al igual que las plantas de combustibles fósiles, requieren grandes extensiones de tierra para la instalación del equipo y el almacenamiento de combustible. Si las plantas de biomasa queman residuos como los urbanos, los de la construcción, madera o residuos agrícolas, proporcionan el beneficio de que la superficie donde están instaladas tiene un mejor aprovechamiento que si se utilizara como vertedero de residuos (15).

La combustión de biogás para producción de electricidad no es un gran impacto en el uso excesivo de la tierra, ya que aunque el equipo requiere de una gran superficie,



ésta puede ser una porción del relleno sanitario, o bien, se puede instalar en rellenos clausurados (15).

► **Uso del agua**

Los biocultivos requieren una menor cantidad de plaguicidas y fertilizantes que los cultivos para la alimentación, lo que significa un menor nivel de contaminación en las aguas residuales y de emisiones atmosféricas.

Las centrales eléctricas de la biomasa requieren agua para las calderas en la producción de vapor y para enfriamiento. Si el agua se reutiliza, la cantidad necesaria durante todo el proceso, se reduce. Si ésta se desecha a un cuerpo de agua natural, las substancias que arrastra y la elevada temperatura, contaminan el recurso hidráulico poniendo en riesgo a los organismos que lo habitan, así como a los animales, plantas y personas que dependan de esa agua. Por lo tanto es importante que el flujo de descarga sea monitoreado continuamente para verificar su cumplimiento con la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

Los motores de combustión y las turbinas que utilizan biogás para la producción de electricidad requieren cantidades insignificantes de agua, por lo que no se genera un alto impacto sobre el recurso.

La captura de gases en rellenos sanitarios, implican perforación de pozos en los mismos, lo que no afecta a cuerpos de agua locales (15).

IX. Operación y mantenimiento

El mantenimiento de estas tecnologías consiste en la limpieza de incrustaciones de los equipos, así como de las medidas que establezca el fabricante. Se debe establecer un plan de emergencia en el caso del fallo de una bomba, porque puede ocasionar la liberación de aceites calientes. Las cavitaciones se ocasionan por las altas y diferenciales temperaturas así como de las reacciones de descomposición que pueden ocurrir al transferir fluidos sometidos a excesivas cargas térmicas. En la Figura 5.42 se observa el esquema básico del recorrido de la biomasa dentro de la central hasta su transformación en energía. En la Figura 5.43 se muestra el Plot



Plan de una central de biomasa típica, posteriormente en la Tabla 5.46 se enlistan los nombres de las secciones de la planta

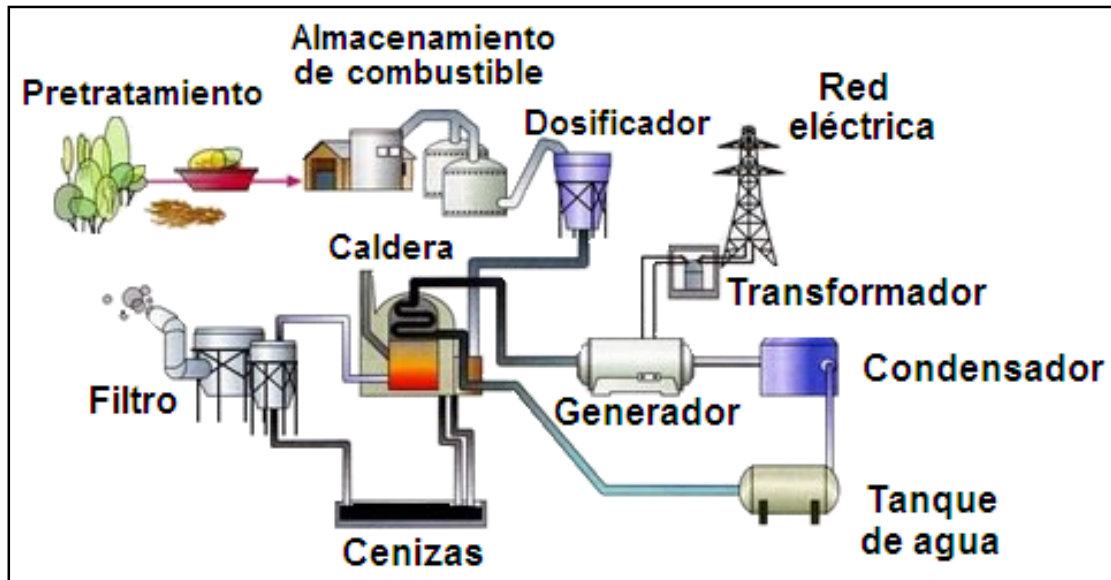


Figura 5.42 Recorrido de la biomasa en una central.

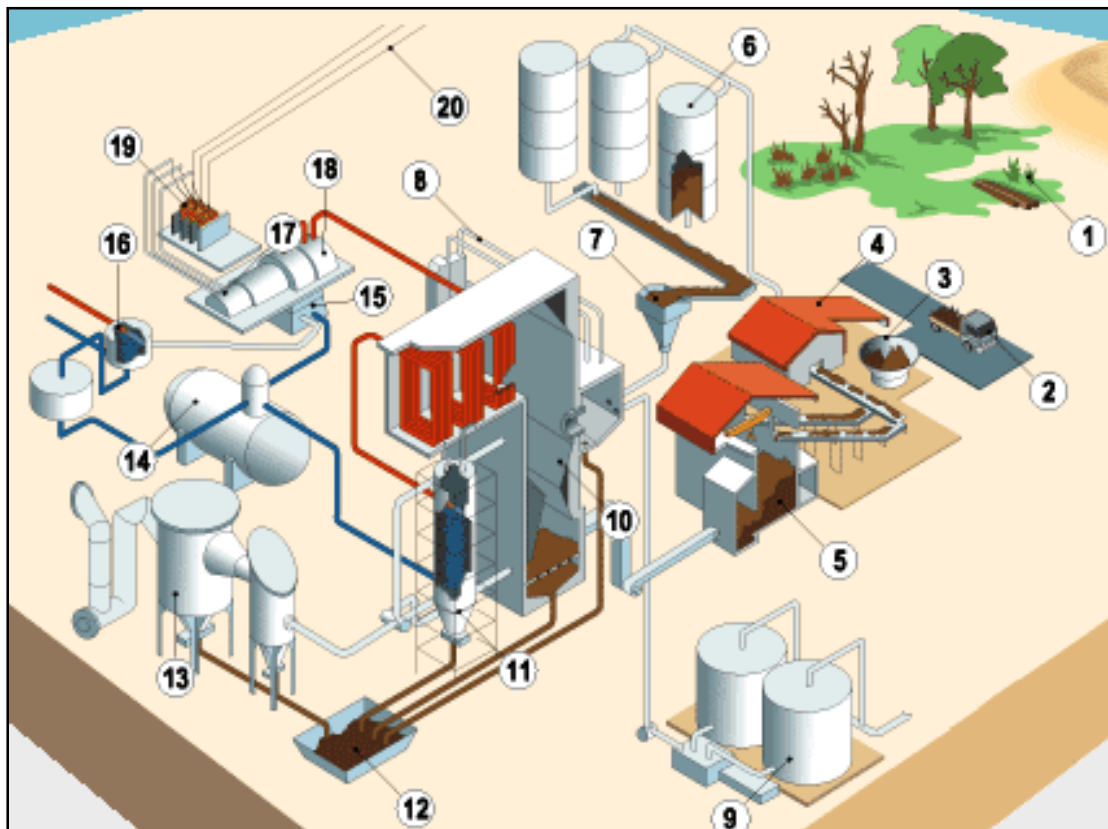


Figura 5.43 Central de Biomasa.



Tabla 5.46 Secciones de una central de biomasa.

No.	Centra de biomasa.	No.	Centra de biomasa.
1	Cultivo y recolección de madera	11	Economizador
2	Transporte	12	Cenicero
3	Astillado	13	Electrofiltro
4	Preparación	14	Tanque de agua de alimentación
5	Almacenamiento de combustible grueso	15	Condensador
6	Almacenamiento de combustible fino	16	Recuperación de calor
7	Dosificador	17	Turbinas
8	Entrada de aire	18	Generador
9	Almacenamiento de combustible de apoyo (líquido)	19	Transformadores
10	Caldera	20	Líneas de transporte de energía eléctrica

A continuación se presenta la metodología para dimensionar una planta de biomasa.

● **Memoria de cálculo para dimensionar una planta de biomasa:**

Datos del cultivo		
Notación	Variable	Dimensiones
S	Superficie	ha
IP	Índice de productividad	kg/ha
IR	Índice de residuo	kg/ha
ID	Índice de disponibilidad	kg/ha
PCI	Poder calorífico (h: húmedo, s: seco)	kJ/kg ó kWh/kg
W	Humedad	%
ρ_{aparente}	Densidad aparente	kg/m ³

Planta escalable		
Notación	Variable	Dimensiones
h_{ef}	Tiempo de funcionamiento	Hora [h]
W_{req}	Humedad requerida	%
η_c	Rendimiento de la caldera	%
t_{partícula}	Tamaño de partícula para la combustión	mm
C_{molienda}	Consumo de potencia en la molienda	kW por ton/h
SSAA	Consumo SSAA	% generación bruta
η_a	Rendimiento del alternador	%



Especificaciones	
IR	Residuos almacenable durante todo el año
Caldera	Caldera de parrilla con sobrecalentador
Turbina	Turbina de vapor de una etapa, de tipo ciclo Rankine
Número	Los números subíndices en la notación de las ecuaciones pertenecen al número de corriente establecida en la Figura 5.44
H_n	Entalpía de vapor de la corriente de la Figura 5.44
h_{tiempo}	Factor de tiempo para que las unidades sean consistentes
Equipo	A los equipos del ciclo Rankine, debe conocerseles P[bar], T[°C], y H [kJ/kg]

Notación de las ecuaciones ³⁶			
Notación	Variable	Notación	Variable
M_b	Masa de biomasa	Q_{caldera}	Potencia de la caldera
E_b	Energía de la biomasa	Q_{vcaldera}	Caudal de vapor en la caldera
Q_{comb1}	Caudal másico del combustible	Q_{vturbina}	Caudal de vapor en la turbina
Q_b	Caudal másico de la biomasa húmeda	W_{turbina}	Potencia de la turbina
Q_{agua1}	Caudal másico del agua	W_{alternador}	Potencial del alternador
Q_{comb2}	Caudal másico del combustible seco	q	calor
Q_{agua2}	Caudal másico del agua en el combustible seco	W_{neta}	Potencia neta
Evap	Evaporación	E_{eléctrica}	Energía eléctrica neta
ω_{evap}	Potencia de evaporación	% η_{eléctrico}	Rendimiento eléctrico global
Q_{vsec}	Caudal de vapor	W_{cicloRankine}	Potencia del ciclo Rankine
H_{vap}	Entalpía de vaporización	η_R	Rendimiento del ciclo Rankine

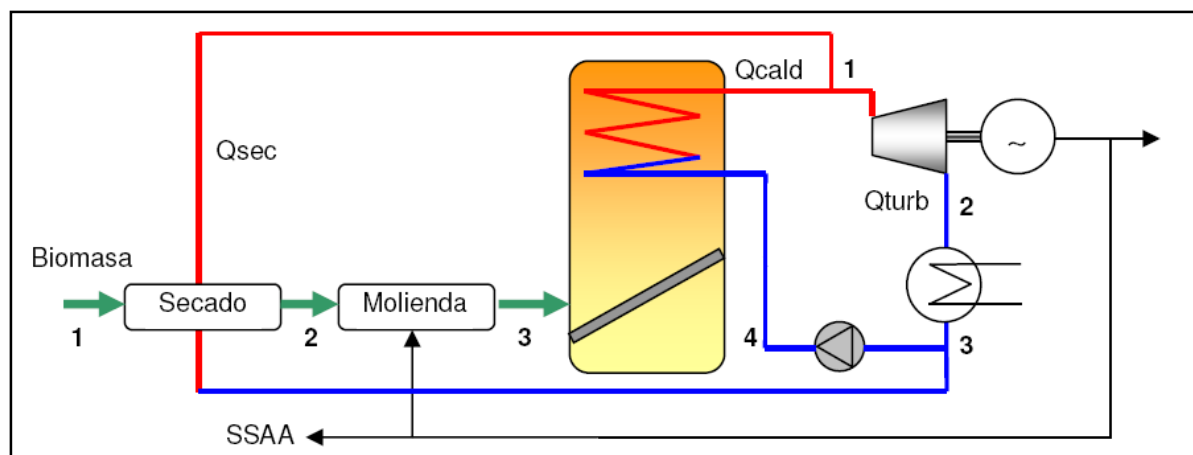


Figura 5.44 Planta de producción de energía a partir de biomasa

³⁶ Las dimensiones se incluyeron en las ecuaciones para facilitar al usuario el manejo de éstas a lo largo de la memoria de cálculo.



► **Dimensionamiento de la planta**

$$M_b \left[\frac{kg}{año} \right] = S \cdot IP \cdot IR \cdot ID$$

Ecuación 5.35 Consumo o disponibilidad de biomasa al año

$$E_b \left[\frac{kWh}{año} \right] = M_b(PCI)$$

Ecuación 5.36 Energía disponible o producida al año a partir de la biomasa

$$\overline{Q_{comb1}} \left[\frac{hg}{h} \right] = \frac{M_b}{h_{ef}}$$

Ecuación 5.37 Caudal másico del combustible

► **Evaporación**

Si se requiere eliminar un porcentaje del contenido de humedad de la biomasa:

- ✓ Combustible con humedad

$$\overline{Q_b} \left[\frac{kg}{h} \right] = \overline{Q_{comb1}} (1 - W)$$

Ecuación 5.38 Caudal másico de la biomasa con humedad

$$\overline{Q_{agua1}} \left[\frac{kg}{h} \right] = \overline{Q_{comb1}} (W)$$

Ecuación 5.39 Caudal másico del agua

- ✓ Combustible seco

$$\overline{Q_{comb3}} \left[\frac{kg}{h} \right] = \frac{\overline{Q_b}}{1 - W_{req}}$$

Ecuación 5.40 Caudal másico del combustible seco

$$\overline{Q_{agua2}} \left[\frac{kg}{h} \right] = \overline{Q_{comb3}} (W)$$

Ecuación 5.41 Caudal másico del agua en un combustible seco

$$Evap \left[\frac{kg}{h} \right] = \overline{Q_{agua1}} - \overline{Q_{agua3}}$$

Ecuación 5.42 Necesidad de evaporación

$$\omega_{evap} [kW] = Evap \cdot H_{vap} \cdot h_{(tiempo)}$$

Ecuación 5.43 Potencia de evaporación

$$Q_{vsec} \left[\frac{kg}{h} \right] = \eta_{evap} (H_1 - H_3)$$

Ecuación 5.44 Caudal de vapor necesario en el área de secado

► **PCI del combustible entrante en la caldera**

$$PCI_s \left(\frac{kWh}{kg} \right) = \frac{PCI_h}{1 - W}$$

Ecuación 5.45 Poder calorífico del combustible seco

$$PCI_3 \left(\frac{kWh}{kg} \right) = \frac{PCI_s}{1 - W_{req}}$$

Ecuación 5.46 Poder calorífico del combustible que entra a la caldera



► **Producción de vapor en la caldera**

$$\omega_{caldera} [kW] = \overline{Q_{comb3}} \cdot PCI \cdot \eta_c \quad \text{Ecuación 5.47} \quad \text{Potencia de la caldera}$$

$$Q_{vcaldera} \left[\frac{kg}{h} \right] = \frac{\omega_{caldera}}{H_1 - H_4} \quad \text{Ecuación 5.48} \quad \text{Caudal de vapor en la caldera}$$

► **Producción eléctrica en la turbina**

$$Q_{vturbina} \left[\frac{kg}{s} \right] = Q_{vcaldera} - Q_{vsec} \quad \text{Ecuación 5.49} \quad \text{Caudal de vapor en la turbina}$$

$$\omega_{turbina} [kW] = Q_{vturbina} (H_1 - H_2) \quad \text{Ecuación 5.50} \quad \text{Potencia de la turbina}$$

► **Producción eléctrica en el alternador**

$$\omega_{alternador} [kW] = \omega_{turbina} \cdot \eta_a \quad \text{Ecuación 5.51} \quad \text{Potencia del alternador}$$

► **Condensador**

$$q_{condensador} = Q_{vturbina} (H_2 - H_3) \quad \text{Ecuación 5.52} \quad \text{Calor liberado en el condensador}$$

► **Producción eléctrica neta**

$$SSAA [kW] = \%_{SSAA} \cdot \omega_{alternador} \quad \text{Ecuación 5.53} \quad \text{Consumo SSAA}$$

$$Molienda [kW] = C_{molienda} \cdot \overline{Q_{comb3}} \quad \text{Ecuación 5.54} \quad \text{Consumo en molienda}$$

$$\omega_{neta} [kW] = \omega_{alternador} - SSAA - Molienda \quad \text{Ecuación 5.55} \quad \text{Potencia Neta}$$

$$E_{eléctrica} [MWh] = \omega_{neta} \cdot h_{ef} \quad \text{Ecuación 5.56} \quad \text{Energía eléctrica neta anual}$$

► **Rendimientos Generales**

$$\% \eta_{eléctrico} = \frac{E_{eléctrica}}{E_b} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.57} \quad \text{Rendimiento eléctrico global}$$

$$\omega_{cicloRankine} = Q_{vturbina} (H_1 - H_3) \quad \text{Ecuación 5.58} \quad \text{Potencia del ciclo Rankine}$$

$$\eta_R = \frac{\omega_{neta}}{\omega_{cicloRankine}} \times 10 \quad \text{Ecuación 5.59} \quad \text{Rendimiento del ciclo Rankine}$$



X. Beneficios

La biomasa es una excelente alternativa energética porque a partir de ella se pueden obtener una gran diversidad de productos; y porque se adapta perfectamente a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Así, mediante procesos específicos, se puede obtener toda una serie de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden ser aplicados para cubrir las necesidades energéticas de confort, transporte, cocinado, industria y electricidad, o servir de materia prima para la industria (70).

La bioenergía sustentable ofrece nuevas oportunidades a la agricultura, fomentando la propagación de vegetales y permitiendo un mejor equilibrio entre el desarrollo urbano y el desarrollo rural. Propicia un mejor manejo de espacios, bosques, reservas naturales, asentamientos humanos y actividades productivas. Permite la eliminación de los desechos orgánicos rurales y urbanos, contribuyendo a la higiene y desarrollo de materiales y sustancias de origen orgánico para la industria de la construcción y del papel.

En los aspectos social y económico, la bioenergía tiene un potencial amplio para el desarrollo de pequeñas y medianas industrias que pueden representar cientos de miles de empleos. Sin embargo, debe considerarse que el logro de la bioenergía debe realizarse alejándose de los sistemas de producción agrícola intensiva, a gran escala y basados en monocultivos, ya que con frecuencia conllevan a la deforestación y por lo tanto a la pérdida de biodiversidad (14).

Las plantaciones de especies múltiples para la producción de biocombustibles, pueden utilizar tecnologías de conversión a pequeña escala, satisfacer las necesidades locales de leña y maderas, y proporcionar empleo, electricidad y combustible líquido a zonas rurales (48).



5.4 Geotérmica

La energía geotérmica o geotermia es aquella que se encuentra en el núcleo (magma y materia incandescente) de la Tierra.



A diferencia de la mayoría de las fuentes renovables, no se origina por la radiación solar. Recibe su nombre del griego *geo* Tierra y *termos* calor; y es la causante de fenómenos terrestres como los volcanes (5) (14) (94) (95).

El calor natural de la Tierra procede del colapso gravitatorio causante de la formación de la misma; de la desintegración radiactiva de los isótopos de uranio, torio y potasio (calor radiogénico); de los movimientos entre las diferentes capas que constituyen la Tierra (manto y núcleo), de la cristalización del núcleo³⁷ y del gradiente geotérmico. Por lo que el contenido total de calor es muy grande, del orden de 12.6 billones de EJ (sólo en la corteza se tienen 5 400 millones de EJ). La distribución actual del calor depende de: (I.) distribución de la temperatura que se tuvo después de la formación total de la Tierra; (II.) ubicación e intensidad de la fuente de calor, las cuales dependen del tiempo; (III.) mecanismo de calor interno, es decir, su transferencia por conducción, convección o ambos (14) (96) (97) (98).

El flujo de calor desde el interior de la Tierra hacia los estratos superiores de la corteza produce cambios de temperatura a distintas profundidades, lo que se conoce como gradiente geotérmico [$^{\circ}\text{C}/\text{km}$] (Ecuación 5.60 dT/dz), éste genera un continuo flujo de calor desde el interior hasta la superficie. Varía desde valores normales de 15°C hasta los $4\ 000^{\circ}\text{C}$, con intervalos de aumento usuales de 30°C por kilómetro aunque en algunas zonas de la litósfera el flujo de calor tiene una temperatura de hasta 200°C , como ocurre en los bordes de las placas tectónicas, donde el deslizamiento de éstas favorece el ascenso del magma. El flujo de calor calienta grandes extensiones de roca en la profundidad, donde se forman sistemas de roca seca caliente o depósitos de fluidos calientes, denominados yacimientos hidrotermales (1) (14) (95).

³⁷ La cristalización es continua y en la zona de transición con el núcleo interno se libera calor.



La enorme cantidad de energía térmica producida continuamente en estos sistemas y los extensos períodos geológicos requeridos para su agotamiento hacen que la geotermia sea considerada como una fuente alterna de energía limpia y renovable. En la Figura 5.45 se esquematiza que de la estructura interna de la Tierra, el 99.9 % de la masa está sometida a una temperatura superior a los 1000 °C y el 0.1 % está sometido a una temperatura inferior a 100 °C (14) (98).

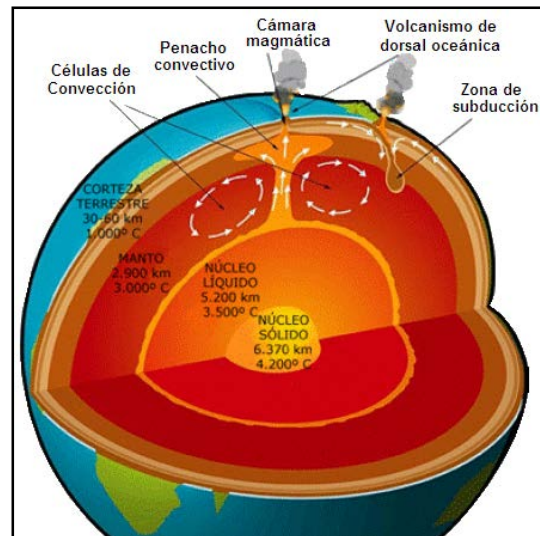


Figura 5.45 Distribución de energía en la Tierra.

La generación geotermoeléctrica inició en Toscana, Italia, en el año 1904 y en Hidalgo, México en 1959. Actualmente se explota en 60 países para usos directos de calentamiento y en 24 países para producción de electricidad; representando el 0.4 % del total de la generación eléctrica mundial (14).

Particularidades nacionales.

En México existe un gran potencial de recursos geotérmicos, estimado en 1400 MW por CFE y en 2 400 MW por el sector académico, así como un gran potencial de experiencia en su explotación, sin embargo es importante continuar con investigaciones y desarrollo de tecnologías para la explotación de los sistemas de roca seca, principalmente. En recursos hidrotermales convectivos, se tiene una capacidad instalada de 960 MW y una generación bruta de 7 404 MWh/año.

Se encuentran en explotación cuatro campos geotérmicos, como se observa en la Tabla 5.47 y en la Figura 5.22, donde los puntos indican zonas con anomalías. El

Campo Pathé, Hidalgo, primera planta geotérmica en América, produjo 3500 kW, pero debido a que requería de gran mantenimiento y el vapor generado no era suficiente, tuvo que cerrarse. El sitio La Primavera, o Cerritos Colorados, Jalisco, es un campo cuyo potencial evaluado es de 75 MW suficiente energía para satisfacer el alumbrado público del municipio de Zapopan (3) (14) (37) (97) (99).

Tabla 5.47 Campos Geotérmicos

Campo Geotérmico	Ubicación	Capacidad [MW]	Generación Bruta [MWh]
Cerro Prieto	Baja California	720	5 176
Los Azufres	Michoacán	195	1 517
Los Húmeros	Puebla	40	320
Las Tres Vírgenes	Baja California	10	42



Figura 5.46 Energía Geotérmica en la República Mexicana.

De la producción total de energía en México, alrededor del 2.97 % se genera por fuentes geotérmicas. A nivel global el orden decreciente de capacidad instalada es EUA con 2 687 MW, Filipinas con 1 970 MW y México con 965 MW, seguidos por Italia e Islandia. En un futuro cercano México tendrá un potencial de 1 186 MW ya que actualmente los Campos Cerro Prieto, los Azufres II y los Humeros se encuentran en expansión (100 y 46 MW respectivamente) además de que se pondrá en marcha el proyecto de Jalisco (5) (14) (37) (97) (100).

Cerro Prieto es el sostén básico de la generación en el sistema aislado del noroeste del país, donde tiene un aporte de aproximadamente 80 %. Los Azufres presentan la ventaja para el sistema central de que no consume agua de enfriamiento y no



emite gases de combustión. Los Húmeros es el yacimiento con más alta temperatura del país, del orden de 400 °C (97).

I. Descripción y principio de operación

El calor geotérmico, se ha concentrado en ciertos tipos de subsuelos, conocidos como yacimientos geotérmicos, los cuales se componen de una fuente de calor como: una cámara magmática, corrientes de agua subterráneas, depósitos o acuíferos donde se aloja el agua percolada desde la superficie (y se calienta por el calor geotérmico) y una formación conocida como capa sello que impide que los fluidos geotérmicos (mezcla de vapor, agua y minerales) se dispersen en la superficie. Un esquema se muestra en la Figura 5.47.

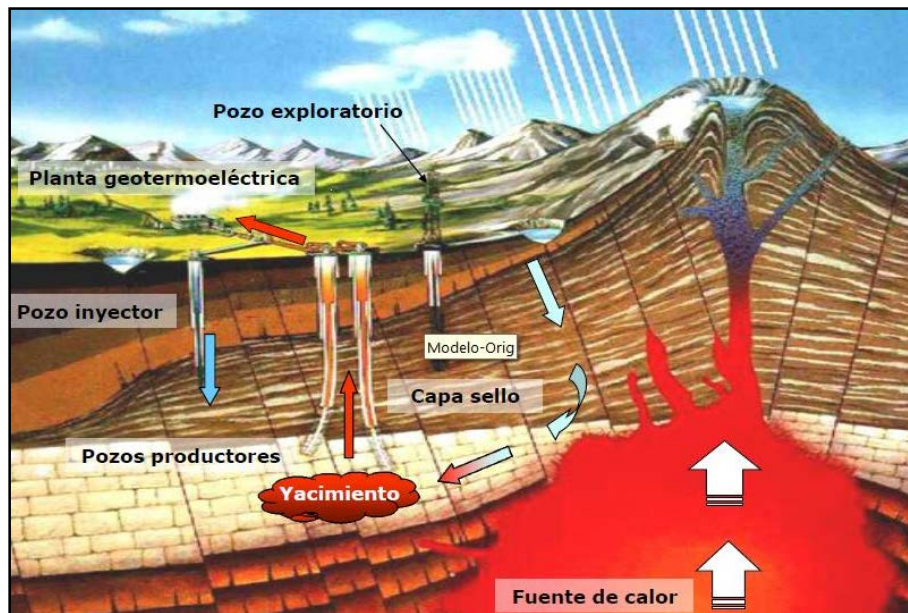


Figura 5.47 Yacimiento geotérmico.

Los fenómenos naturales que indican la existencia de áreas geotérmicas, zonas con anomalías geotérmicas, determinadas mineralizaciones y depósitos de sales. Los campos geotérmicos son causados por la incrustación magmática de elementos químicos, radioactivos y mecánicos; y la colisión de placas, causando separación, substracción u obducción (choque de las placas tectónicas) de las mismas.

Las anomalías ocurren en zonas inestables, sometidas a tensiones que generan grandes presiones y grandes cantidades de calor, causando fracturas por las que fluyen rocas incandescentes en estado de fusión total o parcial. (Tabla 5.48)



Tabla 5.48 Reservas de recurso de alta entalpía

Anomalía	Descripción
Volcanes	Conducto que comunica la parte superior de la corteza sólida con los niveles inferiores de la misma, y por la cual emerge el magma en forma de lava y gases.
Volcanes de fango	Relieve formado por un cráter y un cono volcánico de poca altura pero muy extenso debido a su escasa pendiente. Su origen no está relacionado con las verdaderas formaciones volcánicas, sino que se deben a emanaciones de gas.
Alteraciones hidrotermales	Ocurre por la transformación de fases minerales, y la disolución y precipitación de los mismos en los fluidos calientes que circulan por las rocas.
Fuentes termales y minerales	Albercas de agua caliente que se filtran desde el fondo hasta llegar a la superficie de la tierra. Durante el filtrado absorben los minerales de las rocas.
Geisers	Fuente termal que expulsa periódicamente agua caliente y vapor.
Fumarolas	Emanaciones de vapor y mezclas gases que surgen por las grietas exteriores de un volcán. Pueden ser del tipo secas, ácidas, alcalinas o frías, según su contenido de anhídridos, amoníaco, clorohidrosulfuros, y sulfuros (respectivamente).
Solfataras	Terreno geológico del cual por las fisuras se desprende vapor de agua con alto contenido de ácido sulfhídrico.

● **Clasificación de los sistemas geotérmicos**

Los sistemas se clasifican con base en la temperatura del fluido endógeno que se extrae, o del fluido que se inyecta para la extracción de calor de la roca (14).

Cuando la temperatura del fluido es mayor de 200 °C se le considera un recurso de alta entalpía o de alto contenido energético, su presencia coincide con la existencia de anomalías geotérmicas y es ideal para la producción de electricidad en sistemas convencionales de generación. Si la temperatura del fluido está en el intervalo de 100 a 200 °C se consideran sistemas de mediana entalpía. Si la temperatura es menor de 100 °C se consideran sistemas de baja entalpía, estos sistemas son ideales para generar calor de proceso, se hallan en superficies planas conocidas como zonas estables (14) (101).

Alta entalpía: se requieren las siguientes condiciones geológicas:

1. El yacimiento debe estar en una zona inestable, para asegurar la existencia de un foco activo de calor que proporcione un flujo calorífico anómalo.



2. Encontrarse bajo materiales permeables que permitan la circulación de los fluidos capaces de extraer el calor de la roca.
3. Los fluidos deben almacenarse bajo materiales impermeables que actúen como sello, evitando la disipación continua de la energía.

Usualmente se encuentra en pozos hidrotermales convectivos de entre 1 600 y 4 400 metros de profundidad, los cuales generan mezclas líquido/vapor. La fracción líquida se regresa al pozo o se utiliza en procesos industriales y la fracción de vapor se utiliza en turbinas para la generación de calor. Se estima que las reservas en México a esta temperatura son las de la Tabla 5.49 y actualmente se opera en Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros y Tres Vírgenes (20).

Tabla 5.49 Reservas de recurso de alta entalpía

Reservas	MW_e
Probadas	1 340
Probables	4 600
Posibles	6 000
Total	12 000

Baja entalpía: Para contar con éste se requiere una profundidad de entre 1 500 y 2 500 metros de material permeable. La temperatura oscila entre 60 y 100 °C, el nivel térmico del fluido es bajo, lo que condiciona económicamente: debe usarse en aplicaciones directas del calor, requiriendo la existencia de un centro de consumo adecuado e importante en sus proximidades. Una variante de estos sistemas son los de muy baja temperatura, cuyo valor oscila en los 15 °C (20).

A nivel nacional se tienen 395 manifestaciones superficiales en 276 localidades, dando un estimado de 300 a 350 EJ. Sin embargo el uso actual es de 164 W, equivalentes a 12 500 ton/h de agua a 50 °C utilizada en balnearios, o al calor empleado en el secado de productos agrícolas, calefacción de edificios, etc (95).

Sistemas geotérmicos

Actualmente sólo se explotan los sistemas hidrotermales de alta temperatura con profundidad de alrededor de 3 km. Los cuales constituyen una fracción mínima del total de energía disponible en la Tierra. El resto de los sistemas se encuentran en etapa de investigación y desarrollo (14) (16).



1) Sistemas hidrotermales convectivos: Se constituyen por tres elementos: un fluido que sirve como medio de transporte del calor (fuente de calor), una roca permeable donde se almacenan los fluidos, y una capa de “roca sello”. Los fluidos se infiltran en la corteza terrestre a través de poros y fracturas penetrando varios kilómetros hasta alcanzar un yacimiento, donde se almacenan por largo tiempo y son calentados por las rocas, alcanzando temperaturas de hasta 400 °C. Su existencia se manifiesta en la superficie por la presencia de manantiales calientes, fumarolas, geisers, lagunas de lodo hirviendo o suelos calientes. Los yacimientos pueden ser de vapor o líquido dominante de alta temperatura o de líquido de mediana o baja temperatura. Por la tecnología actual es el único sistema que se explota comercialmente (3) (14).

2) Sistemas de roca seca caliente, mejorados, o estimulados: Conocidos como sistemas HDR (Hot Dry Rock), consisten en extraer el calor de las rocas secas, cuya temperatura es de alrededor de 650 °C, se localizan a una profundidad de entre 2 y 8 km y presentan la característica de contar con fluidos insuficientes o nulos, para transportar el calor hacia la superficie. Por lo que para su explotación se requiere la creación de una red de fracturas en la roca y de la inyección de fluidos para su aprovechamiento. Debido a su gran potencial y a su distribución prácticamente uniforme en toda la superficie terrestre, se estima que para el año 2050 se podrían obtener 100 mil MW. Actualmente la tecnología se encuentra en etapa de ID, dentro de la investigación se ha considerado el uso de CO₂ como el fluido de transporte de calor en vez del agua; además estos sistemas son la base para el proceso de explotación de rocas húmedas. En la Figura 5.48 se observa un esquema de este sistema (14) (95) (100).

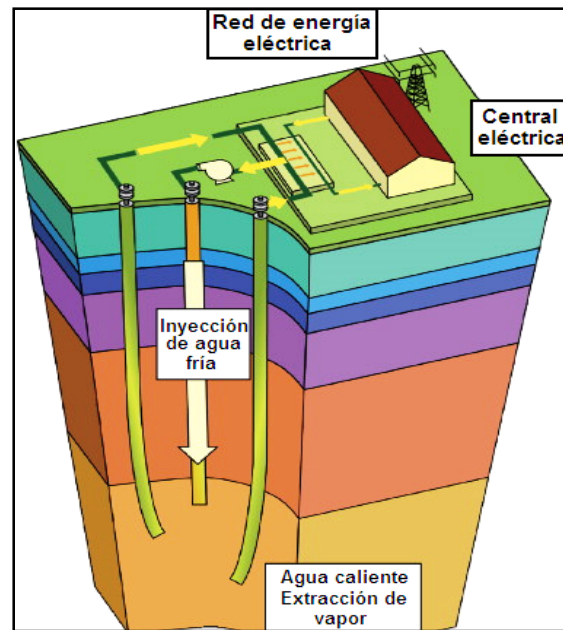


Figura 5.48 Sistema geotérmico HDR

3) Sistemas geotérmicos geopresurizados: Sistemas que contienen agua y metano disuelto a alta presión (alrededor de 700 bar) y temperatura mediana (entre 90 y 200 °C). Estos no se explotan comercialmente pero se conoce que ofrecen tres tipos de energía: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluido a muy alta presión) (3) (14) (99).

