



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Las microrredes energéticas en México,  
su impacto en el Sistema Eléctrico  
Nacional y perspectivas de uso**



Ing. Claudia Ivette González Hernández  
Coordinación de Titulación  
titulacion@fi@ingenieria.unam.mx

05/04/2022

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A**

Valverde Fortanel Luis Enrique

**DIRECTOR DE TESIS**

M. I. Rigel Gámez Leal



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## Índice

Lista de figuras .....	7
Lista de graficas.....	8
Lista de tablas .....	9
Introducción.....	1
1. Antecedentes .....	3
1.1. Problemática.....	3
1.2. Justificación.....	7
1.3. Objetivos y alcances.....	11
1.3.1. Objetivo general .....	11
1.3.2. Objetivos específicos.....	11
1.3.3. Alcances .....	11
2. Estado de la técnica de las microrredes.....	11
2.1. Concepto de microrred y principales elementos que la conforman.....	11
2.2. Configuraciones .....	17
2.3. Aplicaciones.....	21
3. Marco teórico del uso de las microrredes.....	22
3.1. Usuarios .....	22
3.2. Legislación .....	25
3.3. Propiedades y factores.....	28
3.3.1. Propiedades .....	28
3.3.2. Factores .....	30
3.4. Procesos de desarrollo.....	33
3.4.1. Tres fases en diseño de microrredes .....	33
3.4.2. Metodología de seis etapas .....	34
3.4.3. Desarrollo a nivel nacional .....	37
3.5. Modelos de evaluación.....	39
3.5.1. Infraestructura.....	39
3.5.2. Desarrollo de la capacidad de recursos humanos .....	40
3.5.3. Transferencia de tecnología.....	40
3.5.4. Análisis Económico.....	41
3.5.5. Evaluación de la confiabilidad .....	44
3.5.6. Despacho de Energía .....	44
3.5.7. Capacidad de atención.....	45
4. Tecnologías para microrredes .....	47
4.1. Generadores.....	47
4.1.1. Generadores de corriente continua .....	48
4.1.2. Generadores de corriente alterna (Alternadores).....	49
4.1.2.1. Generadores síncronos.....	50

4.1.2.2.	Generadores asíncronos .....	50
4.2.	Energías renovables.....	51
4.2.1.	Energía solar.....	52
4.2.1.1.	Criterios de integración para sistemas solares .....	53
4.2.1.2.	Energía solar térmica.....	54
4.2.1.3.	Energía solar fotovoltaica .....	55
4.2.1.3.1.	Elementos.....	56
4.2.1.3.2.	Ventajas e inconvenientes.....	58
4.2.2.	Energía eólica.....	58
4.2.2.1.	Aerogeneradores.....	59
4.2.2.2.	Micro-eólica.....	60
4.2.2.2.1.	Aspectos importantes del diseño .....	61
4.2.2.2.2.	Aplicaciones.....	62
4.2.2.2.3.	Ventajas e inconvenientes .....	63
4.2.3.	Energía geotérmica.....	63
4.2.3.1.	Roca Seca Caliente .....	64
4.2.3.2.	Clasificación de fuentes de energía geotérmica.....	65
4.2.3.3.	Ventajas e inconvenientes.....	65
4.2.4.	Energía hidroeléctrica.....	66
4.2.4.1.	Elementos .....	67
4.2.4.2.	La minihidráulica.....	69
4.2.4.3.	Ventajas e inconvenientes.....	70
4.2.5.	Energía oceánica.....	71
4.2.5.1.	Energía mareomotriz.....	72
4.2.5.1.1.	Ventajas e inconvenientes .....	73
4.2.5.2.	Energía undimotriz .....	74
4.2.6.	Bioenergía .....	74
4.2.6.1.	Tipos de biomasa .....	76
4.2.6.2.	Transformación de energía .....	76
4.2.6.3.	Ventajas e inconvenientes.....	77
4.2.7.	Sistemas híbridos.....	78
4.2.7.1.	Aplicaciones .....	78
4.3.	Celdas de combustible.....	79
4.3.1.	Estructura y funcionamiento.....	79
4.3.2.	Tipos de celdas .....	81
4.3.3.	Aplicaciones .....	83
4.3.4.	Ventajas .....	84
4.4.	Usos directos .....	84
4.4.1.	Solar .....	85

4.4.2.	Sector industrial.....	85
4.4.3.	Calefacción de distrito.....	85
4.4.4.	Bomba de calor.....	86
4.4.5.	Refrigeración por absorción .....	87
4.4.6.	Diseño bioclimático.....	88
4.4.6.1.	Criterios ambientales en edificaciones.....	89
4.5.	Cogeneración.....	89
4.5.1.	Clasificación .....	91
4.5.2.	Equipos de recuperación.....	92
4.5.2.1.	Calderas .....	93
4.5.2.2.	Intercambiadores y aprovechamiento de gases directos .....	93
4.5.2.3.	Sistemas de absorción.....	93
4.5.3.	Rendimiento y dimensionamiento .....	94
4.5.4.	Beneficios.....	95
4.5.5.	Trigeneración.....	96
4.6.	Hidrógeno.....	96
4.6.1.	Generación.....	97
4.6.1.1.	Electrólisis del agua .....	99
4.6.2.	Almacenamiento.....	100
4.6.3.	Aplicaciones .....	101
4.7.	Baterías y sistemas de almacenamiento de energía .....	102
4.7.1.	Características de las baterías .....	105
4.7.2.	Sistema de gestión de baterías .....	107
4.7.3.	Almacenamiento de energía para sistemas de potencia.....	107
4.7.3.1.	Baterías magnéticas (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES).....	108
4.7.3.2.	Supercapacitores (Advanced Capacitors) .....	109
4.7.3.3.	Volante de inercia (Flywheel Energy Storage - FES).....	110
4.7.3.4.	Almacenamiento de energía en aire comprimido (Compressed Air Energy Storage - CAES).....	111
4.8.	Software, instrumentación y control .....	112
4.8.1.	Gestión de una microrred electrotérmica.....	112
4.8.1.1.	Captura de datos y monitorización.....	112
4.8.1.2.	Control.....	113
4.8.1.3.	Análisis de datos .....	113
4.8.2.	Sistema de control y administración de microrredes .....	113
4.8.2.1.	Características de la comunidad.....	113
4.8.2.2.	Características del sistema .....	114
4.8.2.3.	Elaboración de procedimientos.....	114
4.8.2.4.	Arquitectura del Sistema Social SCADA .....	114
4.8.2.5.	Diseño de interfaces.....	115

4.8.2.6.	Flujo de información.....	116
4.8.2.7.	Sistema de comunicaciones .....	117
4.8.2.8.	Implementación del sistema.....	117
4.8.3.	Respuesta de la demanda.....	119
4.8.4.	Digitalización .....	119
4.9.	Transmisión y distribución.....	120
4.9.1.	Antecedentes .....	120
4.9.2.	Transmisión .....	122
4.9.3.	Distribución .....	122
4.9.3.1.	Tipos de sistemas básicos de distribución.....	124
4.9.3.2.	Conceptos sobre las cargas .....	125
4.9.3.3.	Factor de potencia.....	126
4.9.3.4.	Impacto ambiental y social .....	127
4.9.3.5.	Distribución para microrredes.....	127
4.9.3.5.1.	Alojamiento de la generación distribuida en las redes generales de distribución.....	128
4.9.3.5.2.	Modos de operación .....	128
5.	Principales impactos de las microrredes en los sistemas energéticos .....	130
5.1.	Trilema energético .....	130
5.2.	Dimensiones de la sustentabilidad .....	130
5.3.	Ambientales.....	133
5.3.1.	Impactos de las centrales de generación.....	134
5.3.2.	Rol de las microrredes .....	134
5.4.	Económicos.....	135
5.5.	Sociales .....	136
5.5.1.	Impacto social, factor clave para las microrredes.....	136
5.5.2.	Violaciones a derechos humanos por proyectos de energías renovables en México .....	138
5.5.3.	Propuestas para evitar nuevos conflictos sociales .....	139
5.6.	Relación de las microrredes en México con el Sistema Eléctrico Nacional.....	140
5.7.	Casos de estudio.....	142
5.7.1.	Internacionales.....	142
5.7.2.	Nacionales .....	146
6.	Tendencias y perspectivas del uso de las microrredes en los sistemas energéticos .....	146
6.1.	Prospectivas a nivel mundial a mediano y largo plazo.....	146
6.1.1.	Tendencias generales.....	146
6.1.2.	Mercado de las microrredes.....	148
6.1.2.1.	Estructura del mercado .....	148
6.1.3.	Almacenamiento.....	149
6.1.3.1.	Modelado, software y sistemas de almacenamiento inteligentes .....	149
6.1.3.2.	Nuevas tecnologías de almacenamiento de energía.....	150

6.1.3.3.	Otras aplicaciones .....	151
6.1.4.	Celdas de combustibles .....	151
6.1.5.	Prospecciones .....	152
6.2.	Prospectivas a nivel nacional a mediano y largo plazo. ....	153
6.2.1.	Escenario de transición energética.....	153
6.2.1.1.	Estado actual de la industria eléctrica y la generación mediante energías limpias .....	154
6.2.1.2.	Prospectiva y metas de mediano y largo plazo .....	155
6.2.1.3.	Escenarios del consumo final energético .....	156
6.2.1.4.	Metas de energías limpias y eficiencia energética .....	157
6.2.2.	Sectores relacionados con las microrredes .....	158
6.2.2.1.	Sector transporte .....	158
6.2.2.2.	Industria .....	159
6.2.2.3.	Comercio y agropecuario .....	161
6.2.2.4.	Residencial y edificaciones .....	162
6.2.3.	Tecnologías de las microrredes .....	164
6.2.3.1.	Solar.....	165
6.2.3.2.	Eólica .....	166
6.2.3.3.	Hidroenergía y energía del océano.....	167
6.2.3.4.	Geotérmica.....	167
6.2.3.5.	Bioenergía.....	168
6.2.3.6.	Redes inteligentes y generación distribuida.....	169
6.2.3.7.	Almacenamiento de energía.....	170
6.2.3.8.	Cogeneración .....	171
6.2.3.9.	Desarrollo e impacto social.....	171
7.	Discusión .....	173
7.1.	Análisis.....	173
7.2.	Propuestas de desarrollo y aplicación.....	176
	Conclusiones.....	178
	Referencias .....	180

## Lista de figuras

Figura 1 Esquema general de una microrred .....	13
Figura 2 Configuración de BUS en CD .....	18
Figura 3 Configuración de BUS en CD con cargas en CD.....	18
Figura 4 Configuración de BUS en CA .....	19
Figura 5 Control multinivel de un sistema eléctrico definido por la UCTE .....	28
Figura 6 Panorama de los principales componentes de una microrred .....	32
Figura 7 Proceso de diseño de una microrred .....	34
Figura 8 Diagrama de flujo de las metodologías de diseño de la microrred .....	36
Figura 9 Marco de la red eléctrica inteligente de alto nivel .....	43
Figura 10 Partes de un generador CD .....	48
Figura 11 Partes de un generador CA .....	49
Figura 12 Esquema simplificado de un generador trifásico .....	49
Figura 13 Generador asíncrono .....	51
Figura 14 Tipos de radiación .....	53
Figura 15 Posición y dirección del sol a lo largo del día.....	54
Figura 16 Efecto termosifón dentro de un calentador de agua.....	54
Figura 17 Colectores solares .....	55
Figura 18 Efecto fotovoltaico.....	56
Figura 19 Arreglo fotovoltaico y sus componentes .....	56
Figura 20 Conexión de sistema FV con baterías y conexión a la red .....	57
Figura 21 Molinos de viento tradicionales.....	58
Figura 22 Elementos de un aerogenerador .....	60
Figura 23 Distintos modelos de turbinas para aplicaciones micro-eolicas .....	62
Figura 24 Ejemplo de sistema hibrido .....	62
Figura 25 Presencia de la energía geotérmica en la naturaleza .....	63
Figura 26 Diagrama de una instalación geotérmica .....	64
Figura 27 Río Papaloapan, Tuxtepec Oaxaca .....	66
Figura 28 Central hidroeléctrica del Siglo XX.....	67
Figura 29 Diagrama de una central hidroeléctrica .....	69
Figura 30 Central minihidráulica .....	69
Figura 31 Energía termomotriz.....	71
Figura 32 Generación a partir de diferencia de salinidad.....	72
Figura 33 Partes de la marea .....	72
Figura 34 Funcionamiento de una central mareomotriz .....	73
Figura 35 Movimiento circular de las olas .....	74
Figura 36 Orígenes de la biomasa.....	75
Figura 37 Tipos de biocombustibles y su biomasa de origen .....	75
Figura 38 Proceso de gasificación .....	77
Figura 39 Producción de etanol por método biológico .....	77
Figura 40 Sistema hibrido con generación renovable y convencional.....	78
Figura 41 Celda de combustible comercial .....	79
Figura 42 Flujo y reacciones de los átomos en la celda de combustible (PEM).....	80
Figura 43 Diagrama simplificado de un sistema de potencia con celda de combustible .....	80
Figura 44 Proceso de conversión de energía a partir de una celda de combustible .....	84
Figura 45 Funcionamiento de una bomba de calor .....	86
Figura 46 Ciclo de absorción .....	87
Figura 47 Edificación con diseño bioclimático .....	89
Figura 48 Comparación entre generación convencional y cogeneración .....	91
Figura 49 Configuración para aprovechar gases residuales de un proceso (Sistema inferior) .....	92
Figura 50 Modelo de demanda y suministro de hidrógeno.....	97

Figura 51 Diagrama general de los métodos de producción de hidrógeno.....	98
Figura 52 Esquema de rutas de producción de hidrógeno renovable.....	99
Figura 53 Economía del hidrógeno a partir de fuentes renovables.....	100
Figura 54 Clasificación de las aplicaciones del hidrógeno.....	101
Figura 55 Rutas del "Power to gas", "Power to liquids" y "Power to heat".....	102
Figura 56 Batería de celdas en serie.....	103
Figura 57 Elementos de una batería.....	104
Figura 58 Sistema con baterías y energías renovables.....	104
Figura 59 Rangos de potencia contra el tiempo de descarga de los ESS.....	108
Figura 60 Componentes de un SMES.....	109
Figura 61 Funcionamiento interno de un supercapacitor.....	110
Figura 62 Instalación de un sistema CAES.....	111
Figura 63 Modelo de redes descentralizado.....	113
Figura 64 Flujo de información - Social SCADA.....	116
Figura 65 Arquitectura de comunicación.....	117
Figura 66 Estructura básica de un sistema eléctrico.....	123
Figura 67 Sistema radial.....	124
Figura 68 Sistema anillo.....	124
Figura 69 Sistema red o malla.....	125
Figura 75 Conexiones de los transformadores de distribución.....	126
Figura 76 Triángulo de potencias.....	126
Figura 78 Trilema energético.....	130
Figura 77 Aportes de las microrredes en caso de riesgos.....	131
Figura 79 Impacto ambiental proveniente del cambio de la valoración del medio ambiente.....	133
Figura 80 Distribución de fuentes de energía renovables en México.....	140
Figura 81 Sistemas de almacenamiento de energía según la relación densidad de potencia/densidad de energía.....	141
Figura 82 Plano de la microgrid de Sendai.....	145
Figura 83 Configuración de un sistema de almacenamiento de energía inteligente.....	150

### Lista de graficas

Gráfica 1 Generación de energía eléctrica por modalidad.....	17
Gráfica 2 Capacidad adicional por modalidad de generación solar.....	23
Gráfica 3 Consumo total mundial de energía por sector. 2015, 9 383.6 MMtep.....	24
Gráfica 4 Evolución en la capacidad instalada de tecnología solar Fotovoltaica en Generación Distribuida (MW).....	24
Gráfica 5 Capacidad de atención cuando aumenta la cantidad de generación aumenta el índice de desempeño.....	45
Gráfica 6 Capacidad de atención cuando aumenta la cantidad de generación disminuye el índice de desempeño.....	46
Gráfica 7 Capacidad de atención en el caso del índice de desempeño.....	46
Gráfica 8 Porcentajes de generación con energías limpias y renovables 2018.....	52
Gráfica 9 Aportación de las energías renovables a la matriz energética nacional.....	70
Gráfica 10 Estrategias de evaluación energética en edificaciones.....	88
Gráfica 11 Fuentes de energía a partir de las que se produce hidrógeno.....	97
Gráfica 12 Capacidad de energía instalada de microrredes en el mundo.....	143
Gráfica 13 Distribución de la generación eléctrica por tipo de tecnología, 2018.....	154
Gráfica 14 Capacidad instalada de energías renovables, 2002-2017 (MW).....	155
Gráfica 15 Escenarios del consumo final energético (PJ).....	156
Gráfica 16 Escenarios de demanda de energía eléctrica 2014-2050 (TWh).....	156
Gráfica 17 Trayectoria de progreso de la meta de generación con energías limpias en el SEN, 2019-2033 (%).....	157
Gráfica 18 Participación de combustibles del sector transporte por modalidad, 2017 (%).....	158
Gráfica 19 Comparación del consumo de energía del sector transporte 2014-2050 (PJ).....	159
Gráfica 20 Distribución del consumo de energía en la industria por fuente 1990-2017 (%).....	160

Gráfica 21 Distribución del consumo de energía del sector comercial y servicios 2000-2017 (%).....	161
Gráfica 22 Consumo de energía del sector comercial y servicios hacia 2050, comparación (PJ) .....	162
Gráfica 23 Distribución del consumo de energía por uso final en el sector residencial 2015 (%) .....	162
Gráfica 24 Consumo de energía del sector residencial por fuente hacia 2050 comparación, (PJ).....	163

## Lista de tablas

Tabla 1 Generación de energía eléctrica por tecnología .....	16
Tabla 2 Aplicaciones de las microrredes .....	22
Tabla 3 Consumo de energía en los sectores residencial, comercial y público. (PJ).....	23
Tabla 4 Medios de interconexión según la fuente de energía primaria .....	29
Tabla 5 Ventajas e inconvenientes del método “droop” .....	30
Tabla 6 Categorías de tecnologías de la REI.....	40
Tabla 7 Resumen de las ventajas evaluadas del programa de Redes Eléctricas Inteligentes.....	42
Tabla 8 Clasificación de la energía geotérmica .....	65
Tabla 9 Clasificación de acuerdo con su temperatura de funcionamiento, capacidad y la naturaleza del electrolito.....	83
Tabla 10 Lista de las principales necesidades térmicas que cubre la cogeneración.....	90
Tabla 11 Eficiencias típicas comparativas de generación y cogeneración .....	95
Tabla 12 Relación potencia del sistema con la tensión de las baterías a utilizar.....	105
Tabla 13 Indicadores de sostenibilidad de sistemas energéticos .....	133
Tabla 14 Segmentos de microrredes y factores principales que cubren una diversidad de aplicaciones.....	142
Tabla 15 Resumen de tecnologías renovables para microrredes .....	147
Tabla 16 Estatus del mercado de las microrredes .....	149
Tabla 17 Comparación de sistemas de almacenamiento de energía .....	151
Tabla 18 Metas de generación de energías limpias.....	157
Tabla 19 Metas de eficiencia energética .....	157
Tabla 20 Líneas de acción para la transición tecnológica y energética del sector transporte.....	159
Tabla 21 Líneas de acción para la transición tecnológica y energética de la industria.....	161
Tabla 22 Líneas de acción para la transición tecnológica y energética del sector de edificaciones.....	163
Tabla 23 Normas mexicanas de eficiencia energética .....	163
Tabla 24 Potencial de energías limpias.....	165
Tabla 25 Líneas de acción para la transición tecnológica en energías solar .....	166
Tabla 26 Líneas de acción para la transición tecnológica en energías eólica .....	166
Tabla 27 Líneas de acción para la transición tecnológica en hidroenergía y energías del océano.....	167
Tabla 28 Líneas de acción para la transición tecnológica en energías geotérmica .....	168
Tabla 29 Líneas de acción para la transición tecnológica en bioenergía .....	168
Tabla 30 Líneas de acción para la transición tecnológica en redes inteligentes y generación distribuida.....	170
Tabla 31 Líneas de acción para la transición tecnológica en almacenamiento de energía .....	170
Tabla 32 Líneas de acción para el desarrollo e impacto social .....	172

## Introducción

El sector energético es estratégico porque de él dependen otras industrias, servicios y sectores, hasta la capacidad de desarrollo de un país, razón por la cual muchas naciones destinan parte importante de su presupuesto a la investigación de éste. Por otra parte, no se puede negar el impacto ambiental que tiene este sector debido a sus altos índices de emisiones de gases de efecto invernadero, por lo cual es necesario el estudio de nuevas tecnologías que resuelvan este paradigma. En este sentido las microrredes funcionan como una alternativa que gracias al rápido avance de ciertas tecnologías como las energías renovables, se convierten en un tema relevante para su estudio a futuro.

Por lo anterior, este trabajo busca analizar las microrredes energéticas como una alternativa a las problemáticas que enfrenta el sector energético mexicano, considerando las tecnologías disponibles para establecer una prospectiva del uso de estos sistemas, así como una evaluación de su impacto en el Sector Eléctrico Nacional.

Esta investigación permitió hacer un análisis profundo de los temas abordados en torno a las microrredes. La información presentada se organizó como se explica a continuación.

El primer capítulo está enfocado a los antecedentes teóricos que justifican el desarrollo de este trabajo, de manera concreta se presenta la problemática a resolver, con un enfoque local cuando hablamos de la integración de las microrredes al SEN y con un enfoque global al hacer referencia al cambio climático como el gran reto que enfrentan todos los países del mundo, es importante mencionar que esta investigación tuvo una perspectiva sustentable por lo que la evaluación tiene los enfoques ambiental, económico y social, en adición al análisis técnico inherente de este trabajo. En adición se presentan los objetivos generales y específicos, así como los alcances con la intención de guiar su desarrollo y ayudar a definir los temas que se abordaron en los capítulos subsiguientes.

En continuación, se investigó y definió el estado de la técnica de las microrredes a lo largo del segundo capítulo. Desde las múltiples concepciones existentes según la fuente de consulta, los elementos clave que conforman las microrredes y las configuraciones que pueden tener, con lo cual se pudo desarrollar un panorama completo y actualizado sobre qué es una microrred. Además, se presentaron las distintas áreas de aplicación donde infieren las microrredes, información que se abordó a lo largo de los demás capítulos y que se relaciona con la intención de esta tesis que es reconocer a las microrredes como una posible solución para distintos sectores.

A su vez, en el tercer capítulo se desarrolló un marco teórico respecto al uso de las microrredes; en primer lugar se abarcó a los posibles usuarios y a la legislación correspondiente a estas tecnologías para el caso de México. De la misma manera se estudiaron elementos clave para la implementación de una microrred, dentro de los que resaltan las propiedades y factores a tomar en cuenta previo al diseño, algunas opciones de desarrollo que se podrían utilizar como guía y finalmente modelos de evaluación para conocer la efectividad de la microrred. Todo lo mencionado anteriormente fue retomado para el análisis final y para desarrollar las conclusiones encontradas.

A lo largo del cuarto capítulo se desglosaron las múltiples tecnologías que están ligadas con las microrredes, haciendo énfasis en las energías renovables como tecnologías de generación sin dejar de lado los generados convencionales conforme al contexto actual, también se consideraron tecnologías clave que nos son tan comúnmente abarcadas en la literatura de microrredes como los son las celdas de

combustible, la cogeneración, las tecnologías del hidrogeno y los usos directos, sin embargo éstas últimas ofrecen una abanico de soluciones más amplio y flexible. Consecuentemente también se abarcaron tecnologías que son medulares para las microrredes como los sistemas de almacenamiento, los dispositivos de instrumentación, comunicación y control, y de igual importancia los sistemas de distribución de energía eléctrica.

Un punto primordial de este trabajo es conocer como impactan las microrredes en los sistemas energéticos, lo cual se aborda en el quinto capítulo, se explicó cuáles son las dimensiones de la sustentabilidad, y a partir de esta información se dividieron los impactos en ambientales, económico y sociales, lo que permite tener una visión más amplia de la problemática y de las posibles soluciones que ofrecen las microrredes. De igual manera se hizo un desglose de cómo se relacionan las microrredes con el SEN, para finalmente presentar algunos casos de estudios a nivel nacional e internacional, lo que permitió conocer el nivel de implementación actual que tienen las microrredes en México y en el mundo.

El penúltimo capítulo estuvo enfocado en conocer las prospectivas de las microrredes a nivel nacional y mundial. A nivel mundial se hizo énfasis en algunas tecnologías y como estas esperan crecer en los próximos años, por otra parte, a nivel nacional se presentaron algunos escenarios de consumo energéticos, la importancia que pueden tener las microrredes en distintos sectores primordiales del país, además se retomó a las energías renovables como elementos clave y se presentaron algunas líneas de acción enfocadas a las microrredes y que permitirían una mayor penetración de estas tecnologías.

Por último, en el séptimo capítulo se desarrolló la discusión, se hizo un análisis de todos los capítulos previamente mencionados, haciendo énfasis en los hallazgos más importantes y de utilidad para la presente investigación, esto a su vez permitió crear propuestas de desarrollo e investigación con la intención de plantear una estrategia para trabajos futuros y poder solventar carencias y problemáticas de las microrredes sobre todo nivel nacional.

## 1. Antecedentes

### 1.1. Problemática

Los últimos reportes sobre cambio climático muestran que la acción humana sobre el planeta está dejando estragos de grandes proporciones, este cambio es contabilizado principalmente por el aumento de la temperatura global ya que se puede usar como un indicativo de los cambios que ha sufrido el mundo en las últimas décadas además de señalar los límites a los que debemos poner atención. Se ha establecido por parte de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) que la meta de la sociedad debe ser evitar un incremento de la temperatura superior a 2°C con respecto a los niveles preindustriales (Chacon, 2013), si no se toman enérgicas medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la concentración de los mismos podría duplicar los niveles preindustriales ya en 2035 ( HM Treasury , 2010), haciendo casi inevitable un aumento de las temperaturas promedio al límite mencionado, dicho aumento en la temperatura global representa a largo plazo un riesgo para la prevalencia de la vida humana en el planeta tal y como la conocemos. Según el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), el nivel del mar, si no se hace nada por contener el recalentamiento, podría elevarse entre 9 y 88 centímetros de aquí al año 2100 (de Castro, Ramis, Cotarelo, & Riechmann, 2005). Muchos estudios deducen de ese dato las cifras de desplazamientos forzados de población, los refugiados climáticos podrían ser 150 millones (de Castro, Ramis, Cotarelo, & Riechmann, 2005), por mencionar una consecuencia social del cambio climático. Peor aún representa una grave amenaza a la estabilidad de los distintos ecosistemas del mundo, donde las principales consecuencias ya se pueden ver reflejadas en pérdida de biodiversidad, solo en México en el caso de los animales, los grupos con más especies en riesgo son los reptiles (437 especies, es decir, 54.4% de las especies conocidas en el país para este grupo), las aves (367, 33.5%), los mamíferos (242, 45.2%), los anfibios (194, 53.7%) y los peces (203, 7.5%) (SEMARNAT, 2013), manifestación de climas extremos y desastres naturales, pérdida de recursos naturales entre los que destaca preocupantemente el agua potable, además de afectaciones a actividades económicas primarias como la agricultura y otras actividades sensibles al clima.

El cambio climático se presenta como una consecuencia de la contaminación, es decir la generación en exceso de gases de efecto invernadero. Desde 1750, año que habitualmente se considera como el inicio de las actividades industriales, las concentraciones atmosféricas globales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) han aumentado significativamente a causa de las actividades humanas. Los datos calculados para las últimas décadas indican que las emisiones mundiales de GEI (Gases de Efecto Invernadero) han aumentado entre 1970 y 2004 en un 70%. En concreto, para el caso del CO<sub>2</sub>, sus emisiones anuales en este periodo han crecido aproximadamente un 80%, representando en el año 2004 un 77% de las emisiones totales de GEI antropógenos. Los sectores que tuvieron una mayor influencia en este aumento, debido al desarrollo experimentado durante el periodo indicado, fueron los sectores de suministro de energía, transporte e industria, mientras que la vivienda y el comercio, la silvicultura (incluida la deforestación) y la agricultura, tuvieron un crecimiento más lento (Red Ambiental de Asturias , 2018). Añadiendo la generación de residuos sólidos que afectan los ciclos naturales de los ecosistemas y la explotación de zonas naturales importantes los cuales tienen la función de regular y amortiguar dicha contaminación. Se podría decir que estamos contaminado por encima de la capacidad de amortiguamiento del planeta y por ende se están generando todos los estragos anteriormente mencionados.

Es evidente que la industria energética es uno de los principales contaminantes en el mundo ya que de la misma dependen básicamente todas las actividades productivas de un país, por ende, su economía y finalmente el nivel de vida de su población, tan es así que una crisis en los combustibles puede interpretarse casi de manera directa como una crisis económica. Bajo esta visión de dependencia energética y en nombre del desarrollo se han estado explotando los yacimientos de combustibles fósiles dígase petróleo y gas natural con tal de mantener el ritmo de los procesos industriales. Según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2015, en México, del total de las emisiones, 64% correspondieron al consumo de combustibles fósiles; 10% se originaron por los sistemas de producción pecuaria; 8% provinieron de los procesos industriales; 7% se emitieron por el manejo de residuos; 6% por las emisiones fugitivas por extracción de petróleo, gas y minerías y 5% se generaron por actividades agrícolas (INECC, 2018).

En el caso de México una parte importante del presupuesto público depende justamente de la extracción y venta de hidrocarburos. La actividad del sector energético permitió al Estado financiar, en gran medida, el desarrollo del país. Buena parte de la infraestructura, la industrialización y la urbanización fueron posibles gracias a la contribución fiscal del sector energético, así como al suministro de energéticos baratos durante décadas y al impulso que otorgó al sector industrial mexicano, incluidos el sector de bienes de capital y a las empresas de ingeniería y construcción (Gil, 2009). Además, las actividades del día al día están ligadas con el consumo de dichos combustibles, desde la energía eléctrica que utilizamos, el transporte que nos lleva a nuestras escuelas o trabajos, también los productos que consumimos y utilizamos, todo esto tiene un coste energético y por lo tanto un impacto ambiental.

Aunque las energías renovables y en menor medida las energías limpias, se presentan como una alternativa de generación para satisfacer la demanda energética global, el rezago de impacto es notorio, esto quiere decir que la utilización de combustibles fósiles aun es predominante dentro del espectro energético mundial. La producción de energía en el mundo proviene, aproximadamente, un 86% de combustibles fósiles (Bester, 2018). En México, al cierre del primer semestre de 2018 la generación por fuentes limpias alcanzó 24.12 % (40,499.01 GWh), 17.29% correspondiente a fuentes renovables menos de un punto porcentual para cumplir la meta del 25 % de generación de energía limpia establecida por México. Las tecnologías que mayor crecimiento presentaron fueron la fotovoltaica, la eólica y la cogeneración eficiente contribuyendo a que la capacidad instalada por fuentes limpias se incrementara 11.84 % (2,550.41 MW) y la generación en 21.71 % con respecto al primer semestre del 2017 (SENER , 2018).

También debemos considerar que, si la explotación de hidrocarburos sigue la teoría de pico de Hubber, nos encontraríamos con una disminución en la oferta de hidrocarburos mientras la demanda de energía va en aumento (Bester, 2018). La transición energética está definida justamente como el cambio de las fuentes de origen para la obtención de energía, pasando de combustibles fósiles a fuentes de energías renovables. La transición energética presenta una serie de situaciones que podrían explicar por qué a pesar de conocer y argumentar científicamente las consecuencias de continuar utilizando combustibles fósiles, aun nos encontramos explotando dichos combustibles, principalmente porque un cambio de esa magnitud no se puede lograr a corto plazo y conlleva el compromiso de todos los actores de la sociedad, técnicamente los combustibles fósiles son mejores ya que pueden generar mayor potencia (Densidad de potencia (W/kg)) y tienen una mejor densidad de energía (Wh/kg), es decir ocupan un lugar privilegiado en un diagrama de Ragone en comparación a otras tecnologías alternativas (Calvo Antón, 2018), sigue

siendo más rentable entre otras consideraciones, que podrían ser políticas, económicas, financiera, tecnológicas e incluso culturales relacionadas con un cambio de régimen energético.

Una de las principales barreras técnicas para lograr la añorada transición energética, es la falta de infraestructura especializada, en el caso de México incluso dentro del sector eléctrico convencional es decir la generación a partir de las termoeléctricas y la distribución a través de las líneas del SEN se pueden encontrar deficiencias técnicas que sin duda afectan la calidad del servicio. Ahora hablando de las tecnologías de energías renovables sabemos que son sistemas más modernos que requieren de condiciones especiales para su correcta aplicación, y un considerable grado de financiamiento justamente por el alto costo de estas. El argumento anterior fue fuertemente utilizado para impulsar la Reforma Energética de 2014, que en números sí ha significado un aumento en proyectos de aprovechamiento de energías renovables, de los cuales nos estamos refiriendo principalmente a proyectos de alta potencia. según el reporte de Tendencias Globales en Inversiones en Energías Renovables 2018 (de UN Environment y Bloomberg New Energy Finance), en 2017 las inversiones en la materia aumentaron en un 810% vs. las de 2016. Este aumento se tradujo en 6,000 millones de dólares invertidos (sobre todo en las áreas de energía eólica y solar). Estamos hablando de más de 200 centrales de generación de electricidad, a través de energías renovables (ITPE, 2018).