4) Sistemas geotérmicos marinos: Están ubicados en el fondo del mar y son sistemas de alta entalpía. Se manifiestan como fumarolas, descargas o chimeneas hidrotermales. No se explotan comercialmente ya que los procesos y la tecnología se encuentra en etapa de ID. En México se localizan en el Golfo de California y se manifiestan como expulsión de chorros de agua con temperaturas de hasta 350 °C a una profundidad de 2600 m y con un flujo de calor de 0.34 W/m² (14) (99).

5) Sistemas geotérmicos magmáticos: Se constituyen de roca fundida y están asociados con sistemas volcánicos activos o de gran profundidad, en zonas de debilidad cortical. Se encuentran en etapa de ID, cuyo objetivo es extraer el calor desprendido durante el enfriamiento del magma. Son atractivos por sus altas temperaturas (mayor a 800 °C), lo cual es relevante considerando que la eficiencia de las máquinas térmicas es proporcional a la temperatura máxima de su ciclo termodinámico (3) (14) (99) (100).



En el núcleo de la Tierra, las temperaturas son extremadamente altas, lo que provoca que el metal y otras sustancias que ahí se encuentran, se derritan y se forme el magma. El magma derretido suele ser empujado por altas presiones hacia la corteza terrestre, entre las fallas que dividen las placas tectónicas terrestres, y emana tanto en forma de explosiones de gas, como de geisers y aguas termales. En la Figura 5.49 se muestra un ejemplo de cómo el magma es liberado hacia la superficie terrestre (6).



Figura 5.49 Sistema geotérmico magmático

Existen algunos proyectos piloto en el extranjero, pero su explotación comercial requiere la búsqueda de materiales adecuados que resistan la corrosión y las altas temperaturas. En México, este sistema es viable en el Volcán de Colima (3) (14).

6) Sistemas geotérmicos supercríticos

Están ubicados a profundidades de entre 5 y 6 km, y contienen fluidos en estado supercrítico, con temperaturas de hasta 600 °C. Tienen la capacidad de proveer hasta diez veces más energía que los sistemas geotérmicos convencionales, debido a lo cual, si su explotación (en etapa de ID) resulta factible, la capacidad geotermoeléctrica se incrementaría en varios órdenes de magnitud.

Fuentes de energía geotérmica

En la litosfera y el núcleo interno, el mecanismo de propagación de calor imperante es la conducción, y en el manto y el núcleo externo es la convección. Una parte de la energía generada en la Tierra se consume en los procesos que ocurren en su interior, y el resto, junto con la energía procedente de la desintegración de los isótopos radiactivos (manto y corteza), llega a la superficie y se libera hacia el exterior (14).



Lo que determina el régimen térmico de una zona, y por tanto la distribución de temperaturas, es el balance del calor que entra en la base de la litosfera, desde el interior de la Tierra, el calor generado y absorbido en la misma, y el que finalmente se irradia hacia el exterior. El espesor de la litosfera tiene gran importancia en la distribución de temperaturas puesto que la base de la misma es una isoterma de temperatura elevada (1300 °C). Además, el adelgazamiento litosférico facilita la llegada de magma fundido a la superficie, principalmente en zonas de tectónica extensiva a través de fallas normales (94).

Tabla 5.50 Origen del calor en el interior de la Tierra.

Origen	Descripción	Zona	Potencia [x10 ¹² W]
Radiactividad o desintegración de isótopos radiactivos	Cerca del 50 % del flujo de calor proviene de la desintegración de isótopos radiactivos de vida larga como: ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²³² Th y ⁴⁰ K.	Corteza continental Corteza oceánica Manto superior Manto inferior Núcleo	4.2 – 5.6 0.06 1.3 3.8 – 11.6 1.2 – 2.0
Calor inicial	Energía liberada durante la formación de la Tierra, hace 4 500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie.	Manto Núcleo	7.0 – 14 4.0 – 8.0
Movimientos diferenciales	Energía liberada por los movimientos de las capas terrestres. Éstas responden de distinta forma a las fuerzas de la marea, producidas por el Sol y la Luna. Una consecuencia es la continua disminución de la velocidad de rotación del planeta.	Manto	0 – 7.0
Calor de diferenciación: * Calor latente de cristalización * Energía gravitatoria	La discontinuidad entre los núcleos interno y externo está a temperatura y presión de fusión del hierro. El interno se halla en estado sólido y el externo en estado líquido; en la zona de transición, el fluido del núcleo externo cristaliza y los elementos con menor punto de fusión migran liberando energía gravitatoria. En el proceso, el núcleo interno amplía su tamaño a razón de 100 m ³ /s y se libera energía en forma de calor.	Núcleo externo	1.0 – 2.8 1.0
Total			≈ 42

La propagación de calor está definida por la Ley de Fourier (Ecuación 5.60), y se lleva a cabo desde una zona caliente hasta una zona fría (94).

$$W = -k \frac{dT}{dz}$$

Ecuación 5.60 Propagación de calor por conducción



Donde:

W = calor por unidad de tiempo y unidad de superficie [W/m^2]

k = conductividad térmica del medio [$W/m^{\circ}C$]. Los valores típicos para los materiales mayormente utilizados se observan en la Tabla 5.51.

z = profundidad del medio donde se propaga el calor. [m]

T = temperatura [$^{\circ}C$]

Tabla 5.51 Reservas de recurso de alta entalpía

Tipo de roca	Conductividad térmica [W/mK]	Capacidad térmica volumétrica [MJ/m ³ K]	Tipo de roca	Conductividad térmica [W/mK]	Capacidad térmica volumétrica [MJ/m ³ K]
Rocas Magmáticas			Rocas Sedimentarias		
basalto	1.7	2.3-2.6	caliza	2.5	2.1-2.4.
diorita	2.6	2.9	marga	2.1	2.2-2.3
gabro	1.9	2.6	cuarcita	6.0	2.1-2.2
granito	3.4	2.1-3.0	sal	5.4	1.2
peridotita	4.0	2.7	arenisca	2.3	1.6-2.8
riolita	3.3	2.1	arcillosas/limos	2.2	2.1-2.4
Rocas Metamórficas			Otros Materiales		
gneis	2.9	1.8-2.4	bentonita	0.6	3.9
mármol	2.8	2.0	hormigón	1.6	1.8
metacuarcita	5.8	2.1	hielo (-10 °C)	2.32	1.87
micasquistos	2.0	2.2	plástico (PE)	0.39	-
esquistos arcillosos	2.1	2.2-2.5	aire (0-20 °C, seco)	0.02	0.0012
Rocas No Consolidadas			acero	60	3.12
grava seca	0.4	1.4-1.6	agua (+10°C)	0.58	4.19
grava saturada de agua	1.8	2.4	Argilita	2.38	
morrena	2.0	1.5-2.5	Marga	2.69	
arena seca	0.4	1.3-1.6	Dolomía	3.34	
arena saturada de agua	2.4	2.2-2.9	Gres	3.24	
arcilla/limo, seco	0.5	1.5-1.6	Yeso	5.28	
arcilla/limo saturado de agua	1.7	1.6-3.4	Sal	5.52	
turba	0.4	0.5-3.8	Plata	418	
			Hielo	1.2	
			Madera	0.1	

Suponiendo un volumen de corteza como el de la Figura 5.50 el cambio de temperatura dT en un tiempo dt , dependerá de:

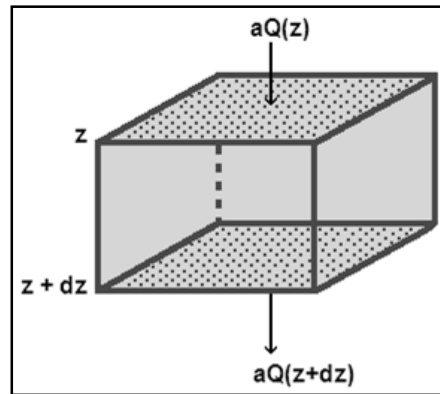


Figura 5.50 Cambio de temperatura en la corteza terrestre.

- El balance del flujo de calor que entra $W(z)$ menos el que sale $W(z+dz)$ del volumen de corteza.
- El calor generado dentro del volumen: Gdz . Donde G es el calor generado por segundo en cada m^3 del medio.
- El calor específico del material.

En régimen no estacionario y con un flujo unidimensional, es decir, si la temperatura se considera en función de la profundidad y el tiempo, la conducción de calor está definida como:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + \frac{G}{\rho C_p} \quad \text{Ecuación 5.61} \quad \text{Propagación de calor en régimen no estacionario}$$

Cuando se alcanza el régimen estacionario, la temperatura no varía con el tiempo:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = -\frac{G}{k} \quad \text{Ecuación 5.62} \quad \text{Propagación de calor en régimen estacionario.}$$

El perfil de temperatura $T(z)$, Ecuación 5.62, se llama geoterma de equilibrio. Para determinar la distribución de temperatura en una zona particular, se estiman como condiciones a la frontera, la temperatura y el gradiente geotérmico en la superficie.

Integrando la Ecuación 5.62, para una capa uniforme:

$$\frac{\delta T}{\delta z} = -\frac{G}{k}z + C_1$$

Aplicando a la superficie, $z=0$, se obtiene el gradiente geotérmico en la superficie.

$$\frac{\delta T}{\delta z} = C_1$$



Integrando la Ecuación 5.62 nuevamente:

$$T = -\frac{G}{2k}z^2 + C_1z + C_2$$

Utilizando la condición a la frontera $z=0$:

$$T_0 = C_2$$

Sustituyendo C_2 en la ecuación:

$$T = -\frac{G}{2k}z^2 + C_1z + T_0$$

Ecuación 5.63 Variación de la temperatura en función de la profundidad.

Debe simularse el flujo subterráneo y el transporte de solutos. La resolución de dichas ecuaciones, implica simplificaciones en el modelo final (102):

1. Validar la Ley de Darcy en todo el sistema geotérmico.

$$Q = -k \frac{dh}{dL} A$$

Donde:

Q = gasto, descarga o caudal [m^3/s]

L = longitud [m]

k = conductividad hidráulica, variable en función del material.

A = área de la sección transversal de la muestra [m^2]

$-\frac{dh}{dL}$ = gradiente hidráulico. El signo se debe a que la dirección del caudal es hacia dh decreciente.

2. La porosidad y la conductividad hidráulica son constantes con respecto al tiempo. La porosidad es además invariable en el espacio.
3. La difusión iónica y molecular puede considerarse como despreciable.
4. El flujo y el transporte de solutos son variables bidimensionales.
5. Los acuíferos son homogéneos e isotrópicos en relación a los coeficientes longitudinal y transversal de la dispersividad.

El flujo subterráneo se expresa por la Ecuación 5.64, cuya resolución puede ser el método de las diferencias finitas.

$$\nabla(\bar{k} \nabla h) + q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación 5.64 Flujo subterráneo.



Donde:

\bar{k} = tensor de conductividad hidráulica.

h= nivel piezométrico.

S_s= coeficiente de almacenamiento.

q= caudal aportado o extraído del sistema.

El transporte de solutos se expresa por la Ecuación 5.65, cuya resolución puede ser el método de las características.

$$\frac{dc}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla c = \nabla(\bar{D} \nabla c) + \frac{q}{n_e \cdot m} (c_i - c) - \lambda c + \frac{S_i}{n_e \cdot m}$$

Ecuación 5.65
Transporte de solutos.

Donde:

\bar{D} = tensor de dispersión hidrodinámica.

c_i= concentración inicial.

q= entradas o salidas de caudal.

n_e= porosidad efectiva.

m= espesor saturado.

S_i = fuente de soluto interna.

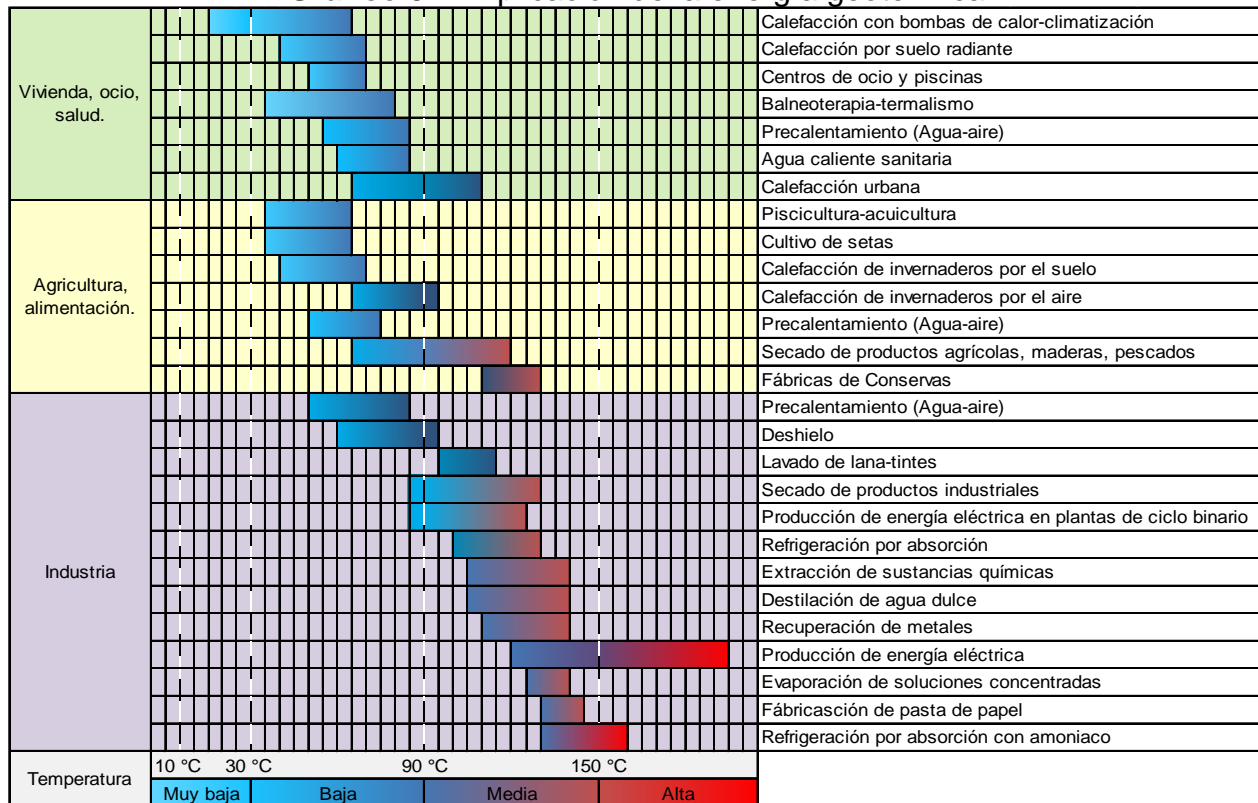
λ = coeficiente de degradación.

II. Aplicación de la tecnología.

La geotermia es una de las energías renovables con mayor madurez tecnológica; cuenta con tecnología sólida, versátil, limpia y útil para múltiples aplicaciones (Ver Gráfico 5.7), como generación de electricidad y usos térmicos. Así mismo, es una de las tecnologías con mayor sustentabilidad energética. Esto se avala considerando el tiempo de explotación, sin afectación de las reservas energéticas, como ocurre en los campos Larderello, Italia; Los Geiseres, USA; y Cerro Prieto, México; cuyas vidas útiles son 100, 78 y 35 años respectivamente (5) (14).



Gráfico 5.7 Aplicación de la energía geotérmica



1) Electricidad.

Para generar electricidad, se extraen fluidos bifásicos (L/V) de alta temperatura (mayor a 200 °C) mediante sistemas hidrotermales convectivos en pozos perforados y se transportan a la superficie para una separación eficiente. El vapor es conducido hacia turbinas de generación y el agua es reutilizada en múltiples aplicaciones de calentamiento antes de ser regresada al subsuelo para recargar el sistema y evitar problemas de impacto ambiental (14) (95) (101):

Vapor seco: Se utiliza cuando el fluido hidrotermal debido a las condiciones de presión y temperatura, se presenta total o en gran porcentaje en forma de vapor, y se conduce a una turbina de vapor convencional. El recurso se explota mediante dos ciclos termodinámicos, como se observa en la Figura 5.51:

- a) Ciclo directo sin condensación: al salir de la turbina, el vapor se libera directamente a la atmósfera. Los costos de instalación y su eficacia son bajos. Se emplea en plantas piloto y en unidades de pequeña potencia.

- b) Ciclo directo con condensación: es la tecnología más común, al salir de la turbina, el vapor es condensado y se separan los gases para su posterior valorización o tratamiento.

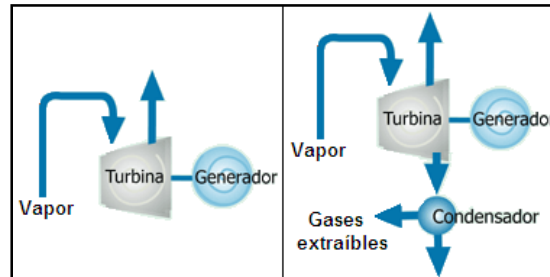


Figura 5.51 Ciclos termodinámicos directos, con y sin condensación.

Flasheo de vapor o agua sobrecalentada: Se utiliza cuando el fluido hidrotermal, debido a altas presiones se encuentra en fase líquida, principalmente agua a alta temperatura. El fluido líquido almacenado es extraído e inmediatamente inyectado en un tanque donde un volumen determinado de él se convierte súbitamente –flash– en vapor, como se observa en la Figura 5.52. El vapor se envía a la turbina de alta presión y el agua separada, todavía a muy alta temperatura es sometida a nuevos procesos flash, con separación de vapor a baja presión, y es enviado a turbinas de baja presión. Este proceso se repite hasta que la temperatura del agua separada lo permite. Es la tecnología mayormente utilizada en las centrales geotermoeléctricas.

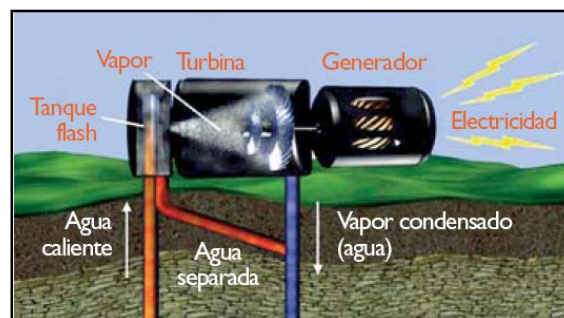


Figura 5.52 Tecnología flash.

Salmueras: constituyen una variedad de los campos de agua caliente, que debido a la elevada concentración en sales no se puede producir el flash y no hay conversión en vapor. El fluido por lo general es de mediana temperatura (menor a 200 °C) y se utiliza en plantas de ciclo binario, donde cede su energía a un fluido secundario llamado fluido de trabajo, de bajo punto de ebullición para evaporarlo,



utilizarlo en turbinas y generar electricidad, como se observa Figura 5.53. Posteriormente el vapor se condensa y es reutilizado. El motivo de emplear un segundo fluido con bajo punto de ebullición es que se necesita menos calor para vaporizar el fluido. Si el fluido geotérmico tiene suficiente entalpía, es decir, mayor que 200 kcal/kg, se puede utilizar como fluido secundario agua dulce. Pero si se tiene una menor entalpía se utilizan compuestos como los freones. La producción de electricidad por pozo geotérmico es una función de las características termodinámicas (fase y temperatura) del fluido y de su poder calorífico superior. El poder calorífico inferior representa el número de pozos que se requieren explotar.

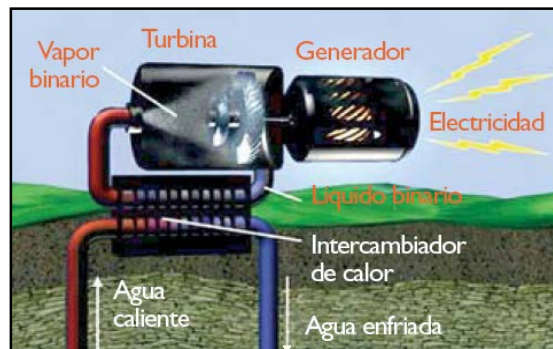


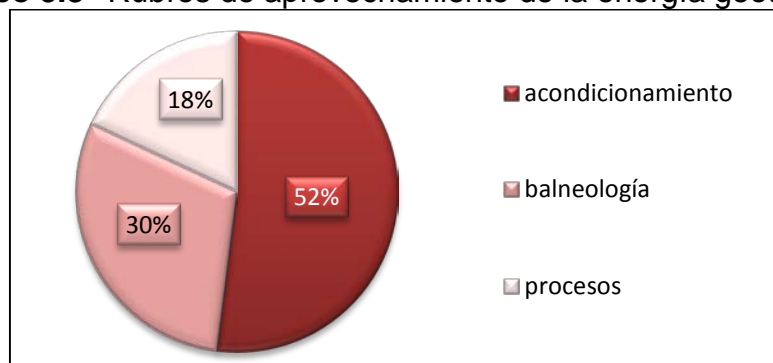
Figura 5.53 Tecnología de ciclo binario.

Se estima que la tecnología que mayor futuro tiene es el de roca caliente seca y húmeda. El uso de la húmeda incrementaría en 150 MW la generación mexicana.

2) Usos directos

Los recursos con temperatura menor a 200 °C, se aprovechan usualmente como se observa en el Gráfico 5.8 y su explotación está definida por el caudal de producción, la temperatura de producción y la salinidad del agua caliente (14) (101):

Gráfico 5.8 Rubros de aprovechamiento de la energía geotérmica.





El caudal y la temperatura de producción influyen a través de la potencia térmica, en las dimensiones de la operación y en el esquema de utilización que se adopte. La salinidad influye en el sistema de explotación. Si el fluido es de baja salinidad puede ser utilizado en riego o eliminado directamente en la red de alcantarillado. Si la salinidad sobrepasa los 5 – 10 gr/L, no se permite su eliminación directa, por lo que comúnmente se inyecta en el subsuelo, en la misma formación acuífera de la que procede. Este sistema donde ocurre un sondeo de extracción y un sondeo de inyección, se denomina doblete geotérmico (101).

Balneología y piscinas climatizadas: Es la forma más antigua en que se ha aprovechado la energía geotérmica, floreció en Roma con termas situadas cerca de manantiales de agua caliente. La aplicación, representa el 19.1 % de los usos directos de la geotermia. Actualmente es aprovechada en balnearios turísticos como el de la Figura 5.54, en natación y en los centros “spa’s” y “resorts” (95) (98).



Figura 5.54 Energía Geotérmica en la República Mexicana.

Procesos: Consisten en aplicaciones térmicas para procesos industriales, como calefacción, secado de madera y productos textiles, deshidratación de frutas y legumbres; y calentamiento de invernaderos y estanques; manejando un rango de temperatura de 60 a 120 °C. Esto permite, por ejemplo, acortar los periodos de maduración de los productos agrícolas y adelantar las cosechas. Otra aplicación es evitar la formación de placas de hielo en los pavimentos, mediante tuberías enterradas a ras del suelo por las que circulan agua caliente o vapor (14) (97) (98).

Acondicionamiento: Consiste en el acondicionamiento térmico de viviendas y espacios, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, las cuales aprovechan el gradiente de temperatura del suelo, desde profundidades de entre 2 y 100 m, como fuente o sumidero de calor. En temporada de invierno, el calor es extraído de



la tierra y liberado en el espacio que se desea acondicionar; en temporada de verano, el proceso se invierte (14).

La temperatura del subsuelo a profundidades pequeñas es constante, pero en los metros más cercanos se ve influenciada por las variaciones térmicas estacionales. La extracción de este calor de bajo nivel térmico (menor a 20 °C) y su transformación a los niveles térmicos utilizables (40 – 50 °C), se realiza por la bomba de calor; equipo que mediante la aplicación de energía mecánica o eléctrica, suministra energía térmica elevada. Para su diseño se requiere realizar el balance de energía alrededor de la bomba, expresado por la Ecuación 5.66.

$$P_e + P_E = P_C + P_P \quad \text{Ecuación 5.66 Balance de energía.}$$

Donde:

P_e = potencia eléctrica consumida en la operación.

P_E = potencia frigorífica (calor extraído del exterior).

P_C = potencia térmica (calor cedido al exterior).

P_P = potencia perdida, debida al rozamientos, incrustaciones e imperfecciones.

El coeficiente de funcionamiento o eficiencia de la máquina, se indica en la Ecuación 5.67, los valores típicos están entre 3 y 4. La energía cedida es extraída del subsuelo o de las aguas subterráneas (98) (101).

$$f = \frac{\text{energía térmica cedida}}{\text{energía mecánica eléctrica consumida}} \quad \text{Ecuación 5.67 Coeficiente de funcionamiento.}$$

La eficiencia se expresa también por los coeficientes conocidos como COP (Coefficient of Performance); si se considera que la bomba trabaja con fluidos fríos, se determina la eficiencia frigorífica, y si se considera que la bomba trabaja con fluidos calientes se determina la eficiencia térmica. Relacionando ambas determinaciones se obtiene la Ecuación 5.68.

$$\begin{aligned} COP_{frigorífico} &= \frac{P_E}{P_e} \\ COP_{térmico} &= \frac{P_C}{P_e} \end{aligned} \quad COP_t = COP_f + 1 - \frac{P_P}{P_e} \quad \text{Ecuación 5.68 Eficiencia de las bombas.}$$



El límite máximo teórico de la eficiencia está dado por el que tendría una bomba ideal que funcionaría siguiendo un ciclo termodinámico de Carnot:

$$COP_{frigorífico}(máx) = \frac{T_E}{T_C - T_E}$$

$$COP_{t} = COP_f + 1$$

$$COP_{t\acute{e}rmico}(máx) = \frac{T_C}{T_C - T_E}$$

Ecuación 5.69
Eficiencia máxima de las bombas.

Donde:

T_C= temperatura del medio caliente.

T_E= temperatura del medio frío.

La aplicación líder de energías renovables a nivel mundial es el uso de las bombas de calor geotérmicas, esto se debe a su alta eficiencia y a que reducen el consumo de energía desde un 30 hasta un 60 % con respecto a los sistemas convencionales de acondicionamiento (14).

Sin embargo en México, pese a la abundancia con la que se cuenta en relación a los recursos geotérmicos de mediana y baja temperatura, el uso se encuentra limitado a la balneología y a los tratamientos terapéuticos y en menor cantidad a lavanderías industriales, calefacción de invernaderos y secado de frutas y madera, así como usos varios como se muestra en la Tabla 5.52. Actualmente se cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 164.7 MW en 160 sitios, cuya producción varía alrededor de las 12 500 ton/hora de agua a una temperatura de 50 °C (14) (98) (103).

Tabla 5.52 Estimación de costos en una planta geotérmica.

Industria	Aplicación
Papelera	Manipulado de la pasta de celulosa
Secado y envasado de alimentos	Aportes de calor necesarios
Industria conservera de alimentos	Procesamiento a temperaturas altas
Automotriz	Agua caliente para máquinas de lavado
Refrigeración	Por absorción a diversas temperaturas
Minera	Explotación y recuperación de minerales y metales



III. Ventajas de la aplicación de la tecnología

- Las emisiones son prácticamente vapor de agua, por lo que su uso no presenta riesgo ambiental para nuestro planeta.
- El flujo de energía es constante a lo largo del año ya que a partir de los 15 m de profundidad, la temperatura de las rocas y el suelo, no dependen de variaciones estacionales u horarias como lluvias, caudales de ríos, recepción de luz solar etc. Sólo depende de la ubicación y las condiciones geológicas.
- La construcción de una planta geotérmica a diferencia de una planta térmica y una de carbón, no requiere de grandes extensiones de terreno para su construcción y el deterioro que causa al paisaje es mínimo.
- Su uso ha evitado la liberación de 16 millones de ton de CO₂, 32 000 ton de NO_x, 78 000 ton de SO_x y 17 000 ton de partículas atmosféricas, comparando la producción equivalente obtenida por medio de plantas carboeléctricas³⁸.
- El CO₂ emitido por una geotermoeléctrica representa la quinta parte de lo que emite una termoeléctrica, y sus rendimientos son similares.
- Reduce los impactos negativos en el ambiente y mitiga el calentamiento global.
- Un campo geotérmico tiene un factor de capacidad muy alto ya que puede operar 24 hrs al día, los 365 días, exceptuando por paros de mantenimiento
- Los precios de la tecnología son bajos, lo que resulta que la energía obtenida tenga un precio de venta altamente competitivo.
- Los sistemas de ciclo binario tienen poca probabilidad de agotar el yacimiento geotérmico pues los líquidos de condensación que son reinyectados al yacimiento contienen energía térmica y se procura que la cantidad total de energía se mantenga constante.
- La construcción de instalaciones geotérmicas tiene un menor costo que construir una planta de vapor convencional.
- El tiempo necesario para poner en marcha una central geotérmica es menor que el requerido para arrancar una de combustible fósil. (6) (14) (95) (97) (98)

³⁸ La producción geotermoeléctrica mundial es de 9 732 MW.



IV. Limitantes o desventajas de su aplicación

- La explotación de la mayoría de los sistemas en los contextos economía y tecnología (perforación y construcción de pozos) se encuentra en etapa de ID.
- Las fases de exploración y desarrollo de nuevos proyectos implican altos riesgos por la incertidumbre y las fuertes inversiones que se deben ejecutar en la localización correcta de los sitios y la perforación de los pozos direccionales para encontrar la zona de producción que asegure el proyecto comercial.
- La fase de explotación implica los riesgos relacionados con la eficiencia de los sistemas de generación y cogeneración, la corrosión e incrustación en los equipos y la disposición de los fluidos residuales.
- Al salir el vapor de la falla en la Tierra se provoca contaminación auditiva, además de que por arrastre se liberan emisiones peligrosas como mercurio y ácido sulfúrico, detectable por el olor a huevo podrido, pero que en cantidades grandes pasa desapercibido y es letal.
- La evacuación del agua de desechos puede ser problemática, ya que el líquido presenta un alto contenido mineral, así como de arsénico y amoníaco.
- Debido a que la explotación de esta energía depende del lugar, para que siga siendo un recurso renovable, se deben recargar los mantos freáticos.
- No puede transportarse como energía primaria y presenta elevados costos de perforación para sistemas de ciclo binario.
- Los equipos presentan grandes áreas de oportunidad ya que es necesario que soporten las altas presiones y temperaturas que se van presentando durante la perforación hasta encontrar la fuente energética.
- Debe realizarse un estudio en geofísica, donde se estudie el comportamiento de las rocas y los fluidos que pasan por sus poros, pero sobre todo un estudio sísmico donde se obtenga la imagen del subsuelo, y se observen las estructuras donde se encuentra el recurso geotérmico. (6) (14) (97) (100)



V. Rendimiento y/o eficiencia

El potencial geotérmico almacenado en los 10 kilómetros exteriores de la corteza terrestre, supera en 2000 veces las reservas mundiales de carbón. Las reservas geotérmicas estimadas en el año 2000 fueron de 1×10^{12} toneladas (95) (104).

Un recurso de alta entalpía tiene en promedio una capacidad de 2 400 MW_e. Un recurso de baja entalpía tiene en promedio una capacidad de 20 000 MW_t (6).

Los recursos de roca seca caliente presentan gran energía, la misma cantidad que contienen 40 mbp, se acumula en 1 km³ de granito a 250 °C (105).

Al implementar una central geoelectrica, se debe hacer una valorización de su rendimiento, como se indica en la Ecuación 5.70 y en la Ecuación 5.71.

$$\eta_{bruto} = \frac{E_p}{E_c}$$

Ecuación 5.70 Rendimiento bruto de una central geoelectrica.

$$\eta_{neto} = E_p - \frac{E_{aux}}{E_c}$$

Ecuación 5.71 Rendimiento neto de una central geoelectrica.

Donde:

E_p= Energía producida en la central.

E_c= Energía calorífica aportada por el agua.

η_{bruto}= Rendimiento de la central (COP eléctrico).

E_{aux}= es el consumo eléctrico de la planta en servicios auxiliares.

Los valores del η_{bruto} en las centrales con aportación de agua geotérmica a 200 °C varían del 50 al 60 %. Para temperaturas de 170 °C, el η_{neto} es del 10 % y si la temperatura es de 100 °C el η_{neto} cae hasta un 6 %

La utilización efectiva de la capacidad de la planta en un tiempo determinado se conoce como factor de planta, y se obtiene dividiendo la energía generada entre la capacidad instalada por el tiempo. Para una planta geotermoeléctrica el factor se encuentra entre el 80 y el 90 %, aproximadamente 25 % mayor que el de una planta térmica convencional (3).



VI. Costos

Los costos de generación de energía eléctrica mediante la geotermia incluyen: inversión en exploración, perforación de pozos y construcción de la central. Se consideran como competitivos y a nivel mundial representan un monto fluctuante de entre 2 y 10.5 ¢USD/kWh. En México los montos varían entre 3.29 y 7.0 ¢USD/kWh. En cuanto a las aplicaciones térmicas de los recursos geotérmicos, los costos son menores, en un rango de entre 0.5 y 2 ¢USD/kWh (14) (16).

Si se requiere realizar un proyecto “llave en mano”, los costos fluctúan entre 1 800 y 3 000 USD/kWh. Para recursos de alta entalpía los costos de inversión son de 1 200 a 5 000 USD/kW, y los de generación son de 2 a 5 ¢USD/kWh (14) (20).

Sin embargo, en una central eléctrica es una desventaja comercial, en comparación con los combustibles fósiles, ya que el efecto de tener que perforar pozos para abastecer energía, es el equivalente económico, a comprar el combustible necesario para abastecer de la misma cantidad de energía. Para estimar los costos de la central mediante el uso de energía geotérmica, con 1 y 2 sistemas flash, se utiliza la Ecuación 5.72 (100) (106).

$$C = 2500e^{(-0.0025[W-5])}$$

Ecuación 5.72 Costo total de una planta térmica.

Donde

C= costo del capital, es decir, costo por kilowatt generado [\$/MW].

W= potencia del proyecto [MW]

Estudios de Prefactibilidad

Antes de explotar un pozo geotérmico, se deben realizar estudios de prefactibilidad, donde se lleva a cabo una investigación sobre los factores que afectan al proyecto, como mercado, tecnología, finanzas, suministros, administración e impacto ambiental. Así mismo la explicación de la existencia de energía en el subsuelo para que la perforación sea justificada. El estudio se debe llevar a cabo como se indica en la Tabla 5.53³⁹ (97):

³⁹ Datos estimados por CFE, los reales son resguardados por las plantas como información confidencial.



Tabla 5.53 Estimación de costos en una planta geotérmica.

Fase	Partes involucradas	Costo estimado [USD \$]		
	Costos de operación, vehículos y gastos de viaje (Costos Fijos para el personal local y los consultores)	20 000	a	70 000
Fase I	Personal (consultores y/o personal local) más el Análisis de laboratorio.	80 000	a	280 000
Fase II	Personal (consultores y/o personal local) más los Contratistas geofísicos.	210 000	a	350 000
Fase III	Personal (consultores y/o personal local) más los Contratistas perforadores.	90 000	a	300 000
	Gastos de mano de obra local, mantenimiento de equipo, vehículos y equipo de campo.	100 000	a	200 000
TOTAL		500 000	a	1 200 000

Operación de una planta geotérmica

El esquema de inversiones y costos asociados a la operación de la planta para determinar el beneficio neto, se determina por las siguientes ecuaciones (97):

$$CT_t = I_i + \sum^n (G + C) - VR$$

Ecuación 5.73 Costo total de la planta térmica.

$$CT_g = I_i + \left[P \cdot I - \sum_1^n G(1 - P) \right] - VR$$

Ecuación 5.74 Costo total de la planta geotérmica (incluye exploración).