Una de las desventajas de las energías renovables o mejor dicho de la aplicación de sus tecnologías para la generación a gran escala, es que su desempeño está restringido por las condiciones del entorno, esto significa que estas tecnologías solo pueden ser implementadas en ciertos lugares muy específicos, donde la cantidad de viento, sol, recurso geotérmico o mareomotriz sea lo suficientemente grande para ser aprovechado de manera eficiente. En realidad estos recursos pueden ser aprovechados prácticamente en cualquier lugar del globo donde se encuentren disponibles, sin embargo no en cualquier lugar se pueden generar la energía necesaria para hacer un aporte significativo al SEN, aunado a esto también se pueden presentar dificultades jurídicas o sociales, por ejemplo cuando hablamos de una zona natural protegida o de alguna comunidad indígena, e incluso puede haber complicaciones geográficas donde el espacio de generación está muy aislado y por lo tanto es complicado hacer la conexión al SEN, también se puede estar muy lejos de la zona de consumo y esto significa pérdidas importantes en la transmisión, además se deben tener en cuenta si la zona es propensa a desastres naturales que dañen considerablemente la infraestructura y las tecnologías a aplicar.

Es deber de las empresas del sector energético y especialmente aquellas de la rama eléctrica proveer un abastecimiento constante, de calidad y asequible para los usuarios. Esto significa que no debe haber sobrecargas, o pérdidas de energía, en realidad esto depende de muchos factores incluso de algunos que están fuera de la jurisdicción de las empresas. Lo que si podemos asegurar es que un sistema de generación, distribución y consumo centralizado como es el que se presenta actualmente en México, tiene la problemática de someter a los usuarios a confiar completamente en este sistema, lo que significa que no hay otras posibilidades de satisfacer dicha demanda y en caso de alguna falla no existe alternativa de solución más que el restablecimiento de la energía a través de este sistema único. Actualmente existen muchas fuentes de generación, tanto de empresas públicas como privadas, sin embargo, la transmisión y distribución corre a cargo completamente de CFE (Comisión Federal de Electricidad).

Los precios de los combustibles y de la electricidad mantienen una tasa de crecimiento, por ejemplo de septiembre de 2017 al mismo mes del 2018, la tarifa Gran Demanda en Media Tensión Horaria tuvo un incremento anual acumulado de 74% (Alegría, 2018), lo que significa que cada vez representan un gasto de mayor impacto en la economía familiar, pero también recordemos que son insumos básicos para la

industria por lo cual toda la cadena de producción se ve afectada por estos aumentos tarifarios que podrían significar en la pérdida de competitividad e incluso la disolución de empresas con poca resistencia a este tipo de cambios. Las fluctuaciones de los precios o de la disponibilidad de los recursos energéticos también son un tema para considerar, ya que habla de la confiabilidad con la que se pueden desempeñar ciertos procesos y brinda estabilidad en la producción de cualquier industria, incluso en la manera en la que se rigen sus finanzas ya que pueden saber el porcentaje de sus gastos que estará destinado a cubrir su consumo de energía.

La globalización de ciertas tecnologías y productos debe atenderse como una problemática mundial ya que significa que se está generalizando y normalizando el uso de ciertos dispositivos o sistemas cuando realmente no son los óptimos o incluso no son necesarios. Esto se puede ver reflejado en varios niveles de la vida humana, los casos más claros son el uso del automóvil, en 2017 la producción de vehículos fue de 4.068.415 unidades en México, lo que supone un crecimiento en la producción de un 13,09% (470.953 vehículos) respecto a 2016, en el que se fabricaron 3.597.462 automóviles (AMIA, 2018), en las tecnologías electrónicas como los celulares, computadoras y televisiones, es importante resaltar que muchas veces estas tecnologías tienen un alto consumo energético y por lo tanto su utilización representa un efecto sustancial para el ecosistema. Las regiones rurales tienen un menor consumo energético a comparación de las grandes urbes precisamente debido a que su estilo de vida no está tan ligado a estas tecnologías, a nivel nacional, el consumo per cápita de los hogares fue de 2926 MJ al trimestre en 2008, sin embargo también se observan importantes diferencias por tipo de localidades: los hogares urbanos consumen poco más del doble que los hogares rurales y aunque estos últimos han aumentado su consumo promedio en el tiempo, la brecha es todavía amplia (Sánchez, 2012). En el caso del consumo de energía, no existe una cultura del ahorro además de que las condiciones a veces no se prestan para hacer los cambios necesarios, somos dependiente de estas tecnologías para mantener nuestro estilo de vida, consumimos productos que tienen un alto valor energético desde su producción hasta el manejo de sus residuos. Todo esto es importante porque se puede generar la percepción de que ésta es la única forma cómo pueden ser las cosas y que por lo tanto no hay otras alternativas para la correcta utilización de la energía, incluso podríamos decir que a nivel social no se conciben otros modelos energéticos al actual, donde la generación se da de manera alejada al consumo. El ahorro energético no depende solamente de la eficiencia de las máquinas sino también de la planeación y gestión durante la implementación de estas tecnologías.

Otro de los efectos de este proceso de globalización tecnológica, es la ejecución de tecnologías fuera de contexto o poco especializadas cuando ya existen las alternativas de ahorro solamente que no se han introducido al mercado, para dar un ejemplo en el norte del país se utilizan sistemas de aire acondicionado de alto consumo, el que se sigan utilizando calentadores de gas cuando existen los calentadores solares, o simplemente que los materiales de construcción de una vivienda no empaten con las temperaturas de su entorno.

México se ha comprometido dentro del Acuerdo de París, como resultado de la Conferencia de las Partes (COP 21) de París, a cumplir con unos porcentajes de generación a partir de energías renovables, con la finalidad de disminuir la emisión de GEI. Actualmente esto se atiende a través de la Ley de Transición Energética que se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* el 24 de diciembre de 2015, la cual establece metas y obligaciones para las áreas de energías limpias y eficiencia energética. Los actores que deberán generar los reglamentos, programas y demás lineamientos que detallen las acciones e instrumentos para asegurar la correcta operación del sistema en estas áreas son, principalmente, la

Secretaría de Energía (SENER), la Comisión Reguladora de Energía (CRE), el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). En los transitorios de la Ley se mantienen las metas establecidas en leyes anteriores sobre el porcentaje de energías limpias en la generación eléctrica: 25% en 2018, 30% en 2021, y 35% en 2024 (Mulás del Pozo, 2019). Esto significa que en México se deben de implementar una serie de medidas que se direccionen a cumplir estas metas. Considerando la magnitud del compromiso se deben buscar distintas alternativas que permitan cumplir este fin, es decir que no podemos restringirnos a los modelos convencionales de generación a partir de renovables, incluso se necesita ir más allá de la generación y apostarle al ahorro de energía, además de otras formas de aprovechamiento y gestión de la energía.

## 1.2. Justificación

Aunque en los últimos años se han implementado una infinidad de programas con la finalidad de entender la problemática del cambio climático en distintos sectores, sería ingenuo asegurar que está situación está siendo correctamente atendida y gestionada, de hecho, en algunos casos podríamos decir que se está tomando una postura irresponsable por parte de algunos gobiernos o empresarios, además de las responsabilidades que le corresponden a la sociedad civil. También debemos considerar que la problemática del cambio climático es un conflicto sin precedentes, por lo tanto, no es posible tomar una postura concreta sobre cuáles deberían de ser las medidas correctas para atender estos problemas, estamos en un proceso de experimentación e innovación que nos da mucho material de trabajo a los ingenieros, para proponer nuevas tecnologías, procesos e incluso dinámicas de organización. Y a partir de los resultados obtenidos buscar escalar y replicar las soluciones que se presenten como las mejores alternativas y dan los mejores resultados. El sector energético juega un papel crucial en la dinámica de la sociedad actual, el desarrollo tecnológico que predomina en los centros de desarrollo está altamente condicionado a la energía disponible, esto significa que cada vez tenemos tecnologías que demandan mayores cantidades de energía, eso anudado con la explosión demográfica nos exige poner especial atención a este sector, para proponer mejores maneras de generar y administrar la energía para no llegar a un punto de crisis que afecte a los sectores más vulnerables de la sociedad y el medio ambiente.

Para que una tecnología sea sustentable debe cumplir varios puntos además de ser amigable con el medio ambiente, en términos generales podemos decir que también debe ser económicamente viable y socialmente responsable. Las microrredes pueden ser evaluadas desde estas tres aristas, ya que su nivel de aplicación permite enmarcar mucho más fácilmente cuáles son los límites de impacto de esta tecnología. A diferencia de las grandes redes eléctricas que suelen dominar en el sector, donde es muy complicado ver sobre qué poblaciones estamos teniendo un impacto positivo y en cuáles negativo, de hecho, al ser tan grandes se pueden generar ambos casos, lo mismo con el impacto ambiental, es difícil identificar todas las afectaciones que puede generar una obra de gran escala.

La generación distribuida juega un papel muy importante dentro de las microrredes, ya que es una de las principales alternativas para la generación de energía eléctrica, y por su naturaleza de distribución pueden adaptarse a distintos contextos, además de ser modulares por lo cual la escala de generación puede variar según las necesidades de los usuarios. Además la generación distribuida se presenta como la siguiente etapa a seguir cuando la generación a gran escala haya aprovechado los puntos geográficos clave a explotar, aunque no podemos ignorar el aporte que hacen las grandes plantas de generación a base de energías limpias, y que de hecho representa la mayoría de la generación aprovechada hasta el momento, debemos tomar en cuenta que la generación distribuida es mucho más flexible en cuanto a la localización,

y la energía producida se consume prácticamente en el punto de explotación y dentro del esquema de una microrred se evitan los problemas de distribución de la energía.

Las microrredes como alternativa a la gestión energética atienden directa o indirectamente algunos de los objetivos planteados en la Agenda de Desarrollo Sostenible propuesta por la Cumbre del Desarrollo Sostenible que reunió a 150 países con el objetivo de lograr un mundo sostenible para el año 2030 (ONU, 2019). Dentro de los principales puntos que incumben a las microrredes energéticas podemos encontrar:

- **7-Energía asequible y no contaminante.** Trabajar para alcanzar las metas de este objetivo es especialmente importante ya que afecta directamente a otros objetivos de desarrollo sostenible. Es vital apoyar nuevas iniciativas que aseguren el acceso universal a los servicios de energía modernos, mejoren el rendimiento energético y aumenten el uso de fuentes renovables para crear comunidades más sostenibles e inclusivas. La situación ha mejorado en la última década: la proporción de la energía renovable ha aumentado respecto al consumo final de energía gracias al uso de fuentes de energía como la hidroeléctrica, la solar y la eólica, y la proporción de energía utilizada por unidad de PIB también está disminuyendo. Sin embargo, el avance en todos los ámbitos de la energía sostenible no está a la altura de lo que se necesita para lograr las metas de este objetivo. Se debe aumentar el uso de energía renovable en sectores como el habitacional, de la calefacción y el transporte. Asimismo, es necesaria la buena disposición de los países para desarrollar nuevas tecnologías en una escala mucho más amplia.
- **9-Industria, innovación e infraestructura.** La creación de infraestructura es fundamental para lograr un desarrollo sostenible, empoderar a las sociedades de numerosos países, fomentar una mayor estabilidad social y conseguir ciudades más resistentes al cambio climático. Es importante considerar la emisión de dióxido de carbono en la industria, por lo cual la está obligada a buscar mejores alternativas energéticas durante los procesos de fabricación. El progreso tecnológico debe estar en la base de los esfuerzos para alcanzar los objetivos medioambientales, como el mejor aprovechamiento de los recursos y la eficiencia energética, por lo tanto, es necesario invertir más en tecnologías locales que se adapten a las condiciones de cada entorno para aumentar la eficiencia y mejorar los servicios. En la industria podemos ver que las pequeñas y medianas empresas que se dedican al procesamiento industrial y la producción manufacturera son los mayores creadores de empleos. Constituyen más del 90% de las empresas de todo el mundo y representan entre el 50 y el 60% del empleo, al tratarse de pequeñas o medianas empresas podrían apostarle a la creación de una microrred si ésta se adapta a sus niveles de consumo.
- **11-Ciudades y comunidades sostenibles.** En 2015, cerca de 4000 millones de personas vivía en ciudades y se prevé que ese número aumente hasta unos 5000 millones para 2030. Se necesita mejorar, por tanto, la planificación y la gestión urbanas para que los espacios urbanos del mundo sean más inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

Los problemas que enfrentan las ciudades se podrían resolver si reducimos la presión sobre la tierra y los recursos naturales de ciertas regiones, es decir que los espacios urbanos deben descentralizarse y asentarse en lugares donde se puedan aprovechar mejor los recursos, así como reducir la contaminación y la pobreza. El futuro optimista presenta ciudades de oportunidades, con acceso a servicios básicos, energía, vivienda, transporte y más facilidades para todos. Las

ciudades del mundo ocupan solo el 3% de la tierra, pero representan entre el 60% y el 80% del consumo de energía y el 75% de las emisiones de carbono, esto significa que estamos concentrando todo nuestro consumo energético en muy poco espacio, las microrredes energéticas ofrecen como alternativa servirse del espacio vacío y aprovechar los recursos energéticos de esas zonas, a través de distintas tecnologías y gracias a esto poder satisfacer la demanda de servicios básicos y otras necesidades, lo cual permitiría tener una vida digna sin necesidad de habitar en las grandes ciudades.

- **13-Acción por el clima.** El cambio climático afecta a todos los países en todos los continentes, produciendo un impacto negativo en su economía, la vida de las personas y las comunidades. El cambio de actitudes se acelera a medida que más personas están recurriendo a las energías renovables y a otras soluciones para reducir las emisiones y aumentar los esfuerzos de adaptación. El cambio climático es un reto global que no respeta las fronteras nacionales, por lo cual la cooperación internacional es necesaria, pero en el caso del sector energético las soluciones deben estar más contextualizadas, por lo tanto, partir de lo local y lo micro hace mucho sentido si queremos resolver los problemas climáticos y energéticos del país.

Siguiendo la línea de los acuerdos internacionales, sabemos que México se comprometió en el Acuerdo de París a desarrollar un proceso de transición energética con finalidad sustituir las fuentes de energía fósiles por fuentes de energía renovables, para lograr estos objetivos debemos hacer énfasis en las distintas formas de utilización de las energías renovables, de las cuales podemos destacar la generación a pequeña escala que puede aprovechar la energía solar en espacios reducidos, utilizar el recurso geotérmico de baja entalpia o pequeñas diferencias de oleaje. Los usos directos son un complemento a la generación ya nos ahorran un porcentaje de energía que ya no debe ser transformada, los usos directos van desde calefacción residencial hasta procesos industriales de gran producción, incluso podemos utilizar las energías renovables para la producción directa de combustible como en el caso de la fotoelectrólisis que genera hidrógeno. Otros temas que se trabajan en paralelo con las energías renovables son el ahorro energético y la cogeneración, ambos buscan la reducción del consumo energético distintos procesos, así como el aprovechamiento de energía residual, todo esto es un aliado económico para quien lo implemente además de disminuir la carga o la demanda al sector eléctrico. Finalmente, también es posible aprovechar tecnologías complementarias como las encargas de almacenamiento de energía, así como los sistemas de transformación y regulación, todo esto nos permite tener un sistema total y teóricamente autosuficiente, lo cual demuestra la factibilidad tecnológica de las microrredes y debemos empezar a utilizarlas como una alternativa mayor.

Los avances de las distintas tecnologías que tienen participación en las microrredes eléctricas han logrado generar dispositivos con buenas eficiencias y a costos muy asequibles, además de que existe toda una instrumentación que permite el acoplamiento de dichas tecnologías. Además de que la naturaleza modular de algunas de ellas, nos permite acondicionar el diseño de la microrred respecto a la demanda energética y a los recursos disponibles. El informe RETHINKING ENERGY de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) desvela cómo, a gran escala, los costos de producción de la energía hidroeléctrica, la geotérmica y la biomasa han sido competitivos, pero durante muchos años la energía eólica y la solar han luchado por competir con el carbón, el petróleo o el gas natural sin obtener resultados en el costo de la energía. Sin embargo, el panorama ha cambiado radicalmente durante la última década y, en particular, durante los últimos cinco años. Los factores que han influido en este cambio son múltiples. Las tecnologías utilizadas en las energías renovables son hoy día mucho más eficientes, ya

que cada vez son más capaces de generar energía incluso en condiciones óptimas, con poco viento, bajas velocidades o bajo irradiación solar. Esto, unido a que las tecnologías de almacenamiento de energía están mejorando rápidamente y a las políticas energéticas impulsadas en la Unión Europea, Estados Unidos y China, principalmente, han posibilitado un desplome en los precios de la energía en general (Roca, 2014).

Una de las principales críticas que se le puede hacer a las microrredes energéticas es la escala de generación o la cantidad de energía que pueden producir, en realidad las microrredes como su nombre lo indica no pueden generar grandes potencias y por lo tanto no compite en nivel de generación con plantas convencionales, ni con los enormes campos eólicos o solares que existen, por lo mismo no pueden satisfacer la demanda energética de algunas industrias, ni de grandes ciudades. Sin embargo, como tecnología puede ser viable en aplicaciones de baja o mediana demanda, se adapta tanto a ubicaciones aisladas como a entornos urbanos e instalaciones específicas. Además, al ser una solución que permite cubrir de forma sostenible las necesidades energéticas y de transporte con un servicio garantizado y disminuyendo los costes operativos, es un concepto que se puede implantar no sólo en fábricas y centros comerciales u operativos, sino también en complejos hoteleros, instalaciones agrícolas, minería, entre otros (Chacón Guadalix, 2015).

El reporte de IRENA, “Innovación: Microrredes Renovables” presenta que la innovación tecnológica trabajando de la mano con la innovación en los modelos de financiamiento podría resultar en la reducción del 60 por ciento de los costos de producción de electricidad en las microrredes eléctricas dentro de los próximos 20 años. Lo que haría que las microrredes fueran altamente competitivas contra la generación a base de Diesel en áreas remotas (IRENA, 2016).

Dentro de los proyectos energéticos se debe cumplir con la legislación correspondiente, por lo cual todos los proyectos energéticos deben estar acompañados de una Evaluación de Impacto Ambiental, así como una Evaluación de Impacto Social. Nos enfocaremos en primera instancia al impacto ambiental, ya que las microrredes te permiten tener un mayor control sobre las afectaciones que el proyecto generaría al medio ambiente, dando pauta a elaborar un plan con las medidas de prevención, mitigación y compensación necesarias (SEMARNAT, 2018). Además, la naturaleza por sí misma tienen la capacidad de compensar los impactos de la acción humana, pero entre mejor sea el equilibrio de la naturaleza con la microrred los daños se pueden reducir considerablemente, esto difiere de los proyectos a gran escala donde las afectaciones ambientales pueden llegar a ser inevitables.

En el aspecto social las microrredes pueden tener múltiples ventajas, una de las principales es que permite democratizar las tecnologías, esto significa que una persona común puede poseer y controlar la tecnología de la cual depende su estilo de vida y al adquirirla se vuelve un actor activo en la lucha contra el cambio climático. Si bien el desarrollo tecnológico nos puede brindar soberanía e independencia como nación, este concepto es extrapolable a nivel personal o local, las comunidades o industrias podrían diseñar y gestionar sus propios sistemas energéticos, lo que les da la libertad de elección en cuanto a la utilización del recurso. Y en caso de ser necesario también es posible estar conectados al SEN.

Se contrarresta la invisibilidad de las tecnologías que se da en el caso de la generación convencional, donde las personas no tienen conciencia del proceso que se lleva a cabo para que la electricidad llegue a sus casas, con la generación distribuida habría un acercamiento profundo de las tecnologías de generación y administración con la población, gracias a lo cual se podría impulsar una campaña de concientización y de mejora en los hábitos de consumo la energía.

### 1.3. Objetivos y alcances

#### 1.3.1. Objetivo general

Analizar las microrredes energéticas como una posible alternativa a las problemáticas que enfrenta el sector energético mexicano, considerando las tecnologías disponibles para establecer una prospectiva del uso de estos sistemas, así como una evaluación de su impacto en el Sector Eléctrico Nacional.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Revisar el estado actual de las microrredes energéticas.
- Definir los elementos principales que integran una microrred.
- Analizar las distintas configuraciones en que se integra una microrred.
- Comparar las distintas tecnologías aplicables a las microrredes.
- Establecer las etapas de desarrollo en la creación de una microrred energética.
- Determinar los posibles impactos ecológicos, económicos y sociales que puede generar una microrred.
- Establecer la relación entre las microrredes energéticas y el Sistema Eléctrico Nacional.
- Comparar y evaluar varias propuestas de desarrollo y aplicación de las microrredes para el caso del Sector Eléctrico Nacional.
- Establecer tendencias y prospectivas del uso de microrredes en el sector energético de México.

#### 1.3.3. Alcances

- Se considerará el análisis con base en la información proporcionada por organismos oficiales a nivel nacional e internacional.
- Las tecnologías consideradas deberán ser existentes, aplicables o en desarrollo.
- La evaluación del impacto abarcará los aspectos principales que considera un desarrollo sostenible; es decir el económico, el ambiental y el social.

## 2. Estado de la técnica de las microrredes

### 2.1. Concepto de microrred y principales elementos que la conforman

La red eléctrica se refiere a una interconexión de líneas de transmisión, subestaciones, transformadores y otros dispositivos que cumplen el objetivo de llevar electricidad desde la planta de generación hasta las casas o negocios. Las primeras redes eléctricas datan de la segunda mitad del siglo XIX.

A pesar de que la red eléctrica es considerada un logro y una maravilla de la ingeniería, en la actualidad estamos extendiendo la naturaleza de su capacidad. Para avanzar, se necesita un nuevo tipo de red eléctrica que sea construida desde las bases del sistema para poder manejar la oleada de tecnologías de la computación y electrónica de las que depende el mismo, se debe poder automatizar y administrar la creciente complejidad y necesidades del sector eléctrico del siglo XXI.

Debido a la variedad de tecnologías relacionadas con la generación y gestión de electricidad, así como las distintas configuraciones que se pueden lograr a partir de las misma, el concepto de microrred suele tener más de una definición dependiendo del autor o la institución que la define. Es importante resaltar

que las microrredes se desarrollan en la búsqueda de satisfacer necesidades específicas en distintos sectores (residencial, industrial, público, etc.), y a pesar de la tendencia global que las microrredes han generado no se puede definir un momento específico de su concepción, ni se puede atribuir a alguien la invención de las microrredes.

Los inicios de esta aplicación se remontan a la década de los 90 como respuesta a la alimentación eléctrica de lugares aislados, islas o consumos puntuales que necesitan de alimentación eléctrica. Este tipo de gestión energética y en gran medida debido al abaratamiento de precios de algunas de las tecnologías renovables, se perfila como una posible sustitución de los sistemas tradicionales de distribución eléctrica, ya que evitaría el trazado, pérdidas y mantenimiento de los clásicos sistemas de distribución, acercándonos al paradigma de energía distribuida.

Por lo anterior la definición de microrred estará ligado a los aspectos que resultan más importantes según la aplicación y el objetivo que busca cumplir. También debemos rescatar que los conceptos de generación distribuida y red eléctrica inteligente están íntimamente relacionados a las microrredes y por lo tanto también serán definidas en este apartado.

Existen múltiples definiciones de microrredes, entre las cuales podemos destacar las siguientes:

De acuerdo con el Grupo de Intercambio de Microrredes del Departamento de Energía de los EE.UU., una microrred es un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos dentro de límites eléctricos claramente definidos que se comporta como una única entidad controlable con relación a la red (Buehler & Majumder, 2016).

El Grupo de Trabajo CIGRÉ C6.2, Microgrid Evolution Roadmap explica que las microrredes son sistemas de distribución de electricidad que incluyen cargas y recursos energéticos distribuidos (como generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento o cargas controlables), que pueden manejarse de forma controlada y coordinada, tanto si están conectados a la red eléctrica principal, como si están aislados y conectados a tierra (Buehler & Majumder, 2016).

El CERTS (Consortium for Electrical Reliability Technology Solutions) define la microrred como una agregación de cargas y micro-generadores operando como un sistema único que provee tanto energía eléctrica como energía térmica (CENER, s.f.).

Una definición más exhaustiva es la que se da dentro del proyecto “Microgrids” del VI Programa Marco de apoyo a la investigación de la Unión Europea, el cual explica que las microrredes comprenden sistemas de distribución en baja tensión junto con fuentes de generación distribuida, así como dispositivos de almacenamiento (CENER, s.f.).

Las microrredes deben tener un controlador ya sea manual o automático central el cual cumple la función equilibrar los recursos disponibles de una manera segura y económica, además de garantizar la seguridad del suministro. Dentro del marco de la red principal una microrred puede observarse como un elemento controlado que puede ser operado como una única carga o generador agregado y que, si fuera económicamente viable, podría funcionar como fuente de energía al igual que una central eléctrica o como un medio para proporcionar servicios auxiliares que contribuyese a la estabilidad y regulación de la red principal.

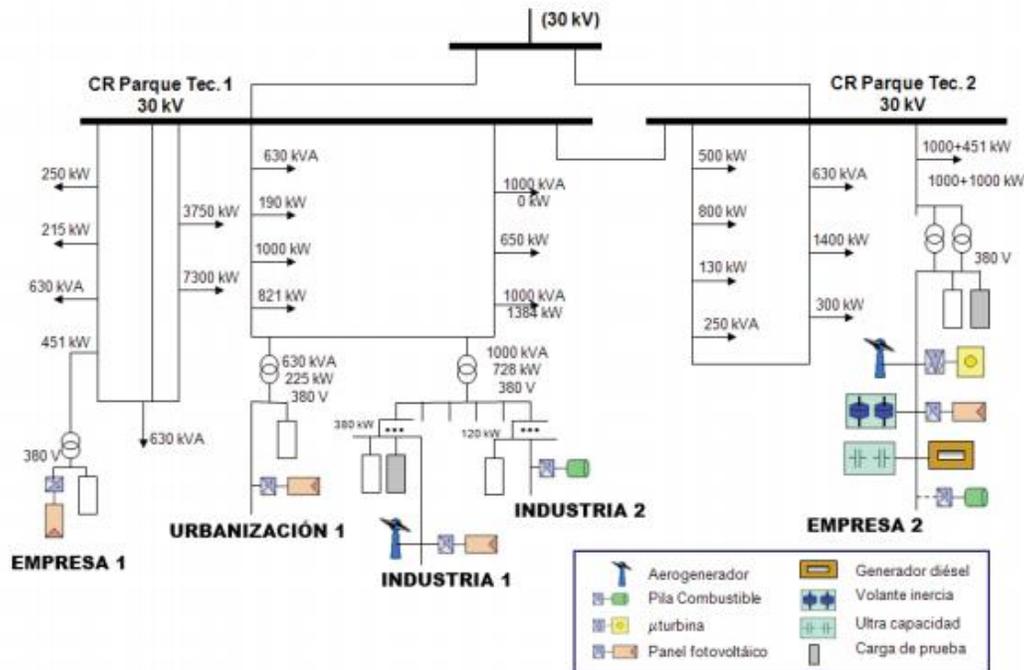


Figura 1 Esquema general de una microrred

Entre las principales ventajas de las microrredes podemos encontrar:

- Las microrredes permiten una mejor calidad del suministro, un mayor ahorro y una menor dependencia de la red de distribución.
- Podrían funcionar tanto conectadas a la red pública de distribución como de manera aislada.
- La cercanía de la ubicación de las fuentes de generación y el aprovechamiento en red de los diversos sistemas de energía y calor aumentan considerablemente la eficiencia energética del conjunto.
- Las microrredes reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero, tienen un menor impacto ambiental y potenciaría la implantación de energías renovables y generación distribuida.
- Un aumento en el uso de las microrredes supondrá una reducción de costes de energía debido a la reducción de la demanda pico en la red de distribución.
- Fiabilidad, especialmente en aquellas zonas donde los apagones son frecuentes. La gran variedad de tecnologías permite al usuario elegir la mejor opción para un lugar determinado.
- Descentralización de la red eléctrica, para brindar suministro energético en aquellos lugares donde la red convencional no es una opción.
- Rápida respuesta de contención ante disturbios en el suministro de energía
- Una mejor relación e integración de la relación entre consumidores y productores, además de mayor participación de los usuarios en la administración del recurso y de las tecnologías

Las microrredes también tienen inconvenientes, como, por ejemplo:

- Falta de una normativa específica que impide su generalización.
- Al tratarse de una tecnología que todavía no está implantada en los mercados, resultan sistemas energéticos excesivamente caros.

- Su naturaleza local, la hace poco atractiva para los inversionistas ya que una vez instalada se pierde control sobre el recurso eléctrico.

A partir de considerar que el concepto de generación distribuida engloba la generación de electricidad mediante instalaciones que son suficientemente pequeñas (3 kW – 10 MW) en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico (Ramón Ducoy, 2012). La generación distribuida por sí misma tiene diversas ventajas, algunas de ellas son comunes a las de las microrredes, debido a que la generación distribuida es una característica intrínseca de las microrredes.

La tecnología digital es quien permite la comunicación bidireccional entre la utilidad y sus consumidores, el censado a lo largo de la transmisión es lo que caracteriza a una red inteligente, por lo tanto, una microrred puede ser al mismo tiempo una red inteligente, sin embargo, no es una característica obligatoria, las microrredes se determinan principalmente por la escala del sistema y por la organización de sus elementos. Por lo tanto, una red inteligente consistirá en una serie de controles, computadoras, automatización, nuevas tecnologías y equipos trabajando en conjunto, pero para este caso en específico las tecnologías trabajaran con la red eléctrica para responder acertadamente a la cambiante demanda de electricidad.

Para el caso de México la Generación Distribuida está definida en la Ley de la Industria Energética (LIE) como Centrales de Generación con capacidades menores a 500 kW obtenidos de un generador externo y que se interconectan a un circuito de distribución con alta concentración de Centros de Carga. De hecho, La Dirección General de Distribución y Abastecimiento de Energía Eléctrica de la SENER, con el apoyo de la Dirección General de Energías Limpias y de otros actores, ha publicado la política pública que tiene la finalidad de Promover la Generación Distribuida y la Generación Limpia Distribuida (GLD). La Ley de Transición Energética (LTE) indica que si la generación se realiza a partir de Energías Limpias es Generación Limpia Distribuida (SENER, 2016).

Las microrredes se componen conceptualmente de los siguientes elementos:

- Una red de distribución en baja tensión.
- Una serie de fuentes de energía distribuidas para proporcionar electricidad y calor.
- Una infraestructura de comunicación y prevención local.
- Un sistema jerárquico de control y gestión.
- Sistemas de almacenamiento de energía.
- Controladores inteligentes para cargas y consumos.

Existen múltiples dispositivos que pueden cumplir cada una de las funciones de los elementos que componen a una microrred, el diseño de la microrred y elección de tecnología está ligado a la dimensión de esta, el presupuesto, las condiciones físicas del espacio, los recursos energéticos disponibles y la aplicación que se requiera satisfacer con la microrred.

Generalmente las microrredes usan fuentes energéticas renovables que se adaptan a los recursos disponibles en el lugar de la implantación, con un sistema de almacenamiento de energía en baterías que sea capaz de resolver picos de consumo, transitorios de producción renovable y los escasos consumos nocturnos, que en la mayoría de los casos son requeridos, ha demostrado ser una solución fiable y de bajo costo (de Alaminos, y otros, 2020). También se utilizan normalmente el apoyo de generadores convencionales que suelen actuar en emergencias o cuando los recursos renovables no están disponibles. También es típico que muchas de las microrredes se diseñen allí donde se usaba previamente un generador convencional y es necesaria la aportación de nueva energía, bien por haber aumentado la demanda, bien por porque el alto costo y/o la logística del combustible empieza a ser una carga

económica importante y es necesario reducir el consumo a base de hacer que el tiempo de funcionamiento sea menor, o por ambas cosas a la vez.

A continuación, se clasifican distintas tecnologías que se pueden utilizar en una microrred, las características de cada una se analizarán a detalle más adelante.

#### Generación

- Paneles solares.
- Mini generadores
- Generadores eólicos.
- Microturbinas.
- Pilas de combustible.
- Generadores convencionales.

#### Almacenamiento

- Baterías.
- Almacenamiento térmico.
- Volantes de inercia.
- Ultracapacidad.