Donde:

$CT_{t \text{ o } g}$ = Costo total de la Planta Térmica o Planta Geotérmica.

I, I_i = Inversión e Inversión inicial.

n = años de vida útil (usualmente de 20 a 30).

G = Gastos de operación y mantenimiento.

C = Gastos por combustible.

VR = Valor de Rescate

P = Probabilidad de éxito.

El beneficio neto correspondiente, se obtiene de la diferencia obtenida al relacionar la Ecuación 5.73 con la Ecuación 5.74.

$$B = CT_t - CT_g$$

Ecuación 5.75 Beneficio neto.

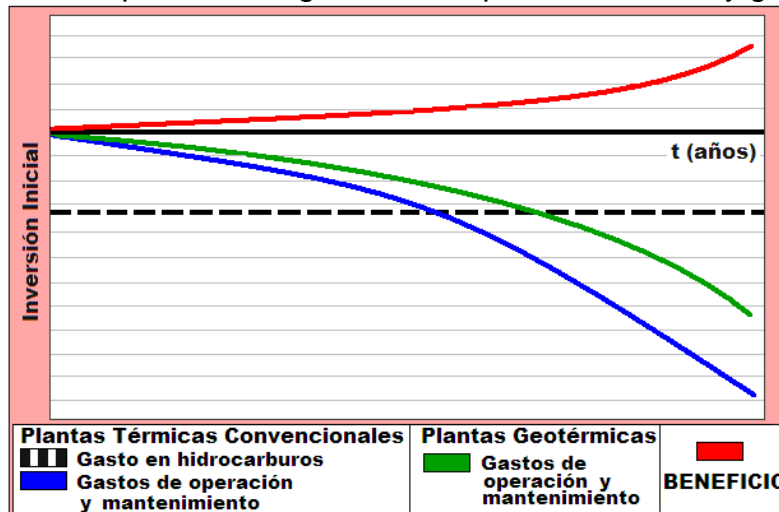
Se estima que para cualquier campo, los primeros kWh generados, asociados a las primeras instalaciones, representarán un costo a nivel equivalente de las plantas tomadas como alternativa, como se observa en el Gráfico 5.9, donde se comparan



los gastos realizados entre las plantas térmicas convencionales y las geotérmicas, de la comparación resulta que la geotérmica tienen un costo 25 % menor que la plantas de carbón, y que el incremento de la capacidad instalada por la adición de nuevos pozos, implica una disminución progresiva en los costos de generación.

El costo de construcción de una planta térmica es menor que el de una planta geotérmica, lo que se compensa en la producción y mantenimiento, ya que es menor este costo en la planta geotérmica (97).

Gráfico 5.9 Comparación de gastos entre plantas térmicas y geotérmicas.



VII. Generación de residuos e impacto ambiental

Las plantas geotermoeléctricas emiten vapor de agua, con un contenido mínimo de gases, entre ellos el CO₂; cuya cantidad liberada es comparable con la que se emitiría a la atmósfera mediante descargas naturales, como la ocurrencia de fumarolas o geiseros, aunque no se hubiese desarrollado un proyecto comercial de energía geotérmica. En la Tabla 5.54 se muestra la comparación en emisiones de generar electricidad por fuentes convencionales y por energía geotérmica (14).

Tabla 5.54 Emisiones generadas en la geotermia

Fuente	Fuente convencional [g/kWh]	Geotermia [g/kWh]
CO ₂	453	13 - 272
Hidrocarburos	906	0
Carbón	1 042	0

Como cualquier planta, las geotérmicas causan impactos ambientales en el terreno sobre el cual son construidas, sin embargo, a diferencia de otras plantas, las



geotérmicas se construyen en un espacio menor, no causan la tala de árboles, ni intervienen en ríos circundantes. No requieren instalaciones mineras, túneles, piscinas de desecho y no presentan el riesgo de tener fugas de combustible.

VIII. Operación y mantenimiento

Para aprovechar el calor, los pozos se cavan con una profundidad de dos kilómetros en el yacimiento geotérmico, posteriormente por medio de una tubería se extrae agua caliente a una temperatura de alrededor de 360 °C, ésta en la superficie terrestre se transforma en vapor.

Posteriormente se provoca el “giro”, es decir, que la fuerza del vapor en expansión provoca que la turbina por la que pasa el fluido gire y ponga en acción al generador produciendo electricidad. Ésta es suministrada a la red pública. Finalmente el agua se enfría y se devuelve al yacimiento, donde recibe nuevamente energía, y se calienta por lo que puede ser utilizada de nuevo.

En la Figura 5.55 se muestra el esquema general de una central geotermoeléctrica, posteriormente en la Tabla 5.55 se enlistan los nombres de sus secciones.

Tabla 5.55 Campos Geotérmicos

1	Aprovechamiento de calor	5	Vapor de agua	9	Agua Caliente
2	Giro de la turbina	6	Vapor	10	Agua Fría
3	Producción de electricidad	7	Turbina	11	Red eléctrica
4	Regreso a la tierra	8	Generador		

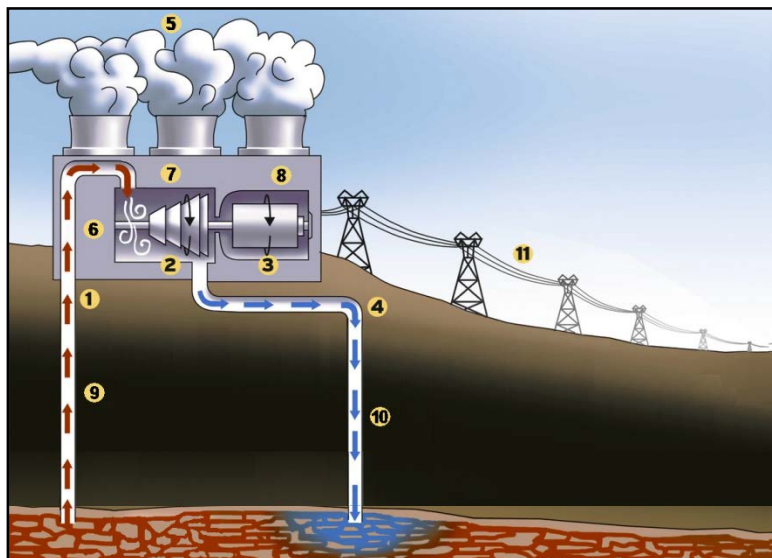


Figura 5.55 Planta geotermoeléctrica



IX. Beneficios

La energía geotérmica es un recurso renovable, sustentable, limpio y seguro que permite la generación de electricidad de forma continua y confiable; permite el ahorro en el uso de combustibles fósiles y contribuye a la diversificación de las fuentes de energía (14).

En la explotación de pozos geotérmicos, desde un enfoque de proyecto de inversión, resulta más atractivo maximizar la explotación, es decir, extraer la mayor cantidad de fluidos en un periodo de vida útil de 10 a 20 años. En vez de extraer fluidos en cantidades menores durante cientos de años, ya que se obtendría una baja potencia eléctrica o de calefacción. Se ha comprobado que si la producción es máxima durante un tiempo corto, y es constante durante el mismo periodo, se genera al finalizar un periodo de declive natural tanto en producción como en costos, teniéndose un proceso económicamente sostenible. En cambio si la producción es pequeña durante un periodo largo, deben realizarse inversiones intermedias (100).

Actualmente la energía Geotérmica le ahorra a México 10 millones de barriles de petróleo al año (97).



5.5 Energía Hidráulica

Es la energía producida por el movimiento natural del agua en el ciclo hidrológico, el cual es inducido por la energía solar y está supeditado al clima, relieve y caudal de los ríos. Se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de las corrientes de los ríos y las mareas, para transformarla en otro tipo de energía o trabajo, y para la generación de electricidad; procesos que en su mayoría, no reducen la cantidad de agua. Entre las tecnologías aplicables de esta energía están las centrales hidroeléctricas y las correspondientes a la energía mareomotriz (5) (14) (20).



El potencial hidráulico ha tenido dos periodos, en el primero se empleaba para generar energía mecánica y en el segundo se emplea principalmente en generar electricidad. La energía hidroeléctrica comenzó a explotarse en la segunda mitad del siglo XIX, siendo hasta 1950 la principal fuente de electricidad, posteriormente fue gradualmente sustituida por la energía termoeléctrica y la nuclear (5) (6) (107).

La International Hydropower Association estima que entre el 16.1 y el 19 % del suministro eléctrico global proviene de centrales hidroeléctricas. En países en vías de desarrollo el porcentaje de aplicación puede llegar hasta un 50 % (14) (108).

En el caso de México está ubicado entre amplios litorales y tiene grandes cadenas montañosas, así como vastos sistemas de riego agrícola, lo que crea un potencial enorme para aprovechar el recurso hidroeléctrico. CFE estima un potencial nacional hidroeléctrico de 52 427 MW en 583 sitios, y una capacidad instalada de 11 343 en centrales hidroeléctricas, de los cuales 300 MW corresponden a pequeñas centrales de empresas públicas y 90 MW a centrales privadas de autoabastecimiento. En cuanto al total de la energía generada, el 11.6 % se produce en las 79 centrales hidroeléctricas conectadas al servicio público, con un valor promedio de 27 300 GWh/año. El potencial de las centrales con capacidades menores a los 10 MW se estima de 3 250 MW, aunque sólo se tiene una capacidad instalada de 109 MW en 34 centrales pequeñas.



Entre las regiones hidrológicas más importantes de México están la 27 y la 28, que representan un potencial de 3.5 TWh/año, relativas a los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz. En la Figura 5.56 se observan los ríos potenciales para el aprovechamiento de la minihidráulica en México (5) (6) (14) (16).

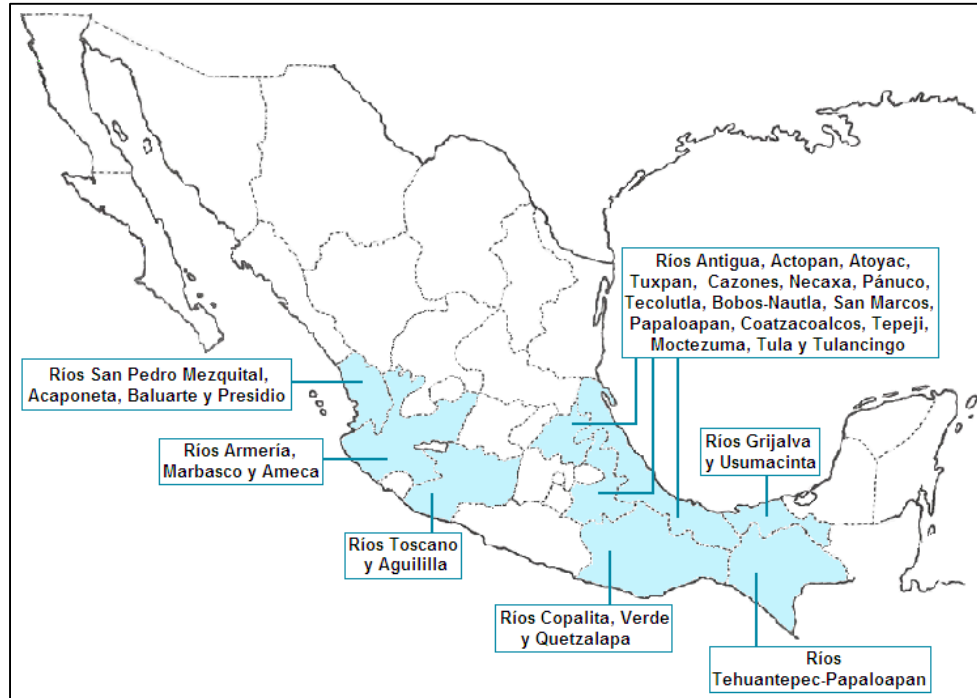


Figura 5.56 Ríos potenciales para minihidráulica.

La CFE ha identificado como sitios (ver Tabla 5.56) con un adecuado potencial hidroeléctrico aquellos cuya potencia media es mayor de 5 MW; a razón de definir la factibilidad técnica, económica ambiental y social de los proyectos.

Tabla 5.56 Centrales Minihidráulicas Públicas (CFE) y Privadas

Ubicación	Capacidad [MW]	Ubicación	Capacidad [MW]
Chiapas	28.4	Nayarit	2.2
Chihuahua	28	Oaxaca	2.5
Durango	13.9	Puebla	8.4
Edo. México	14.1	S. L. Potosí	20.1
Guerrero	38	Sinaloa	14
Hidalgo	4	Sonora	28.8
Jalisco	46.5	Veracruz	95.6
Michoacán	33.6		

A nivel nacional, actualmente existen principalmente dos fuentes principales de generación de electricidad, la termoeléctrica y la hidroeléctrica. Las principales



centrales hidroeléctricas en operación se describen en la Tabla 5.57 y la distribución del potencial nacional en cuanto a la potencia hidroeléctrica de los principales ríos, se muestra en la Tabla 5.58.

Tabla 5.57 Centrales Hidroeléctricas en operación

Central	Estado	No. de Unidades	Capacidad [MW]	Generación [GWh]	% de utilización de la planta
Chicoasén (Manuel Moreno Torres)	Chiapas	8	2400	7257.85	34.52
Infiernillo (Adolfo López Mateos)	Michoacán – Guerrero	6	1160	3945.61	38.83
Malpaso (Netzahualcóyotl)	Chiapas	6	1080	4205.91	44.46
Angostura (Belisario Domínguez)	Chiapas	5	900	2848.65	36.13
Aguamilpa (Aguamilpa Solidaridad)	Nayarit	3	960	2143.14	25.48
Temascal (Miguel Alemán)	Oaxaca	6	354	1781.35	57.44
Caracol (Carlos Ramírez Ulloa)	Guerrero	3	600	1478.03	28.12
La Villita (Presa José María Morelos)	Michoacán	4	300	1471.11	55.98
Peñitas (Presa Ángel Albino Corzo)	Chiapas	4	420	1446.34	39.31
El Cajón (Leonardo Rodríguez Alcaine)	Nayarit	2	750	1231.58	18.75
Huites (Luis Donald Colosio)	Sinaloa	2	422	1073.61	29.04

Tabla 5.58 Potencia hidroeléctrica

Río	% Potencia	Central	Ubicación
Grijalva	52.30	Chicoasén (Manuel Moreno Torres)	Tabasco
Balsas	20.60	Infiernillo (Adolfo López Mateos) y El Caracol (Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa)	Michoacán – Guerrero
Papaloapan	6.40	Temascal (Miguel Alemán)	Oaxaca
Yaqui - Mayo	4.40	El Novillo (Plutarco Elías Calles), El Palmito (Lázaro Cárdenas) y Oviáchic (Álvaro Obregón)	Sonora – Durango
Otros	16.30	---	---

Existe también un potencial importante para centrales pequeñas, que se encuentra en etapa de estudio en los estados de Puebla y Veracruz, actualmente es un potencial no evaluado, pero que se estima en 3 GW (1) (3).



I. Descripción y principio de operación

● Centrales hidroeléctricas.

Aprovechan el caudal y la carga hidráulica de una corriente de agua natural o artificial donde la presión y las energías potencial y cinética son convertidas en energía eléctrica mediante turbinas y generadores de alta eficiencia. Se clasifican según su potencia instalada, en México se nombran según la Tabla 5.59 (14).

Tabla 5.59 Clasificación de Centrales Hidroeléctricas

Tipo de Central	Potencia Instalada
Grande	30 MW
Pequeña	1 – 30 MW
Mini	100 kW – 1 MW
Micro	10 – 100 kW

En algunos países se utiliza el término pico, si la potencia es menor a 10 kW.

El cálculo de potencia hidráulica o mecánica se realiza por la Ecuación 5.76, siendo los términos de referencia para realizar los cálculos, el salto y el gasto (13) (107).

$$P_h = g \cdot \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot H \quad \text{Ecuación 5.76} \quad \text{Potencia hidráulica}$$

Dónde:

P_h = potencia hidráulica suministrada por la turbina [W]

g = gravedad 9.81 [m/s²]

η = rendimiento global del sistema⁴⁰ [%]

ρ = densidad del agua 1000 [kg/m³]

Q = caudal [m³/s]

H = salto [m]

Centrales hidroeléctricas:

Aprovechan la energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural, conocido como salto geodésico. El agua que cae se hace pasar por una turbina hidráulica, la cual transmite la energía a un generador donde se transforma en energía eléctrica.

⁴⁰ Porcentaje de potencia que puede obtenerse respecto del potencial técnico, considerando pérdidas de transformación.



Se requiere la construcción de una presa y un embalse con capacidad para almacenar el escurrimiento de la corriente en los meses lluviosos del año, y regular la extracción por las turbinas en los meses de estiaje. Otro medio para aprovechar la acumulación de energía es por bombeo; en este sistema el agua fluye de un embalse superior a otro inferior, generando hidroelectricidad durante los periodos horarios de mayor demanda y precio de energía, posteriormente el mismo volumen de agua es bombeado al embalse superior durante los periodos horarios de menor demanda y precio. Los sistemas de bombeo permiten que se reutilice la corriente, evitando variaciones en el caudal (5) (14).

Debido a la sobreexplotación mundial de los ríos, los efectos nocivos ocasionados al ambiente y las poblaciones aledañas, se determinó que las grandes centrales no son renovables, pese a cubrir el 25 % de la producción total de energía en el mundo (en países en desarrollo, el porcentaje es del orden del 50 %). El término “energía renovable” se utiliza para centrales mini y micro hidroeléctricas⁴¹ (6).

Centrales hidroeléctricas pequeñas (PCH). Minihidroeléctricas:

Requieren la construcción de una presa de poca altura y un embalse con capacidad de regulación diaria o semanal. Otra posible construcción es instalarlas al pie de presas, ya existentes, de almacenamiento para riego o suministro urbano. Las más comunes son las que se construyen sin embalse, por lo que se dice que funcionan al hilo del agua o de pasada (14).

Si las centrales están hechas adecuadamente, no causan alteraciones a los ríos ni afectan a la vida fluvial y permiten la electrificación de zonas aisladas. Es por esto que antes de llevar a cabo su construcción hay que realizar estudios hidrológicos de la zona y demás análisis que garanticen que la instalación no causará daños al entorno. Los planes hidroeléctricos a pequeña y muy pequeña escala tienen usualmente un reducido impacto ambiental (1) (48).

⁴¹ En este documento se utilizará el término central para nombrarlas indistintamente.



Centrales hidroeléctricas muy pequeñas. Microhidroeléctricas:

No requiere la construcción de una presa. Es la opción más viable por ser la tecnología menos costosa y la más amigable con el ambiente. Además de que puede instalarse en ríos caudalosos.

Parámetros para el diseño de una central

Una central hidroeléctrica se conforma principalmente por los elementos mostrados en la Figura 5.57

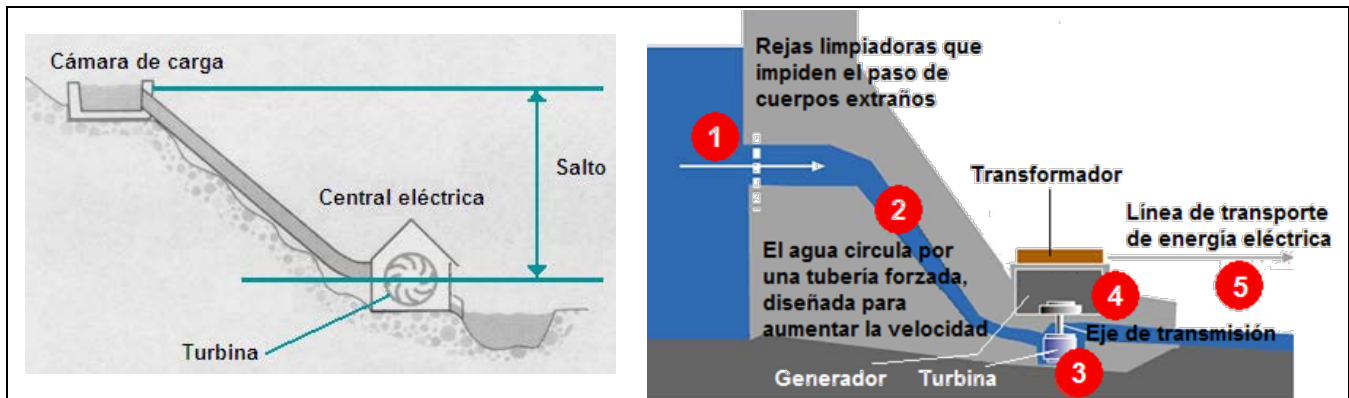
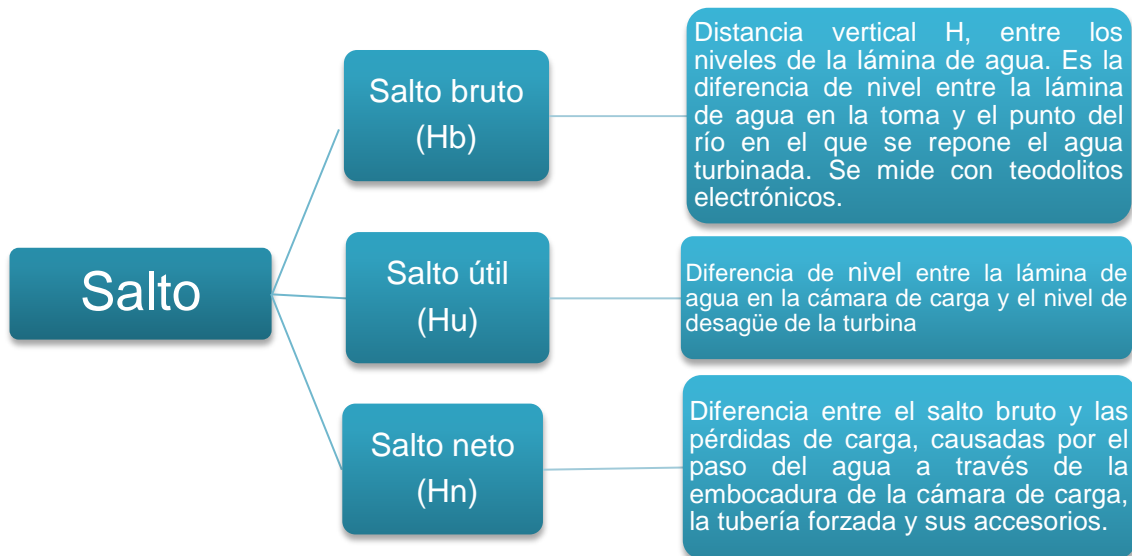
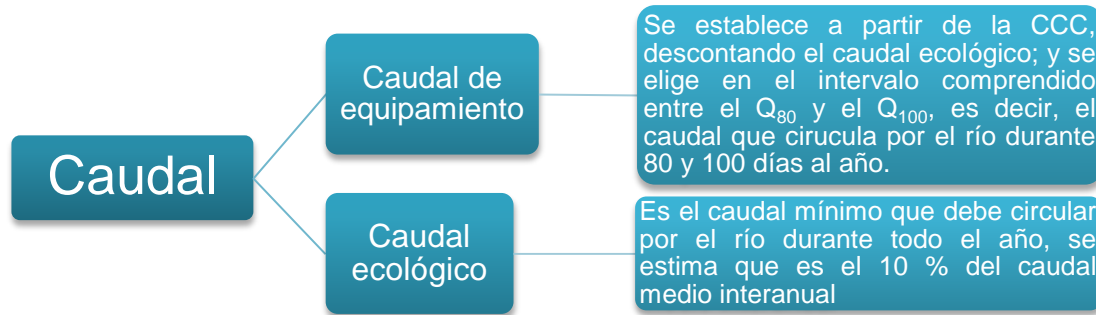


Figura 5.57 Elementos de una central hidráulica.

La potencia de la central hidroeléctrica es proporcional al salto y al caudal; para fines de cálculo y diseño:





El cálculo del salto neto obedece los principios de dinámica de fluidos y se obtiene mediante la Ecuación 5.77

$$\begin{aligned} \text{Salto neto } (H_n) \\ &= \text{Salto bruto } (H_b) \\ &- \text{Pérdidas de carga} \end{aligned}$$

Ecuación 5.77 Salto neto
en centrales hidroeléctricas

El salto neto también se obtiene a partir de datos topográficos y de las pérdidas de carga en la toma, en el canal de derivación y en la tubería forzada; las cuales tienen una estimación global de entre el 5 y el 10 % del salto bruto.

Las pérdidas de carga se miden como pérdidas de altura del salto –presión- y son consecuencia de la fricción que existe entre el agua y las paredes tanto del canal como de la tubería forzada, así como también las pérdidas ocasionadas por turbulencia, el cambio de dirección del flujo y las contracciones y expansiones que éste experimenta (107).

La potencia del salto bruto es proporcional a $H^{3/2}$, por lo que un error del 5 % en la medida del salto resultará en un error del 7.6 % en la potencia estimada de la central hidroeléctrica; por lo que si no es para una primera estimación, se deben emplear aparatos topográficos electrónicos.

Para poder determinar la potencia a instalar y la energía producible a lo largo del año en un central, se debe conocer el caudal circulante por el río en la zona próxima a la toma de agua. Esto se logra obteniendo los datos de los caudales correspondientes a una serie de años, lo suficientemente amplia como para incluir años secos, estándares y húmedos. Una vez determinados los años normales se



calculan los caudales medios diarios (Figura 5.1) y a partir de éstos se construyen las Curvas de Caudales Clasificados, CCC. (Figura 5.59).

Para llevar a cabo la medición del caudal, se pueden emplear varios métodos, siendo los más comunes:

- Medidas directas del caudal (estaciones de aforo).
- Método de medida del área transversal y de la velocidad media.
- Medida directa del caudal por dilución de un soluto en la corriente.
- Medida del caudal mediante el uso de un aliviadero.
- Medida del caudal por la pendiente de la lámina de agua.

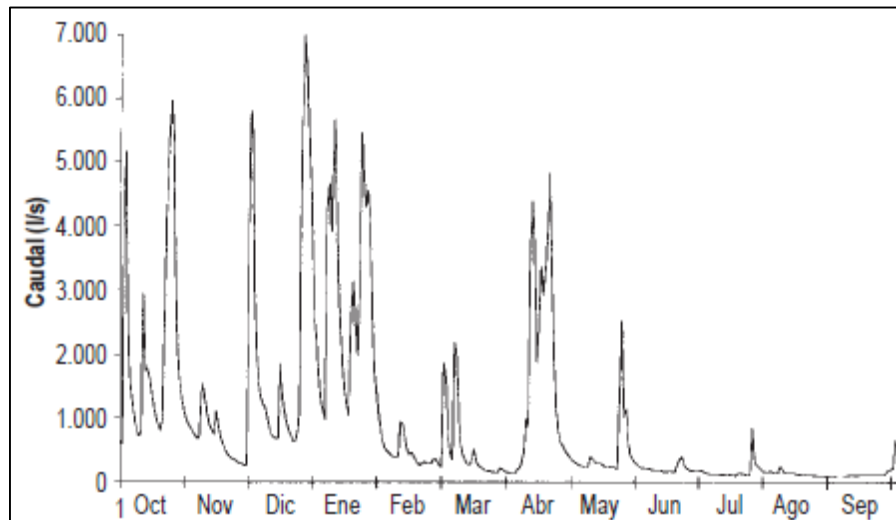


Figura 5.58 Curva de Caudales Medios Diarios

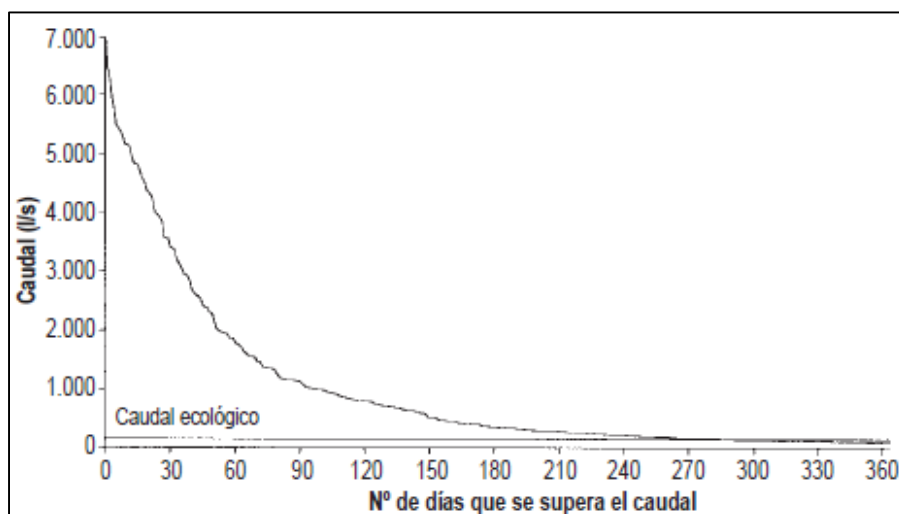


Figura 5.59 Curva de Caudales Clasificados



La capacidad máxima [m³/s] que puede transportar el canal de derivación limita el caudal a descender hacia la central. Esta capacidad corresponde a un valor entre el 80 y el 100 % de la sección mojada mínima del canal, la cual puede estimarse a partir de la Ecuación 5.78 (107).

Sección mojada
= altura de la lámina de agua del canal
× anchura del canal

Ecuación 5.78 Sección
mojada mínima del canal en
centrales hidroeléctricas

La energía eléctrica generada en una central, se obtiene mediante la Ecuación 5.80

$$E = \eta \cdot \rho V \cdot g \cdot Hn$$

Ecuación 5.79 Energía generada en
una central hidroeléctrica

Donde:

E= energía eléctrica anual generada por la turbina [J/año]

ρ = densidad del agua [1000 kg/m³]

V= volumen medio anual turbinado, para este dato se requiere de la CCC [m³/año]

g= gravedad [9.81 m/s²]

Hn= salto neto

η = rendimiento global, producto de los rendimientos de la turbina, del reductor (si existe en el sistema) del generador y del transformador.

II. Aplicación de la tecnología.

En las centrales hidroeléctricas la electricidad se produce por la fuerza que ejerce la corriente de agua sobre las turbinas, esta producción depende tanto de la cantidad del agua como de la presión que ésta alcanza. La turbina se interpone en el curso natural del flujo de agua y al girar produce una corriente eléctrica. Las turbinas individuales no aportan suficiente energía para usarse a gran escala pero pueden representar una importante aportación en el uso doméstico (5) (6).

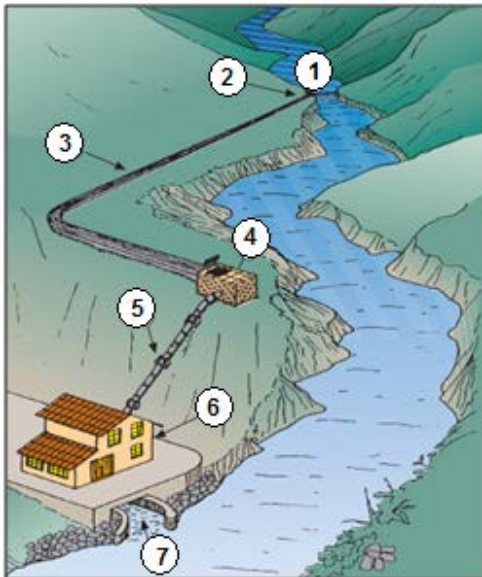
Las turbinas hidráulicas son movidas por la acción del agua que circula por ellas, este movimiento es transmitido al generador mediante un eje, que finalmente transforma la energía cinética en eléctrica debido a la inducción electromagnética.



Tipos de centrales

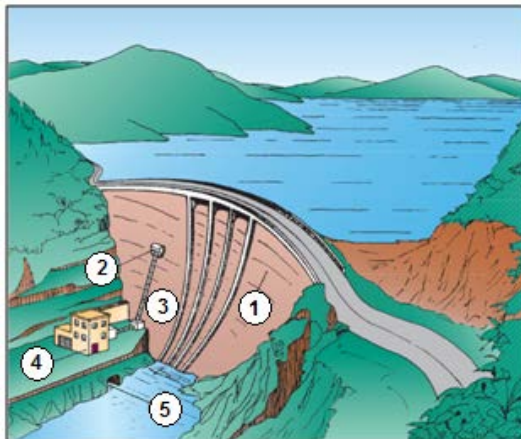
Además de por la potencia, las centrales se clasifican por su funcionamiento en relación con la modalidad de toma y acumulación de agua (1) (109):

Agua fluyente: No están reguladas y el caudal varía durante el año en función del régimen hidrológico del curso de agua. El agua se capta del río a través de una obra de toma o un canal, es trasladada hacia la central y una vez turbinada, se devuelve al río en un punto distinto al de captación (1) (109).



Agua Fluyente
1. Azud
2. Toma de agua
3. Canal de derivación
4. Cámara de carga
5. Tubería forzada
6. Edificio con el equipamiento electromecánico
7. Canal de salida

Pie de presa: Centrales construidas debajo de las presas, donde se puede controlar el agua a través de un depósito de regulación diario, semanal o mensual. Esta regulación está relacionada con la capacidad de acumulación de agua (1) (109).



Pie de presa
1. Presa
2. Toma de agua
3. Tubería forzada
4. Edificio con el equipamiento electromecánico
5. Canal de salida

Reversibles:

En estas centrales además de la generación de electricidad, se bombea agua para complementar la producción eléctrica (1).

Elementos de las centrales

Sin importar el tipo de central que se tenga, las centrales comparten diversos elementos como se observa en la Figura 5.60 y se dividen en tres grupos: obra civil, equipamiento electromecánico y equipos auxiliares.

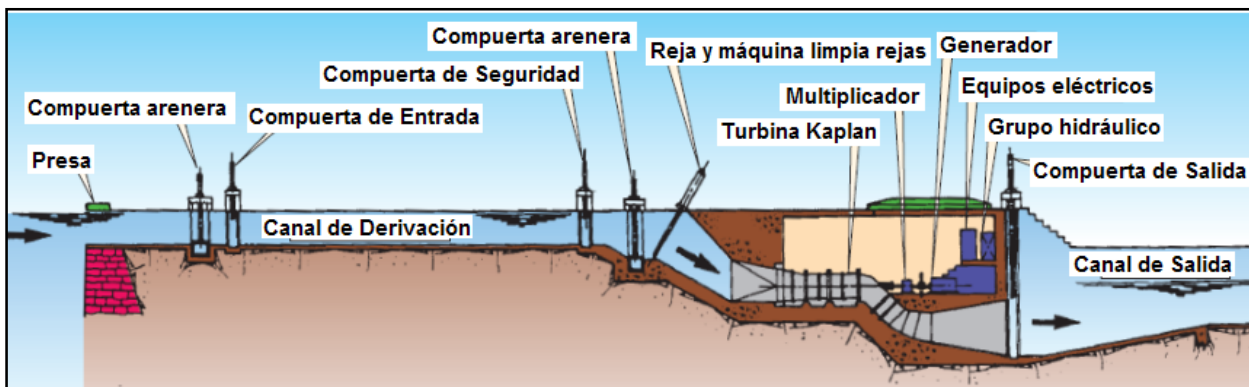


Figura 5.60 Elementos de una central hidroeléctrica

Obra Civil:	
Azudes y presas	Se construyen de forma transversal al curso del agua, para la retención y desviación hacia la toma del caudal que deriva en la central. En los azudes la retención ocurre sin que haya variaciones importantes en el nivel del agua. En las presas se construye un muro para elevar la superficie libre del curso del agua creando un embalse.
Obra de toma	Deriva el agua hacia las tuberías. Por lo general se les instala un órgano de cierre o reja que impide el paso de sólidos.
Canal de derivación	O tuberías de derivación, transportan el agua desde la toma hasta la cámara de carga. A lo largo del canal se instalan compuertas para limpieza y vaciado, y al final contienen una rejilla, que impide el paso de partículas sólidas.
Cámara de carga	Se sitúa al final del canal de derivación y al inicio de la tubería forzada. Su función es evitar la entrada de aire en la tubería forzada, lo que ocasionaría sobrepresiones.
Tubería forzada	Generalmente fabricada en acero, comienza por un órgano que impide el paso del agua para que el vaciado sea lento. Su función es conducir el agua desde la cámara de carga hasta la turbina.
Edificio	Albergue de los equipos electromecánicos de la central.
Canal de salida	Conducto por el cual el agua es restituida a su cauce natural.