#### Cargas

- Eléctricas – Térmicas
- Punto de interconexión con la red eléctrica

#### Sistemas de control

- Sistema de Control Central de la Microrred
- Controladores locales
- Interfaz

#### Transmisión

- Inversores
- Líneas eléctricas

El diseño de un sistema eléctrico se realiza principalmente en función de los consumos que se tienen que alimentar más un factor de seguridad. Si el equilibrio de generación–consumo se rompe, tendremos un déficit energético que desembocara en la parada del sistema (de Alaminos, y otros, 2020). El papel que cumplen los sistemas de control es crucial, nos darán una información actualizada de cómo se encuentra el sistema para que de esta forma consumir la energía responsablemente. Por esta razón es de suma importancia un estudio exhaustivo de los consumos, pero no solo desde el punto de vista eléctrico, sino también desde el punto de vista de consumo de la comunidad o industria, que nos dé una idea real de las necesidades energéticas para que los cálculos técnicos puedan resolver verdaderamente las necesidades.

Una interrupción en el suministro eléctrico como en el caso de un apagón puede tener un efecto domino, que afectaría a actividades cruciales incluyendo a la banca, comunicaciones, tráfico y seguridad. Una microrred agregaría resiliencia a nuestro sistema eléctrico y estaría mejor preparado para atender emergencias. Las microrredes eléctricas detectarían y aislarían los cortes, conteniéndolos antes de que se conviertan en un apagón a gran escala. Las nuevas tecnologías permitirán asegurar que el restablecimiento del servicio eléctrico sea rápido y estratégico después de una emergencia, ya que podría dirigir que zonas

reabastecer primero. Si se combinan las herramientas de generación distribuida una comunidad podría mantener en funcionamiento sistemas clave. Además, una microrred permite abordar ciertos problemas específicos como reemplazar o actualizar infraestructura obsoleta y el uso eficiente de la energía para hacer más conciencia de la conexión entre la electricidad y el medio ambiente.

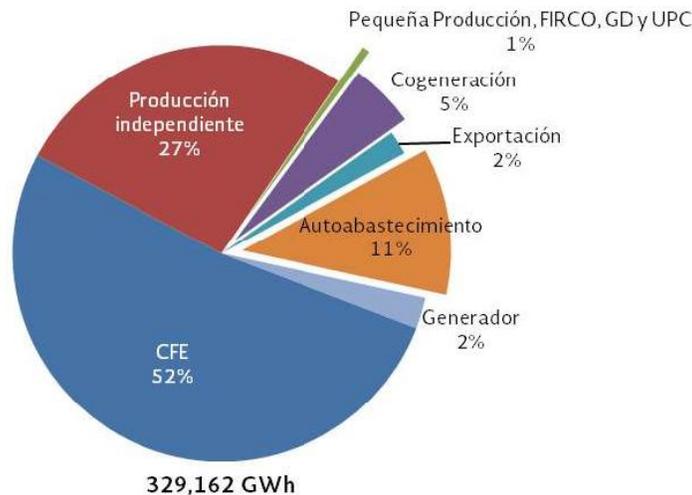
En México, durante transcurso de 2020 la producción de electricidad aumentó a 1,172.62 PJ, reflejando una reducción del 5.47% respecto a lo observado durante 2019. Este flujo lo integra la generación de las centrales eléctricas públicas de CFE, las centrales de los Productores Independientes de Energía (PIE), las centrales eléctricas generadoras y las de los privados que cuentan con un permiso otorgado por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Las centrales eléctricas públicas aportaron 37.36% del total de la generación eléctrica, los productores independientes de energía 30.49%, mientras que la autogeneración de electricidad participó con 23.28% y el 8.85% restante perteneció a las Centrales Eléctricas con otro tipo de permiso (SENER, 2021).

El total de energía generada en 2020 observó un incremento de 7.14% (451.9 PJ), debido principalmente al crecimiento del 7.31% (389.3 PJ) en la producción con hidrocarburos, y del 15.24% (100.97 PJ) con energías renovables.

	2019	2020	Variación porcentual (%) 2020/2019	Estructura porcentual (%) 2020
<b>Total</b>	<b>6,332.80</b>	<b>6,784.70</b>	<b>7.14</b>	<b>100.00</b>
Carbón	230.46	192.29	-16.56	2.83
Hidrocarburos	5,315.16	5,703.46	7.31	84.06
Petróleo crudo	3,788.64	3,820.93	0.85	56.32
Condensados	60.49	140.98	133.08	2.08
Gas natural	1,466.04	1,741.56	18.79	25.67
Nucleoenergía	124.82	125.62	0.64	1.85
Renovables <sup>1</sup>	662.35	763.32	15.24	11.25
Hidroenergía	84.97	96.97	14.12	1.43
Geoenergía	112.88	112.21	-0.60	1.65
Solar	40.32	50.75	25.87	0.75
Energía eólica	60.22	70.93	17.79	1.05
Biogás	2.80	2.53	-9.63	0.04
Biomasa	361.17	429.94	19.04	6.34
Bagazo de caña	113.25	99.66	-12.00	1.47
Leña	247.92	330.28	33.22	4.87

Tabla 1 Producción de energía primaria (Petajoules)

Dentro de las tecnologías limpias podemos encontrar a la generación distribuida, la cual ha tenido un incremento porcentual de 35.67%, pasando de 1,023 MW en 2019 a 1,388 MW en 2020, siendo la tecnología de generación que más creció en ese periodo (SENER, 2021). Este dato nos puede servir como indicador para conocer la tendencia que tendrá dicha tecnología en los próximos años, y considerando la profunda relación de la generación distribuida con las microrredes, podemos pronosticar que las microrredes tendrán lugar dentro de la banda energética nacional. Otro dato importante se muestra en el siguiente gráfico, donde para el 2017 el 11% de la generación eléctrica del país se genera dentro de la modalidad de autoabastecimiento (SENER, 2018), aunque esto no implica necesariamente la existencia de una microrred nos muestra que existe una voluntad de los consumidores por producir y administrar su energía.



Gráfica 1 Generación de energía eléctrica por modalidad

Las microrredes representan una oportunidad sin precedente de impulsar a la industria energética a una nueva época de fiabilidad, disponibilidad y eficiencia que contribuirá a nuestra estabilidad económica y ambiental. Durante el proceso de transición, será crítico realizar pruebas, desarrollo de tecnología, educar a los consumidores, creación de estándares y regulaciones, y sobre todo la transmisión de información entre agentes para asegurar los beneficios de las microrredes como una realidad.

## 2.2. Configuraciones

Las microrredes pueden adoptar numerosas formas, dimensiones y distribuciones. Los principios técnicos y la arquitectura de las microrredes pueden tener varias configuraciones en función de factores como la cantidad de fuentes generadoras, su tamaño, las características de la distribución eléctrica a los usuarios, tipo de perfiles de carga, potencia demandada, etc.

La elección del tipo de corriente que se use para la operación del sistema depende mucho de las tecnologías utilizadas y de la estrategia de gestión de la energía. Mientras que la generación fotovoltaica y las baterías funcionan en CD, otras tecnologías de generación, como son los generadores convencionales, mini-eólica o pequeñas centrales hidroeléctricas, producen normalmente en CA. En microrredes híbridas el uso de barras de CA es más común cuando la batería es el componente central del sistema. En ese caso se instala un inversor bidireccional para controlar el suministro de energía entre las cargas de CA y la batería.

La primera clasificación de configuración se basará en el tipo de corriente utilizada en el BUS de vertido generador:

- BUS en CD

La configuración de BUS en CD, es el caso más simple, donde las fuentes de generación vierten su producción en una batería, que a través de un inversor CD/CA alimenta los diferentes consumos. El control del sistema es muy simple, incluso se puede limitar al arranque del generador convencional cuando el nivel de carga en la batería es bajo o cuando se necesita un aporte energético puntual, pero nunca entra en contacto eléctrico directo con los consumos. Se trata de sistemas sencillos, pero bastante fiables y está diseñado fundamentalmente para pequeñas redes de distribución zonales y de consumos controlados (de Alaminos, y otros, 2020).

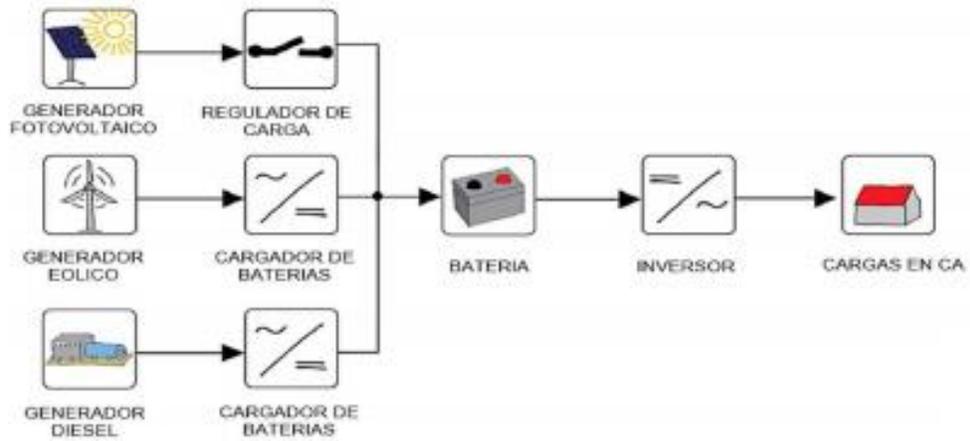


Figura 2 Configuración de BUS en CD

En la actualidad gran parte de las cargas eléctricas están controladas o actúan con electrónica de potencia, las cuales necesitan corriente continua para su funcionamiento. En la mayoría de los casos la energía producida por generadores de corriente continua debe convertirse en corriente alterna para sincronizarse con la red eléctrica convencional y ésta nuevamente en CD para algunas aplicaciones; estas conversiones implican pérdidas de energía.

- BUS en CD con cargas en CD

La configuración de BUS en CD con cargas en CD, es similar a la configuración anterior, pero incorpora una salida directa en CD que podría alimentar algún tipo de carga de accionamiento directo cuando la batería está plenamente cargada evitando de esta forma perder esa energía disponible que no sería usada en el caso de no tener este tipo de alternativa. La función del generador convencional en este caso sería la de reserva energética de emergencia, con la posibilidad adicional de abastecer también directamente las cargas de CA, bien como seguridad ante la avería del inversor CD/CA, bien en paralelo con el inversor siempre y cuando se hubiera diseñado para trabajar de esta forma y tanto el inversor, como el sistema de control, tenga estas funciones implementadas (de Alaminos, y otros, 2020).

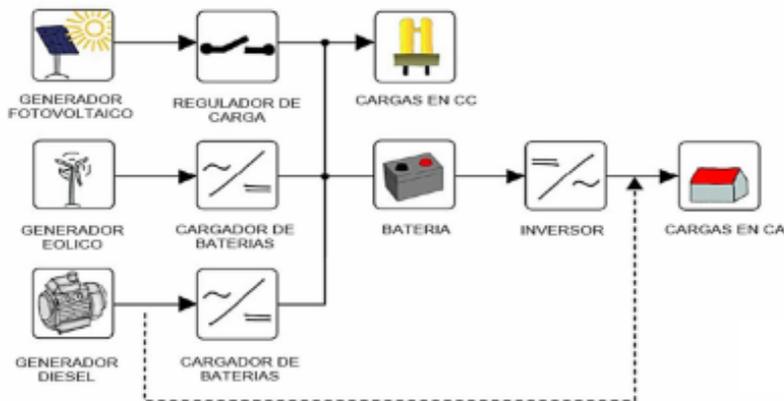


Figura 3 Configuración de BUS en CD con cargas en CD

La CD se usa en sistemas de distribución de la industria para alimentar cargas electrónicas de alta sensibilidad, en las infraestructuras de telecomunicaciones y transmisiones punto a punto para largas distancias.

Algunas ventajas del uso de microrredes de CD serían la no existencia de potencia reactiva ni corrección del factor de potencia, la falta de armónicos, alta eficiencia en la entrega de energía a la red de distribución y una mejor calidad de esta. Por otro lado, también existen desventajas como el uso de sistemas de protección más complejos, no hay puntos de cruce por cero y se necesitan niveles de tensión más altos, de igual manera hay problemas en las elevadas corrientes de arranque de transformadores, motores y generadores.

- BUS en CA

La configuración de BUS en CA es la más compleja pero versátil de todas, para su funcionamiento debe de existir un sistema de control sofisticado que dictamine las maniobras necesarias para su perfecto funcionamiento, administrando el generador convencional cuando sea necesario, pero siempre dando prioridad al funcionamiento de las otras fuentes energéticas o la descarga de las baterías para suplir puntas de consumo o situaciones temporales de falta de producción. Estos sistemas son más exigentes y delicados en su operación y mantenimiento, necesitando una mayor preparación del personal que los asista.

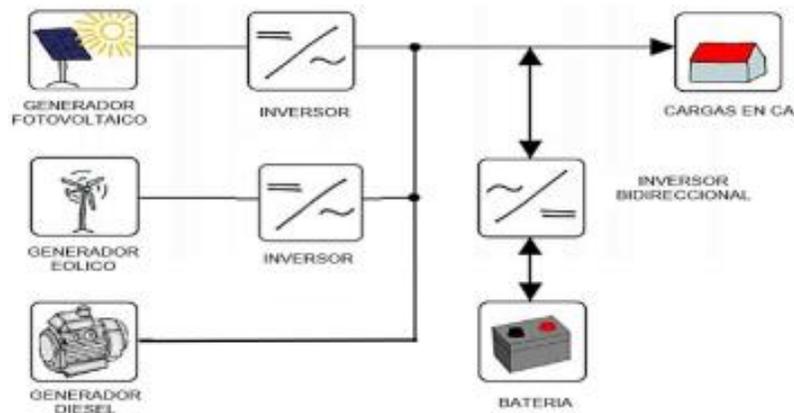


Figura 4 Configuración de BUS en CA

Una de las principales características de las microrredes en CA, es la conexión directa con la red eléctrica convencional. La ventaja principal es la alimentación eléctrica a las cargas en forma directa, considerando también que el acoplamiento de una microrred de CA es menos costoso en términos económicos ya que se requiere un menor tamaño de convertidor CA-CD (de Alaminos, y otros, 2020).

De manera general en condiciones normales el funcionamiento de una microrred de CA consiste en alimentarse de fuentes locales si la demanda de potencia de carga es menor que la potencia producida por las unidades de generación de la microrred. En la mayoría de los casos las microrredes de CA funcionan a voltajes y frecuencias aplicados en la mayoría de los sistemas de distribución convencionales ya que estos tienen una gran flexibilidad.

La microrred es gestionada por un controlador central que lidera el sistema jerárquico de control. Este controlador central proporcionará las consignas a los controladores del resto de los equipos. La microrred podrá funcionar de dos modos distintos: conectado a la red principal y aislada de la misma.

Cuando la microrred funciona en modo conectado con la red principal, ésta proporcionará las referencias de tensión y frecuencia necesarias para que el resto de los elementos de generación de la microrred funcionen de acuerdo con los requerimientos evitando problema de estabilidad dentro de la microrred. El controlador central funciona como una suerte de gestor de mercado realizando el despacho económico de la generación de la microrred. Para ello deberá tener en cuenta las siguientes entradas:

- Precios del mercado
- Ofertas de las fuentes de generación
- Ofertas del lado de la demanda para cargas de alta y baja prioridad

El controlador central envía a los controladores de las fuentes y de las cargas inteligentes, las consignas de potencia activa u reactiva, así como las señales a aquellas cargas que han de mantenerse en servicio y a aquellas que han de desconectarse. El controlador central también tiene la responsabilidad de comprobar que no se incumplen ninguna de las restricciones técnicas impuestas a la microrred y que no perturba al funcionamiento de la red externa.

Sin embargo, también se presenta el caso cuando la microrred trabaja en modo aislado, para esta configuración los generadores tienen que ser capaces de responder con rapidez a los cambios en el consumo para que así tanto la tensión como la frecuencia se mantengan estables. Pero se debe considerar que los generadores de la microrred suelen tener una respuesta lenta, del orden de decenas de segundos, lo que puede ocasionar problemas de seguimiento de la demanda y provocar problemas de estabilidad al no mantenerse la frecuencia dentro de los márgenes de seguridad.

Así pues, un conjunto de generadores de la microrred forzosamente necesitará una serie de sistemas de almacenamiento para asegurar el balance energético inicial. El déficit energético provocado cuando la microrred pasa a modo aislado o el debido a variaciones en la generación o en la demanda, deberá ser compensado por dichos sistemas de almacenamiento. Estos sistemas deberán asumir las labores de proporcionar las referencias de tensión y frecuencia al resto de elementos de la generación. De este modo emularán la funcionalidad que aporta tener la microrred conectada a la red general, para funcionar así, los sistemas de almacenamiento deberán estar conectados a la microrred a través de un inversor con controles adecuados para mantener la estabilidad en tensión y frecuencia de la microrred (CENER, s.f.).

Una situación común es la instalación de microrredes en lugares donde ya se usaba un generador convencional para alimentación eléctrica, éste es normalmente integrado en la nueva instalación con un mayor o menor régimen de horas de funcionamiento. Dentro de la instalación se puede optar por operar los grupos de manera manual (mediante personal encargado de accionarlos) o automática (integrado en un sistema de control), por lo que la opción más conveniente dependerá del diseño de la instalación, las necesidades de funcionamiento y la capacidad de la comunidad local.

En el modo de funcionamiento automático integrado en el sistema de control, el arranque del grupo puede venir comandado por un bajo estado de carga de las baterías, o una alta demanda de potencia por parte de los consumos conectados a la microrred. El funcionamiento en modo manual puede interesar en determinadas situaciones donde la comunidad local pueda prever con cierta antelación fuertes picos de consumo, o una baja producción de las fuentes generadoras renovables, basadas en una predicción meteorológica, o simplemente donde los cortes de suministro sean asumibles.

Si el control de los generadores convencionales funciona de manera automática se corre el riesgo de que un error en el dimensionamiento del sistema de generación o previsión de los consumos haga que el grupo arranque muchas veces aumentando considerablemente el consumo de combustible y una continua carga y descarga de baterías con el consiguiente deterioro de estas. Esto podría ocasionar que la comunidad local opte por desconectar el sistema de control automático para ahorrar combustible, por lo que no se cumpliría una función fundamental en este tipo de instalaciones

Una solución mixta entre el control totalmente manual o el automático, puede ser un sistema manual con medidas de protección automática.

Ya que los generadores convencionales aun juegan un papel muy importante en la dinámica de las microrredes, dentro de la práctica se puede diferenciar si el grupo funge como generador principal o como generador de apoyo.

- Generador convencional principal: suele tratarse de grupos de gran potencia respecto a la demanda, por lo cual deben funcionar continuamente. En este caso se puede usar nuevas fuentes de generación renovable con el fin de reducir el consumo de combustible haciendo que el tiempo de funcionamiento diario del grupo sea menor.
- Generador convencional de apoyo: suele tratarse de grupos de menor potencia respecto a la demanda esperada que funcionan puntualmente. En este caso habitualmente se cubriría la demanda con la nueva generación renovable, utilizando un sistema de almacenamiento de energía en baterías y donde el grupo se encargará básicamente de cubrir puntas y recargar las baterías en casos de necesidad, ya sea debida a una alta demanda puntual de los consumos que se dé ocasionalmente, o bien por una baja generación de las otras fuentes energéticas (de Alaminos, y otros, 2020).

### 2.3. Aplicaciones

Las redes eléctricas están experimentando una revolución conceptual y a escalas nunca vistas, el creciente intercambio de generación local está dando lugar a modificaciones en la forma en que se gestionan las redes. No es algo nuevo que grandes instalaciones como hospitales y fábricas dispongan de algún sistema auxiliar de emergencia, por lo general, en forma de generadores diésel. En los últimos, la tendencia generalizada ha sido aumentar la capacidad de generación local con la instalación de fuentes de energías renovables entre las que destacan las celdas fotovoltaicas, en ocasiones acompañadas de un banco de baterías. A diferencia de los generadores de emergencia, que se mantienen principalmente por razones de seguridad del suministro, se desea que estas inversiones adicionales se utilicen con la mayor profusión y rentabilidad posibles. Por lo tanto, se hace necesaria una estrategia de implementación óptima de la capacidad de generación eléctrica, tanto interna como externa (Buehler & Majumder, 2017).

En el pasado, las redes eléctricas tradicionales los usuarios finales apenas podían hacer uso y formar parte del sistema eléctrico. Las plantas generadoras y las decisiones de control no se encontraban al alcance de los usuarios, que tenían un dominio escaso sobre su procedencia o su coste. Actualmente, la generación ha dejado de ser dominio exclusivo de las grandes centrales eléctricas: los paneles solares en tejados y otras formas de generación distribuida están difuminando la distinción entre productores y usuarios. También debemos agregar que no solo las tecnologías de generación están cada vez más disponibles para todo el mundo, el aumento de los niveles de inteligencia integrada y los interruptores controlables hacen posible la descentralización de las decisiones de control. Los propietarios de grandes instalaciones, como hospitales o fábricas, tienen actualmente la capacidad de controlar sus propias redes eléctricas y, de esta forma, reducir los costes y las emisiones (Buehler & Majumder, 2017).

Una microrred tiene la cualidad de brindar información y herramienta a los usuarios para que hagan las decisiones pertinentes respecto a su uso de la energía. Incluso podrían administrar su recurso energético desde una computadora u otro dispositivo. Es decir que habría una alta participación de los consumidores, los cuales podrán conocer en qué actividades y horarios tienen un mayor consumo, si se ajusta a los precios del mercado puede haber un ahorro económico considerable, incluso tendrían la posibilidad de producir su propia energía y aportarla a la red.

		Factores principales					
		Sociales	Económicos	Medioambientales	Operativos		
Segmentos	Ciudadanos típicos	Acceso a la electricidad	Ahorro de combustible y de costes	Reducción de la huella de CO2 y la contaminación	Independencia del combustible	Suministro ininterrumpido	
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 100px; background-color: #8B4513; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-size: 8px;">Fuera de red</div> <div style="width: 10px; height: 100px; background-color: #D2691E; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-size: 8px;">Red débil</div> <div style="width: 10px; height: 100px; background-color: #A08060; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-size: 8px;">Conectado a red</div> </div>	Compañías suministradoras de la isla		✓	✓	✓	(✓)	
	Comunidades remotas	✓	✓		✓		
	Industrial y comercial			(✓)	✓	✓	
	Defensa			(✓)	(✓)	✓	✓
	Comunidades urbanas				(✓)		✓
	Instituciones y universidades			(✓)	✓		(✓)

PIE: Productor independiente de electricidad      ✓ Factor principal      (✓) Factor secundario

Tabla 2 Aplicaciones de las microrredes

En la tabla anterior se encuentra una clasificación general de cuáles son las principales aplicaciones en las que se utiliza el concepto de microrredes. Se podría decir que algunas de estas aplicaciones también logran satisfacerse si la alimentación se obtiene de red principal, por lo que se debe hacer énfasis en que las microrredes tienen la característica de ser diseñadas para casos muy específicos, con objetivos particulares dependiendo del caso, así que el espectro de aplicación de las microrredes puede ir desde lugares completamente aislados hasta lugares con amplio acceso a la red principal. Tal como muestra esta tabla los factores que empujan a que se instale una microrred van más allá de satisfacer la demanda de electricidad, esto significa que las microrredes encajan como tecnología en el esquema de desarrollo sostenible al abarcar el aspecto económico, el ecológico y el social.

### 3. Marco teórico del uso de las microrredes

#### 3.1. Usuarios

Para establecer el potencial de las microrredes es necesario conocer la actualidad del mercado energético, dentro de esta dinámica uno de los actores principales son los usuarios finales, ya que de estos depende la energía que se está consumiendo y por lo tanto la energía a producir. En el transcurso del 2020, el consumo de energía en México superó 15.36% a la producción de energía primaria. Por lo que, al cierre de 2020, México presentó un índice de independencia energética equivalente a 0.87. Es decir, se produjo

13.0% menos energía de la que se puso a disposición para las diversas actividades de consumo dentro del territorio nacional, teniendo que importar parte de la energía.

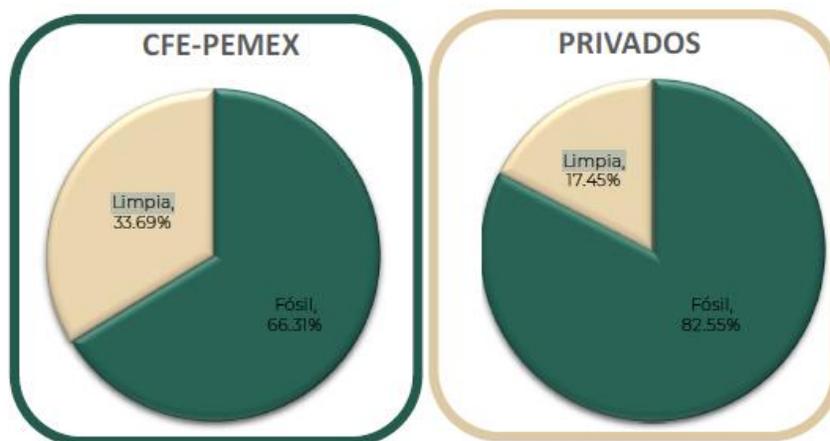
Una división entre los principales sectores consumidores de energía es pertinente, ya que cada uno tendrá sus propias necesidades y maneras de gestionar sus recursos energéticos. Entre sectores también varía el tipo de combustible que consumen, esto se relaciona directamente a las actividades que realizan.

	2019	2020	Variación porcentual (%) 2020/2019	Estructura porcentual 2020
Total	952.59	1,075.64	12.92	100.00
Residencial	748.94	914.88	22.16	85.05
Solar	7.88	9.01	14.32	0.84
Leña	247.92	330.28	33.22	30.71
Total de petrolíferos	231.04	289.54	25.32	26.92
Gas licuado	231.04	289.54	25.32	26.92
Querosenos	0.00	0.00	0.00	0.00
Gas seco	29.94	25.95	-13.34	2.41
Energía eléctrica	232.15	260.10	12.04	24.18
Comercial	170.70	145.41	-14.82	13.52
Solar	5.17	5.96	15.27	0.55
Total de petrolíferos	61.89	76.20	23.12	7.08
Gas licuado	61.89	76.20	23.12	7.08
Diésel	0.00	0.00	0.00	0.00
Gas seco	10.96	9.50	-13.34	0.88
Energía eléctrica	92.67	53.75	-42.00	5.00
Público	32.95	15.36	-53.40	1.43
Energía eléctrica	32.95	15.36	-53.40	1.43

Fuente: Sistema de Información Energética, SENER

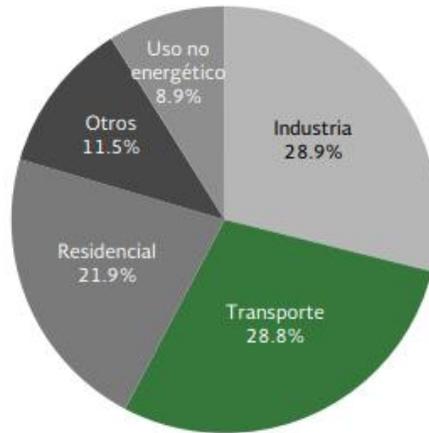
Tabla 3 Consumo de energía en los sectores residencial, comercial y público. (PJ)

Durante el primer semestre 2020, México contaba con una capacidad instalada total de 83 122.45 MW de los cuales 23 874.92 MW provienen de tecnologías limpias representando el 25.64 %, mostrando un crecimiento en la capacidad instalada para tecnologías limpias del 18.81 %, en comparación con la capacidad instalada al cierre del primer semestre del 2019. Es necesario rescatar la información anterior ya que los usuarios finales pueden intervenir más directamente en el aprovechamiento de energías renovables que se explotan en sitio, en comparación con los hidrocarburos que requieren de una cadena de extracción, transformación y distribución antes de llegar al usuario.



Gráfica 2 Porcentaje De Participación De Las Energías Limpias En La Matriz De Generación De Energía Eléctrica CFE Y Privados

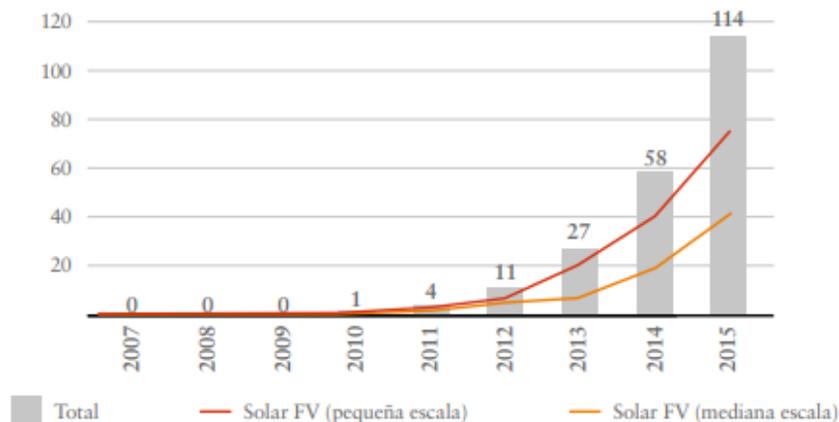
Por su parte, el sector industrial reflejó mayor consumo a nivel mundial con 2,889.53 MMtep, seguido por el sector transporte con 2,889.37 MMtep; obteniendo así, una brecha estadística entre ambos sectores, la cual presentó una participación promedio del 28.94% del total.



Gráfica 3 Consumo total mundial de energía por sector. 2015, 9 383.6 MMtep

Por otro lado, la energía solar fotovoltaica destaca dentro de las energías renovables, es la fuente con mayor crecimiento a nivel mundial y en México ha tenido una creciente participación. En la última década la capacidad instalada con tecnología solar creció anualmente en promedio 36.3%. Asimismo, la generación de energía eléctrica con energía solar creció a un ritmo de 27.1%, pasando a ser la tercera tecnología renovable más importante en México. La generación distribuida contribuyó en este crecimiento de la fotovoltaica al alcanzar los 520 MW de capacidad instalada.

En años recientes y como consecuencia de la reforma energética, se ha detonado la producción de energía solar por parte de los pequeños consumidores de electricidad. Los sistemas fotovoltaicos representaron 99% de la capacidad total instalada en la modalidad de Generación Distribuida, el resto lo ocupan principalmente los contratos de interconexión de pequeñas centrales basadas en biogás. Como prueba irrefutable del crecimiento exponencial de la generación distribuida, se puede agregar que a finales de 2017 se tenían registrados 54 mil contratos de interconexión bajo el esquema de generación distribuida, monto exponencialmente mayor a los cerca de 2 mil contratos que se tenían en 2012.



Gráfica 4 Evolución en la capacidad instalada de tecnología solar Fotovoltaica en Generación Distribuida (MW)

Por el lado de la demanda, los principales consumidores de energía solar son los sectores residenciales (5.29 PJ) y comercial (3.63 PJ). En dichos sectores, los usos finales de la energía solar son en su mayoría

para aplicaciones térmicas (generación de calor). El sector industrial consume una fracción menor de energía solar con fines térmicos (0.49 PJ).

Sí consideramos que uno de los principales distintivos de las microrredes es que busca evitar la generación de gases de efecto invernadero, necesariamente tenemos que hablar de la utilización de energía que no venga bajo la presentación de combustible, por lo que destaca inevitablemente la electricidad cómo un tipo de energía más amigable con el medio ambiente.

Históricamente el sector residencial ha sido de los sectores de mayor consumo de electricidad en México. Del año 1990 al año 2010 este consumo pasó de poco más de 20 TWh a cerca de 49 TWh teniendo una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 4.6%.

Se concentró en establecer el potencial técnico en este subsector residencial de aproximadamente medio millón de usuarios. Se cuenta actualmente con un potencial técnico de 1 757 MW de SFVI a nivel nacional, de los cuales la mayor parte estarían en la tarifa 1 con 1 083 MW, mientras que para la tarifa 1C, 1B, 1A y 1D serían 306 MW, 208 MW, 115M y 45 MW, respectivamente. Debido a que la tarifa 1 cuenta con el mayor potencial, los estados con la mayor cantidad de capacidad proyectada posible serían la CDMX, el Estado de México, Jalisco, Baja California Norte y Guanajuato con el 71% del potencial identificado para dicha tarifa. Aunque no es una regla que la generación distribuida se aplique a usuarios de alto consumo, son estos los que podrían vencer los beneficios más rápidamente, principalmente en el ámbito económico, para el resto de los usuarios sería necesario buscar otras herramientas que incentiven a la implementación de estos esquemas.

El crecimiento de la generación distribuida se debe a la instalación de sistemas solares en el sector residencial, por parte de usuarios que cuentan con una tarifa de alto consumo (DAC), principalmente debido a los programas de promoción del uso de la energía solar, el sector residencial registró una producción récord de energía solar de 5.3 PJ, aunque esto solo representó el 0.7% de su consumo energético; otro segmento que hasta ahora ha instalado este tipo de sistemas son los usuarios de tarifas eléctricas de media y baja tensión, principalmente MiPyMEs.

A través de los portales electrónicos de ANES, FIDE y FIRCO, se identificó la presencia de más de 600 empresas que han incursionado en el mercado de la generación distribuida fotovoltaica en México.

### 3.2. Legislación

El parteaguas en el desarrollo y aprovechamiento de las energías renovables, así como la implementación de mejores modelos energéticos, destacando a la generación distribuida y a las redes inteligentes, fue sin duda la Reforma Energética, la cual entro en vigor en el año de 2015. Desde ese momento se ha visto un crecimiento en la inversión, utilización e interés por dichas tecnologías.