Equipamiento Electromecánico	
Órgano de cierre de la turbina	Válvulas o compuertas que aíslan y permiten el vaciado de las turbinas en caso de paro de la central.
Turbinas	Transforma la energía del fluido en energía mecánica.
Generadores	Transforman la energía mecánica de las turbinas en energía eléctrica. Pueden ser del tipo síncrono o asíncrono. Síncrono: se emplean en centrales con potencia mayor a 2 000 kV conectados a la red o en centrales de pequeña potencia que funcionan en isla. Asíncronos: deben estar conectados a la red eléctrica, de la cual toman la energía para producir su magnetización. Se emplean en centrales menores de 500 kV. En el caso de las centrales entre 500 y 2 000 kV la elección del generador depende de la valoración económica y de los condicionantes técnicos exigidos por la compañía eléctrica.
Elementos de regulación	Adecuan los componentes móviles de las turbinas, en relación a las circunstancias existentes (caudal, demanda eléctrica, etc.) con el fin de lograr el mejor rendimiento energético. Pueden ser hidráulicos o electrónicos.
Transformadores	Dispositivo que regula la tensión para mantener la frecuencia de energía eléctrica.
Celdas y cuadros eléctricos	Se instalan en el interior de la central y se constituyen por componentes eléctricos de regulación y control.
Línea eléctrica de interconexión	Transporta la energía eléctrica desde la central hasta el punto de conexión con la red eléctrica o centro de autoconsumo.

Equipos Auxiliares	
Compuertas	Sistema contra-incendios
Rejas	Alumbrado
Grúas para movimiento de máquinas	Medidor de gasto volumétrico

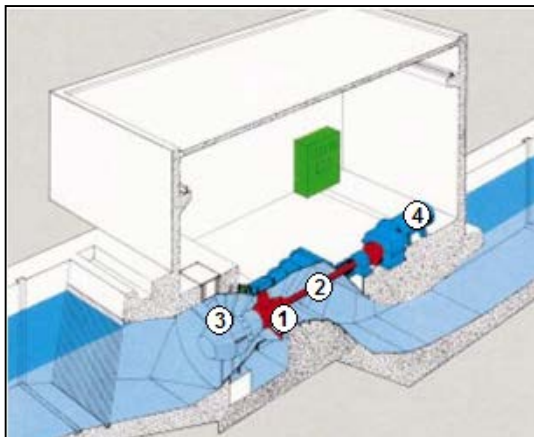
Existen 3 principales tipos de turbinas, todas reguladas por una compuerta para lograr un flujo constante, con una eficiencia que puede superar el 90 %, por lo que el proyectista debe exigir al fabricante, un rendimiento garantizado en pruebas de laboratorio. Existen de dos mecanismos, las de acción o impulso y las de reacción. Las primeras utilizan sólo la velocidad del flujo de agua para girar, en ellas la presión del agua se convierte en energía cinética. En las segundas, la presión del agua actúa como una fuerza sobre la superficie de los álabes y decrece a medida que avanza hacia la salida; estas turbinas emplean tanto la presión como la velocidad del agua para girar. Una clasificación más amplia se observa en la Tabla 5.60



Tabla 5.60 Clasificación de las Turbinas Hidroeléctricas



Kaplan: Es una turbina de reacción o acción radioaxial. Está diseñada para sostener gastos grandes y saltos pequeños, de los órdenes de 500 m³/s y 80 m, respectivamente. Son las más estables ya que cuentan con álabes móviles, que se acomodan automáticamente al variar las condiciones de operación; lo que hace que la eficiencia se mantenga constante. Son capaces de turbinar hasta el 25 % de su caudal nominal, con un rendimiento del 92 % y admiten variaciones notables en el caudal. Incluyen el generador en la misma turbina. El agua es regulada por un distribuidor y el rotor tiene forma de hélice, con álabes orientables mediante un servomotor (107) (109).

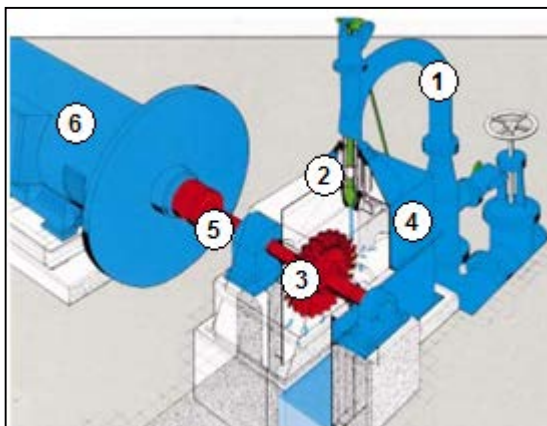


Turbina Kaplan de eje horizontal, tipo S	
1.	Distribuidor y palas
2.	Eje de Turbina
3.	Rodete
4.	Generador



Hélice: Primera versión de las turbinas Kaplan; es de acción radioaxial, álabes fijos y centrípeta. Su diseño contempla gastos grandes de hasta 500 m³/s y saltos bajos de aproximadamente 30 m. Su presión es variable y presenta rendimientos típicos del 93 %.

Pelton o de flujo cruzado: Son las turbinas de acción mayormente utilizadas. Su uso es preferible para el aprovechamiento del recurso con saltos grandes (entre 150 y más de 2 200 m) y gastos bajos, menores a los 30 m³/s. Está sometida a presión atmosférica, por lo que no puede sumergirse. Si el gasto es variable la eficiencia de la turbina no se altera; pero sí se afecta con los cambios de energía. Son capaces de turbinar hasta el 10 % de su capacidad nominal con rendimientos de hasta el 90 %; su montaje puede hacerse con el eje horizontal o vertical, con uno o varios inyectores y con uno o dos rodetes. El funcionamiento básico de esta turbina es que el agua incide de forma tangencial al rotor (pieza circular de acero en cuya periferia se tienen un conjunto de cuencas denominadas álabes), por medio de chiflones, de la tubería de distribución y del inyector, el cual está equipado con una válvula de aguja que regula el caudal, y un deflector que impide el golpe del ariete de la turbina durante las fases de paro programado o de emergencia. Si es de tipo horizontal tendrá uno o dos chiflones, pero si es vertical, podrá tener hasta ocho (13) (109).

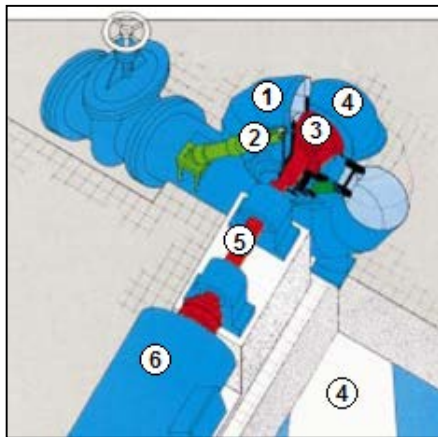


Turbina Pelton	
1.	Tubería de distribución
2.	Inyector
3.	Rodete
4.	Carcasa
5.	Eje de turbina
6.	Generador

Francis: Turbinas de reacción en las que el agua incide de forma radial en el rotor, ocasionando una descarga en paralelo (axial) al eje de rotación, generalmente centrípetas. Si son de álabes móviles permiten variar el gasto y tomar cambios en la demanda. Si son de álabes fijos, están diseñadas para saltos y gastos medios,



del orden de entre 25 y 380 m y de entre 30 y 200 m³/s. Su eficiencia se ve afectada tanto por la variación del gasto como de la carga. Son capaces de turbinar a partir del 40 % de su caudal nominal, con rendimientos del 92 %; su montaje común es vertical y con un rotor. El funcionamiento básico de esta turbina consiste en que el agua es regulada por el distribuidor, este en conjunto con la cámara espiral dan velocidad y orientación al agua para incidir en el rodete. Los álabes del rodete pueden ser orientables o fijos (107) (109).



Turbina Francis con cámara espiral	
1.	Cámara espiral
2.	Álabe móvil
3.	Rodete
4.	Codo y tubo de descarga
5.	Eje de turbina
6.	Generador

Para llevar a cabo una adecuada elección previa de la turbina, se utilizan herramientas denominadas ábacos, donde el salto [m] está en el eje de las abscisas, y el caudal [m³/s] en el eje de las ordenadas, como el que se observa en el Gráfico 5.10. Así mismo debe calcularse la energía específica de una turbina, mediante la Ecuación 5.80 (109).

$$E = gH = \frac{1}{\rho} (p_1 - p_2) + \frac{1}{2} (c_1^2 - c_2^2) + (z_1 - z_2)$$

Ecuación 5.80 Energía
hidráulica específica de una
turbina

Donde:

E = energía hidráulica específica de una turbina

g = gravedad [9.81 m/s²]

H = salto neto

ρ = densidad del agua [1000 kg/m³]

$p_{1,2}$, $c_{1,2}$, $z_{1,2}$ = presión, velocidad y altura en las secciones 1 o 2.

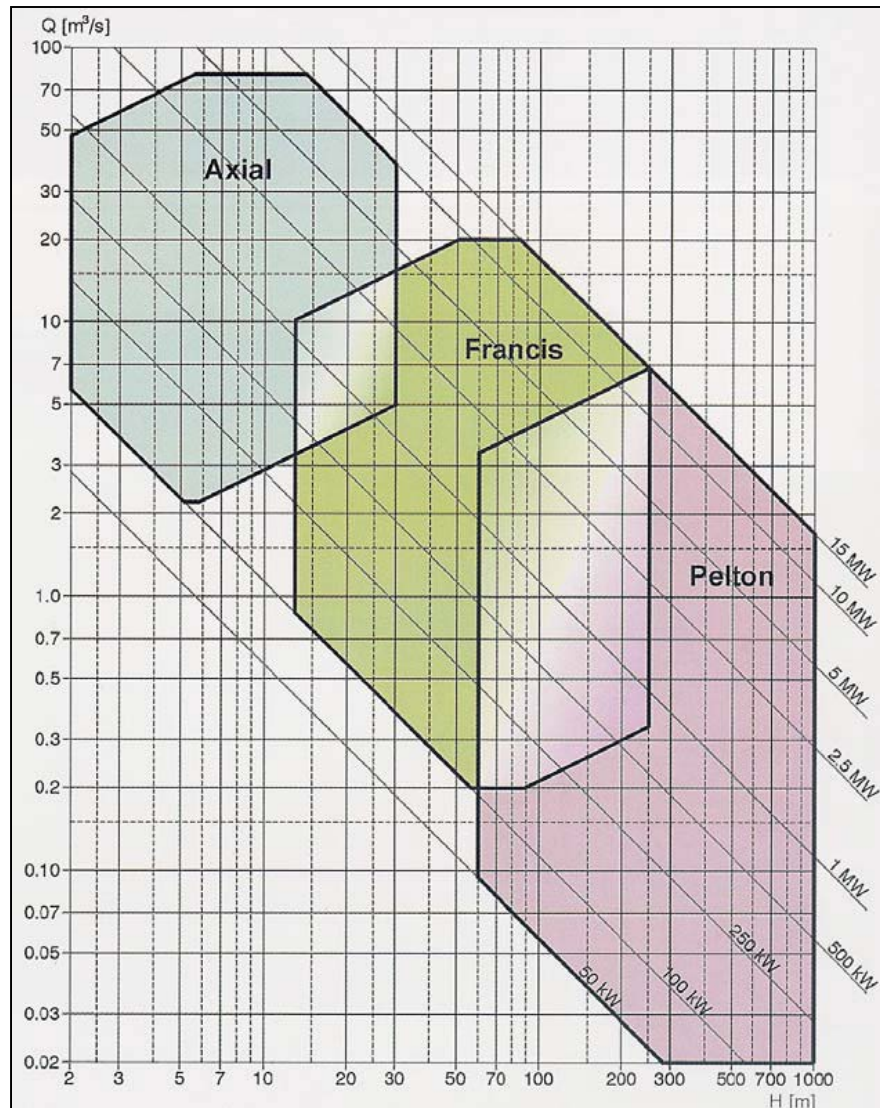


Gráfico 5.10 Abaco para la elección de turbina hidráulica.

Para que la elección definitiva garantice la máxima rentabilidad de la central se debe utilizar la curva de caudales clasificados (CCC), la cual muestra para un tramo de río, el porcentaje de tiempo en el que se alcanza o se supera un cierto valor del caudal. Se genera al ordenar una serie temporal de caudales por orden de magnitud (si el orden es cronológico, se obtiene un hidrograma).

Además de las turbinas, existen otras tecnologías como las ruedas hidráulicas y las bombas de ariete, utilizadas para aplicaciones de pequeña escala como el bombeo de agua (16).



III. Ventajas de la aplicación de la tecnología

● Centrales hidroeléctricas:

- Reducen las emisiones de gases de efecto invernadero al sustituir la energía producida en centrales que consumen combustibles fósiles.
- Reducen la deforestación al eliminar el uso de leña.
- Si están equipadas con “pasos de peces” bien diseñados, no representan un obstáculo al paso de los peces migratorios.
- El agua utilizada no se consume durante la generación de energía, salvo la que se evapora de los embalses y no hay contaminación de agua ni suelo.
- El impacto ambiental ocasionado por hidroeléctricas al hilo del agua es mínimo al no alterar el régimen de escurrimiento y no usar un gran espacio en el cauce.
- Implementar una PCH con agua potable, no produce impactos ambientales adicionales, ya que las obras de captación, el embalse y la tubería forzada se tienen que construir para suministrar agua potable a la población ribereña.
- Si las turbinas trabajan con cojinetes sin aceites, el agua sólo tiene contacto con acero al carbono en la tubería y acero inoxidable en los equipos, mismos materiales utilizados para construir la infraestructura en el suministro de agua potable a la población ribereña.
- Movilizan los recursos financieros de la población ribereña, además de crear puestos de trabajo para la operación y mantenimiento.
- La vida útil de las centrales hidroeléctricas supera los 50 años, facilitando la recuperación de la inversión, tienen costos de operación y mantenimiento bajos y se pueden actualizar con la incorporación de tecnologías recientes.
- El uso de la hidroelectricidad aumenta la estabilidad y la confiabilidad del sistema eléctrico, al responder inmediatamente ante las fluctuaciones en la demanda de electricidad, al poder de ser inyectada en el sistema eléctrico más rápidamente que cualquier otra fuente energética.
- A nivel mundial se tiene un informe de recomendaciones para maximizar los beneficios y minimizar los impactos ambientales y sociales que genera una central, emitido por la Comisión Mundial de las Represas.



● **Energía hidráulica:**

- Con la construcción de presas se mejora el manejo del agua en la cuenca, se provee un medio para la vida acuática, se mitigan las sequías e inundaciones y se disminuye el grado de erosión a lo largo del cauce.
- El agua es un recurso descentralizado, por encontrarse disponible en sitios dispersos, permitiendo la prestación del servicio de electricidad a las zonas alejadas de la red de distribución; reduciendo los costos e ineficiencias relacionadas a la conducción y distribución de la energía en grandes distancias.
- Las grandes instituciones mundiales -Banco Mundial, Banco Central Europeo, Banco Interamericano de Desarrollo, etc. -tienen programas de ayuda para el uso de esta energía en los países en desarrollo. (1) (6) (14) (16) (107)

IV. Limitantes o desventajas de su aplicación

● **Centrales hidroeléctricas:**

- Pueden provocar el desplazamiento de la fauna existente, obstrucción a la migración de peces o alteración de su ruta (afectando el ciclo de vida de algunas especies), y el daño o muerte de éstos en las turbinas.
- En ocasiones durante su construcción y mantenimiento provocan cambios de régimen de escurrimiento, transporte de sedimentos, contaminación del agua embalsada y emisión de dióxido de carbono y metano por la descomposición de la vegetación inundada.
- El agua utilizada en las represas compite con el agua de consumo humano.
- Las especies de agua dulce se encuentran en amenaza creciente, ya que se ha perdido un porcentaje significativo de los humedales a nivel global.
- Con el fin de mantener en operación las centrales, se ha caído en la sobre explotación de los acuíferos y la calidad del agua está declinando.
- Las presas afectan a las poblaciones (las cuales deben ser reubicadas, generalmente sin el sustento de tierras fértiles), a los ecosistemas, a los ciclos del agua y del carbono y al suelo fértil.
- Las alteraciones en ecosistemas acuáticos en zonas tropicales pueden tener efectos ambientales indirectos, como el aumento de sustancias patógenas y sus



receptores intermedios pudiendo producirse un aumento de enfermedades tales como la malaria y la fiebre amarilla.

- Las centrales requieren de una gran inversión inicial. (5) (6) (14) (48) (108)

V. Rendimiento y/o eficiencia

● Rendimiento del recurso hidráulico

En términos del potencial energético nacional para grandes centrales hidroeléctricas, CFE tiene localizados 28 sitios para su instalación, y dichas centrales cuales se encuentran en etapas de pre-factibilidad, factibilidad y diseño, con una capacidad conjunta de 7 624 MW; de los cuáles el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2009-2018 espera desarrollar 2 124 MW en el escenario base y 2 244 MW en el de mayor crecimiento.

Sin embargo, el potencial de las pequeñas centrales es desconocido, lo que ha inhibido su desarrollo. Estudios realizados por la CONAE identificaron 62 sitios viables en las cuencas de Puebla y Veracruz, con una potencia conjunta de 250 MW; y se estimó el potencial nacional en 3 200 MW (6) (14).

Se estima que para lograr una capacidad de 3 000 kW, que es la cantidad suficiente para satisfacer 1 000 departamentos, se requiere tener una caída de agua de 100 metros, con un gasto de 3 m³/s. Esto se logra ampliamente en cualquier zona montañosa del planeta con un régimen regular de lluvias (13).

● Potencia de una central

La potencia teórica de una central se calcula por la Ecuación 5.81

$$P_T = g \cdot Q \cdot H_n$$

Ecuación 5.81 Potencia
teórica de una central hidráulica

Donde:

P_T= potencia instalada [kW]

Q= caudal [m³/s]

H_n= salto neto [m]

La producción de la central se estima multiplicando la potencia teórica por un factor de eficiencia como se observa en la Ecuación 5.82



$$P = P_T \cdot e$$

Ecuación 5.82 Producción de una central hidráulica

Donde:

e = factor de eficiencia de la central, y se define por $e= n_t(n_g)n_{tr}$

n_t = rendimiento de la turbina (potencia mecánica)

n_g = rendimiento del generador

n_{tr} = rendimiento del transformador (potencia eléctrica)

El rendimiento de los equipos es facilitado por los fabricantes de los mismos, sin embargo para una minicentral se tiene un factor de eficiencia típico de 0.8.

Para calcular la producción de energía en la central, se utiliza la Ecuación 5.83

$$Prod_a = P_T \cdot tiempo$$

Ecuación 5.83 Producción anual de energía

Donde:

$Prod_a$ = producción anual de energía [kWh/año]

P_T = potencia instalada [kW]

Tiempo= horas de funcionamiento efectivo al año [h/año]

VI. Costos

Para poner en marcha una central hidroeléctrica, se debe considerar que la inversión inicial incluya obra civil, equipos electromecánicos y auxiliares, conexión a la red, dirección de obra y los permisos e impuestos. Así mismo se deben considerar los costos de explotación, el personal de vigilancia y la limpieza de las instalaciones; el mantenimiento y reparación de equipos, incluyendo mano de obra y repuestos; así como los seguros de las instalaciones. Estos últimos son prácticamente despreciables los primeros años pero aumentan a lo largo de la vida útil de la central, y son del orden del 2 al 5 % de la inversión (109).

El precio de venta de energía en la central se determina por la Ecuación 5.84

$$F_T = (P_F \cdot T_p + E_C \cdot T_e \pm D_H \pm E_R)K_f - Al$$

Ecuación 5.84 Precio de venta de energía hidráulica

Donde

F_T = (Factura) Precio de venta de la energía.



P_F = Potencia a facturar [kW], es el cociente entre la energía entregada y el número de horas de puesta en marcha.

T_P = Término de potencia o tarifa fija, es el resultado de multiplicar el precio de facturación por los kW contratados.

E_C = Energía cedida [kW]

T_e = Término de energía o tarifa variable, es el valor (kW) del consumo en el periodo de facturación, medidos por el contador.

D_H = Complemento por discriminación horaria, costo distinto de la energía durante cada periodo horario, su objetivo es lograr el aplanamiento de la curva de costos.

E_R = Complemento por energía reactiva, son los recargos y descuentos porcentuales en función de la política energética.

D_H y E_R = No afectan de forma considerable el precio de la energía.

A_I = Abono por incumplimiento de potencia, deber ser un valor de cero, por no haber incumplimiento.

K_f = Coeficiente obtenido por $K_f = K_C(K_P)$, es decir el producto de los costos incluidos en tarifas y la aportación a la política energética. En las minicentrales tienen valores típicos de $K_C= 0.85$ y $K_P= 1.08$

Para conocer la rentabilidad de la inversión se utilizan los criterios de las siguientes ecuaciones (109):

$$PR = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ingresos netos}}$$

Ecuación 5.85 Periodo de Retorno, tiempo que se tarda en recuperar la inversión.

$$IE = \frac{\text{Inversión}}{\text{Energía de salida (kWh)}}$$

Ecuación 5.86 Índice de energía, es el costo del kilovatio hora generado.

$$IP = \frac{\text{Inversión}}{\text{Potencia instalada (kW)}}$$

Ecuación 5.87 Índice de potencia, que es el costo del kilovatio instalado.

La vida de una central puede estimarse mayor de 40 años, este límite superior depende de la concesión que el gobierno otorgue sobre el agua a los responsables



de la central. Es por esto, que los inversionistas buscan periodos de retorno no superiores a diez años. Los proyectos rentables pueden determinarse empíricamente con los criterios de la Tabla 5.61 (107) (109).

Tabla 5.61 Rentabilidad de una Central Hidroeléctrica

Se consideran:	De rentabilidad altamente confiable	De rentabilidad poco confiable
Obra nueva...	Si son saltos altos en ríos de fuerte pendiente	Si son saltos bajos en ríos de media o baja pendiente
Saltos nuevos...	En ríos regulados por embalse en cabecera	En ríos no regulados por embalse en cabecera
Saltos existentes que cuentan con obra civil...	En buen estado o que requiera sólo pequeñas reparaciones	Muy deteriorada y con canales muy largos
Si el propietario usa...	Casi toda la energía producida	Poca energía de la producida

De las pérdidas de carga ocurridas en el proceso, la que tiene mayor afectación económica es la de la tubería forzada, que va en función de la velocidad del flujo. Esto se resuelve aumentando el diámetro de la tubería, lo que incrementa el costo de la misma. Dándose así una relación inversamente proporcional entre la disminución de pérdidas y el aumento del costo.

Los beneficios económicos de aprovechar el recurso hidroeléctrico resultan de la diferencia entre la facturación (kWh producidos por el precio del kWh) y los gastos de explotación y mantenimiento, así como la amortización de la inversión (107).

En los proyectos de electrificación rural, un factor económico importante es el costo por fletes y traslado del personal a sitios de difícil acceso (13).

En las centrales mini hidroeléctricas se utilizan turbinas Pelton, y las potencias típicas rondan entre 300 W y 1 MW. En estos sistemas, la obra mecánica implica del 15 al 35 % del costo total de la obra, el resto es obra civil y mano de obra.

En general, las centrales hidroeléctricas tienen costos relativamente bajos y compiten favorablemente con las tecnologías de energías convencionales. En promedio se estima que la inversión tiene un valor de USD \$ 2,100/kW, y que el costo de la electricidad generada es de ¢USD 4/kWh



VII. *Generación de residuos*

En diversos estudios realizados en Europa se ha determinado que la generación de 1 GWh por una central hidroeléctrica equivale a 481 ton CO₂ menos que si se genera 1 GWh en centrales eléctricas de combustibles convencionales.

Los impactos ambientales producidos en la ejecución de proyectos de centrales hidroeléctricas dependen del tamaño, la situación geográfica, y el entorno físico, biológico y climático. Debe elaborarse una evaluación de impacto ambiental (EIA) si el proyecto se desarrollará en zonas destinadas a la conservación de espacios naturales, considerando la flora y fauna.

El agua turbinada se devuelve al río, ya que no se encuentra con mayor contaminación que antes de entrar en las turbinas. La única especificación que debe cuidarse es que entre la toma de agua y el canal de retorno, se mantenga un caudal constante que garantice la supervivencia de la biota. Este flujo es el caudal residual o canal ecológico (107).

El caudal ecológico debe asegurar la supervivencia de los peces y favorecer su diversidad, así como valorizar el paisaje y mejorar la limpieza de los cauces. El volumen del caudal se fija mediante las siguientes clasificaciones:

Métodos hidrológicos: consideran que los organismos ribereños están adaptados a las variaciones estacionales de un régimen hídrico. Estas variaciones afectan el comportamiento, ciclo biológico y producción de las poblaciones:

Método de Curva de Permanencia: consiste en la construcción de la Curva de Caudales Clasificados.

Método de caudal $7Q_{10}$: entrega el valor de un caudal mínimo estadístico $7Q_{10}$ que corresponde al valor que en promedio, cada diez años, será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días de sequía consecutivos. El método supone que a valores menores que éste puede generarse un stress ecológico (caudal ecológico). Existen aproximaciones similares utilizando la estadística hidrológica que describe las condiciones de sequía como el $7Q_2$ y el $10Q_5$.



Método de Tennant: su objetivo es encontrar una relación entre el caudal y la disponibilidad de hábitat para la biota acuática. Se divide el año en un periodo seco y otro lluvioso, para los cuales se proponen caudales expresados como porcentajes del caudal medio anual, relacionándolos con grados de conservación. A partir del mismo se determina el porcentaje del flujo medio anual sobre el cual el hábitat comienza a degradarse, se debe especificar la velocidad del flujo y la profundidad (por lo general 10 %, 0.25 m/s y 0.3 m).

Método de Aproximación por Rangos de Variabilidad (RVA): ideado para casos cuyo objetivo es la conservación de los ecosistemas. Se basa en datos de largos periodos de tiempo donde se describe la variabilidad hidrológica antes y después de instalada una represa. Consiste en tener una descripción del flujo natural a través de 32 parámetros definidos por Ritcher, para luego estimar un rango de variación máximo de estos parámetros. Con este método se recomienda “imitar” las características del flujo natural después del funcionamiento de la hidroeléctrica.

Métodos hidráulicos: se basan en estudios de una sección transversal para así relacionar la magnitud de la descarga con la profundidad de los cauces, velocidad y perímetro mojado; factores limitantes en la biota.

Método del Perímetro Mojado: se asume que la integridad del hábitat está directamente relacionada con el área húmeda. Consiste en la construcción de curvas que muestran la relación entre el caudal y el perímetro mojado. Puede observarse que hasta un cierto volumen de agua el perímetro crece rápidamente a medida que aumenta la descarga pero sobrepasado este volumen el perímetro se mantiene casi constante. Generalmente el flujo recomendado es aquel cerca de este punto de inflexión, considerado el nivel óptimo para el desove de peces y la producción de invertebrados bentónicos.

Métodos de simulación de hábitat: Las especies de peces están adaptadas a ciertas características hidráulicas, estructurales y geomorfológicas. Al conocer cómo afecta el caudal a estas características se puede predecir el caudal óptimo para mantener las poblaciones de los peces.



In stream Flow Incremental Methodology: integra modelos analíticos hidráulicos junto con el estudio de la calidad del agua, sedimentos, estabilidad de los cauces, temperatura y otras variables que afectan la producción de peces. Involucra un modelo computarizado (Physical Habitat Simulation System) que relaciona el caudal con datos obtenidos del hábitat físico. Consiste en la construcción de índices que muestran el grado de adaptación de especies a diferentes valores de velocidad, profundidad y características geomorfológicas específicas.

Métodos holísticos: asumen que si las características del flujo hídrico que pueden generar un impacto ecológico se incorporan a un régimen de flujo modificado, la biota y la integridad funcional del ecosistema se mantienen.

Método de Building Block ~ Aproximación Bottom-up: se realiza mediante grupos de trabajos multidisciplinarios, considerando trabajos de investigación ya realizados, modelos para entender la respuesta del caudal, características hidráulicas y juicios de expertos. Uno de los pasos críticos es la estimación de la importancia económica y social del área de estudio, evaluando la dependencia social y económica de los ecosistemas ribereños en conjunto con la comunidad.

Los flujos se determinan y describen en términos de duración y magnitud, la descripción de cada uno de los componentes del flujo son los building block, conformando los Requerimientos de Flujo para una cuenca o río. Se denomina de tipo Bottom - Up ya que el caudal recomendado se estima a partir de un flujo mínimo hacia valores más altos.

Benchmarking ~ Aproximación Top-down: Se basa en principios similares al método Building Block, difiriendo en que el caudal es determinado a partir de un flujo máximo aceptable hasta valores menores (Top-Down). Con información disponible, modelos conceptuales y juicio de expertos se identifican indicadores hidrológicos ecológicamente relevantes. Con estos indicadores los cauces escogidos son caracterizados dentro de un río como benchmark o de referencia. En los cauces de referencia no existe necesariamente un flujo natural pero cubren variados tipos y niveles de flujo. Posteriormente se relacionan los impactos ecológicos en función de



los cambios en el flujo hídrico, determinando así cuánto puede cambiar el flujo del agua antes de que el ecosistema sea degradado.

Evaluación de métodos para la estimación de un caudal ecológico

Según la base teórica, los distintos métodos (a excepción de los holísticos y RVA) procuran mantener un cierto caudal para conservar poblaciones de organismos y peces, sin pretender conservar un nivel eco sistémico.

Los métodos de Curva de Permanencia, $7Q_{10}$, de Tennant y perímetro mojado sólo toman en cuenta la magnitud mínima del caudal como factor limitante en los requerimientos bióticos. Al estimar un flujo mínimo no toman en cuenta los requerimientos de flujo para mantener la vegetación terrestre adyacente. Desde un punto de vista eco sistémico se dejan de considerar intercambios de materiales y nutrientes importantes que pueden afectar la funcionalidad del ecosistema.

Los métodos hidrológicos, excepto RVA, tienen una base estadística simple; se calculan los caudales según las probabilidades de ocurrencia de sequía o caudales bajos; estos caudales se relacionan con las tasas de producción o sobrevivencia de la población objetivo. Al basarse en resultados estadísticos simples se desconoce el carácter complejo de los ecosistemas y la incertidumbre que los caracteriza; además los flujos mínimos que ocurren infrecuentemente generan efectos de corto plazo diferentes a los efectos de largo plazo.

El método de RVA puede ser útil si se estudian las características de los ecosistemas y los efectos compuestos entre el cambio del flujo natural y los impactos generados por las diversas actividades humanas en el ecosistema. Una de las desventajas de este método es que no se ha estudiado si las variables del flujo seleccionadas pueden considerarse como independientes una de otras.

El método de perímetro mojado es simplista, pocas variables hidráulicas pueden representar adecuadamente el requerimiento de caudal para especies objetivos. La relación entre el caudal y el perímetro mojado depende de la forma de los cauces; por lo tanto, si se realiza una curva con una sola sección transversal no se



representan las características de todo un río. Con este método se presupone que la morfología del cauce se mantiene a lo largo del tiempo, limitando su aplicación en cursos de agua con variabilidad morfológica como es el caso de los cauces en regiones semiáridas; volviéndolo un método no representativo de todos los ríos.

Los métodos de simulación de hábitat contienen suposiciones no válidas o que no corresponden a la realidad. Además, con estos se han calculado caudales de una magnitud similar a los calculados por métodos más simples. Por último, la aplicabilidad de este método en cursos de agua de regiones semiáridas está restringida por el hecho de que existen caudales muy bajos y con una alta diversidad morfológica lo que dificulta caracterizar un trozo de curso de agua.

Los métodos holísticos a pesar de no basarse sólo en poblaciones objetivos, no incorporan estudios eco-sistémicos. Una de sus ventajas es la inclusión de la participación ciudadana y la realización de un estudio social y económico de la dependencia humana de los ecosistemas. En su aplicación debe tenerse cuidado en que las recomendaciones en los pasos a seguir se tornen muy rigurosas, ya que la base de este método es el juicio de expertos.

En la Tabla 5.62 se comparan los métodos en virtud de los aspectos ecológicos y de gestión. En éstos se detalla si contienen indicadores para su revisión, el grado de aplicabilidad en los diferentes tipos de ecosistemas y los costos estimados.

Se consideran de baja aplicabilidad los que no pueden ser utilizados en la mayoría de los ecosistemas acuáticos, como los hidráulicos que consideran ríos con cauces estables y secciones rectangulares. Los de aplicabilidad alta con precaución, se refiere a que pueden ser utilizados en una gran variedad de ecosistemas acuáticos sin adoptar los valores que se determinan con los métodos en diferentes ecosistemas; sólo serían generalizables los procedimientos.

Los costos presentados son relativos a los de los métodos con que se comparan. La complejidad se estima considerando el tiempo requerido para llevar a cabo la determinación, el grado de conocimiento y la necesidad de personal calificado.



Tabla 5.62 Métodos para calcular el caudal ecológico

Aspectos Ecológicos			Aspectos de Gestión			
Tipo	Objetivos de conservación	Componentes del flujo hídrico	Indicador	Aplicabilidad	Complejidad	Costos relativos
Flujo mínimo	Poblaciones de peces	Magnitud	No	Baja	Baja	Bajos
RVA	Ecosistemas	Magnitud, predictibilidad, duración, frecuencia y tasa de cambio	Si	Alta con precaución	Baja a media	Medios
Hidráulicos	Poblaciones de peces	Magnitud	No	Baja	Baja a media	Bajos a medios
De simulación de hábitat	Poblaciones de peces	Magnitud	No	Baja	Media a alta	Altos
Holísticos	Ecosistemas, valores económicos y culturales	Magnitud, duración y predictibilidad	Sí	Alta con precaución	Media a alta	Medios a altos

VIII. Operación y mantenimiento

Con el fin de causar el mínimo impacto al construir la central se debe tener en cuenta el estado del sitio de ubicación, y la forma en que se va a realizar la obra civil; accesos y zanjas para canalizar el agua; analizando los impactos que cada una de estas obras puedan causar en el ambiente. Se debe considerar también el uso final de la central, cuando ya no se necesite, el río debe seguir su cauce como antes de que estuviera levantada la central.

Además se deben respetar los caudales ecológicos y permitir el paso de los peces mediante pasos ascendentes y descendentes, así como corregir las riberas del tramo cortocircuitado para favorecer el desovado de los peces (107).

Los pasos de peces son estructuras hidráulicas que rompen la discontinuidad del flujo que llega a la toma de agua, haciendo posible que los peces circulen en forma ascendente y descendente. El volumen de agua consumido por las estructuras, contribuye al caudal residual. Los pasos más comunes son las “escalas”, se componen por estanques comunicados entre sí mediante tabiques con vertederos, orificios o escotaduras verticales. Los estanques crean zonas de descanso para los



peces y disipan la energía cinética del agua que desciende por el paso. En la Figura 5.61 se muestra un esquema básico de un paso (107).

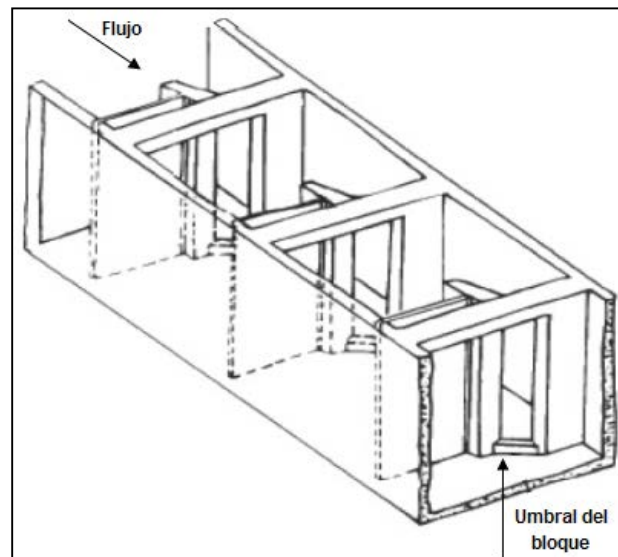


Figura 5.61 Escalera de escotaduras verticales

Para conocer las posibilidades de aprovechamiento, existen dos elementos decisivos: la pluviometría y la topografía del lugar. Cuando se requiere almacenar agua para las épocas de estiaje, se instala un vaso-cortina-túnel de conducción, en la obra de toma. Si el gasto del río de suministro es constante todo el año se puede instalar un canal de conducción. Los cálculos de los canales de conducción, obra de toma y desfogue pueden representar el que el sistema opere o no, por lo que deben precisarse los flujos, las presiones y las velocidades a lo largo del sistema. Cuando se requiere de una cortina para almacenaje en un vaso, se debe evaluar el nivel de agua mínimo de operación (NAMINO), el nivel de agua máximo de operación (NAMO) y el nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) (13).

La elección del sitio para instalar una central se lleva a cabo considerando la disponibilidad de terrenos, la accesibilidad del lugar (cuanto mayor es la accesibilidad, menor será el impacto provocado sobre el lugar) y la evaluación de los parámetros de referencia (caudal y salto).



● **Hidroelectricidad, generación de electricidad:**

La energía potencial del agua se transforma en energía mecánica en una turbina y posteriormente ésta es transformada en energía eléctrica en un generador. La energía potencial es directamente proporcional al salto.

Al realizar la instalación eléctrica, se debe tener un sistema de control y regulación; durante la operación de la central, la energía se entrega al sistema de distribución continuamente, pero si no hay demanda de energía durante un tiempo se deberá realizar una descarga. Esto se soluciona instalando una resistencia en forma de calor, que disipe los excedentes, los cuales pueden aprovecharse en procesos de calefacción o refrigeración (13).

IX. Beneficios

Las centrales hidroeléctricas contribuyen al desarrollo sostenible por ser económicamente factibles, hacen posible la generación descentralizada de electricidad y no generan emisiones de GEI. Si son bien proyectadas, el impacto visual es mínimo, el desarrollo de los peces y su captura (pesca alimenticia) no se ven afectados. Por cada empleo directo que se genera con una central hidráulica, se genera al menos uno indirecto. Las labores agrícolas se benefician con las centrales por que se crean cuerpos de almacenamiento de agua y se implementa el bombeo y las líneas de distribución. Así mismo se reducen las carencias de electricidad en zonas rurales donde la red eléctrica no está disponible (107).



5.6 Energía Oceánica

En general esta fuente y las tecnologías aplicables son incipientes, es decir, se encuentran en etapas conceptuales y modelos experimentales que tienden a la modularidad. La Agencia Internacional de la Energía estima un potencial de desarrollo de 748 GW para el año 2050, con la cual se evitarían 5 200 millones de toneladas de CO₂. Con una estimación de costos de 40 a 60 ¢USD/kWh (3) (110).



Esta tecnología presenta las ventajas siguientes:

- En zonas donde no hay plataforma continental, los captadores (boyas) se colocan cerca de la costa, reduciéndose costos de infraestructura y mantenimiento en comparación con las zonas de plataforma continental.
- Para las personas que viven en zonas costeras, constituye un excelente recurso para la obtención de energía eléctrica, agua potable, y otros productos rentables como hidrógeno y biocombustibles. Además de la generación de empleos directos e indirectos en la operación de las tecnologías marinas.
- Los costos por operación y mantenimiento son bajos, en relación a las centrales eléctricas alimentadas con otra fuente energética.

Y las siguientes desventajas:

- Los prototipos marinos son grandes estructuras navales que hay que fabricar al lado de la costa donde se van a instalar.
- Es una tecnología incipiente, cuya única aplicación ha sido como planta piloto. Por lo tanto se requiere investigación y desarrollo de la tecnología necesaria para recibir, transformar, transmitir y distribuir la energía.
- Varios de los equipos que requerirían instalarse en el lecho marino siguen en etapa de desarrollo, ya que los prototipos no soportan la presión y son altamente afectados por la corrosión.

En los océanos se puede encontrar energía en el oleaje; las mareas; las corrientes submarinas permanentes y en la diferencia térmica, asociada tanto a la profundidad como a la salinidad (3) (110).



Corrientes oceánicas

Las corrientes marinas forman parte del sistema de convección termohalina (movimiento del agua alrededor de la Tierra) y siempre fluyen en la misma dirección. Su estructura es tridimensional, con movimientos horizontales debidos al viento y con movimientos verticales debidos a la diferencia de temperatura y salinidad. Las corrientes marinas superficiales son generadas por los vientos latitudinales, girando a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur, pese a que su movimiento es de menor velocidad que el de las mareas, tiene mayor continuidad (110).

Las tecnologías que aprovechan este recurso han sido desarrolladas para capturar la energía cinética transportada en este movimiento y su diseño se basa en el de las turbinas hidráulicas y las eólicas.

Gradientes de temperatura

● Gradiente salino

Los diferentes grados de salinidad entre el agua de los ríos y el agua de mar, crea una presión química que mediante dos tipos de tecnologías se puede utilizar para generar electricidad (110).

- **Retardo de la presión Osmótica:** consiste en bombear agua marina a un depósito, donde la presión es inferior a la presión osmótica entre el agua dulce y la salada. El agua dulce fluye a través de una membrana semipermeable incrementando el volumen de agua en el depósito que puede generar electricidad mediante una turbina hidráulica.
- **Electrodiálisis Inversa:** es el proceso inverso a la desalación del agua, mediante membranas selectivas a los iones se crea electricidad en forma de corriente continua.

El mayor potencial se encuentra en las desembocaduras de los grandes ríos, donde enormes caudales de agua dulce fluyen hacia el mar. En estas zonas, el potencial estimado es de 1 650 TWh/año (110).



La tecnología se encuentra en fase incipiente, lo que hace que su costo sea muy elevado. Se tiene un pronóstico global de que en el año 2025 la tecnología offshore tenga una inversión de 23 ¢USD/kWh (110).

● **Gradiente térmico**

Esta tecnología permite extraer energía de las profundidades del mar y convertirla en electricidad, si la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo marino es elevada. En el aprovechamiento de esta energía se recurre a procesos de intercambio de calor entre el agua fría del fondo y el agua cálida de la superficie.

Su principio de operación consiste en la conversión de la energía térmica del agua de mar. En la superficie el agua tiene una temperatura mayor que en zonas profundas, ya que absorbe un porcentaje del calor de los rayos del sol y el resto es reflejado. Dando una relación inversamente proporcional, a mayor profundidad menor es la temperatura (13).

En latitudes tropicales y a profundidades de mil metros, el gradiente térmico puede llegar hasta los 20 °C, lo que podría utilizarse para generar electricidad al evaporar y condensar, en forma alterna, un fluido de trabajo. Dicho vapor movería turbinas acopladas a generadores de electricidad, alcanzando una generación aproximada de 44 000 TWh/año (13) (110).

Además de la generación eléctrica, esta tecnología permite desalinizar el agua marina y proporcionar calefacción y refrigeración; también se ha utilizado en la maricultura (producción de algas y granjas marinas) (110).

La tecnología consiste en una máquina térmica que cualitativamente, operaría de forma idéntica a una central térmica convencional. Donde la capa superior oceánica actúa como fuente de calor, mientras que el agua extraída de las profundidades actúa como refrigerante, esto se observa en la Figura 5.62 y en la Figura 5.63 se muestra el funcionamiento de una central eléctrica, conformada por las secciones de la Tabla 5.63

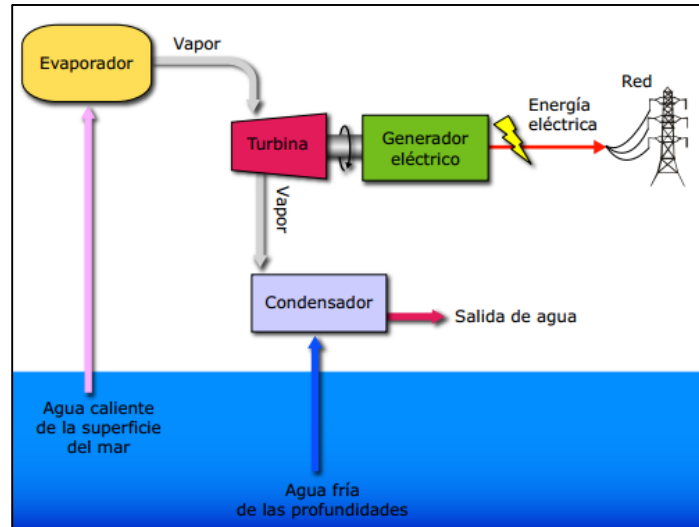


Figura 5.62 Esquema conceptual de una central de gradiente térmico.

Tabla 5.63 Secciones de una central de gradiente térmico.

No.	Centra de biomasa.	No.	Centra de biomasa.
1	Lecho marino (1000 m)	9	Sección giratoria
2	Ancla	10	Placa triple
3	Ingesta de agua fría	11	Soporte de la boya
4	Extensión del ancla	12	Ingesta de agua caliente
5	Sección giratoria	13	Barcaza
6	Tubería de agua fría (HDPE)	14	Fuga de agua mezclada
7	Manguera de transferencia	15	Superficie del mar
8	Boya		

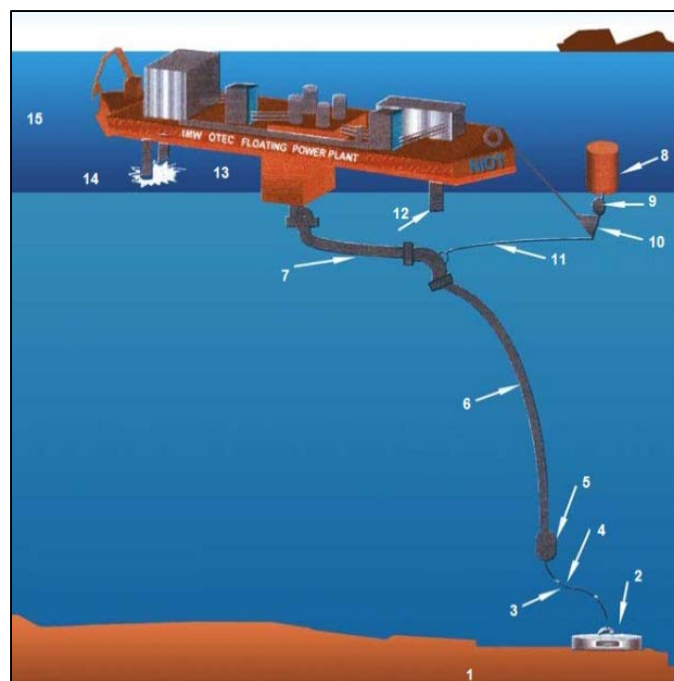


Figura 5.63 Central con funcionamiento de gradiente térmico.



Mareomotriz

También conocida como energía de las mareas. Cuando sube la marea, el agua puede ser retenida en esclusas, diques en estuarios, lagunas costeras o presas, y cuando baja puede ser liberada de la misma manera en que ocurre en las hidroeléctricas. Sin embargo, esto sólo se logra con mareas de al menos 4 metros de altura entre la pleamar y la bajamar, lo que ocurre en pocos lugares del mundo.

La energía cinética de las mareas se aprovecha mejor cerca de las costas, particularmente donde el movimiento del agua se acelera debido a la existencia de accidentes topográficos, como estrechos e islas. Donde se calcula que las mareas y las corrientes marinas pueden generar 7 800 TWh/año (13) (110).

Las diferencias entre las tecnologías consisten en el método de contención de la turbina, el número de palas y en la forma en que el movimiento es controlado, en general mediante dispositivos modulares. Se tienen dos tipos de tecnologías, de aprovechamiento de la corriente (turbinas de eje horizontal y vertical y el hidropilano oscilante) y de aprovechamiento de la diferencia entre la pleamar y la bajamar.

Turbinas de eje horizontal y vertical: Tienen de dos a tres palas montadas horizontal o verticalmente para formar un rotor. El movimiento del agua hace girar las palas y el rotor, éste último a su vez, mueve el generador eléctrico. Un prototipo se observa en la Figura 5.64.



Figura 5.64 Turbina de eje horizontal.

Hidropilano oscilante: su funcionamiento es similar al ala de un avión; contiene sistemas de control que alteran su ángulo respecto a la corriente de agua, formándose fuerzas de sustentación y resistencia que hacen oscilar el dispositivo, generando energía.



Aprovechamiento de la diferencia entre pleamar y bajamar: la tecnología tiene un alto grado de madurez por ser similar a las centrales hidráulicas. Como la central de la Rance, en Francia, cuya potencia es de 240 MW, criticada por su alto impacto ambiental, y la central de Shihwa, en Corea del Sur, de 240 MW con la capacidad de proveer electricidad a 500 mil personas, con un mínimo impacto ambiental.



Figura 5.65 Central eléctrica en Corea del Sur

Undimotriz

También conocida como Olamotriz o energía de las olas; es generada debido al movimiento continuo de las olas y puede ser aprovechada para mover turbinas, por medio de dispositivos flotantes (13).

La ola entra a la cámara del sistema y el agua sube de nivel, expulsando el aire que está en el interior. Esto mueve las turbinas que están unidas a los generadores. Cuando la ola baja, el aire entra nuevamente a la cámara a través de la turbina, provocando que ésta vuelva a moverse. El proceso se repite incesantemente con el movimiento natural de las olas. Una variación de estos sistemas es mediante un pistón, éste sube y baja dentro de un cilindro con cada movimiento de las olas. El movimiento del pistón hace que el generador gire (13).

A nivel mundial, para explotar rentablemente la energía de las olas, los proyectos deben situarse preferentemente a una distancia de 40° de la línea del Ecuador, ya que a esas latitudes se tiene el mayor potencial, donde se estima un potencial de generación mínimo de 29 500 TWh/año, y actualmente se ha utilizado como auxiliar en la iluminación de casas y faros (110).

Las tecnologías de aprovechamiento de la energía de las olas son las siguientes:



Atenuador: consiste en largas estructuras flotantes alineadas en paralelo a las olas con el propósito de absorberlas. Su movimiento se regula de forma selectiva para producir la energía (110).



Figura 5.66 Estructura flotante o atenuador

Desbordamiento: consisten en un sistema que enfocan las olas y las hace pasar por encima, transportando el agua a través de rampas hasta un depósito elevado.

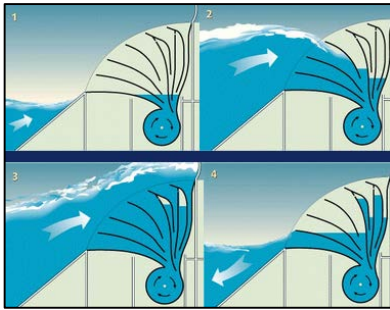


Figura 5.67 Estructura desbordamiento

Punto absorbedor: es una estructura flotante capaz de absorber la energía de las olas en todas sus direcciones debido a su pequeño tamaño en comparación con la longitud de la ola. En la Figura 5.68 las flechas indican el flujo del agua, los puntos rojos una válvula cerrada y los amarillos una válvula abierta (110).



Figura 5.68 Punto absorbedor con turbina Pelton.

Convertidor de ola oscilante: o sistema OWSC, extrae la energía del movimiento de las olas. Los dispositivos se montan en los fondos marinos de las zonas costeras.



Cuando la ola entra al equipo OWSC, empuja el aire, dicho aire provoca el movimiento de una turbina. Al salir la ola, el OWSC succiona aire del exterior, ocasionando que la turbina se mueva en dirección contraria (110).

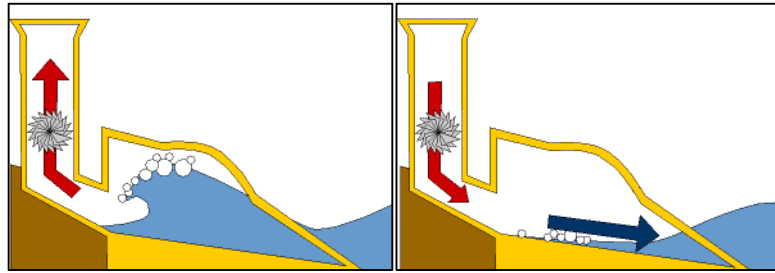


Figura 5.69 Funcionamiento del equipo OWSC.

Actualmente existen aprovechamientos piloto de energía mareomotriz en Francia, China y Canadá; y plantas experimentales de gradiente térmico en Japón y Hawai.

En lo que respecta a México, en 2012 se licitó una central mareomotriz en el Golfo de California, cuyos estudios calculan una potencia de 3 MW, sin embargo, debido a que la inversión es muy alta, es necesario realizar una investigación más extensa donde se evalúe la factibilidad económica, y el impacto social que se tendría, así como la realización de una MIA (manifestación de impacto ambiental).

Desde el Golfo de California, hasta el golfo de México, a la altura del estado de Tamaulipas, se desprenden grandes remolinos de viento, los cuales al entrar en contacto con el agua del Golfo generan anticiclones de más de 300 km de diámetro, a una profundidad de 1000 metros y velocidades tangenciales de 1 m/s^2 . Se requiere una investigación exhaustiva del área para determinar la viabilidad y factibilidad económica, ambiental y social de aprovechar dichos remolinos. La Universidad Nacional Autónoma de México ha calculado que en el Mar de Cortés es posible obtener una alta generación de electricidad proveniente de las mareas debido a las corrientes marinas en el Canal del Infiernillo⁴² y los respiraderos hidrotermales⁴³ (111).

⁴² Canal formado entre la Isla del Tiburón y la costa de Sonora. Llamado así debido a que durante la pleamar y la bajamar, se forman grandes corrientes que dificultan la navegación.

⁴³ Géiseres, fallas o grietas de las cuales fluye agua geotermalmente caliente, se dan en zonas volcánicamente activas con grandes cantidades de agua en su superficie.



6. Experiencia de la aplicación de ER (eléctrica o térmica).

6.1 Aplicación Nacional.

México ha adquirido una vasta experiencia en las industrias automotriz, aeroespacial y eléctrico-electrónica, lo cual representa una garantía de éxito para la fabricación de equipos y componentes de energías renovables. Actualmente el país cuenta con una infraestructura de clase mundial gracias al desarrollo de la proveeduría, la transferencia de metodologías de calidad, estándares de manufactura, certificaciones y el talento humano. Lo que ha logrado que se cuente con 1924.8 MW de capacidad instalada de generación eléctrica con base en energías renovables (5).

En lo que se refiere a **energía solar**, a pesar del gran potencial que se tiene, no es el tipo de energía mayormente instalado. Alrededor del 75 % del territorio nacional recibe, en promedio, 5 kWh/m² al día. Los estados cercanos a la costa del Océano Pacífico son los que reciben mayor radiación, alcanzando valores de hasta 7 kWh/m² día. En el año 2009 se instalaron 839.686 m² de colectores de energía solar para calentar agua de uso sanitario y se logró un potencial de 17.633 kW en módulos para electrificación rural, comunicaciones y bombeo de agua. Se espera que en 2014 se cuente con 25 MW fotoeléctricos disponibles para generar 14 GWh/año.

- La instalación de uso de energía renovable más importante del país es parte de la planta híbrida, eléctrica, eólica, solar y de gasóleo (diésel) en San Juanico, Baja California Sur. Se compone de 17 kW fotovoltaicos, 10 kW eólicos y un motor generador de diésel de 80 kW.
- En Agua-Prieta Sonora, una zona desértica con un alto índice de radiación, se construyó una planta de ciclo combinado de 549 MW y de los cuales 14 MW provienen de energía solar térmica (2).
- En 1987 la empresa Kyocera se estableció en la ciudad de Tijuana, donde se dedica a la producción de semiconductores de cerámica. A partir de 2004, la compañía comenzó a ensamblar paneles solares y actualmente cuenta con una capacidad de producción de 35 MW por año. Durante 2008 Kyocera inició una inversión de 33 millones de dólares para la construcción de una segunda planta



en Tijuana, con la cual planea incrementar su producción de paneles solares y aumentar su capacidad de producción de 35 a 150 MW anuales (5).

- En el año 2012 en Baja California Sur, entró en operación una central solar fotovoltaica de 1 MW, con una superficie instalada de 10 000 m², y una expectativa de vida útil de 20 años.
- El Museo Tecnológico de la CFE desde 2010, tiene instalados 30 kW en un sistema solar fotovoltaico (112).

El Instituto de Investigaciones Eléctricas tiene instalado en el noroeste del país pequeños sistemas fotovoltaicos con una capacidad de alrededor de 1.5 – 2.0 MW, con los que planean estudiar los efectos sobre la demanda que éste sistema tendría en la red eléctrica. Varios programas como el de *Laboratorios Sandía* de EUA han beneficiado con esta tecnología a los estados de Durango y Chihuahua, y comunidades rurales, que de otra manera carecerían de energía eléctrica. (6)

En el centro del país se ha llevado a cabo una investigación sobre la tecnología de canal parabólico desde principios de los años ochenta, con la planta solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en CU.

Pese a estos proyectos, en México la cantidad instalada es pequeña, con alrededor de tan sólo 8 m² por cada mil habitantes (14).

Respecto a la **energía eólica**, los estudios realizados por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) y diversas instituciones de México, estiman que el potencial eólico nacional es mayor a 40 GW. La región del Istmo de Tehuantepec es una de las mejores regiones a escala mundial para la generación de electricidad a partir del viento. La instalación de parques eólicos en Oaxaca, es muy limitada, por lo que la CRE realizó los procedimientos para que la CFE pueda construir una línea de alta tensión adecuada para absorber la generación eléctrica de los parques eólicos de la zona, con una potencia de 1 a 1.5 GW. En la modalidad de inversión extranjera, esta infraestructura ha promovido la instalación de 1.5 GW eólicos.

A pesar de los importantes recursos nacionales existentes en materia eólica, este tipo de energía continúa desempeñando un papel pequeño en el sector eléctrico del país. En el año 2007 se inauguró el primer parque eólico a gran escala (La Venta II



con 83 MW). Consolidándose al día de hoy como el parque eólico con mayor potencia y la mayor producción en el conjunto de Iberoamérica.

- En la actualidad, los parques eólicos La Venta III, IV, V, VI y VII (cada uno de 100 MW), cuentan con 585 MW de potencia eólica. Para el 2014 la SENER tiene previsto instalar más de 500 MW de potencia eólica en Oaxaca, en la modalidad inversión extranjera, que permitan la producción de 590 MW (2).
- En enero de 2009 CEMEX inauguró en Juchitán de Zaragoza, Oaxaca, un parque eólico de autoabastecimiento de energía. Dicho parque tiene una capacidad de generación eléctrica de 250 MW y abastece el 25 % de las necesidades de energía de CEMEX en México. Actualmente cuenta con 25 aerogeneradores que producen 167 MW.
- En Ciudad Juárez, Chihuahua desde marzo de 2002, Vientek cuenta con dos plantas de manufactura de aspas para turbinas eólicas y su capacidad de producción asciende a 1 200 MW. Desde su llegada a México, la compañía ha producido más de 5 000 aspas para motores eólicos (5).
- Además de en Oaxaca, la CFE ha instalado turbinas para conformar parques eólicos como el de Guerrero Negro, Baja California Sur, de 0.6 MW (6).
- En Tamaulipas se tiene planeada la instalación de 4 aerogeneradores que conformarán un parque eólico demostrativo, para lo cual se estima una inversión de 4 millones de pesos.

Al final del año 2012, los proyectos en operación a nivel nacional cubrieron un total de 1375.45 MW, repartidos como se observa en la Tabla 5.60 Para lograrlo, la CRE ha expedido permisos a varias empresas privadas, mientras que la CFE ha celebrado acuerdos para el financiamiento y la construcción de una línea de transmisión de electricidad con capacidad de 2 000 MW, que permita conectar los proyectos del Istmo con el sistema eléctrico nacional (57).



Tabla 6.1 Proyectos Eólicos en México.

Proyecto	Esquema	Desarrollador	Turbinas	Año de Operación Comercial	MW en 2012
Proyectos eólicos en operación en Oaxaca					
La Venta	Obra Pública Financiada	CFE	Vestas	1994	1.6
La Venta II	Obra Pública Financiada	CFE	Gamesa	2006	83.3
Parques Ecológicos de México	Autoabastecimiento	Iberdrola	Gamesa	2009	79.9
Eurus I	Autoabastecimiento	Cemex / Acciona	Acciona	2009	37.5
Eurus II	Autoabastecimiento	Cemex / Acciona	Acciona	2010	212.5
Bii Nee Stipa I	Autoabastecimiento	Iberdrola	Gamesa	2012	26.35
La Mata – La Ventosa	Autoabastecimiento	Eléctrica del Valle de México	Clipper	2010	67.5
Fuerza Eólica del Istmo	Autoabastecimiento	Peñoles	Clipper	2011	50
Fuerza Eólica del Istmo II	Autoabastecimiento	Peñoles	Clipper	2012	30
La Venta III	Productor externo de Energía	CFE / Iberdrola	Gamesa	2012	102
Oaxaca II, III, IV	Productor externo de Energía	CFE / Acciona	Acciona	2012	306
Proyectos eólicos en otros estados					
La Rumorosa I	Baja California	Autoabastecimiento	Gobierno BC	2010	10
Arriaga	Chiapas	Autoabastecimiento	Grupo Salinas	2012	28.8
Pequeños aerogeneradores ubicados en sitios aislados de la red					2.0
Pequeñas aerobombas (turbinas eólicas que impulsan bombas hidráulicas)					3.0

Este recurso no se ha cuantificado con precisión en México, sin embargo, con base en mediciones de superficie y mapas eólicos, se sabe que es abundante y puede superar al de varios países líderes actuales en generación eoloelectrica (Alemania, Estados Unidos, España e India). Además cuenta con instituciones, académicos, recursos humanos especializados, una importante base industrial e inversionistas interesados en conformar una industria eoloelectrica (14) (65).



La **bioenergía** en México representa el 3.2 % del consumo de energía primaria, siendo las principales fuentes la madera y el bagazo de la caña de azúcar. En 2005 la industria azucarera produjo 5 000 millones de kilogramos de azúcar y 56 millones de litros de etanol. La producción nacional de etanol comenzó en 1999 en el estado de Veracruz, y se destinaba sólo a la industria farmacéutica. Pero en el 2008 se implementó un marco legal sobre los biocombustibles con la aprobación de la Ley para la Promoción y Desarrollo de Biocombustibles, y la industria azucarera tuvo la posibilidad de producir electricidad y etanol para sectores de autopropulsión eléctrica. Sin que exista una evaluación precisa del universo de posibilidades de aprovechamiento, se cuenta con un potencial amplio:

- En el 2005 la CRE autorizó un proyecto de 19 MW para generar 120 GWh/año con biogás, 70 MW para generar 105 GWh/año con bagazo de caña de azúcar y 224 MW para generar 391 GWh/año con sistemas híbridos (gas de petróleo y bagazo de la caña de azúcar).
- Los residuos sólidos generados en agricultura y jardines son adecuados para la generación de electricidad y se han estimado en 73 millones de toneladas. Estos productos de desecho permiten una instalación de 803 MW con una producción anual de 4.5 GWh.
- La empresa Bioenergía de Nuevo León desarrolló un proyecto de 7 MW eléctricos, entró en operación en 2003 y es pionera en el uso de biogás producido por la digestión anaerobia de los residuos sólidos urbanos. Actualmente tiene el objetivo de crecer hasta 12 MW.
- La compañía "Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey" tiene dos licencias autorizadas por la CRE para autosuministro de energía eléctrica generada a partir de biogás, con una potencia total de 10.8 MW (2).
- En Monterrey, se han instalado, con el apoyo del Global Environmental Fund (GEF) a través del Banco Mundial dos proyectos de aprovechamiento de biogás por fermentación anaerobia de lodos, que tienen una capacidad instalada de 10.8 MW y pueden generar hasta 54 GWh/año.
- Guanajuato, a través del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado, ha promovido la realización de proyectos, entre los cuales se encuentran el de la



- granja La Estrella, en la Ciudad de León, en donde se aprovecha el residuo orgánico de las vacas para la generación de electricidad (12).
- Las comunidades rurales aisladas del país, satisfacen la mayor parte de sus necesidades energéticas con biomasa. Se estima que la leña provee cerca del 75 % de la energía de los hogares rurales.
 - Actualmente, se tienen 12 permisos de la CRE para instalar 135 MW en plantas de generación eléctrica a partir de biomasa (13) (20).
 - La empresa estadounidense Global Seawater (GSI) ha empezado a cultivar en México una planta no comestible llamada *salicornia*, que crece en áreas desérticas de la costa y se riega con agua de mar (77).
 - El proyecto más importante de generación eléctrica por biomasa es el de Bioenergía de Nuevo León, de la empresa Sistemas de Energía Internacional S.A. de C.V. (SEISA), el cual es el primero en el país que aprovecha el biogás liberado por un relleno sanitario para generar energía eléctrica, con una capacidad de 7 MW. El proyecto se desarrolló con un apoyo parcial del Global Environmental Facility (GEF), a través del Banco Mundial (73) (74).
 - En la Ciudad de México, la Delegación Miguel Hidalgo pretende operar una planta de generación de electricidad con base en desechos orgánicos (6).

Referente a la **energía geotérmica**, México ocupa el tercer lugar en el mundo en la generación de energía eléctrica mediante fuentes geotérmicas; tiene 960 MW de potencia instalada y una producción de 7 404 MWh/año, equivalente al 2.0 % de la capacidad instalada pública.

Las reservas conocidas de este recurso se han evaluado en 1.3 GW y las probables en 4.5 GW. Los yacimientos geotérmicos del territorio nacional, abarcan toda la escala de temperatura (alta, media y baja) (2).

La explotación actual de los recursos de temperatura alta es de 886.6 MW y la de los recursos de temperatura media es de 107 MW. Sin embargo, este tipo de energía no se ha convertido en uno de los más importantes debido a los altos costos requeridos en su infraestructura y en el equipo especializado necesario para perforar pozos en roca volcánica y que soporten las altas presiones y temperaturas.



- La CFE, único productor de este tipo de tecnología en México; ha perforado pozos exploratorios en Los Negritos-Michoacán y Acoculco-Puebla.
- Existen importantes aprovechamientos de la energía geotérmica en los campos Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros y Tres Vírgenes (6).

En cuanto a la **energía hidráulica**, es la más explotada en México. Actualmente existen alrededor de 4000 presas que generan 19 TWh/año. En el año 2010 la CRE señaló que la generación de energía eléctrica podría llegar hasta 80 TW/h Ese mismo año en los estados de Veracruz y Puebla, el potencial se elevó a 400 MW para generar cerca de 3.5 TWh/año.

- La mayor planta hidráulica en el país, Chicoasen, tiene una potencia instalada de 2 400 MW y está situada en el estado de Chiapas.
- En 2007 la planta de El Cajón comenzó a operar en el estado de Nayarit con 750 MW de potencia, uno de los proyectos más importantes en los últimos años, conocido por la polémica que causó la oposición pública desde inicios de su construcción por motivos económicos, políticos, sociales y ambientales.
- La planta de la Parota de 900 MW, ubicada en el estado de Guerrero, se encuentra en construcción, la oposición de varios grupos ecologistas han retrasado su culminación, pero se prevé que para el 2016 puede generar al año 780 MWh además de evitar 0.94 millones de toneladas de emisiones de CO₂ y se estima un costo de \$ 10 362 251 487.00 MX (2).
- Una empresa llamada Comexhidro trata de explotar la energía minihidroeléctrica con las presas de riego ya existentes, con lo cual el impacto ambiental que una construcción podría tener en los ecosistemas adyacentes es nulo. En 2003 se inauguró el primer proyecto minihidroeléctrico llamado “Las Trojes” en Jalisco, con una capacidad de 8 MW (6) (13).
- El potencial hidrológico en México es de alrededor de 280,000 m³ al año. Tomando en cuenta únicamente los ríos Grijalva, Balsas, Santiago e Ixtapantongo se cubre el 89.7 % de la potencia hidroeléctrica total instalada.

En relación a la **energía oceánica**, actualmente el país no tiene proyectos en ejecución ni instalaciones eléctricas en operación para usar energía del mar (2).



6.2 Aplicación Internacional.

En el mundo la búsqueda de un desarrollo sustentable, ha promovido el uso de fuentes renovables para la generación de electricidad, calor y como fuente de combustión. El potencial mundial es alto (relación de fuente renovable con su ubicación) aunque su uso aún se considera como limitado. En la Tabla 6.2 se observan las aplicaciones de las fuentes renovables.

Tabla 6.2 Desarrollo de las Energías Renovables en el mundo

Aplicaciones	Fuentes / Tecnologías	Capacidad existente [GW]
Electricidad	Eoloeléctrica	121
	Solar fotovoltaica en red	13
	Concentración solar	0.5
	Grandes hidroeléctricas	860
	Pequeñas hidroeléctricas	85
	Bioenergía	52
	Geotermoeléctrica	10
Calor	Calentadores solares de agua	145
	Bioenergía	~250
	Geotermia	~50
Combustibles líquidos	Bioetanol	67
	Biodiesel	12

En lo que respecta a **energía solar**, Estados Unidos es el país con mayor capacidad eléctrica instalada en celdas fotovoltaicas, con más de 200 MW. El país con mayor aplicación de colectores solares es China, donde donde hay 164 millones de m². Además de éstos, los desarrollos importantes son los siguientes:

- Central solar fotovoltaica de Tudela (Navarra), España; de 1.2 MW, construida con 12.602 paneles fotovoltaicos, sobre una superficie de 70 000 m². Con una inversión inicial de 10.86 millones de euros y una producción de 1.9 MWh.
- En Chipre hay 600 m² de calentadores solares por cada 1000 habitantes; es decir, más de 0.5 m² por habitante.
- En cuanto a las plantas de canal parabólico: en 2007 entró en operación la planta Andasol en Andalucía, España; y en 2008 la planta Nevada Solar One en Nevada, Estados Unidos.