Derivado de diversas disposiciones establecidas en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, en el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE) 2014 - 2018, en la Ley de Transición Energética, su Reglamento, Disposiciones Administrativas de Carácter General en materia de Generación Distribuida así como en el Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018; ahora se puede instalar en un domicilio o negocio, una Central Eléctrica de Generación Distribuida y Generación Limpia Distribuida menor a 0.5 MW y realizar un contrato de interconexión con CFE Suministrador de Servicios Básicos.

Algunos de los puntos positivos de la Generación Distribuida es que permiten ahorrar en el gasto por concepto de consumo de energía, y contribuyen en la utilización de tecnologías limpias, en el aprovechamiento de fuentes renovables de energía y, por ende, en la conservación del medio ambiente. También podemos señalar que un sistema de Generación Distribuida permite la intervención del usuario

en la gestión de su energía, además de estar abierto a la introducción de otras tecnologías, por lo que sería viable llegar de estos modelos al diseño de microrredes inteligentes.

Los requisitos para realizar un contrato de interconexión de una central eléctrica con capacidad menor a 0.5 MW se definen en las Disposiciones Administrativas de Carácter General, este documento incluye los modelos de contrato, la metodología del cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales, aplicables a las centrales de generación distribuida y generación limpia distribuida.

Se cuenta con 3 modelos de contratos de contraprestación de la energía entregada a las Redes Generales de Distribución, la instalación física es exactamente la misma en los tres casos, lo que varía es el esquema de compraventa de energía con CFE:

- **Medición Neta de Energía (Net Metering):** El cliente consume y genera energía en un mismo contrato de suministro. Esta energía se compensa entre sí y se emite una única facturación.
- **Facturación Neta (Net Billing):** La energía consumida que CFE factura al cliente es independiente de la energía que el cliente genera y vende a CFE; es decir, no se compensa. Se debe de asociar a un contrato de suministro.
- **Venta total de Energía:** El cliente vende a CFE toda la energía generada. No existe un contrato de suministro del cliente con CFE.

La CFE como la mayor generadora de energía eléctrica, busca según sus comunicados, reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, salvaguardar la biodiversidad, hacer un uso adecuado de los residuos, así como el uso racional de los recursos naturales. En materia de cambio climático, la CFE da cumplimiento a las obligaciones derivadas de Acuerdos Internacionales y la legislación local, ante las autoridades e instancias nacionales e internacionales.

Entre los acuerdos destacan:

- Acuerdos de París COP 21
- Meta nacional Sector Eléctrico LGCC 2018, 2020, 2024.
- Registro Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI): Diseño del Sistema Nacional de Monitoreo Verificación y Reporte.
- Creación del Mercado Mexicano de Carbono, el cual deberá entrar en vigor en 2017. Mecanismos Fiscales y Financieros para el Carbono.
- Certificados de Energías Limpias.

Los documento y acuerdos anteriores son los que establecen los modelos que se deben seguir en el sector energético a nivel nacional, así que no solo CFE se debe alinear a dichos modelos, las empresas privadas, pequeños productores y usuarios también deben cumplir en la medida de lo posible con los parámetros que ahí se estipulan.

Las energías renovables además de disminuir el consumo de combustibles fósiles en nuestro país, también ofrece grandes beneficios fiscales para personas físicas y morales que invierten en energía limpia. En México el Gobierno Federal apoya a cualquier persona o empresa que pague impuestos en el país para que invierta en energías renovables.

Dentro de la Ley del ISR (Ley del Impuesto Sobre la Renta), en el Artículo 34 fracción XIII, se estipula que toda inversión que se haga en energías renovables podrá ser 100% deducida de impuestos. Lo

dispuesto en esta fracción será aplicable siempre que la maquinaria y equipo se encuentren activos y operando mínimo 5 años inmediatos al ejercicio en el que se efectúe la deducción.

De manera análoga, dentro de la Ley de Transición Energética, existe un capítulo enfocado específicamente al Programa de Redes Eléctricas Inteligentes, el cual se encuentra en su Título Tercero (De las Autoridades y los Instrumentos de Planeación).

Dicho programa está enfocado a la modernización de la red nacional, mediante la implementación de tecnologías inteligentes para un mejor manejo de la información, y para mejor medición y control de la red, también se busca la reducción de costos, así como brindar un servicio de calidad. Este programa es de intereses ya que está íntimamente relacionado con el esquema de Generación Distribuida, así como con el aprovechamiento de Energías Renovables. Las microrredes inteligentes que se están estudiando en el presente trabajo, entran muy bien en los objetivos del Programa de Redes Eléctricas Inteligentes, además las tecnologías que se presentarán más adelante en este texto son una propuesta viable para alcanzar las metas que plantea el programa.

A continuación, se enlistan los principales intereses del programa :

- El uso de información digital y de tecnologías de control para mejorar la confiabilidad.
- La optimización dinámica de la operación de la Red Nacional de Transmisión y de las Redes Generales de Distribución, y sus recursos.
- El desarrollo e integración de proyectos de generación distribuida, incluidos los de generación a partir de Energías Renovables;
- El desarrollo y la incorporación de la demanda controlable y de los recursos derivados de la Eficiencia Energética.
- El despliegue de tecnologías inteligentes para la medición y comunicación en las Redes Eléctricas Inteligentes.
- La información hacia los consumidores y opciones para el control oportuno de sus recursos.
- El desarrollo e integración de tecnologías avanzadas para el almacenamiento de electricidad y de tecnologías para satisfacer la demanda en horas pico;
- La identificación y reducción de barreras para la adopción de Redes Eléctricas Inteligentes.
- La investigación sobre la viabilidad de transitar hacia un esquema de precios de la electricidad en tiempo real o por periodos de uso.

La Ley de Transición Energética también considera en su Título Noveno (De la Participación Voluntaria), en el Capítulo I llamado del Reconocimiento en Excelencia en Eficiencia Energética la creación de un reconocimiento hacia aquellas tecnologías y edificaciones diseñadas y acondicionada para hacer un uso sustentable y eficiente de la energía. La certificación y reconocimiento de Excelencia en Eficiencia Energética estará a cargo de la Secretaría de Energía , con el apoyo técnico de la CONUEE. Para su evaluación y otorgamiento, la CONUEE podrá solicitar el apoyo de la SEMARNAT, Secretaría de Economía y de la SEDATU.

También se han creado múltiples fondos y fideicomisos para el financiamiento de proyectos de energías renovables y eficiencia energética. Dentro de los principales programas se encuentra el FIDE (Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica), el cual es un organismo privado que busca desarrollar e implementar acciones que propicien el uso eficiente de la energía eléctrica y la generación con Energías Renovables. El FIDE cuenta con múltiples programas, proyectos, productos y servicios, dirigidos a los sectores residencial, industrial, comercial y de servicios, al campo, a los municipios y a las MiPyMEs, mediante los cuales ofrece opciones de asistencia técnica, diagnósticos energéticos, apoyo en la

realización de proyectos, así como financiamiento con condiciones preferenciales para la adquisición de productos que permitan el ahorro de energía eléctrica.

Actualmente existe el Fondo de Garantía CSOLAR con un total de 96 millones de pesos autorizados por el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (FOTEASE), dicho fondo tiene como objetivo principal acelerar el otorgamiento de financiamientos para la adquisición de sistemas solares fotovoltaicos interconectados, bajo la modalidad de generación distribuida y se enfoca principalmente, a los usuarios no subsidiados de las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas del sector comercial e industrial. El Fondo no es meramente económico, sino que combina actividades de asistencia técnica con un mecanismo financiero de apoyo temporal, esto enfocado a superar las barreras de financiamiento que enfrenta el sector de generación solar distribuida fotovoltaica.

### 3.3. Propiedades y factores

#### 3.3.1. Propiedades

La Generación Distribuida como uno de los principales esquemas de una microrred, se clasifica en:

- Pequeña escala cuya capacidad se encuentra entre 0 y 10 kW para uso residencial y hasta 30 kW para uso general en baja tensión, con tensión de interconexión menor a 1 kV
- Mediana escala cuya capacidad es menor a 500 kW y la tensión de interconexión es menor a 35 kV.

Las topologías de una microrred no tienen un manual establecido, por lo que suelen ser muy variadas. Generalmente, tanto las fuentes de generación distribuida, así como los sistemas de almacenamiento energético operan en corriente directa (DC). Sin embargo, el SEN trabaja en corriente alterna, por lo que se hace imprescindible el uso de convertidores.

Una microrred puede funcionar de manera aislada o con una interconexión a la red, aun así ambas configuraciones tiene que superar los estados transitorios que se generan en todo el sistema, entendiendo estado transitorio como las distintas presentaciones que tendrá la energía antes de ser aprovechada por el usuario, por cuestiones de calidad la transición entre estado debe ser estable y regulada, es fundamental controlar la potencia, ya sea de tipo activa o reactiva, y tener establecido la reacción del sistema ante faltas completas de energía. Las técnicas de control que requiere una microrred son muy sofisticadas, por lo que van desde los reguladores clásicos, hasta métodos digitales de control. La imagen siguiente nos muestra los distintos niveles de control que puede tener una microrred.

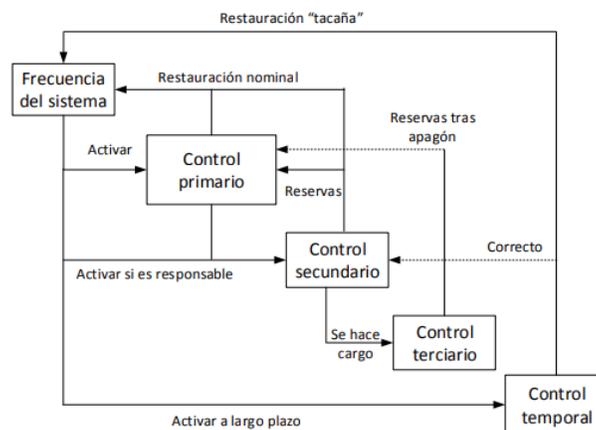


Figura 5 Control multinivel de un sistema eléctrico definido por la UCTE

Para el diseño de una microrred y en general para el análisis de estos sistemas, es necesario tomar en cuenta las siguientes particularidades:

- La demanda puede provenir de fuentes “no controlables”.
- Las unidades de almacenamiento pueden jugar un papel importante en el control y operación de una microrred.
- Una microrred es normalmente responsable de la generación y suministro de calor a todas sus cargas.
- Una microrred debe estar preparada para la conexión y desconexión de fuentes de energía distribuida y cargas, aunque haya labores de mantenimiento.

Las fuentes de energía distribuida se dividen en dos grupos: las unidades de generación distribuida y las unidades de almacenamiento distribuido. Dentro de las fuentes de energía distribuida se deben considerar dos grupos de dispositivos bien definidos, por un lado, están las unidades convencionales que se conectan a la microrred a través de máquinas rotativas y el otro grupo consiste en unidades que utilizan inversores de electrónica de potencia para acoplarse al sistema. De las máquinas rotativas sabemos que convierte la potencia de una fuente de energía primaria a potencia eléctrica y actúa como la interconexión entre la fuente y la microrred, mientras que las unidades que usan inversores pueden suministrar otro tipo de conversiones además de potencia, como el control de tensión o de frecuencia.

	<i>Fuente de energía primaria</i>	<i>Interconexión/Inversión</i>
<i>DG convencional</i>	<i>Pequeña hidroeléctrica</i>	<i>Generador síncrono</i>
	<i>Turbina eólica de velocidad fija</i>	<i>Generador de inducción</i>
<i>DG no convencional</i>	<i>Turbina eólica de velocidad variable</i>	<i>Convertidor electrónico de potencia (conversión AC-DC-AC)</i>
	<i>Microturbina</i>	
	<i>Solar fotovoltaica Pila de combustible</i>	<i>Convertidor electrónico de potencia (conversión DC-DC-AC)</i>
<i>DS a largo plazo</i>	<i>Baterías de almacenamiento</i>	<i>Convertidor electrónico de potencia (conversión DC-DC-AC)</i>
<i>DS a corto plazo</i>	<i>Supercapacitor</i>	<i>Convertidor electrónico de potencia (conversión DC-DC-AC)</i>
	<i>Flywheel</i>	<i>Convertidor electrónico de potencia (conversión AC-DC-AC)</i>

*Tabla 4 Medios de interconexión según la fuente de energía primaria*

Cuando se conectan varios generadores distribuidos en paralelo, las diferencias de tensión entre los mismos pueden dar lugar a corrientes circulantes que pueden ser perjudiciales. Para evitar estas corrientes circulantes, se utilizan dos modelos de control diferentes:

La primera es la técnica de reparto activo, esto significa que debe haber sistemas de censado y controles activos todo el tiempo para regular las potencias provenientes de los distintos generadores. Esta

configuración consigue un reparto de potencia preciso, no obstante, se necesitan comunicar los distintos generadores, resultando en sistemas poco redundantes y complejos de implementar.

La técnica de reparto activo puede presentarse bajo las siguientes configuraciones:

- Control centralizado. Se diseña un módulo central que calcula las referencias de tensión y corriente y las envía a cada convertidor.
- Maestro-esclavo. Un generador maestro se encarga del control del sistema y genera energía simultáneamente. El resto se comportan como esclavos.
- Reparto de corriente promediada. Se crea un bus de comunicación que calcula la corriente media del sistema. Según este dato, cada generador entrega una parte proporcional a su potencia nominal.
- Control de corriente circular. Disposición en anillo en la que cada módulo toma como referencia de corriente la del módulo anterior.

El segundo modelo es el Método Droop, que se rige bajo el siguiente principio: si consideramos un sistema con dos generadores síncronos en paralelo y sin carga. Cuando uno de ellos intente girar a una velocidad superior que el otro, aparece una intensidad de corriente  $I$  de tipo inductiva, debido al carácter inductivo de las impedancias síncronas. El generador uno adopta la corriente como una carga, mientras que generador dos la considera como una alimentación de potencia. Esto da lugar a que ambos generadores vuelvan a tener la misma velocidad.

El método “droop” reproduce este comportamiento en los generadores distribuidos de potencia. Se proporcionan unas características de potencia activa y reactiva a los generadores que se desea paralelizar en base a la potencia nominal de cada uno. Con esto se consigue controlar la tensión de cada generador mediante la potencia reactiva y la frecuencia mediante la potencia activa. A pesar de todas las ventajas que parece tener este método, también cuenta con algunos inconvenientes.

Ventajas	Inconvenientes
No precisa de comunicaciones	Compromiso entre regulación de tensión y reparto de potencias
Cada generador se controla de manera independiente	Mal comportamiento en el reparto de armónicos
Alta fiabilidad	Necesidad de inductancias de acoplamiento
Disposición física ilimitada	Dependencia de la impedancia de la línea
Generadores con distintos rangos de potencia	Respuesta dinámica lenta
	Dificultades en intermitencias de las energías renovables.

*Tabla 5 Ventajas e inconvenientes del método “droop”*

### 3.3.2. Factores

El principal factor que considerar cuando se quiera desarrollar un proyecto de tipo microrred es sin duda la carga o demanda de energía que va a tener el sistema, al igual que en otros proyectos de giro energético, será la demanda la que dicte la capacidad de generación y almacenamiento que deben cubrir la tecnología. Esta estimación se puede lograr a partir de conocer ciertas variables, como el número de dispositivos a alimentar y la potencia de estos, o conociendo el número de usuarios que van a interactuar con la microrred.

También es importante conocer las actividades que se van a realizar en el espacio de aplicación de la microrred, si se trata de una industria es necesario saber qué tipos de procesos se van a llevar a cabo dentro de sus instalaciones, esto nos permite establecer un diseño de la distribución de la energía, es decir hacia donde se va a direccionar y en qué momento del día, qué dispositivo podemos acoplar para asegurar la correcta distribución. Incluso se podría buscar la manera de optimizar los procesos internos de dicha industria, a través de mejores equipos o mejor organización, todo esto con la finalidad de restarle carga al sistema total.

Si se trata de una microrred de tipo comercial o residencial, la demanda de energía será mucho menor y los ahorros se podrían lograr interviniendo en los hábitos de las personas, más que en mejorar las tecnologías que están utilizando. Aun así, conocer la cotidianidad de los usuarios, nos permite establecer la demanda que tendrá la microrred y con qué tecnología podemos satisfacer dicha demanda.

Los recursos energéticos disponibles como factor de diseño pueden considerarse con la misma importancia que el factor el anterior. Lo ideal sería poder implementar la microrred en el lugar donde se tenga la mayor cantidad de recursos naturales para la generación de energía. En el caso concreto de las energías renovables, éstas suelen ser muy puntuales respecto a los lugares donde pueden ser aprovechadas, solamente la energía solar se encuentra de manera uniforme a lo largo del territorio mexicano, aunque esta tecnología puede verse limitada por otros aspectos como el espacio disponible, o el entorno (edificios, árboles, etc.).