- Entre 2006 y 2009 comenzaron a operar en España, dos plantas comerciales de torre central, PS-10 y PS-20, con 11 y 20 MW de potencia, respectivamente. La experiencia rentable y sustentable ha sido buena, por lo que actualmente se encuentran en marcha otros proyectos de este tipo de plantas (14).
- En Argentina, la fundación EcoAndina investiga e implementa tecnología solar, provee agua potable y se ocupa mediante donaciones institucionales del desarrollo local de comunidades de la Puna Andina. En la Provincia de Jujuy, San Juan de Misa Rumi (cerca de la frontera con Bolivia y Chile) la base energética son la energía solar y la eólica; la localidad es de aproximadamente 50 familias en 30 viviendas, por lo que fue factible instalar cocinas solares, hornos panaderos solares, calentadores de agua y calentadores ambientales (escuelas o albergues), todos del tipo solar y comunitarios, como se observa en la Figura 5.11. A las personas que gozan de los recursos, se les cobra 1 peso argentino para el mantenimiento de los sistemas (113).



Figura 6.1 Tecnología solar

La Figura 6.2 muestra el promedio anual de la radiación solar en el mundo, donde se observa que geográficamente México es uno de los países con mayor capacidad de aprovechamiento del mismo. En rosa se representa la máxima incidencia, en amarilla la incidencia media y en azul la incidencia mínima.

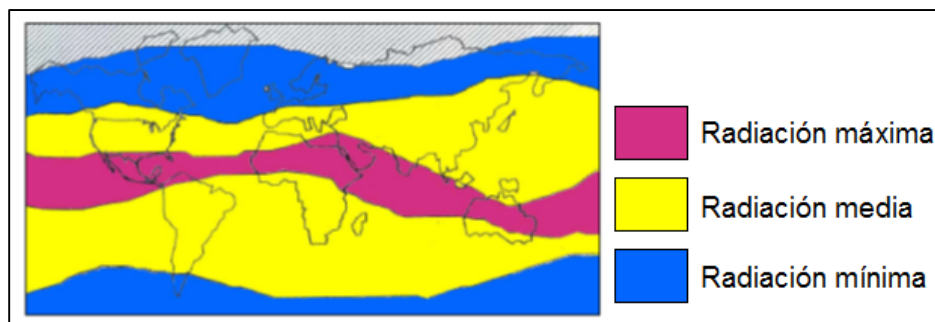


Figura 6.2 Radiación solar en el mundo.



En cuanto a la **energía eólica**, Los Países Bajos la han utilizado de manera importante desde el siglo XVII y hoy, junto con España y Alemania, son líderes mundiales en su manufactura e innovación. Al inicio del presente año se contaba con alrededor de 18 500 MW eólicos en el mundo (6).

En 1994 en California, Estados Unidos se instalaron 15 000 turbinas eólicas que generaban la energía equivalente a la consumida anualmente por los habitantes de San Francisco. Dicha experiencia positiva desencadenó una ola de desarrollo que llevó a los otros estados y a las otras naciones a aprovechar esta tecnología.

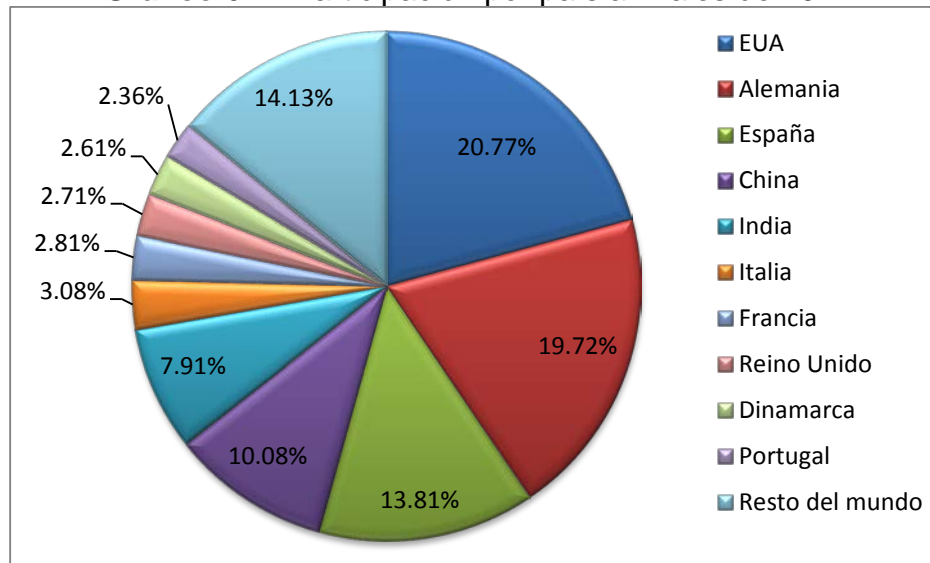
Desde el año 2000 la capacidad de generación de electricidad a partir de viento ha crecido a una tasa anual promedio de 30 %. La Unión Europea quien tiene los proyectos eólicos más importantes ha acumulado cerca de 12 822 MW, donde Alemania se consolida en primer lugar con 6 113 MW.

- La provincia española de Navarra, posee la industria eólica de más rápido crecimiento en el mundo ya que, partiendo de cero, obtuvo el 23 % de su electricidad con esta tecnología en menos de tres años.
- El principal fabricante de aerogeneradores es Alemania, aunque hay mercados emergentes, como en Dinamarca, India y China que crecen a ritmo vertiginoso. En la última década a los países con generación eoloeléctrica se han sumado España y Estados Unidos. Países como Italia, Reino Unido, Países Bajos, Japón y Portugal han alcanzado ya los 1 000 MW.
- Actualmente existen varios proyectos en construcción en los estados de Colorado, Iowa, Minnesota, Nebraska, Kansas, New Mexico, Oregon, Texas, Wisconsin y Wyoming. Estos desarrollos elevarán la capacidad eólica del país en un 50 %, suficiente para proveer de energía a más de 500 mil hogares. Canadá, Italia, Finlandia, China, Taiwán, Noruega, España, Francia, Reino Unido y Estados Unidos han empezado el desarrollo de centrales eólicas mar adentro. Se espera que entre 2012 y 2017 se cuente con una capacidad instalada mundial de alrededor de 10 000 MW mar adentro (14) (65).

En el Gráfico 6.1 se muestra el porcentaje de aportación mundial en energía eoloeléctrica de los principales países productores.



Gráfico 6.1 Participación por país a finales de 2011



En lo que se refiere a la **energía geotérmica**, Italia fue pionera en generar este tipo de energía en 1904, posteriormente países como México y Japón aprovecharon su ubicación geográfica para explotar este recurso, como se ve en la Tabla 6.3 (6).

Tabla 6.3 Usos de la energía geotérmica

País	Utilización GWh / año	Capacidad MW	Uso principal
China	12.605	3.687	Baños
Suecia	10.000	3.840	Bombas de calor
EUA	8.678	7.817	Bombas de calor
Turquía	6.900	1.495	Baños / calefacción
Islandia	6.806	1.844	Calefacción urbana
Japón	2.862	822	Baños
Italia	2.098	607	Baños / Spas
Hungría	2.206	694	Baños / Spas
Nueva Zelanda	1.968	308	Industrial
Brasil	1.840	360	Baños / Spas

- En Islandia, mediante energía geotérmica se genera el 18 % de la electricidad pública; se considera como el país con mayor actividad geotérmica por que el 99 % de las viviendas adquieren su energía eléctrica con esta tecnología.
- En Filipinas, según datos del Banco Mundial, se logra generar hasta el 27 % de la electricidad pública (95).
- El recurso que mejor puede aprovecharse es la roca seca caliente a más de 200 °C y a una profundidad de 5 000 metros. Por lo que la empresa petrolera Shell,



ha comenzado sondeos para su posible explotación en Francia y Alemania y Suiza (aunque éstos no se consideraban de gran potencial).

- Al año 2010, los países con utilización de esta energía son Armenia, Canadá, Chile, Yibuti, República Dominicana, Grecia, Honduras, Hungría, India, Irán, Corea, Nevis, Rwanda, Eslovaquia, Islas Salomón, Suiza, Taiwán, Tanzania, Uganda, Vietnam y Yemen.
- Además de la producción de electricidad, se utiliza en actividades industriales como: calefacción en Islandia, Estados Unidos y Nueva Zelanda; procesado de alimentos en Estados Unidos y Filipinas; lavado y secado de lana en China y Nueva Zelanda; fermentación en Japón; industria papelera en Australia, China y Nueva Zelanda; producción de ácido sulfúrico en Nueva Zelanda; manufactura de cemento en Islandia y China; y teñido de telas en Japón (3).

Internacionalmente se tiene una gran proyección de la energía geotérmica, en la Tabla 6.4 se observa el crecimiento esperado de cada país.

Tabla 6.4 Países que utilizan la energía geotérmica

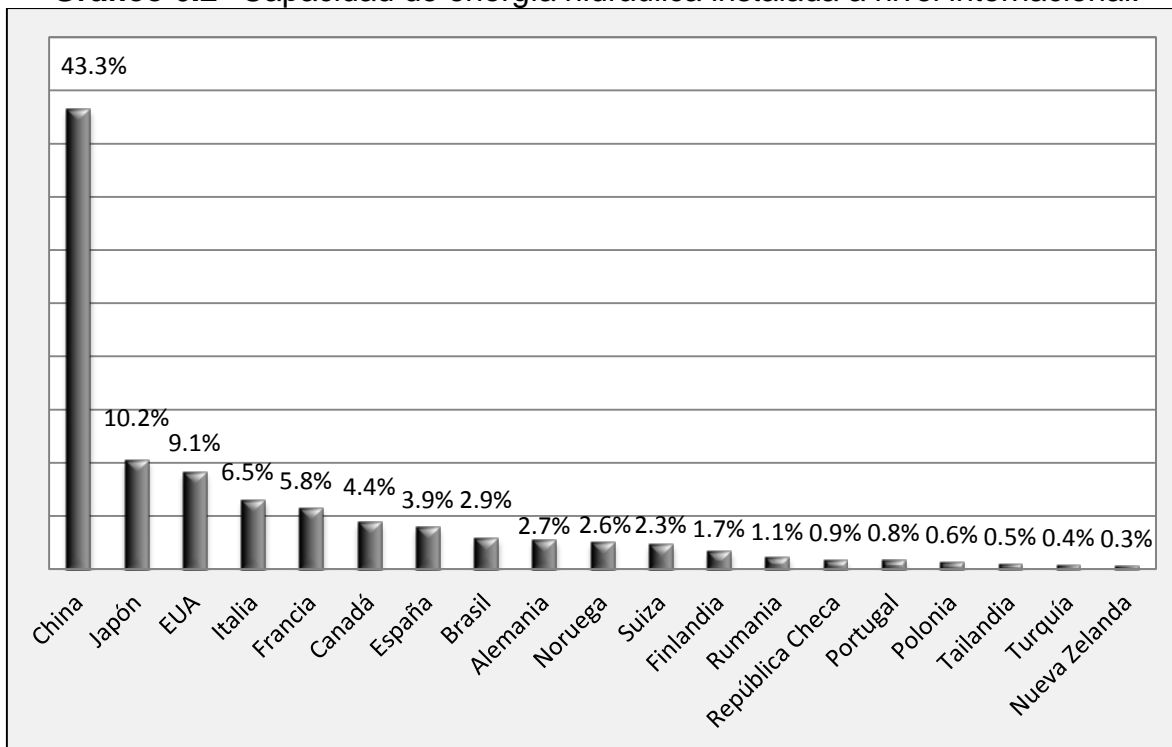
País	Capacidad instalada en el 2010 [MW]	Capacidad proyectada para el 2015 en [MW]	País	Capacidad instalada en el 2010 [MW]	Capacidad proyectada para el 2015 en [MW]
USA	2 687	5 400	China	24	60
Filipinas	1 970	2 500	Francia	16	35
México	965	1 140	Etiopía	7.3	45
Italia	843	920	Alemania	6.6	15
Islandia	628	800	Austria	1.4	5
Nueva Zelanda	575	1 240	Australia	1.1	40
Japón	536	ND	Tailandia	0.3	1
El Salvador	204	290	Chile	0	150
Kenya	167	530	España	0	40
Costa Rica	166	200	Honduras	0	35
Nicaragua	88	240	Argentina	0	30
Turquía	82	ND	Canadá	0	20
Rusia	82	190	Grecia	0	15
Nueva Guinea	56	75	Hungría	0	5
Guatemala	52	120	Países Bajos	0	5
Portugal	29	60	Rumania	0	5



En lo que a **energía hidráulica** se refiere, China cuenta con la mayor capacidad instalada del mundo con 60 200 turbinas dando 14 300 MW y produciendo alrededor de 36 TWh, lo que representa el 43 % del total de capacidad a nivel mundial (tanto en operación actual y como la que se encuentra en construcción y la planeada). Le siguen Japón y Estados Unidos con 3 381 y 3019 MW respectivamente. En octavo lugar, y en primero de los países latinos se encuentra Brasil con 950 MW, bajo el aprovechamiento de pequeños saltos hidráulicos. En el Gráfico 5.8 se observa el porcentaje de participación de diferentes países considerando la instalación mundial existente al año 2012 (13).

La ubicación geográfica de cada país es un factor decisivo para el aprovechamiento de esta energía. Por ejemplo, en Noruega, el 98 % de la energía eléctrica proviene de la hidráulica, gracias a que sus ríos siguen un curso impetuoso y breve. En contraste, en España los periodos ríos de sequías y lluvias son muy marcados, por lo que los ríos son poco caudalosos y no se logra un curso continuo, obteniéndose sólo el 20 % del total de la producción eléctrica, siendo el principal proyecto la Central de Salto de San Román Zamora (1) (5).

Gráfico 6.2 Capacidad de energía hidráulica instalada a nivel internacional.





Después de la hidráulica, la **bioenergía** es la fuente renovable de mayor potencia para generar energía eléctrica. USA es el generador más grande con 7 000 MW instalados, éste país y en general en América se utiliza el etanol absoluto, el cual mezclado con gasolina puede usarse en motores de ciclo de Otto. En Europa se utiliza mayoritariamente el ETBE (Etil-ter-butil-éter), aunque la tendencia es ir hacia el uso de etanol absoluto. Algunos países como USA y Suecia, utilizan etanol en mezclas superiores, es decir compuestas en un 85 % por etanol y en un 15 % por gasolina, en vehículos Flexible Fuel Vehicles (FFV) (77).

Los países que actualmente tienen mayor producción de biodiesel son Alemania, Italia, Austria, Francia y Suiza. Gracias al desarrollo de investigaciones y proyectos ambientales socialmente viables, España ha escalado posiciones para situarse casi a la par de estos países; como con la central térmica de biomasa en Sangüesa (Navarra) que produce biocombustibles sólidos; la gasolinera de biodiesel en Tárrega (Lérida) que produce biocombustibles líquidos, y la fábrica de bioetanol de Ecocarburantes Españoles en Cartagena (Murcia) (1) (77).

Las expectativas de crecimiento de la generación de energía con biomasa alrededor del mundo son de más de 30 000 MW para el año 2020. China e India son candidatos para instalar sistemas con biomasa de manera masiva. Las estimaciones internacionales muestran que para el 2015 China deberá tener entre 3 500 y 4 100 MW instalados, e India entre 1 400 y 1 700 MW. Esto representa un crecimiento acelerado de sus niveles actuales de capacidad instalada de 154 y 59 MW respectivamente. Otros países que muestran un promisorio crecimiento por la variedad de sus sistemas de biomasa son Brasil, Malasia, Filipinas, Indonesia, Australia, Canadá, Inglaterra, Alemania y Francia (13).

Respecto a la **energía oceánica**, como se mencionó en la ficha, China, Francia, Canadá, Japón y Hawai aprovechan esta energía de forma experimental en centrales eléctricas. En España se tienen dos proyectos pequeños, uno offshore en Santoña (Cantabria) que compuesto por 10 boyas, genera energía a partir del oleaje; y otro en Mutriku, basado en la tecnología de columna de agua oscilante, que recoge el oleaje cuando llega a la costa (1).



7. Programas de apoyo para el fomento del uso de la ER.

Para producir energía eléctrica a través de fuentes renovables, es necesario contar con apoyos económicos y fiscales que hagan atractivos los proyectos de producción de energía limpia (8).

7.1 Programas Nacionales e incentivos.

La aplicación de incentivos económicos con propósitos ambientales es un camino apenas iniciado en México. Sin embargo, promovidos por la SEMARNAT con la participación de SChP y SECOFI, existen ya algunos en operación, tales como:

- **Incentivos económicos para investigación y desarrollo de tecnología** en diversos proyectos con fondos del CONACYT.
- **Contratos de interconexión para fuentes intermitentes** de energía eléctrica, elaborados por la CRE.
- **Protocolo de Kioto:** permite usar la figura del Mecanismo para un Desarrollo Limpio para la obtención de Certificados de Reducción de Emisiones.
- **Contrato de interconexión para fuente solar** de pequeña escala del tipo de medición neta (Net Metering).
- **Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía** cuyo objetivo es promover la utilización, desarrollo e inversión en energías renovables, así como en eficiencia energética. (5)

Siendo los más recurridos por los empresarios:

- **Arancel cero.** Cuando las industrias adquieren en el extranjero equipo de monitoreo, control, o prevención de la contaminación pueden importarlo, al amparo de la fracción arancelaria No. 9806.00.04. El arancel cero se otorga a la importación de equipo cuya inversión reporte un beneficio ambiental, prevengan la contaminación, promuevan la investigación y el desarrollo tecnológico y que no se produzca competitivamente en México. Este instrumento significa un ahorro de entre el 15 y 20 %. Con él se pretende favorecer en el corto plazo la disponibilidad de equipo de monitoreo, prevención y control de la contaminación.



Los interesados en este incentivo, deberán realizar el siguiente procedimiento:

1. Solicitar ante la Dirección General de Servicios al Comercio Exterior de SECOFI, el permiso de importación correspondiente.
 2. Anexar a la solicitud, la información que agiliza el dictamen técnico:
 - Descripción de la mercancía a importar.
 - Catálogo de operación del equipo a importar, que contenga las especificaciones técnicas y cualquier otra información que corrobore que es un equipo para la prevención, monitoreo o control de la contaminación.
 - Plano de la localización del equipo, dentro del proceso productivo.
 - Funciones específicas que va a desempeñar el equipo a importar.
 - Justificación ambiental, explicación de la razón para realizar la importación.
 - Factura u orden de compra con nombre del comprador.
 3. SECOFI turnará el expediente tanto a CANACINTRA para saber si el equipo no se produce competitivamente en México, como al INE para realizar el dictamen técnico sobre el beneficio ambiental de la importación.
 4. La Secretaría Técnica de la Comisión de Comercio Exterior dictaminará la solicitud de permiso de importación y lo comunicará por escrito al solicitante. El solicitante recogerá el permiso y llevará a cabo la importación.
- **Depreciación acelerada.** Apoyo en el cual la SHCP ofrece a los empresarios que adquieran activos fijos que reporten un beneficio ambiental, capturen energía renovable, o sean sistemas de cogeneración de electricidad eficiente, como inversión nueva; el estímulo de la depreciación acelerada, hasta 100 por ciento en un año. Así, las industrias pueden deducir en un año el monto de sus activos, con la consiguiente disminución de la base sobre la que se grava el Impuesto Sobre la Renta. Este instrumento se encuentra en la LGEEPA y en la Ley del Impuesto Sobre la Renta, donde se establece que la deducción puede ser en la adquisición o en la puesta en operación.

En la Tabla 7.2 se puede consultar una lista exhaustiva de los programas que otorga el Gobierno Federal como apoyo a proyectos de energías renovables.



Por otra parte para enfrentar el alto costo inicial que conlleva la implementación a gran escala de energías renovables, México cuenta con instrumentos de desarrollo y financiamiento local.

El **Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS)** financia proyectos de infraestructura y servicios públicos locales, promueve la inversión privada y busca que los créditos otorgados se ajusten a cortos plazos de recuperación, de tal manera que se optimice la mezcla de recursos y se cubran los riesgos que no cubre el mercado. Además a través del **Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN)**, desarrolla y cofinancia estudios de inversión.

Además, México cuenta con apoyo del Fondo Global del Medio Ambiente (Global - Environmental Facility GEF), que es parte del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); también recibe apoyo del Banco Mundial, del Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza; y del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO – SAGARPA) (6).

Los proyectos para los que se puede solicitar financiamiento internacional (100 millones de USD) incluyen los aspectos establecidos en la Tabla 7.1

Tabla 7.1 Apoyo internacional para implementar proyectos sustentables

Organismo	Tipo de participación	Monto [millones de USD]
GEF	Donación	15
BM	Préstamo	15
Estados	Capital gubernamental invertido	30
Municipios	Capital gubernamental invertido	30
Otros	Aportaciones de otros actores, públicos o privados.	10

Los proyectos financiados por el gobierno federal y que están destinados a ser utilizados por municipios, para obtener el apoyo requieren lo siguiente:

- Solicitud del Presidente Municipal, especificando la obra a realizar, modalidad y estructura financiera.
- Proyecto ejecutivo, validado técnica, ambiental y presupuestalmente por la dependencia normativa federal y/o estatal que corresponda, con las



autorizaciones requeridas conforme a las disposiciones legales, y si es el caso, la disposición legal de aprovechamiento de agua, así como la que deba otorgar el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) y con la liberación de derechos de vía, servidumbre de paso y aprovechamiento de los recursos naturales, detalles del estado y/o avances del proyecto, costo estimado del proyecto y reducciones de GEI estimadas (ton).

- Plan de operaciones y mantenimiento.
- Tener designada la dependencia, entidad o gobierno municipal que será responsable de su ejecución, operación y mantenimiento.

El principal proyecto financiado de aprovechamiento de la biomasa que actualmente está en operación es el **Proyecto Patsari – Programa Nacional de Estufas Ahorradoras de Leña** en el estado de Michoacán, la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO) donó 5 millones de pesos a familias mexicanas rurales; implementando estufas limpias y seguras, con energía solar y bioenergía.

Respecto a los proyectos financiados con capital privado y capital federal, los requisitos de manera general son:

- Solicitud de Crédito y copia de la Ley de Ingresos y Presupuesto de Egresos donde se establezca el proyecto
- Cuenta pública del año en curso con antigüedad no mayor a tres meses.
- Cuadro de deuda donde se muestre: institución, fecha de contratación, tipo de crédito, monto, plazo, tasa, comisiones, forma de pago y garantías.
- Descripción del proyecto identificando los principales rubros, calendario, costo y beneficios
- Copia que acredite la personalidad jurídica e identificaciones del: Presidente, Síndico, Secretario y Tesorero y las facultades legales otorgadas.
- Acta de cabildo donde los regidores autorizan a contratar el financiamiento o la fuente de pago certificada por el Secretario del Ayuntamiento.
- Acta de cabildo donde se autorice la constitución del Fideicomiso de Administración, Garantía y Pago y la afectación de participaciones federales o estatales para garantía y/o fuente de pago del crédito solicitado.



Tabla 7.2 Programas del Gobierno Federal para el Apoyo de Proyectos de ER

Organismo /Institución	Nombre del programa	Tipo de apoyo	Monto	Contacto
SEDESOL	Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias, para el Ejercicio Fiscal 2013	Infraestructura para Redes o sistemas de energía eléctrica	hasta \$3,000,000.00	Tel. (0155) 5141-7900 Ext. 54900 contacto@sedesol.gob.mx www.sedesol.gob.mx www.microrregiones.gob.mx
	Programa 3x1 para Migrantes el Ejercicio Fiscal 2013	Infraestructura para Redes o sistemas de energía eléctrica	hasta \$1,000,000.00	
Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas	Programa de Infraestructura Básica para la Atención de los Pueblos Indígenas (PIBAI)	Construcción de líneas y redes de distribución de energía eléctrica y electrificación no convencional	Monto no definido pero con participación 70% por el programa 30% por el Municipio	www.cdi.gob.mx
Secretaría de Energía	Proyecto de Electrificación Rural con Energías Renovables. Servicios Integrales de Energía	Electrificación mediante energías renovables a 36 comunidades, que por su dispersión no puedan ser integradas a la red.	Monto en función de proyecto	Tel: + 52 (55) 5000-6000 Ext. 1096 Fax: + 52 (55) 5000-6223 E-mail: acordero@energia.gob.mx
BANOBRAS	Créditos para Inversión Pública Productiva a Municipios	Financiamiento y asistencia técnica para proyectos de infraestructura o servicios públicos que las administraciones estatales y municipales lleven a cabo.	Monto en función de proyecto	Tel: 5270-1200 www.banobras.gob.mx



Organismo /Institución	Nombre del programa	Tipo de apoyo	Monto	Contacto
Fideicomiso para El Ahorro de Energía (FIDE)	Financiamiento a proyectos de Micro Generación y Cogeneración de Energía Eléctrica hasta de 500 kW	Financiamiento a proyectos para la adquisición e instalación de sistemas, con uso de fuentes de energías alternas.	Monto en función de proyecto. Financiamiento del 100%	Tel. 01 (55) 1101-0520 Ext. 96192 ó 96034 www.FIDE.org.mx
	Financiamiento a municipios.	Financiamiento a proyectos de Ahorro de Energía y de Eficiencia Energética		
	Financiamiento a proyectos de desarrollo que impacten el mercado y la eficiencia energética	Financiamiento a proyectos para la instalación de equipos y sistemas de cogeneración hasta de 500 kW, con energías alternas.		
Firco / SAGARPA	Programa SAGARPA-Banco Mundial-Firco	El gobierno (SAGARPA, Banco Mundial y FIRCO), financiarán con 60.5 millones USD la instalación de tecnologías renovables en el ámbito rural.	Monto en función de proyecto, con participación 50% por el programa 50% por el Municipio	Tel. 5062-1200 Ext. 1101 – 1014 – 1021 octavio.montufar@firco.sagarpa.gob.mx magonzalez.firco@sagarpa.gob.mx www.firco.gob.mx
	Fideicomiso de Riesgo Compartido (Agro-negocios)	Respaldo a empresas rurales y organizaciones de productores, apoyos a actividades productivas en beneficio del medio ambiente, con fuerte impacto social	Hasta \$200,000, máximo 80% o 90% para capacitación o estudios y planes de negocios. Hasta \$4,000,000, máximo 50% para equipo.	



Tabla 7.3 Programas privados o mixtos de apoyo para proyectos de ER

Organismo /Institución	Nombre del programa	Tipo de apoyo	Monto	Contacto
BANOBRAS/FONADIN* (Federal 49% / Privado 51%)	Fondo para el Financiamiento de Estudios para Proyectos de Infraestructura	Fondo para apoyar al Gobierno Federal y Gobiernos Estatales y Municipales, en el desarrollo de estudios de proyectos de infraestructura	Inicial de 200 millones de pesos	Tel: (55) 5270-1770 y 1375 www.fonadin.gob.mx www.banobras.gob.mx
FINTEGRA	Créditos a Proyectos Sustentables	Productos y servicios financieros, consultoría y asistencia técnica; para Entidades de Gobierno, para proyectos de alta rentabilidad social, infraestructura, educación, servicios municipales, seguridad y producción.	Monto en función de proyecto	Tel. 5540-7375 Tel. (442) 245-2400 www.fintegra.com.mx
INTERACCIONES	Créditos a Proyectos Sustentables	Financiamiento para Gobiernos Estatales y/o Municipales. Inversión Pública Productiva. Restructuraciones de pasivos. Capital de trabajo (Gasto Corriente). Emisiones de deuda. Arrendamiento de Proyectos de Infraestructura.	Monto en función de proyecto	Tel. 5326-8600 Ext. 6147 y 01 800 911 27 3486 jgomezl@interacciones.com atencionclientes@interacciones.com www.interacciones.com



7.2 Programas Internacionales e incentivos.

Existen empresas que proporcionan a abogados, científicos y técnicos; el entrenamiento y recursos necesarios para la protección del ambiente en sus comunidades; dichas empresas ayudan a que sus miembros ganen aptitudes y construyan organizaciones fuertes que trabajen internacionalmente, desarrollando estrategias transnacionales para enfrentar los retos ambientales siguientes.

- Apoyo estratégico durante el desarrollo y fortalecimiento de leyes ambientales.
- Provisión de equipo científico y entrenamiento para el monitoreo de condiciones ambientales.
- Evaluación científica de la información ambiental para la identificación de toxinas y de sus fuentes.
- Elaboración de leyes y regulaciones modelo, como las leyes de protección de calidad del agua.
- Creación de un registro ambiental y de derechos humanos.
- Testimonios de expertos, apoyando casos en contra de contaminadores.
- Evaluaciones de impacto ambiental y propuestas de proyectos de desarrollo.
- Apoyo en el desafío por parte de las instituciones financieras internacionales.
- Colaboración en la redacción de demandas y otros documentos legales.
- Información acerca de tecnologías sostenibles y limpias.
- Incentivación de la colaboración transnacional.
- Cultivo del poder del derecho internacional.
- Motivación de la acción ciudadana y la participación pública.
- Conservación del Ambiente

Algunas empresas ambientalmente comprometidas son las siguientes⁴⁴:

1. Alianza Ambiental de Derecho Ambiental (ELAW)
2. Angélica Foundation / Tides Foundation:
3. Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente (AIDA):
4. Charles Stewart Mott Foundation
5. Embajada Del Reino Unido

⁴⁴ Para cada una, se revisó que entre sus principales objetivos estuvieran los rubros de protección ambiental.



6. Fund for Global Human Rights
7. International Community Foundation
8. Marisla Foundation
9. Sandler Family Foundation
10. The David and Lucile Packard Foundation
11. The Summit Foundation
12. The William and Flora Hewlett Foundation
13. GEF- PNUD

En la Tabla 7.4 se puede consultar una lista exhaustiva de los programas internacionales que dan apoyo a proyectos de energías renovables

Los requisitos generales para la obtención de recursos a través de programas internacionales son los mencionados a continuación:

- Solicitud de Crédito.
- Validación del Proyecto.
- Justificación económica.
- Viabilidad técnica.
- Autosuficiencia desde el punto de vista financiero.
- Estar acorde con la normativa medioambiental.
- Demostración de los beneficios a obtener.
- Programa de ejecución y mantenimiento.
- Respaldo del gobierno estatal o federal (si no es un proyecto particular).



Tabla 7.4 Programas Internacionales de Apoyo para Proyectos de ER

Organismo /Institución	Nombre del programa	Tipo de apoyo	Monto	Contacto
Banco de América del Norte (BDAN)	Créditos Para Inversión Pública Productiva a Municipios	Desarrollo/financiamiento de proyectos de infraestructura ambiental en la región fronteriza Mex-EUA	Monto en función de proyecto	Tel. (656) 688-4600 Fax (656) 625-6999 becc@cocef.org Página www.cocef.org
Banco Interamericano de desarrollo	Créditos para Inversión Pública a Municipios	Donaciones a países en desarrollo para proyectos de biodiversidad, aguas internacionales, cambio climático, contaminantes orgánicos y degradación de la tierra o capa de ozono.	Hasta 1, 000,000 USD. por proyecto y 350,000 USD para asistencia o preparación de proyecto	Teléfono:9138-6200 BIDMexico@iadb.org www.iadb.org
Global Environment Facility (GEF)	Créditos para Inversión Pública Productiva a Municipios			www.thegef.org Tel.4000-9875 enlace@pnuma.org www.pnuma.org
Banco Europeo De Inversiones (BEI)	Créditos para Inversión Pública Productiva a Municipios	Inversión de la UE en Latinoamérica para proyectos ambientales, incluyendo energía renovable.	Hasta 5, 000,000 euros por proyecto con la condición de financiar sólo hasta el 50% del total.	www.eib.org http://www.eib.org/Attachments/country/ala_es.pdf info@eib.org
Grupo Banco Mundial / Corporación Financiera Internacional	Financiamiento para Municipios	Financiamiento a empresas, si existe participación privada y las actividades se desarrollan conforme a principios comerciales.	En proyectos nuevos, el máximo es el 25% o, hasta el 35% si es pequeño.	Tel. 5480-4244 Fax. 5480-4222
Ministerio Alemán de Desarrollo Económico / Banco de Crédito Desarrollo	Financiamiento para Proyectos de Energías Renovables y Eficiencia Energética.	Línea de crédito para proyectos de Energías Renovables y Eficiencia Energética. (A través de Nacional Financiera)	Fondo de 31.2 millones de Euros	Tel.01 (800) 623-4672 info@nafin.gob.mx www.nafin.gob.mx Tel. (55) 5536-2344 http://www.kfw.de



8. Viabilidad de la incursión de ER en el sector eléctrico.

Además de los beneficios ambientales y sociales, las energías renovables, ofrecen beneficios económicos, ya que garantizan la estabilidad de costos. En México, las instituciones gubernamentales que participan en el desarrollo de los recursos renovables son las siguientes (ver Glosario):

- Secretaría de Energía (SENER)
- Comisión Reguladora de Energía (CRE)
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE)
- Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO)
- Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE)
- Comisión Federal de Electricidad (CFE)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL).

Las energías renovables y la eficiencia energética son factores fundamentales en el desarrollo sustentable del país. Por lo cual se han creado programas para la difusión, premios nacionales de ahorro de energía, y la promoción del uso masivo de colectores solares para calentamiento de agua (2).

Actualmente la CFE estudia la posibilidad de la instalación de fuentes renovables (eólica, hidráulica y geotérmica) en la modalidad de autoconsumo, con respecto al uso industrial y alumbrado público, ya se cuenta con obras eólicas, hidráulicas y solares, así como para la obtención de biogás producido a partir de la digestión anaerobia de residuos sólidos municipales y el estiércol (6).

Las medidas vigentes para la promoción de energías renovables son:

- Proyecto de Energías Renovables a Gran Escala de la SENER para instalar 100 MW de fuentes eólicas y 300 MW de fuentes híbridas.
- Plan de Acción para eliminar barreras para el Desarrollo de la Generación Eolo-eléctrica en México (GEF / PNUD / SENER - IIE) con el cual la SENER mediante el IIE vigila el desarrollo del Centro Regional de Tecnología del Viento, en La Venta, Oaxaca.



- Decretos para una política de promoción de energías renovables en el Marco del Protocolo de Kyoto y la elaboración de un Programa Nacional de Electrificación Rural por medio de energías renovables en los estados de Oaxaca, Veracruz, Guerrero y Chiapas (2).
- Promulgación de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición en esta Materia. Así como la publicación de la Estrategia Nacional para la Transición Energética y su Explotación Sustentable, y el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables; así como la creación del Consejo Consultivo para las Energías Renovables.

Aunque estas iniciativas son limitadas, representan el primer paso en la dirección de generar una visión de Estado en la materia, que incluye el diseño de un plan estratégico de investigación, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos en el sector, que esté a la altura de los retos energéticos del país (14).

Dichos retos refieren a la explotación del potencial para generación de energía a través de fuentes renovables, y al aprovechamiento de la capacidad para convertirse en un importante proveedor de componentes a nivel mundial (37).

Actualmente México cuenta con ocho proyectos de mitigación de GEIs, 4 mini-hidroeléctricos, 3 de biogás por digestión anaerobia de biomasa y 1 eólico, cuya capacidad conjunta evitará la emisión de un millón de ton/año de CO₂ (6).

Existen sociedades civiles nacionales cuyos propósitos generales son remover las barreras de implementación de energías renovables, probar y evaluar tecnologías e instalaciones existentes, estudiar sus aplicaciones y crear conciencia en la población sobre los beneficios que conllevan (2) (6).

- Asociación de Empresas para el Ahorro de Energía en la edificación.
- Asociación Nacional de Energía Solar.
- Asociación Mexicana de Cogeneración y Autoabastecimiento.
- Asociación Mexicana de Energía Eólica.
- Asociación de Técnicos y Profesionales en Aplicaciones Energéticas.
- Centro de Investigación en Energía.



- Centro Mexicano de Derecho Ambiental. Energía, Tecnología y Educación.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).
- Sociedad Mexicana de Hidrógeno

El GEF, el PNUD y el Banco Mundial apoyaron a México con una donación de millones de dólares para contrarrestar las barreras existentes para las tecnologías renovables. La CONUEE, mediante un estudio, demostró que los ejecutivos están dispuestos a contribuir al saneamiento ambiental, incluso pagando por servicios de energía verde, ya que saben que es importante para la exportación de sus productos a países desarrollados donde el mercado ambiental está más establecido (6).

8.1 Barreras en el Desarrollo Sustentable.

Una de las barreras más importantes en el mercado energético actual es el alto costo de inversión inicial necesario para las energías renovables.

En diversas convenciones internacionales se concluyó que una de las maneras exitosas de implementar energías renovables es que se pague una tarifa verde (costo adicional por el servicio eléctrico). Sin embargo, a diferencia de los países europeos y norteamericanos, en México el salario de la mayoría de la gente es limitado. Lo que provoca que aunque mucha gente está consciente de la urgencia en la mejora del medio ambiente y esté dispuesta a pagar; no todos lo estuvieran, no por convicción, sino por falta de recursos.

Consecuentemente, una de las peculiaridades de la política energética mexicana ha sido asegurar el abasto de energía al menor costo posible, es decir; el servicio se encuentra subsidiado, lo que se traduce en obstáculos para las finanzas públicas a largo plazo. Un gobierno no puede pagar los déficits económicos de todos sus gobernados, sin caer en un déficit para él mismo, quedando éste en la búsqueda de opciones más baratas (aparentemente) al corto plazo, lo cual deja fuera del mercado a las tecnologías renovables. Además, el subsidio puede generar el desperdicio e ineficiencia de la energía eléctrica y por lo tanto de recursos públicos adicionales que pudieran impulsar las energías renovables.



Otro factor que no permite la integración de las energías renovables es la estructura del mercado eléctrico, principalmente por la centralización que tiene. Según la visión económica actual, el modelo de las grandes centrales eléctricas es obsoleto e ineficiente. El mercado eléctrico mexicano está estructurado por un monopolio con una red nacional eléctrica que se alimenta en su mayoría de 20 grandes centrales. Después de varias reuniones internacionales en las que se discutió el problema de la implementación de energías renovables en México, se concluyó que la falla es por los mecanismos de mercado, no por problemas con la tecnología.

Al regionalizar las centrales de abastecimiento, como se haría si se establece una red basada en energías renovables, se haría más eficiente. La experiencia en otros países ha demostrado que el mercado de energía renovable se desarrolla mejor en un mercado de competencia. Estudios económicos demuestran que la privatización del sector eléctrico, con un plan nacional y una sólida regulación fomentaría la implementación a gran escala de las energías renovables.

Para definir de manera precisa la sustentabilidad del crecimiento del país es importante tener indicadores como: calidad de vida de las personas y del ambiente; y capital humano (educación e investigación científica) y social (organizaciones y asociaciones sin fines de lucro, normatividad y relaciones personales), indispensables para el desarrollo del país. Sin embargo, los capitales humano y social actuales son débiles y no producen iniciativas de alto nivel, lo que se traduce en rezago en el desarrollo. Esto a su vez impone barreras en la introducción de tecnologías nuevas. Los principales rezagos para establecer el desarrollo sustentable son los siguientes:

- Transparencia.
- Estabilidad política.
- Respeto al marco legal.
- Sanción a la corrupción y al tráfico de influencias.
- Toma de decisiones abierta-inclusión a sectores relevantes.

En muchas zonas del país, no se conocen las tecnologías renovables y los vastos recursos con los que México cuenta. En cualquier empresa social, la opinión pública



es de suma importancia, por lo que no se puede implementar un programa como el de éste, sin que la mayoría de la gente esté consciente de las implicaciones buenas y malas del proyecto (6).

8.2 Beneficios de la aplicación de las ER.

Las energías renovables además de ofrecer un gran potencial para la generación de energía, proveen al país de la capacidad suficiente para convertirse en un importante proveedor de componentes a nivel mundial, especialmente para la zona de libre comercio de América del Norte; la SENER ha proyectado la exportación con un resultado de 150 mil millones de dólares en los próximos diez años (5).

Las energías renovables crean cinco veces más puestos de trabajo que las convencionales. Se estima que emplean directamente a 89 000 trabajadores, a los que habría que añadir otros 99 000 empleos indirectos. La que más empleos directos genera es la energía eólica, con un 37% del total. Le sigue la solar fotovoltaica con un 30%. En tercer lugar la solar térmica, con un 9%. Donde la contratación indefinida representa el 82% y el 18% son de formación en prácticas. Es decir, la temporalidad es menor en las empresas de fuentes renovables.



9. Conclusiones.

El presente trabajo aporta las bases técnicas y el marco jurídico de México para proyectos que consisten en la evaluación de factibilidad e implementación de energías renovables. Se identificó que a nivel mundial el 87 % de la energía proviene de fuentes fósiles y en México es el 89 %, lo cual representa altos costos ambientales, como el efecto invernadero, lluvia ácida, pérdida de la biodiversidad, y disminución de la capa de ozono. Considerando que a nivel mundial se vive una crisis energética, es necesario buscar alternativas de producción de energía eficiente, tales como las fuentes renovables de energía.

En México, la necesaria transición energética constituye una gran oportunidad para el desarrollo científico y tecnológico, la formación de recursos humanos especializados, la creación de empresas y la generación de miles de empleos, con todo lo cual se contribuirá al desarrollo sustentable.

A nivel nacional se tiene una gran variedad de recursos naturales que favorecen el desarrollo de un gran número de actividades productivas, incluyendo las relacionadas con la generación de energía renovable, esto le otorga al país diversas fortalezas, entre las que destacan las siguientes:

- Generación potencial de energía eólica estimada en 40,000 megavatios.
- Generación potencial de energía hidroeléctrica estimada en 53,000 megavatios.
- Generación potencial de energía geotérmica estimada en 2,400 megavatios.

En el presente estudio se detectaron 6 alternativas de producción de energía que podrían ser explotadas en México:

- Energía solar
- Energía eólica
- Bioenergía
- Energía geotérmica
- Energía hidráulica
- Energía oceánica

Se expusieron las ventajas y desventajas de las mismas; además el estudio proporciona datos de índole económico, como los costos de producción y los costos que implica el construir las plantas; estos datos son de gran utilidad, para los



gobiernos federal, estatal y/o municipal que puedan estar interesados en construir una central de este tipo, y así evaluar las ventajas y desventajas que presentan desde diferentes puntos de vista como lo son el social, el ambiental, el económico.

La energía solar tiene un gran potencial debido a que el 75 % del territorio nacional recibe en promedio 5 kWh/m²día, cantidad suficiente para satisfacer la demanda de un hogar mexicano promedio utilizando una celda de 1 m². Si se aprovechara la radiación solar recibida en el estado de Sonora o en el de Chihuahua, en un área de 4 225 km², utilizando tecnologías termosolares de potencia y celdas fotovoltaicas, con factores de planta del 25 %, se podrían cubrir las necesidades del país en energía eléctrica, respecto del alumbrado público; esto significa que tan sólo el 0.06 % del territorio nacional podría cubrir toda la demanda de energía eléctrica. Las principales limitantes para el aprovechamiento de la energía solar son el alto costo y el posible daño a las especies endémicas vegetales y animales (principalmente subterráneos) que requieren del espacio a utilizar y de la radiación solar para su existencia.

En energía eólica, México tiene un potencial de entre 40 000 y 50 000 MW, distribuidos principalmente en los estados de Oaxaca, Baja California Sur, Yucatán, Quintana Roo y las franjas fronterizas de los estados de Baja California, Sonora y Chihuahua. Actualmente, es la alternativa renovable más explotada en México para producir electricidad. Las principales limitantes de esta tecnología son que se requiere que el viento tenga una velocidad mínima de 5 m/s y que sea constante; gran parte del país tiene vientos de mayor velocidad, pero no es constante, se tienen grandes declives. Además de que los parques eólicos pueden causar daño a diferentes especies de aves, desde colisiones hasta modificar sus rutas migratorias.

La bioenergía ha sido explotada en México, principalmente en zonas marginadas, para producir calor a partir de la quema de desechos orgánicos de bosques, madera y residuos agrícolas, industriales y alimenticios. El país produce entre 70 y 73 millones de toneladas anuales de residuos agrícolas y forestales con potencial energético, los cuales sumados a los residuos sólidos urbanos de las 10 principales ciudades; si fueran destinados a la generación de electricidad a partir de su



transformación térmica, proveerían la posibilidad de instalar una capacidad nacional de 803 MW y generar 4 507 MWh/año. México tiene un potencial bioenergético entre 83 500 y 119 500 MW al año, con lo cual se podría cubrir el 60 % de la demanda energética. La mayor fuente de recursos bioenergéticos se localiza en las zonas norte, noreste y centro del país.

Considerando por una parte, la gran capacidad de ahorro en materia de emisiones de gases de efecto invernadero y por otra parte, la utilización de materias agrarias, como estiércol, purines, y otros residuos de origen animal u orgánico para la producción de biogás, la bioenergía ofrece importantes ventajas medioambientales tanto en el ámbito de producción de calor y electricidad como en su uso en forma de biocarburantes. Como consecuencia del carácter descentralizado y de la estructura de inversiones regionales, las instalaciones de biogás pueden aportar una contribución decisiva al desarrollo sostenible en zonas rurales y ofrecer a los agricultores nuevas posibilidades de ingresos. Las principales limitantes para su implementación consisten en la posible deforestación y pérdida de equilibrio ecológico con la explotación de las zonas boscosas; contaminación por CO₂ y CO; desplazamiento de especies autóctonas para el caso de los agroparques energéticos; y competencia por el uso de suelo para la producción de alimentos, entre otras.

La capacidad potencial en energía geotérmica del país es de 2 400 MW distribuidos prácticamente en todos los estados de la república mexicana. Actualmente sólo se aprovecha cerca del 40 % del potencial, representando sólo el 2.97 % de la producción nacional. Lo cual es bajo considerando el enorme potencial del país y que existen tecnologías en el estado del arte para su explotación, ya que podrían adecuarse fácilmente las utilizadas para la perforación de pozos petroleros en caso de encontrarse a alta profundidad; es la que tiene menor impacto ambiental, el flujo de energía es constante, y la inversión es baja con respecto a las otras tecnologías de fuentes renovables. Las principales limitantes para la implementación de los procesos geotérmicos son los altos riesgos exploratorios para la localización de pozos geotérmicos, así como los altos costos en la exploración, y las emisiones de



especies contaminantes y mortíferas durante la perforación y explotación de los pozos, como el azufre y los gases de efecto invernadero.

El potencial hidroeléctrico es de 52 427 MW distribuido en 583 sitios y la capacidad instalada es de 11 343 MW. Las regiones con mayor potencial se encuentran en los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz. Aunque la capacidad instalada con respecto al potencial es alta, si se compara con otras fuentes de energía (las no renovables), aun se tiene un amplio camino por recorrer. Sus principales limitantes para la explotación son la alta inversión inicial requerida, y los probables daños al ecosistema, sin embargo, un proyecto correctamente diseñado podrá evitarlos.

Por último, otra fuente renovable de energía pero que en México no ha sido altamente considerada es la energía oceánica. Las tecnologías para explotarla actualmente se encuentran en fase de desarrollo y por tanto su confiabilidad y rentabilidad a gran escala aún no ha sido probada. Actualmente se desconoce el potencial energético del país, sin embargo se cree que es bastante alto considerando que México está rodeado por zonas marinas. Desde el Golfo de California, hasta el golfo de México, a la altura del estado de Tamaulipas, se desprenden grandes remolinos de viento, los cuales al entrar en contacto con agua del Golfo generan anticiclones de más de 300 km de diámetro, a una profundidad de 1 000 metros y velocidades tangenciales de 1 m/s². Pero para aprovechar el potencial mareomotriz del país es necesario realizar mayor investigación de las áreas con posible potencial energético para determinar la viabilidad y factibilidad económica, ambiental y social de aprovechar dichos remolinos.

La seguridad en el abastecimiento energético, la diversificación del suministro de energía, la protección al medio ambiente, así como la cohesión económica y social, han sido las principales razones por las cuales la promoción del aprovechamiento de las energías renovables, así como la eficiencia energética, es prioritaria en el mundo actual y ha detonado el desarrollo y establecimiento de lineamientos para una menor dependencia de los hidrocarburos.



El objetivo de implementar una política energética en el país reside en contar con un suministro seguro, diversificar el consumo de las fuentes primarias reduciendo el impacto ambiental y promover la eficiencia de la compañía suministradora. Para cumplir este objetivo es indispensable que la instalación de tecnologías renovables ocurra en el menor tiempo posible.

La combinación del gran potencial de México y las aspiraciones del sector industrial han llevado al gobierno a proponer un plan sobre la explotación a gran escala de este tipo de fuentes. Cuyo principal objetivo es la generación de electricidad, para satisfacer su demanda, tanto en las zonas con suministro directo de la red pública, como en aquellas donde no hay suministro por su lejanía.

La conciencia de que el cambio climático debido a la emisión de gases de efecto invernadero promueve el desarrollo de una estrategia nacional, que deberá sumarse a las de otros países, para mitigar en forma adecuada dichas emisiones; el uso de fuentes renovables de energía, entre otras medidas, juegan un papel importante.

La explotación del elevado potencial de fuentes renovables de energía en México para su aplicación en la generación de electricidad requiere del correcto y adecuado marco regulador, hecho en relación a las necesidades del país para atraer inversionistas, así como un marco legal que considere los aspectos sociales, ambientales y económicos del país. Actualmente el marco legal para regular y estimular la producción de energía de fuentes renovables está dado por:

- Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética,
- Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos,
- Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables,
- Financiamiento de la Transición Energética,
- Ley Federal de Derechos. Artículo 1 y Artículo 56,
- Ley del Impuesto Sobre la Renta. Artículo 40.

Debe, además, haber mayor cooperación entre los sectores públicos y privados, a fin de crear más incentivos económicos y financieros, así como promover el desarrollo tecnológico para hacer competitivas las energías renovables para su uso



en la producción de electricidad. Los incentivos existentes para desarrollar estos proyectos son los siguientes:

- Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía
- Proyecto Patsari – Programa Nacional de Estufas Ahorradoras de Leña
- Proyecto de Electrificación Rural con Energías Renovables
- Líneas multinacionales como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Banco Mundial, Banco Alemán de Desarrollo, Corporación de Financiación Internacional (IFC), que buscan proyectos piloto escalables para la transferencia tecnológica baja en carbono.
- Mecanismos de Desarrollo Limpio
- Depreciación acelerada y Arancel Cero.

La falta de información, de incentivos fiscales y del marco legal regulatorio provocan que el aprovechamiento de ER esté restringido mayoritariamente a la generación hidroeléctrica, recurso que sin contaminar es escaso; en general en el uso de fuentes renovables se tiene un aprovechamiento mínimo y es un recurso abundante.

Sin embargo, en cuanto al sector energético el país tiene las siguientes fortalezas:

Experiencia. El éxito de México en el desarrollo de sectores como el automotriz y eléctrico-electrónico, aporta una plataforma de metodología especializada en infraestructura, que favorece el desarrollo del sector de Energías Renovables y permite la optimización de las cadenas de suministro, programas de apoyo comunes y ventajas sinérgicas.

Talento. Actualmente en México se gradúan cerca de 90 mil estudiantes de ingeniería y tecnología. Lo cual representa una aportación de talento altamente atractivo para las empresas de sectores como el de Energías Renovables. Sin embargo, debe mejorarse el desarrollo de estrategias para la vinculación de la industria con la academia, tanto para formar los cuadros de los recursos humanos necesarios, como para realizar actividades de investigación y desarrollo.



Costos Competitivos. De acuerdo al estudio “Índice de costos de manufactura”, elaborado por la consultora Alix Partners en el año 2013, México es el país con menores costos para la manufactura de componentes industriales. Esto en comparación con las principales potencias emergentes como Brasil, China e India.

Como recomendaciones generales, el gobierno mexicano debería seguir las siguientes líneas de acción:

- Fomento a la investigación y desarrollo tecnológico.
- Promoción de la inversión privada para la creación y fortalecimiento de empresas dedicadas al diseño y fabricación de componentes y equipos.
- Impulso a proyectos de generación de electricidad a partir de ER.
- Desarrollo de infraestructura de transmisión.
- Elaboración de un plan nacional de energías renovables o plan de producción de energía sustentable, que incluya la disminución de contaminación, precios razonables de electricidad y cobertura a zonas marginadas, competitividad en el mercado y desarrollo industrial.
- Consolidación de estrategias de difusión sobre los beneficios que las ER pueden aportar al desarrollo regional. La adecuada evaluación de los beneficios ambientales y sociales que este tipo de tecnologías aportan al entorno social, puede ser una estrategia atractiva a nivel gubernamental.
- Establecimiento de un salario mínimo para aquellos profesionales expertos en el tema, dedicados a la investigación, desarrollo de proyectos y/o al diseño, construcción y operación de tecnologías para la explotación de las fuentes renovables.

Con los objetivos fijados para el uso de energías renovables en el sector eléctrico público, se espera reducir las emisiones de CO₂ en torno a la cantidad de 6.3 MT CO₂/año. El sector privado también tiene el objetivo de explotar los recursos renovables, con lo que a mediano plazo, permitiría una reducción adicional de 3.52 MT CO₂/año. En la Tabla 9.1 se muestra el potencial de emisiones reducidas en el sector eléctrico, mediante el uso de fuentes renovables de energía.



Tabla 9.1 Emisiones reducidas mediante el uso de fuentes renovables

Tipo de Inversión	Energía Renovable	Potencia [MW]	Generación [GWh/año]	Emisiones reducidas [MT CO₂/año]
Gubernamental	Eólica	591	2 098	1.29
	Geotérmica	125	1 020	0.63
	Hidráulica	3988	5 494	4.33
	Solar	30	53	0.03
Privada	Eólica	1 076	3 829	2.16
	Biomasa	495	3 035	1.11
	Biogás	42	197	0.05
	hidráulica	172	571	0.2

El uso racional y eficiente de las actuales fuentes energéticas y la introducción de las energías renovables y la energía nuclear son la solución para enfrentar el agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles, conservando al mismo tiempo el ambiente para un desarrollo sustentable.



10. Bibliografía

1. **Energías Renovables para jóvenes.** Energías Renovables para Jóvenes. *Energías Renovables para todos.* [En línea] [Citado el: 12 de Mayo de 2010.] www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_ERJOVENES.pdf.
2. *Electricity sector in Mexico: Current status. Contribution of renewable energy sources.* **Cancino Solórzano, Yoreley, y otros.** 1, Oviedo, España : El Servier, Enero de 2010, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, págs. 454 - 461.
3. **Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico.** SENER. *Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables.* [En línea] [Citado el: 03 de Mayo de 2010.] www.sener.gob.mx/webSener/res/0/Programa%20Energias%20Renovables.pdf.
4. **Barnés de Castro, Francisco.** Comisión Reguladora de Energía. *Las Energías Renovables en México.* [En línea] 30 de Mayo de 2006. [Citado el: 28 de Mayo de 2010.] www.coparmex.org.mx.
5. **Unidad de Inteligencia de Negocios.** Industrias Estratégicas ProMéxico, Energías Renovables. *ProMéxico, Inversión y Comercio.* [En línea] 29 de Enero de 2010. [Citado el: 08 de Junio de 2010.] www.promexico.gob.mx/wb/Promexico/energias_renovables.
6. **Mijares García, Tania y Pérez Guzmán Katya.** Las energías renovables en México. *Programa Aire y Energía.* [En línea] 2005. [Citado el: 10 de Junio de 2010.] www.cemda.org.mx/artman2/uploads/las_energ_as_renovables_en_m_xico2.pdf.
7. **IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.** Impactos ambientales de la producción de electricidad. *Asociación de Productores de Energías Renovables.* [En línea] 2000. [Citado el: 17 de Junio de 2010.] www.appa.es/descargas/Resumen_Estudio_ACV.pdf.
8. **Renovables, Energías.** Las Energías Renovables. *El periodismo de las Energías Limpias.* [En línea] IBERDROLA, 2010. [Citado el: 16 de Junio de 2010.] www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_GENERAL.pdf.
9. **H. Congreso de la Unión, Cámara de Diputados.** Diario Oficial de la Federación. *LAERFTE, LPDB, Constitución, Marco Jurídico Básico del Sector, Marco Legal y Regulatorio del Sector Energético, LGEEPA, LASE, Aguas Nacionales.* [En línea] 28 de Noviembre de 2008. [Citado el: 28 de Abril de 2010.] www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio.
10. **Comisión Federal de Electricidad.** Temas de Preguntas Frecuentes. *La CFE, Generamos electricidad, Transmitimos Electricidad, Distribuimos electricidad, Ahorramos electricidad, Nuestra gente, Administración y finanzas, Nuestros proyectos, Nos modernizamos.* [En línea] [Citado el: 21 de Septiembre de 2010.] www.cfe.gob.mx/Paginas/PreguntasFrecuentes.aspx.



11. **Subdirección de Programación, Coordinación de Planificación, CFE. Una empresa de clase mundial.** Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2008 - 2017. *Federal Ministry of Economics and Technology*. [En línea] 2009. [Citado el: 4 de Junio de 2010.] www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/publicaciones/Documents/POISE20082018.pdf.
12. **ANES.** Asociación Nacional de Energía Solar, A.C. *Energías Renovables, Balance de Energía, Legislación*. [En línea] © 2009 Asociación Nacional de Energía Solar, 2010. [Citado el: 12 de Junio de 2010.] www.anes.org/anes/.
13. **Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.** Fuentes Renovables de Energía. [En línea] 30 de Octubre de 2009. [Citado el: 15 de Junio de 2010.] www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/CONA_24_energias_renovables.
14. *Energías Alternativas.* **Pérez de la Mora, Miguel, y otros.** [ed.] Rosaura Ruiz Gutiérrez. 2, Distrito Federal : Academia Mexicana de Ciencias, Abril-Junio de 2010, Ciencia, Revista de la Academia Mexicana de Ciencias, Vol. 61. ISSN 1405 - 6550.
15. **U.S. Environmental Protection Agency.** Non-Hydroelectric Renewable Energy. *Electricity from Non-Hydroelectric Renewale Energy Sources*. [En línea] Clean Energy, 5 de Agosto de 2010. [Citado el: 21 de Agosto de 2010.] www.epa.gov/cleanenergy/energy-and-you/affect/non-hydro.html#footnotes.
16. **Gob. Federal, SENER, GTZ.** Órgano Interno de Control en SENER. *Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México*. [En línea] 2009. [Citado el: 13 de Mayo de 2010.] www.sener.gob.mx/webSener/res/0/ER_para_Desarrollo_Sustentable_Mx_2009.pdf.
17. **Zamarripa Colmenero, Alfredo y Díaz Padilla, Gabriel.** Áreas de potencial productivo de piñón *Jatropha Curcas L.*, como especie de interés bioenergético en México. *Alternativas para el desarrollo*. [En línea] SAGARPA, 30 de Abril de 2008. [Citado el: 09 de Septiembre de 2010.] www.oleaginosas.org/impr_211.shtml.
18. **Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2009 - 2018. Subdirección de Programación, Coordinación de Planificación.** [En línea] [Citado el: 01 de Septiembre de 2011.]
19. **Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2009 - 2012.** [En línea] 27 de Noviembre de 2009. [Citado el: 01 de Septiembre de 2011.]
20. **Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico.** Prospectiva sobre la utilización de las energías renovables en México. Una visión al año 2030. *Secretaría de Energía*. [En línea] 30 de Noviembre de 2005. [Citado el: 14 de Mayo de 2010.] www.sener.gob.mx/webSener/res/168/Ener_Renovables_2030.pdf.
21. **Secretaría de Energía.** *Marco Jurídico Básico del Sector Energético y del Subsector Electricidad, Marco Legal y Regulatorio del Sector Energético. Subsector de Hidrocarburos, Disposiciones*



Jurídicas Aplicables, Eficiencia energética. [En línea] [Citado el: 24 de Septiembre de 2010.] www.sener.gob.mx/portal/Default.aspx?id=863&lang=1.

22. Ley de Aguas Nacionales. *Leyes Federales Vigentes.* [En línea] 18 de Abril de 2008. [Citado el: 24 de Mayo de 2010.] www.cddhcu.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16.pdf.

23. Comisión Reguladora de Energía. Metodología para la Determinación de los Cargos por Servicios de Transmisión de Energía Eléctrica para Fuentes de Energía Renovable. [En línea] 16 de Abril de 2010. [Citado el: 27 de Septiembre de 2010.] www.anes.org/anes/formularios/LeyesyNormas/Leyes/Metodologia_Cargos_Serv_Transmision_16-04-10.pdf.

24. —. Convenio para el Servicio de Transmisión de Energía Eléctrica para Fuentes de Energía Renovables. [En línea] 28 de Abril de 2010. [Citado el: 27 de Septiembre de 2010.] www.cre.gob.mx/documento/1329.pdf.

25. —. Contrato de Interconexión para fuentes de Energías Renovables. *Secretaría de Energía.* [En línea] 8 de Abril de 2010. [Citado el: 27 de Septiembre de 2010.] xml.cie.unam.mx/xml/ms/royoe/UA-FV/DiarioOficial-7Abril-ContratoIntercMediaTensi%C3%B3n.pdf.

26. Secretaría de Energía. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas (utilización). *Subsecretaría de Electricidad.* [En línea] 8 de Noviembre de 2005. [Citado el: 24 de Septiembre de 2010.] www.sener.gob.mx/webSener/res/Acerca_de/NOM001-SEDE-2005.pdf.

27. —. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-1999, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución. *Subsecretaría de Electricidad.* [En línea] 20 de Abril de 1999. [Citado el: 24 de Septiembre de 2010.] www.sener.gob.mx/webSener/res/Acerca_de/nom002sede-1999.pdf.

28. Secretaría de Economía. NORMA Oficial Mexicana NOM-003-SCFI-2000, Productos eléctricos-Especificaciones de seguridad. *ecretaría de Comercio y Fomento Industrial.* [En línea] 20 de Diciembre de 2000. [Citado el: 24 de Septiembre de 2010.] www.mypsa.com.mx/norma03.htm.

29. Secretaría de Trabajo y Previsión Social. Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-2008, Electricidad estática en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad. *Diario Oficial de la Federación.* [En línea] 22 de Febrero de 2008. [Citado el: 24 de Septiembre de 2010.] www.dof.gob.mx/documentos/3535/stps/stps.htm.

30. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Normas Oficiales Mexicanas en Eficiencia Energética Vigentes. [En línea] 09 de Marzo de 2010. [Citado el: 24 de Septiembre de 2010.] www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_1002_nom_publicadas_vigen.



31. SEMARNAT. NOM-113-SEMARNAT-1998. *Que establece las especificaciones de protección ambiental para la planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de subestaciones eléctricas de potencia de distribución que se pretendan ubicar en diferentes sectores.* [En línea]
32. —. NOM-114-SEMARNAT-1998. [En línea] 23 de Noviembre de 1998. [Citado el: 27 de Septiembre de 2010.] gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/LEYES/NOM-114.pdf.
33. Secretaría de Desarrollo Social. NOM-085-ECOL-1994. *Norma Oficial Mexicana, NOM-ECOL-085, NOM-081-SEMARNAT-1994, NOM-041-SEMARNAT-2004, NOM-042-SEMARNAT-2003.* [En línea] 18 de Noviembre de 1993. [Citado el: 28 de Agosto de 2010.] www.semarnat.gob.mx/leyesyformas.
34. Secretaría de Trabajo y Previsión Social. NOM-011-STPS-2001, *Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo. Diario Oficial de la Federación.* [En línea] 17 de Abril de 2002. [Citado el: 24 de Septiembre de 2010.] www.stps.gob.mx/DGSST/normatividad/noms/Nom-011.pdf.
35. Secretaría de Salud. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SSA1-1993. [En línea] 23 de Diciembre de 1994. [Citado el: 24 de Septiembre de 2010.] www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/021ssa13.html.
36. *Estimación horaria de la irradiancia solar extraterrestre.* Plasencia, Edson, y otros. [ed.] Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 19, Perú : s.n., 2007, *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, Vol. 10, págs. 72 - 77. www.scielo.org.pe/pdf/iigeo/v10n19/a07v10n19.pdf. ISSN: 1561-0888.
37. ProMéxico Trade and Investment. México Investment Map. *Recursos Naturales y Energías Renovables (México, Sectores Estratégicos).* [En línea] Secretaría de Economía. [Citado el: 30 de Junio de 2010.] mim.promexico.gob.mx/wb/mim.
38. EcoEfecto. *Comunicaciones y Energía Solar.* [En línea] 9 de Diciembre de 2008. [Citado el: 14 de Mayo de 2010.] ecoefecto.com/CSA%20 analisis%20 tecnico.htm.
39. Energy Systems. Energy Systems. *Sistemas de Energía Renovable.* [En línea] Club Efecta. [Citado el: 07 de Mayo de 2010.] www.energysystems.com.mx/.
40. González, Dr. Joan García. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales.* [www.ub.es/geocrit/b3w-376.htm] [ed.] Universidad de Barcelona. Barcelona, España : s.n., 25 de Mayo de 2002. *La Cocina Solar. Un sistema de aprovechamiento directo de la energía solar para cocer los alimetros junto a otras aplicaciones.,* Vol. VII. ISSN 1138-9796.
41. LANSOLAR INGENIEROS. *Energías Renovables, Ahorro Energético y Desarrollo Sostenible. LANSOLAR MAGAZINE.* [En línea] 2006. [Citado el: 07 de Mayo de 2010.] www.lansolar.com/indexr.php.



42. Justin. Heating. *Solar Ducts: Heating Air and Generating Power*. [En línea] [Citado el: 12 de mayo de 2010.] www.metaefficient.com/heating/solarducts-using-sunlight-to-heat-air.html.
43. *Active solar distillation - A detailed review*. Sampathkumar, Arjunan, Pitchandi, Senthilkumar. [ed.] El Sevier. 6, India : ScienceDirect, 25 de Enero de 2010, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, págs. 1503 - 1526.
44. *Hydrogen Production by Three-Step Solar Thermochemical Cycles Using Hydroxides and Metal Oxide Systems*. Charvin, Abanades, Lemort, Flamant. 5, France : American Chemical Society, 14 de Junio de 2007, *Energy & Fuels*, Vol. 21, págs. 2919 - 2928.
45. Team to Chemically transform carbon dioxide into carbon-neutral liquid fuels. [En línea] 5 de Diciembre de 2005. [Citado el: 12 de Mayo de 2010.] share.sandia.gov/news/resources/releases/2007/sunshine.html.
46. *Energía Solar y Arquitectura*. Mendieta Melchor, Elvis F. 2, Ciudad de México : Revista Digital Universitaria, 31 de Marzo de 2002, *Revista Digital Universitaria*, Vol. 3. www.revista.unam.mx/vol.3/num1/art2/index.html.
47. Duffie, Beckman. *Ingeniería Solar de Procesos Termales*. Segunda Edición. New York : John Wiley & Sons, In., 1991. ISBN 0471510564.
48. IPCC, Grupo Técnico V del. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *ONU, UNEP y PNUMA*. [En línea] Abril de 2002. [Citado el: 14 de Mayo de 2010.] www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf. ISBN 92-9769-104-7.
49. Subcomité de Calentadores Solares, del Comité Técnico de Normalización Nacional para Energía Solar. NMX-ES-001-NORMEX-2005. *NORMEX. La Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C.* [En línea] 14 de Octubre de 2005. [Citado el: 18 de Octubre de 2010.] www.sitiosolar.com/NMX-ES-001-NORMEX%20-%202005.pdf.
50. ENERGYCOMSA. ENERGY WERNER PRODUCTS (Lima, Perú). *ENERGY WERNER PRODUCTS*. [En línea] Energía & Telecomunicaciones. [Citado el: 07 de Mayo de 2010.] www.mfesoftware.com/pe/partners/energycom/productos.htm.
51. *Engineering and Environmental Assessment of the Potential of Solar Power Plants in the Central Karakum*. Pendzhiev, A.M. 1, Geliotekhnika, Russia : Allerton Press, Inc., 23 de Noviembre de 2009, *Applied Solar Energy*, Vol. 46, págs. 71 - 76. www.springerlink.com/content/hv6xt55830n8tx10/. ISSN 0003-701X.
52. Arias, Omar Gil. Modelo y Simulado de Dispositivos Fotovoltaicos. *Universidad de Puerto Rico*. [En línea] Diciembre de 2008. [Citado el: 25 de Agosto de 2010.] grad.uprm.edu/tesis/gilarias.pdf.



53. Ortiz Rivera, Eduardo I. Analytical Model for a Photovoltaic Module using the Electrical Characteristics provided by the Manufacturer Data Sheet. [aut. libro] Book Group Author IEEE. *2005 IEEE 36th Power Electronic Specialists Conference (PESC)*. s.l. : Book Series: IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE RECORDS, 2005.
54. Florida Solar Energy Center (FSEC STANDARD). Test Method for Photovoltaic Module Power Rating. *FSEC Standard 202-10*. [En línea] Enero de 2010. [Citado el: 25 de Agosto de 2010.] www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/standards/FSECstd_202-10.pdf.
55. Ortiz Rivera, Eduardo Iván. Modeling and Analysis of Solar Distributed Generation. *Michigan State University*. [En línea] 2006. [Citado el: 25 de Agosto de 2010.]
56. Fernández, Herman, y otros. Modelo genérico de celdas fotovoltaicas. *Scielo. Universidad, Ciencia y Tecnología*. [En línea] Julio de 2008. [Citado el: 25 de Agosto de 2010.] Vol. 12, No. 48. pp 157 - 162. www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S1316-48212008000300006&script=sci_arttext. ISSN 1316-4821.
57. Asociación Mexicana de Energía Eólica. Panorama General de la Energía Eólica en México. *AMDEE*. [En línea] 2010. [Citado el: 01 de Julio de 2010.] www.amdee.org.
58. Energías Renovables para todos. Energías Eólica. *Energías Renovables para todos*. [En línea] [Citado el: 26 de Julio de 2010.] www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_EOLICA.pdf.
59. Ramírez, Jenine. Corrientes Oceánicas. *Ciencias Terrestres*. [En línea] Abril de 2006. [Citado el: 29 de Julio de 2010.] cremc.ponce.inter.edu/2daedicion/articulo2.htm.
60. Danish Wind Industry Association. www.windpower.com. *Rugosidad y cizallamiento en recursos eólicos*. [En línea] Copyright 1997-2003 Asociación danesa de la industria eólica, 7 de Mayo de 2003. [Citado el: 28 de Julio de 2010.] www.talentfactory.dk/es/tour/wres/shear.htm.
61. Hau, Erich. *Wind Turbines*. [trad.] Horst von Renouard. Segunda edición. Berlín : SPRINGER, 2005. págs. 146 y 462-463. ISBN 3-540-24240-6.
62. Biosol. Solar Biosol. *Galería fotográfica*. [En línea] icomers, 2010. [Citado el: 29 de Junio de 2010.] www.biosol.com.mx/upload/image/big/16.01.jpg. Wind Resource Map.
63. Burton, Tony. *Wind Energy Handbook*. England : John Wiley & Sons Inc., 2001. págs. 42-45. ISBN 0 471 48997 2.
64. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Energy Managment Agency, Intelligent Energy Europe. *El recorrido de la energía eólica*. [En línea] 1, 2002. [Citado el: 26 de Julio de 2010.] www.madrid.org/cs/. B-41681-2002.



65. Comisión Federal de Electricidad. 3er. Coloquio Internacional sobre oportunidades para el desarrollo de la Ventosa, Oaxaca, México. *Proyecto Eólico de 50 MW*. [En línea] CONUEE, Octubre de 2002. [Citado el: 01 de Julio de 2010.] www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/2181/1/images/cferct.pdf.
66. Moreno Figueredo, Conrado. Distribución de los aerogeneradores en un parque eólico. *Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER)*. [En línea] [Citado el: 26 de Julio de 2010.] www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia41/HTML/Articulo03.htm.
67. Cesáreo Gómez de León, Félix. *Tecnología del Mantenimiento Industrial*. Primera Edición. Murcia : Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones, 1998. págs. 56-57. ISBN84-8371-008-0.
68. Ing. Borja Díaz, Marco A. Instituto de Investigaciones Eléctricas. *División de Energías Alternas*. [En línea] Anexo 5, Julio de 2005. [Citado el: 02 de Agosto de 2010.] www.energia.gob.mx/webSener/res/168/A5_Eolica.pdf.
69. CIEMAT. Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas. *Investigación en materias de energía y de medio ambiente, así como en multiples tecnologías de vanguardia*. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2010.] www.ciemat.es/portal.do?IDM=141&NM=4.
70. Energías Renovables para todos. Biomasa. *Energías Renovables para todos*. [En línea] [Citado el: 11 de Agosto de 2010.] www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_BIOMASA.pdf.
71. Red Mexicana de Bioenergía. Red Mexicana de Bioenergía. [En línea] 2010. [Citado el: 18 de Agosto de 2010.] www.rembio.org.mx/.
72. Comisión Nacional para el uso eficiente de la energía. Energía de la biomasa. *Fuentes Renovables de Energía*. [En línea] CONUEE, 9 de Junio de 2010. [Citado el: 11 de Agosto de 2010.] www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_622_energia_de_la_biomasa.
73. PNUD, IIE, CONUEE, SENER. Guía de gestiones para implementar en México plantas de generación eléctrica que utilicen energías renovables. [En línea] [Citado el: 17 de Agosto de 2010.] www.layerlin.org/pdfs/guia.pdf.
74. Aguillón Martínez, Javier. Seminario sobre la situación actual y prospectiva energética en México y el Mundo. *Energía de Biomasa*. [En línea] 5 de Agosto de 2009. [Citado el: 17 de Agosto de 2010.] www.ai.org.mx/archivos/seminarios/situacion-actual-prospectiva-energetica/Mesa-3/Energia%20de%20Biomasa.pdf.
75. Inclán Gallardo, Ubaldo. Energías Renovables en México, Potenciales de aprovechamiento e iniciativas actuales. *Dirección de Energías Renovables y Medio Ambiente*. [En línea] 1 de Abril de 2004. [Citado el: 19 de Agosto de 2010.] www.fina-



nafi.org/contenu/partages/presentConf04/Inclan_SENER.ppt+inclan+sener+Energ%C3%ADas+Renovables+en+M%C3%A9xico+Potenciales+de+aprovechamiento+e+iniciativas+actuales&cd=1&hl=es&ct=cl.

76. Mata, Juan C. y Fernández, José L. Potencial Energético de Residuos Sólidos Urbanos y Desechos Pecuarios dentro de la Política Energética de México. [En línea] Junio de 2003. [Citado el: 19 de Agosto de 2010.] www.bioenergy-lamnet.org/publications/source/mex/PPT-WG2-1-Mata-LAMNET-WS-Morelia.pdf.

77. Energías Renovables para todos. Biocarburantes. *Energías Renovables para todos*. [En línea] [Citado el: 13 de Agosto de 2010.] www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_BIOCARBURANTES.pdf.

78. *Estimación de la Generación de Energía a partir de Biomasa para proyectos del Programa de Mecanismos de Desarrollo Limpio*. Flores, R., y otros. [ed.] Universidad Autónoma Metropolitana. 1, México : Red de Revistas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, 31 de Enero de 2008, Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 7, págs. 35 - 39. redalyc.uaemex.mx/pdf/620/62070105.pdf. ISSN: 1665 - 2738.

79. Mujal Rosas, Ramón M. *Tecnología eléctrica*. [ed.] Universidad Politécnica de Catalunya. Tercera edición. Barcelona : Edicions UPC, 2003. págs. 321 - 325. ISBN: 84.8301-716-4.

80. *Bioenergy and the potential contribution of agricultural biotechnologies in developing countries*. Ruane, John, Sonnino, Andrea y Agostini, Astrid. Roma, Italia : s.n., 8 de Mayo de 2010, Biomass and Bioenergy, Vol. 34, págs. 1427 - 1439.

81. Tratimex, S.A. de C.V. Proyecto Tizayuca. *Tratamiento eficiente del estiércol y depuración de aguas de Tizayuca (México)*. [En línea] Octubre de 2002. [Citado el: 30 de Agosto de 2010.] www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/7116/8/ricardoromero.pdf.

82. SEISA, Sistemas de Energía Internacional S.A de C.V. Aprovechamiento de los desechos sólidos municipales para la generación de Energía Eléctrica. [En línea] 2002. www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/7116/8/jorgegutierrez.pdf.

83. Ministerio de Medio Ambiente; Ministerio de Educación y Ciencia; Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte. *Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel*. [En línea] 2006. [Citado el: 17 de Agosto de 2010.] www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Analisis%20de%20Ciclo.%20biodies el.pdf. ISBN 84-8320-376-6.

84. BiodiSol. La Producción de Biodiésel. [En línea] [Citado el: 02 de Septiembre de 2010.] www.biodisol.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel-definicion-de-biodiesel-materias-primas-mas-comunes/la-produccion-de-biodiesel-materias-primas-procesos-calidad/.



85. EUR-Lex. El acceso al Derecho de la Unión Europea. *Artículo 1*. [En línea] [Citado el: 16 de Agosto de 2010.] eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31985L0210:ES:HTML.31985L0210.
86. Fernández Polanco, F., Fernández Polanco, M. y García Encina, P.A. Criterios para la selección de tecnología de digestión anaerobia de residuos sólidos. *Biblioteca Virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental*. [En línea] [Citado el: 26 de Agosto de 2010.] El trabajo forma parte del proyecto REN20012-049/TECNO del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España.. www.bvsde.paho.org/bvsacd/unam7/criterios.pdf. REN20012-049/TECNO.
87. Ingeniería Ambiental, Facultad de Química, UNAM. (Grupo del Dr. Alfonso Durán Moreno). Compostaje Anaerobio, Gasificación, Pirólisis y Plasma. *Identificación de tecnologías aplicables a los proyectos de residuos sólidos urbanos*. [Documento electrónico]. Distrito Federal, México : s.n., Febrero de 2010. págs. 1 - 7. Proyecto BANOBRAS, Torre de Ingeniería, UNAM.
88. SEDESOL. Manual Técnico - Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal. *Subsecretaría de desarrollo urbano y vivienda*. [En línea] 2001. [Citado el: 28 de Agosto de 2010.] pp. 101 - 105. www.bajacalifornia.gob.mx/spa/servicios/residuos_solidos/manual_tecnadmvo.pdf.
89. SITA Environmental Trust; Juniper; Assurre. Mechanical-Biological-Treatment: A Guide for Decision Makers Process, Policies and Markets. *The Summary Report*. [En línea] www.wastereports.com/free_downloads/MBT_report_download_page.html.
90. Centro Nacional de Producción más Limpia. Universidad Pontificia Bolivariana. La incineración de residuos sólidos, inertes y peligrosos. *Los residuos como combustibles. Sistemas de Conversión Energéticos*. [En línea] Julio de 2002. [Citado el: 19 de Agosto de 2010.] www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID8.pdf.
91. Secretaría de Desarrollo Social. NOM-043-ECOL-1993. *Norma Oficial Mexicana*. [En línea] 22 de Octubre de 1993. [Citado el: 28 de Agosto de 2010.] www.sma.df.gob.mx/simat/emisiones/emi_con_atm_043.pdf.
92. Circeo, Louis, Martin, Robert C. y Smith, Michael E. Achieving "Zero Waste" with Plasma Arc Technology. *Plasma Applications Research Program*. [En línea] www.p2pays.org/ref/03/02918.ppt+Circeo,+Louis+J.,+Jr,+Robert+C.Martin+y+Smith,+Michael+E.+Georgia+Tech+ResearchInstitute.&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=mx.
93. *Estimating the bioenergy potential of Pinus radiata plantations in Chile*. Acuña, Eduardo, y otros. 1, Chile : Pontificia Universidad Católica de Chile, 2010, Ciencia e Investigación Agraria, Vol. 37, págs. 93 - 102. www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-16202010000100009&script=sci_arttext. ISSN 0718-1620.
94. Pous, Jaume y Jutglar, Lluís. *Energía Geotérmica*. Barcelona : Ediciones Ceac, 2004. Energías Alternativas y Medio Ambiente. ISBN: 84-329-1061-9.



95. Energías Renovables para todos. Energías Geotérmica y del Mar. *Energías Renovables para todos*. [En línea] [Citado el: 9 de Diciembre de 2010.] www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_GEOTERMICA.pdf.
96. Gupta, Harsh y Roy, Sukanta. *Geothermal Energy, an alternative resource for the 21st century*. Primera edición. Oxford : Elsevier, 2007. pág. 19. ISBN-13: 978-0-444-52875-9 ISBN-10: 0-444-52875-X.
97. González González, Miguel Alejandro. Centro de Geociencias. *Geotermia como alternativa energética en México, ¿es realmente viable?* [En línea] 2010. [Citado el: 11 de Noviembre de 2010.] www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/treMiguelGG09.pdf.
98. Llopis Trillo, Guillermo y Rodrigo Ángulo, Vicente. Guía de la Energía Geotérmica y Anexo. [En línea] [Citado el: 05 de Enero de 2011.] www.fenercom.com/Publicaciones/Geotermia.pdf.
99. Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Informe 1 de la Gerencia de Geotermia*. Gerencia de Geotermia. Ciudad de México : Instituto de Investigaciones Eléctricas. pág. 27. www.iie.org.mx/geotermia/informe1.doc.
100. *International Division*. Ruggero Bertani, Enel. [ed.] Vía Dalmazia. Rome, Italy : s.n., 2007, Renewable Energy Business Development, Vol. 15, págs. 8-19. geoheat.oit.edu/bulletin/bull28-3/art3.pdf.
101. Gobierno de España y Ministerio de Ciencia e Innovación. La energía geotérmica y los yacimientos geotérmicos. *Instituto Geológico y Minero de España*. [En línea] [Citado el: 15 de Diciembre de 2010.] www.igme.es/INTERNET/Geotermia/inicio.htm.
102. *Aproximación a la Hidrodinámica de los sistemas hidrotermales*. Navarro, A., y otros. 3-4, Madrid : Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en el Museo Nacional de Ciencias Naturales, 23 de Diciembre de 1994, Estudios Geológicos, Vol. 50, págs. 189-199. Doi:10.3989/egeol.94503-4317.
103. Geothermal Education Office. Geothermal Energy - Worldwide - México. [En línea] 23 de Diciembre de 2000. [Citado el: 11 de Noviembre de 2010.] geothermal.marin.org/geomap_1.html.
104. Catamutun. El Mercado Mundial del Carbón. *Catamutun*. [En línea] [Citado el: 09 de Diciembre de 2010.] www.catamutun.com/produccion/carbon/mundo.html.
105. 4 Alternatives. Base de conocimientos de energías renovables. *Roca caliente seca: el futuro de la energía geotérmica*. [En línea] 15 de Febrero de 2004. [Citado el: 05 de 01 de 2011.] www.4alternatives.net/conocimientos/index.php/espanol/otras-fuentes/690-roca-caliente-seca-el-futuro-de-la-energia-geotermica.



106. Massachusetts Institute of Technology. The Future of Geothermal Energy. *Impact of Enhanced Geothermal Systems [EGS] on the United States in the 21st Century*. [En línea] [Citado el: 18 de Enero de 2011.] www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_geo_energy.pdf. ISBN: 0-615-13438-6.
107. MHyLab. ESHA. *MHyLab*. [En línea] Febrero de 2007. [Citado el: 02 de Junio de 2011.] www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/publications/TN_FAQ_Es.pdf.
108. World Commission On Dams. Represas y Desarrollo: Un nuevo marco para la toma de decisiones. *Informe de la Comisión Mundial de Represas*. [En línea] World Commision, 16 de Noviembre de 2000. [Citado el: 6 de Febrero de 2011.] www.dams.org/report/wcd_informe.htm. ISBN 1-85383-798-9.
109. Ingeniería, Estudios y Proyectos NIP, S.A. División de Investigación y Recursos. *Minihidráulica en el país Vasco*. [En línea] Noviembre de 1995. [Citado el: 11 de Febrero de 2011.] www.eve.es/docpubli/ERen-MPV.PDF. ISBN 84-8129-032-7.
110. *Transparencia para todos, Energía Marina*. Luis, Merino y Mosquer, Pepa. [ed.] Energías Renovables. 106, Madrid : Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias., Diciembre de 2011, Energías Renovables, Especial: Energías del Mar, Vol. 1, pág. 65. www.energias-renovables.com/publico/revista_digital.php?nrevista=575&title=Revista%20digital%20N%C3%BAmero%20106Diciembre%202011%20/.
111. Zavala, Jorge, y otros. Caracterización y regionalización de los procesos oceanográficos de los mares mexicanos. *Procesos oceanográficos*. [En línea] CONABIO. [Citado el: 26 de Enero de 2013.] www.conabio.gob.mx/gap/index.php/Procesos_oceanogr%C3%A1ficos.
112. Comisión Federal de Electricidad. Energía Solar. *Desarrollo Sustentable*. [En línea] www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/Desarrollo_Sustentable/energiarenovable/Paginas/Energiasolar.aspx.
113. Fundación EcoAndina. Fundación EcoAndina. *Soluciones Sustentables*. [En línea] Ecoandina.org, 2010. [Citado el: 23 de Junio de 2010.] www.ecoandina.org/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1.
114. *Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies*. Lunghi, Piero y Bove, Roberto. Perugia, Italia : ELSEVIER, 2006, Energy Conversion & Management, Vol. 47, págs. 1391–1401. doi:10.1016/j.enconman.2005.08.017.



Glosario y acotaciones

Absortancia:	O coeficiente de absorción, es la energía absorbida con relación a la recibida.
Ariete:	Bomba de chorro de agua que actúa por choque. Golpe de ariete: la bomba levanta agua empleando la fuerza que se genera cuando una masa de agua en movimiento se detiene repentinamente.
ACB:	Análisis Costo Beneficio.
Armónicos:	Distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.
Artículo (No):	Los artículos descritos en el presente trabajo, corresponden a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, de 1917. A menos de indicarse otro documento de referencia en el texto. Éstos son vigentes a la fecha de elaboración del documento.
Central Termoeléctrica:	La energía termoeléctrica resulta al liberar calor de un combustible. Utiliza como combustibles, productos fósiles, átomos de uranio, productos nucleares y energía solar. El calor liberado se emplea en un ciclo termodinámico convencional o en un ciclo combinado para mover un alternador y producir energía eléctrica
CFE:	Comisión Federal de Electricidad. Tiene por objeto la planeación del Sistema Eléctrico Nacional, así como, la generación, conducción, transformación, distribución y venta de energía eléctrica para la prestación del servicio público y la realización de todas las obras, e instalaciones que se requieran para el cumplimiento de su objeto.
Ciclo combinado:	Ciclo en la generación de energía donde co-existen dos ciclos termodinámicos en un mismo sistema; el primero tiene como fluido de trabajo, vapor de agua; y el segundo tiene como fluido de trabajo algún gas, producto de una combustión.
Ciclo Rankine:	Ciclo termodinámico en el que se relacionan el consumo de calor con la producción de trabajo.
Cogeneración:	Proceso mediante el cual, simultáneamente se obtiene energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente).
Combustibles fósiles:	Petróleo, carbón y gas natural.
CONACyT:	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
CONAPO:	Consejo Nacional de Población
Conducción:	Transferencia de calor a través del medio por la interacción molecular o atómica dentro del mismo.
CONUEE:	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Fomenta el ahorro y la eficiencia energética mediante la implementación de medidas de ahorro y el uso de energías alternativas.
Convección:	Transferencia de calor por la cual las moléculas se mueven de un lugar a otro dependiendo de su temperatura y por lo tanto de la densidad. Es el mecanismo más importante en los gases y los fluidos.
Costos de bioenergía:	Las ecuaciones de los costos de la tecnología de Bioenergía (capítulo 2.3) los resultados obtenidos son C_{inv} [MX\$/ton año] y $C_{O\&M}$ [MX\$/ton tratada año].



Costo nivelado de generación:	El costo nivelado de generación de un kWh es un indicador comparativo de la competitividad de una tecnología con respecto de otra, ya que evalúa económica y financieramente las distintas tecnologías para generar energía eléctrica. Su valor corresponde a la suma de los costos de inversión (CI), combustible (CC) y operación y mantenimiento (COM), dividida entre la generación durante la vida útil de la planta.
CRE:	Comisión Reguladora de Energía. Regula las industrias de gas natural y electricidad, otorga permisos para productores externos, aprueba contratos para la producción, y calcula contraprestaciones para los productores, asegurándoles el pago justo por su servicio energético.
Desarrollo sustentable:	Desarrollo actual que no compromete ni entorpece el desarrollo futuro.
Dendroenergía:	Energía generada en la combustión de la madera, la cual es especialmente apta para generar energía eléctrica. (Plantaciones energéticas o dendroenergéticas).
ER:	Energías Renovables.
Estado Supercrítico:	Estado intermedio entre líquido y gas.
Factor de capacidad:	Horas anuales de operación frente al total de horas posibles.
Fuentes de energía:	Sistema cuyo contenido energético es susceptible de ser transformado en energía útil.
FIDE:	Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica: organismo privado no lucrativo, creado para promover acciones que induzcan y fomenten el ahorro y uso racional de la energía eléctrica. El Comité Técnico del FIDE, está integrado por CFE, SUTERM, CONCAMIN, CANACINTRA, CANAME, CMI, CNEC y la CONUEE.
FIRCO:	Fideicomiso de Riesgo Compartido: establecido por SAGARPA, promueve la implantación de energías renovables en zonas rurales.
Gas seco:	Proviene del gas natural pero se le extrajeron hidrocarburos pesados como el butano y el propano.
GEI:	Gases de efecto invernadero.
GEF:	Global Environmental Fund
Generador:	Persona física o moral capaz de generar electricidad a través de fuentes renovables de energía.
I&D:	Investigación y desarrollo.
IDEA:	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
IIE:	Instituto de Investigaciones Eléctricas.
IMP:	Instituto Mexicano del Petróleo.
Julio (J):	Unidad de energía en el Sistema Internacional (SI). Es la energía producida por la fuerza de un newton (unidad de fuerza) al desplazar su punto de aplicación un metro en su misma dirección y sentido. (Energía)
kilovatio-hora (kWh): kilowatt-hora	El trabajo realizado durante una hora por una máquina de potencia de 1 kilovatio. E.g., un aerogenerador que tenga una potencia nominal de 750 kW producirá 750 kWh de energía por hora de funcionamiento. Un kWh equivale a 3 600 000 Julios. (Producción).



LandGem:	Herramienta automatizada con una interface de Microsoft Excel que puede ser utilizada para estimar las tasas de emisión totales de los gases de vertedero (metano, dióxido de carbono, etc.)
LEAP:	Long – range Energy Alternatives Planning System, sistema de cómputo desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo, que analiza los problemas de energía y medio ambiente; diseñada para llevar a cabo una planeación energético – ambiental en forma integrada o para representar una cadena energética específica.
Método de las diferencias finitas:	Utilizado para calcular de manera aproximada soluciones a las ecuaciones diferenciales usando derivadas en una o más funciones.
Método de las características:	Utilizado para solucionar ecuaciones diferenciales parciales, consiste en reducir una ecuación diferencial parcial a una familia de ecuaciones diferenciales ordinarias.
Mosto:	Sustancia fermentable, zumo o bagazo.
MVA y MVAr:	MVA = Mega Volt Ampere, MVAr = Mega Volt Ampere Reactive
MWe y MWt:	Unidades de medición del output en una planta de generación. MWe significa la capacidad eléctrica instalada y MWt significa la capacidad térmica instalada.
1 MWh:	Equivale a 0.086 Tep (Tonelada equivalente de petróleo)
NOM:	Norma Oficial Mexicana.
O&M:	Operación y mantenimiento.
OECD:	Organisation for Economic Co-operation and Development. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PAH:	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
PEMEX:	Petróleos Mexicanos.
PNUD:	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
PNUMA:	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Proyectos Llave en Mano:	Es el desarrollo de proyectos completos, desde la ingeniería conceptual, básica y de detalle, hasta la realización de pruebas finales en la instalación, capacitación del personal y entrega del proyecto. El desarrollo se hace en conjunto con el cliente, mostrando en reuniones el avance y atendiendo a las sugerencias y modificaciones que se soliciten. Entre las ventajas de realizar un proyecto llave en mano se encuentran: reducción de tiempo en la ejecución del mismo, trato con sólo una constructora, reducción de costos de supervisión de obra, bonificación de un porcentaje del costo de la ingeniería, etc.
Radiación:	Transferencia de calor por radiación electromagnética, es decir sin contacto entre los cuerpos y en ausencia de un medio.
Reservas Probadas:	Cantidades de producto recuperable de campos conocidos que, por análisis de datos de geología e ingeniería, pueden ser estimadas con “razonable certeza”, bajo las condiciones económicas y operativas existentes.
Reservas No Probadas:	Cantidades de producto que están basadas en datos de geología y/o ingeniería, similares a los utilizados en las reservas probadas, pero que en sus aspectos regulatorios, técnicos, contractuales, y económicos, presentan incertidumbre. Se subdividen en probables y posibles.
Reservas Probables:	Reservas no probadas y que el análisis de datos de geología e ingeniería sugieren menos ciertas que las probadas. Si se utilizan métodos



	probabilísticos, debe existir al menos una probabilidad del 50 % de que la cantidad a ser recuperada será una buena porción.
Reservas Posibles:	Reservas no probadas y que el análisis de datos de geología e ingeniería sugieren menos ciertas a ser recuperadas que las probables. Si se utilizan métodos probabilísticos, debe existir al menos una probabilidad del 10 % de que la cantidad a ser recuperada será una buena porción.
SAGARPA:	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
SE:	Secretaría de Economía.
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social. Promueve proyectos para la explotación de las energías renovables.
SHCP:	Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
SEMARNAT:	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Expone las políticas de conservación de los recursos naturales y medio ambiente.
SENER:	Secretaría de Energía. Establece las líneas generales de política energética, asegura coherencia en la política energética nacional, planifica el desarrollo del sector, optimiza el uso de los recursos, y promueve las energías renovables aplicando a su vez un marco transparente, regulado por la SHCP.
SS:	Secretaría de Salud.
Suministrador:	Servicio público que brinda energía eléctrica a los distintos consumidores.
Sustentación:	Fuerza ejercida sobre un cuerpo que se desplaza a través un fluido, de dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente. Permite a las aeronaves con alas despegar, por ser mayor que el peso de la aeronave.
Syngas o gas de síntesis:	Gas combustible de PCI mediano o bajo, gas de síntesis cuya composición en volumen es 68 % N ₂ , 9.7 % CO ₂ , 1 % O ₂ , 7.3 % CO, 7 % H ₂ , 2.9 CH ₄ , 3.3 % C ₂ H ₄ , 0.8 % C _x H _x .
Turbina de gas:	Es una turbomáquina motora, cuyo fluido de trabajo es un gas, generalmente se usan en ciclos de potencia como los ciclos de refrigeración.
Tep:	Tonelada equivalente de petróleo: calor desprendido al quemar una tonelada de petróleo. En países desarrollados el consumo por persona al año es de 4 a 6.5 Tep por persona. Mientras que en los países no desarrollados, el consumo está por debajo de 0.2 Tep por persona.
tmca:	Tasa media de crecimiento anual
Watt, vatio (W):	Unidad de potencia en el SI. Es la potencia de una máquina que realiza el trabajo de 1 Julio en el tiempo de 1 segundo.



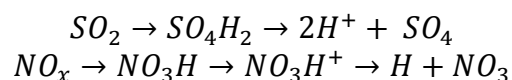
Anexos

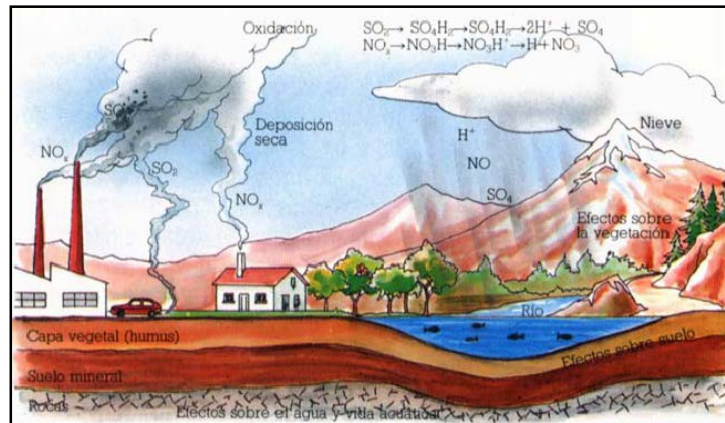
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN CONVENCIONALES:

- Térmico de lignito: combustible fósil de poder calorífico relativamente bajo, gran proporción de azufre y componentes inertes.
- Térmico de carbón: combustible fósil de mediano poder calorífico, bajo cuya denominación se incluyen mezclas de hullas y antracitas.
- Térmico de fuel-oil: derivado del petróleo, usado para generar electricidad.
- Térmico de gas natural: combustible fósil de alto poder calorífico.

IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES:

- Calentamiento global: proceso de aumento gradual de la temperatura de la Tierra a consecuencia del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, provocado por los procesos de combustión (con fines energéticos) de carburantes fósiles y por la deforestación.
- Disminución de la capa de ozono: de reducción, tanto en concentración como en grosor, de la capa de partículas de ozono presente en la estratosfera. Es consecuencia de la alteración del balance atmosférico de oxígeno y ozono, las emisiones de clorofluorocarbonos (CFC → hidrocarburo sintético utilizado como refrigerante) son las principales responsables de este impacto.
- Eutrofización: proceso de acumulación de nutrientes en las aguas con el consiguiente crecimiento masivo de organismos, fundamentalmente algas, y la disminución de la concentración de oxígeno.
- Sustancias carcinógenas: aquellas que favorecen la aparición del cáncer.
- Radiactividad: proceso por el cual los isótopos de elementos como el uranio, emiten espontáneamente partículas y/o rayos nocivos para los seres vivos.
- Acidificación: proceso de introducción de sustancias ácidas en el medio, provocado por las emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre y de nitrógeno provenientes principalmente de la quema de combustibles fósiles. Tras reaccionar con el vapor de agua presente en el aire, estos óxidos se convierten en compuestos ácidos que la lluvia precipita sobre la superficie terrestre.





- Contaminación por metales pesados: son aquellos que tienen un peso atómico relativamente alto y una densidad aproximada de 5 g/cm^3 . Regularmente son muy tóxicos, persistentes y bioacumulativos, tanto en el agua como en el aire y el suelo, por lo que su peligrosidad es muy elevada. Para la salud humana los más nocivos son plomo, cadmio y mercurio.
- Niebla de invierno: provocada por la elevada concentración en el aire de SO_x y partículas en suspensión provenientes de la industria y el transporte. Estas sustancias actúan como núcleos de condensación del vapor de agua a bajas temperaturas y humedad elevada, como ocurre en invierno.
- Residuos industriales: residuos producidos por la industria.
- Niebla fotoquímica o de verano: provocada por altas concentraciones de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV), acompañados de una fuerte radiación solar. Lo que genera alta concentración de ozono superficial.
- Residuos radioactivos: producidos por las centrales nucleares. Presentan trazas de radiactividad en concentraciones superiores a los valores establecidos por la NOM-035-NUCL-2000, límites para considerar un residuo como radiactivo.
- Agotamiento de los recursos energéticos: los recursos no renovables (combustibles fósiles y minerales) se van agotando a medida que son explotados, disminuyendo las reservas de los mismos. (7)

ECOPUNTOS Y ACV

La unidad utilizada para medir el impacto medioambiental en los sistemas de generación de electricidad es el llamado Ecopunto de Impacto o Ecopunto solamente. Para evaluar el impacto medioambiental, se otorga a cada tecnología o



sistema estudiado un valor total de ecopuntos por Terajulio de electricidad producido, o lo que es igual a 278 MWh. La unidad Ecopunto la inventó el departamento de Medio Ambiente del Gobierno Suizo y su utilidad entre los gestores medioambientales ha hecho que se generalice en todo el mundo.

Los ecopuntos son unidades de penalización ambiental, cuántos más ecopuntos obtenga un sistema de generación de electricidad mayor será su impacto ambiental, y viceversa, los sistemas con menos ecopuntos resultarán ser los más amigables con el medio ambiente. Si en un estudio se desea cuantificar los beneficios ambientales de un sistema, se puede utilizar esta unidad de medida, tomando en cuenta que para estos resultados el valor obtenido será negativo.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV) herramienta de gestión ambiental basada en la recopilación y evaluación, conforme a un conjunto sistemático de procedimientos, de las entradas y salidas de materias primas, energía y emisiones residuales; de tal manera que puedan identificarse los impactos ambientales atribuibles al proceso, producto o actividad, a lo largo de todo su ciclo de vida; es decir, desde que se genera hasta que se desecha o elimina. Las etapas del ACV según la norma ISO/DIS 14 040:1996, Gestión Ambiental, se muestran en la Figura 0.1:

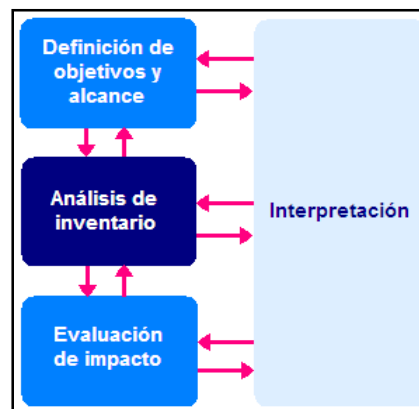


Figura 0.1 Etapas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Normalización de impactos:

Para que sea posible comparar categorías de impacto diversas y dispares se debe aplicar un factor de normalización a las cantidades resultantes de cada categoría de impacto, expresadas en su respectiva unidad de referencia. Este factor de



normalización se calcula a partir del volumen preexistente en el medio ambiente de cada uno de los compuestos contaminantes de referencia, exceptuando la cantidad aportada por el proceso evaluado. Logrando así ponderar la importancia que tiene el proceso estudiado con referencia al estado inicial del medio. El factor de normalización para cada tipo de impacto es el inverso del nivel preexistente de la sustancia equivalente por habitante, considerando 500 000 000 de habitantes.

Caracterización de impactos:

Se traducen las cantidades emitidas de cada sustancia contaminante a la unidad de referencia equivalente a su categoría de impacto, con el fin de medir sus respectivas contribuciones. Por ejemplo: la sustancia más representativa dentro de la categoría de impacto “calentamiento global” es el CO₂, éste se convierte en la unidad de referencia de dicha categoría. Lo significa que las cantidades del resto de las sustancias o compuestos contaminantes que contribuyen al calentamiento global se traducirán a unidades de CO₂; así un kilo de óxido nitroso equivaldrá a 270 kilos de CO₂, o lo que es igual, una unidad de este óxido contribuye 270 veces más al calentamiento global que la misma cantidad emitida de CO₂. En la Tabla 0.1 se muestran los factores de caracterización y de normalización para el cálculo de ecopuntos, en relación a los impactos medioambientales.

Tabla 0.1 Normalización y categorización para el cálculo de Ecopuntos.

Categoría de Impacto	Factores de caracterización [kg equivalentes]	Total Europa	Equivalente por habitante	Factores de normalización
Calentamiento global	CO ₂	6.50x10 ¹²	1.30 x10 ⁰⁴	7.69 x10 ⁻⁰⁵
Disminución Capa Ozono	CFC	4.60 x10 ⁰⁸	9.20 x10 ⁻⁰¹	1.09 x10 ⁰⁰
Acidificación	SO _x	5.60 x10 ¹⁰	1.12 x10 ⁰²	8.93 x10 ⁻⁰³
Eutrofización	Fosfatos	1.90 x10 ¹⁰	3.80 x10 ⁰¹	2.63 x10 ⁻⁰²
Metales Pesados	Pb	2.70 x10 ⁰⁷	5.40 x10 ⁻⁰²	1.85 x10 ⁰¹
Sustancias Carcinógenas	PAH	5.40 x10 ⁰⁶	1.08 x10 ⁻⁰²	9.26 x10 ⁰¹
Niebla de invierno	SO ₂	4.70 x10 ¹⁰	9.40 x10 ⁰¹	1.06 x10 ⁻⁰²
Niebla de verano	Eteno	8.90 x10 ¹⁰	1.78 x10 ⁰²	5.62 x10 ⁻⁰³



Evaluación de impactos:

Determina la importancia relativa de cada una de las categorías de impacto, consideradas a partir de la capacidad de los respectivos compuestos contaminantes de referencia para provocar algunos de los siguientes daños:

- Una muerte extra al año por millón de habitantes.
- Enfermedades importantes como consecuencia de períodos de niebla.
- 5 % de deterioro de los ecosistemas.

Cuanto mayor es la probabilidad de provocar estos daños, y por tanto, más urgente es la necesidad de reducir los impactos medioambientales, mayor es el factor de evaluación asignado a cada categoría de impacto. El factor de evaluación que se otorgará al impacto será igual que el factor de reducción que debe aplicarse para que no se presente alguno de los daños mencionados.

CÁLCULO DE ECOPUNTOS

Etapa incluida en el ACV, en la que se combina la información obtenida en las etapas anteriores, identificando los impactos producidos, evaluando y cuantificando los mismos en términos del daño medioambiental causado. Este daño medioambiental, se expresa en ecopuntos; los cuales se calculan para cada sustancia emitida a partir de la Ecuación 0.1 (7).

$$\begin{aligned}
 \text{Ecopunto} = & \text{Cantidad de sustancia emitida} \\
 & \times \text{Factores de caracterización} \\
 & \times \text{Factores de Normalización} \\
 & \times \text{Factores de Evaluación}
 \end{aligned}
 \qquad \text{Ecuación 0.1} \quad \text{Cálculo de Ecopuntos}$$

La evaluación con ecopuntos se lleva a cabo como se muestra en la Tabla 0.2:

Tabla 0.2 Evaluación con ecopuntos

IMPACTO OCASIONADO AL SISTEMA	NORMALIZACIÓN	EVALUACIÓN	RESULTADO
Entrada de Energía	$\frac{1}{\text{Valor objetivo}}$	$\frac{\text{Valor actual}}{\text{Valor objetivo}}$	Ecopuntos
Salida de CO ₂			Ecopuntos
Salida de SO ₂			Ecopuntos
Salida de plomo			Ecopuntos
Salida de CFC			Ecopuntos
Salida de residuos			Ecopuntos
			Total