En algunos casos primero se busca un lugar con buenas condiciones naturales para la implementación de la microrred, pero también se puede dar el caso donde ciertas cuestiones impidan que el lugar sea cambiado y la microrred debe acoplarse a los recursos que se tengan disponibles. Otro caso muy común es cuando toda la infraestructura ya está desarrollada y lleva funcionando un largo periodo de tiempo, y se busca implementar la microrred a dichas instalaciones, en esta situación específica la microrred tendrá que diseñarse bajo todas las condiciones se presenten debido a la infraestructura ya establecida.

El diagrama a continuación nos muestra que hay tres fuentes de donde se puede obtener energía, la generación gestionable hace referencia a generadores a base de hidrocarburos o a la obtención de electricidad a partir de la red eléctrica. Las fuentes renovables entran en la generación intermitente debido a su misma naturaleza, con la excepción de la geotermia que, una vez instalada la infraestructura necesaria, el recurso puede ser explotado de manera continua. Finalmente, las baterías funcionan como un generador cuando así lo requiere el sistema, o como carga cuando no están aportando energía a la microrred, las baterías son sumamente importantes ya que pueden utilizarse para satisfacer picos de demanda.

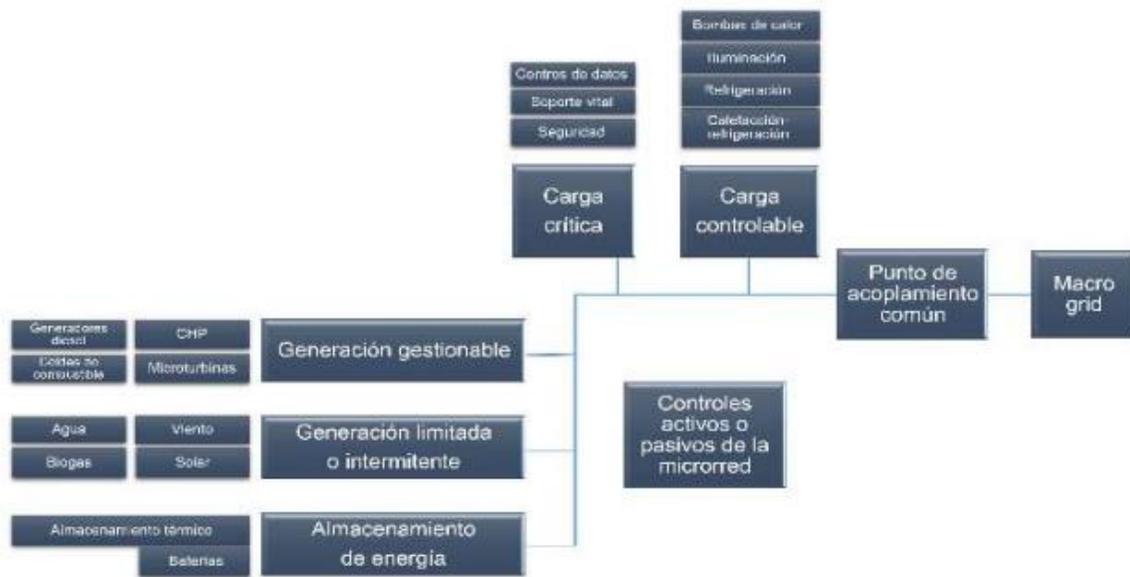


Figura 6 Panorama de los principales componentes de una microrred

El estudio de los recursos aprovechables para la microrred es muy importante ya que nos indica de donde obtendremos la energía para alimentar el sistema. Dentro de este estudio se debe considerar la administración de los residuos, ya sean orgánicos, inorgánicos o energéticos, como el calor, primero porque siempre es necesario hacer la correcta disposición de los residuos y segundo porque algunas veces estos residuos pueden convertirse en nuevas fuentes de energía: los residuos orgánicos se pueden aprovechar a través de bio-digestores, los residuos sólidos, en algunos casos, al incinerarlos y el calor siguiendo el principio de cogeneración.

El espacio disponible para la implementación de la microrred puede ser un factor determinante, ya que podría restringir la cantidad de dispositivos a utilizar. Aunque esta situación se presenta más frecuentemente en las ciudades, esto no significa que una microrred no pueda implementarse en las urbes, de hecho, son las zonas que más las requieren debido a sus altos consumos de energía. Solamente se deberá tener mayores consideraciones durante el proceso de diseño.

Si la ubicación geográfica de la microrred es muy apartada de la red eléctrica de distribución, estamos hablando necesariamente de una microrred en modo isla con sus respectivas consideraciones técnicas. Los sitios apartados también tendrán mayor dificultad para acceder a hidrocarburos, como la gasolina, el diésel y el gas natural, ya que los esquemas de distribución no suelen llegar a sitios apartados, sobre todo si son instalaciones con una finalidad específica.

La ubicación nos brinda información de los recursos energéticos disponibles, así como de las condiciones climáticas que podrían afectar a la microrred, por lo que siempre será necesario tener un amplio conocimiento de las implicaciones ambientales que tendría el proyecto. También se puede presentar el caso donde la ubicación escogida para el sistema entre en conflicto con comunidades previamente establecidas, o que se trate de zonas naturales protegidas donde no se puede construir. Todo esto entra en juego al momento de diseñar una microrred energética.

El factor económico no se puede dejar de lado en cualquier proyecto ingenieril, por lo tanto, los recursos económicos para el desarrollo de la microrred podrían establecer ciertas limitante o libertades a tomar en cuenta durante el proceso de planeación. Las microrredes se caracterizan por la utilización de tecnologías inteligentes, las cuales se encargan de la toma de datos, procesamiento de los mismo, toma de decisiones,

gestión de los recursos y control de ciertos equipos, estas tecnologías pueden encarecer este tipo de proyectos sin embargo tienen beneficios equivalentes a su costo.

Aunque aún se está lejos de la implementación de las microrredes a nivel nacional, la generación distribuida se presenta como una base sólida con la cual trabajar, y a la que poco a poco se le irán agregando más tecnologías que respondan de manera más precisa a las necesidades energéticas de las personas, de la industria y del medio ambiente.

### 3.4. Procesos de desarrollo

Debido a su habilidad para administrar una variedad de recursos energéticos como un sistema único, las microrredes han demostrado que son capaces de impulsar significativamente la penetración de las energías renovables, también son capaces de amortiguar el impacto de la variación en la generación renovable dentro de grandes sistemas de potencia. Ofrecen importantes beneficios en términos de resiliencia energética debido a su habilidad de operar de manera aislada o interconectada de la red eléctrica principal.

Hasta hace poco el uso más obvio de una microrred era proveer energía en configuraciones aisladas, áreas remotas que no estuvieran cerca de alguna red aprovechable. La mayoría de las locaciones se encontraban en países desarrollados y dependían solamente de generadores a diésel, que generalmente funcionaba durante algunas horas al día.

En poco tiempo se han creado nuevos mercados que incluyen al sector comercial e industrial, lo cuales quieren reducir sus costos por demanda energética, tomar ventaja del índice de tiempo de uso y mejorar su resiliencia. De acuerdo con Navigante Research los sectores comercial e industrial son los de mayor crecimiento respecto al aprovechamiento de las microrredes a nivel mundial. En realidad, no necesitan que su sistema de generación distribuida sea capaz de operar de manera independiente a la red, solo les interesa que detrás del medidor generación distribuida para ahorrar recursos económicos y generar energía limpia.

Con la caída de los costos en tecnologías solares y equipos de almacenamiento, los costos indirectos se vuelven más importante, y está demostrado que han aumentado en proporción al costo total del proyecto. Los costos indirectos incluyen todos los gastos previos a la adquisición de la tecnología, como la obtención de permisos y el financiamiento. Uno de los costos más importante de esta clasificación es el diseño del sistema. En proyectos de pequeña generación distribuida, estos costos abarcan un mayor porcentaje del total, además suelen pagarse con recursos directos del desarrollador, ya que se generan antes de que se obtenga un financiamiento.

#### 3.4.1. Tres fases en diseño de microrredes

##### **Fase uno: Pre-viabilidad /Diseño conceptual**

En la primera fase del diseño de una microrred, el usuario debe iniciar con una idea turbia pero que haga sentido. En algunos casos la información específica del sitio puede estar limitada, para lo cual se presenta una variedad de datos más generales. En este momento es importante considerarla factibilidad de la mayor variedad de diseños como sea posibles. Se deben responder preguntas como:

- ¿Se necesita una fuente de respaldo?
- En caso de necesitar una fuente de respaldo, ¿Cuál es el balance entre mayor número de baterías y el ahorro de combustible?

- ¿Cuál es el presupuesto general en términos de capital y costos de operación y como varia eso con los distintos diseños?

Estándares internacionales de microrredes:

- IEC 62898-1 - Microgrids - Guidelines for planning and design
- IEC 62898-2 - Microgrids - Guidelines for operation and control
- IEC 62898-3-1 - Microgrids - Technical Requirements - Protection requirements in microgrids

**Fase dos: Viabilidad / Diseño detallado.**

Para este punto, el usuario debería tener suficiente información específica del sitio donde se va a instalar el sistema, además de haber hecho una elección sobre los distintos equipos a utilizar.

Esta fase también es utilizada para afinar detalles sobre el diseño, al comparar diferentes productos e identificar diferencias de eficiencia y desempeño. Se incluye una amplia actualización de la base de datos sobre los productos de los vendedores, para que sea más fácil afinar el diseño al comparar la información de los distintos proveedores.

**Fase tres: Diseño final**

En esta etapa del proyecto se deben generar los diagramas y planos detallados de ingeniería. Se deben generar información específica como el tamaño de tuberías, cableado, esquemas de protección, proceso de construcción.

El siguiente diagrama muestra como es la transición entre las distintas fases del diseño, además enlista la información que debe generar cada etapa. La última etapa se refiere a la ejecución del proyecto, desde la construcción-instalación hasta el mantenimiento continuo de la microrred.



Figura 7 Proceso de diseño de una microrred

3.4.2. Metodología de seis etapas

Otra metodología encontrada, consta de seis etapas y se centra más profundamente en la parte técnica de la microrred.

### **Etapas 1 - Recolectar información de la zona:**

Se debe disponer de información específica de la zona, que puede ser adquirida a través de: visitas a la zona para registrar el comportamiento de las diferentes variables en un período de tiempo, consulta de fuentes confiables o estimaciones que produzcan un grado de incertidumbre razonable en los casos en que no se disponga de información precisa. El método de generación de energía eléctrica dependerá de la disponibilidad de recursos en la zona.

La información preliminar que debe ser recolectada para el diseño de la microrred es la siguiente:

- Condiciones de la carga: número de usuarios, ubicación y distancia entre usuarios, área promedio de vivienda, área disponible para instalación de generadores y almacenadores y aplicación del servicio de energía.
- Condiciones de la zona: temperatura ambiente mínima, máxima y promedio, altura sobre el nivel del mar, densidad de descargas atmosféricas, resistividad aparente del terreno, identificación de ambientes salinos, identificación de ambientes húmedos y usos del suelo.
- Condiciones económicas: disponibilidad de apoyos gubernamentales, índice de necesidades básicas insatisfechas y condiciones de acceso.
- Recursos renovables: irradiación solar promedio mensual y condiciones de registro, velocidad de viento promedio mensual y condiciones de registro, potencial hídrico, producción de biomasa, potencial oceánico y potencial geotérmico.
- Recursos no renovables: diésel, gasolina y carbón.

### **Etapas 2 – Estimar perfiles de carga:**

Se calcula la demanda máxima a partir del análisis de carga por usuario y las cargas especiales o de uso común que se tengan en cuenta según el uso del suelo y la aplicación del servicio eléctrico. Una vez estimado el valor de demanda máxima de la totalidad de usuarios, se calcula la curva de carga según el tipo de servicio, aplicando los factores de demanda (Fd). Estos valores se expresan como porcentajes de la carga máxima. El resultado obtenido debe escalarse de manera que el promedio de consumo de energía por usuario sea aproximadamente 92 kWh/mes como mínimo.

### **Etapas 3 – Dimensionar los elementos que conforman la microrred:**

Las fuentes de generación de una microrred aislada deben atender la totalidad de la carga con una adecuada capacidad en reserva. A partir de la información obtenida en las dos primeras etapas, se puede estimar la capacidad para cada tipo de generación que participe en la microrred.

### **Etapas 4 – Definir la topología para la microrred:**

Según las características del terreno, el área disponible, la distribución y magnitud de las cargas, se define la topología de la red. Esto incluye la ubicación y distribución de los equipos de generación, configuración y trazado de la red de distribución, longitudes de ramales, niveles de voltaje, calibre de conductores y toda la información que sea necesaria para elaborar un diagrama unifilar de la red para asimismo modelarla y simularla.

### **Etapas 5 – Realizar análisis eléctrico:**

El análisis eléctrico de la red ante la variación de la carga y la generación a lo largo del día indicará la viabilidad operativa del diseño inicial. Para ello se realiza un análisis de tensiones en estado estable,

evaluando el flujo de potencia en cada período u hora de servicio, sobre uno o varios días que representen el comportamiento de las fuentes y la demanda a lo largo del año. La magnitud de la tensión deberá mantenerse dentro de  $\pm 10\%$  de la tensión nominal en los bornes de generación y la frecuencia dentro de  $\pm 1\%$  de su valor nominal.

### Etapa 6 – Realizar ajustes:

Con los resultados obtenidos en los flujos de potencia se determina la viabilidad operativa de la microrred. Si las caídas de voltaje superan el límite establecido deberá aumentarse el calibre de los conductores. Para el cálculo del flujo de potencia se introduce el modelo del generador slack en la simulación. La función de este elemento es evaluar la capacidad de generación determinada inicialmente. Si el generador slack absorbe potencia activa, se asume como un excedente de potencia que irá al sistema de almacenamiento. La cantidad de energía excedente determinará si es necesario redimensionar la capacidad de almacenamiento. Si el generador slack entrega potencia activa a la red, deberá compararse su aporte con la capacidad nominal de los generadores convencionales que hagan parte del diseño, para determinar si la demanda de energía adicional puede ser asumida por el conjunto de generadores definidos, o, por el contrario, deberá recalcularse la capacidad de generación. Si el promedio de la potencia entregada por el nodo slack, en cada hora, supera el 10 % de la potencia nominal de los generadores despachables, deberá aumentarse la capacidad de generación. Debe cumplirse la condición:

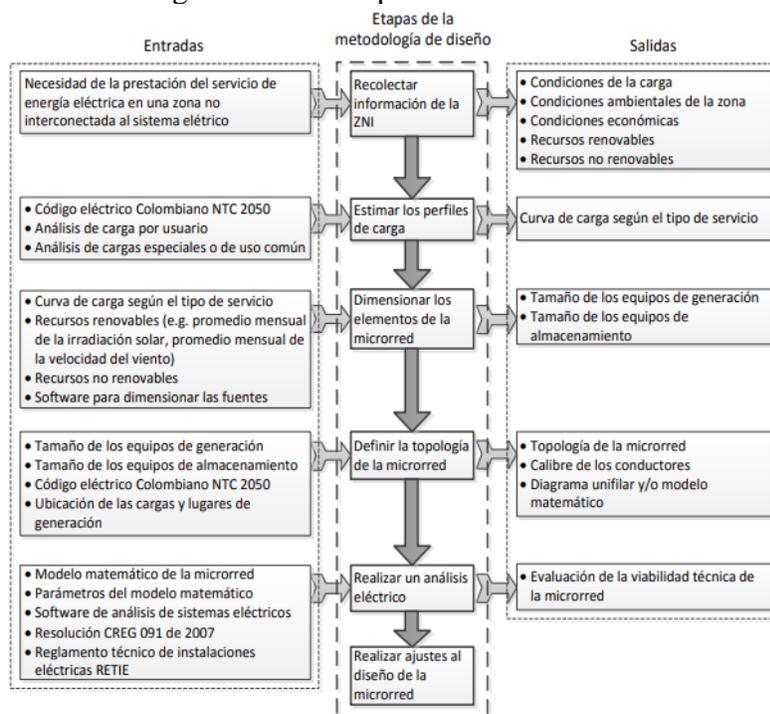
$$\frac{\sum_{i=1}^n P_{slack_i}}{n} < 1.1 \sum P_{nom_{Desp}}$$

Donde:

n: Número de horas de servicio

Pslack: Potencia de salida del generador slack

PnomDesp: Potencia nominal de generadores despachables



Nota: 1 Este diagrama es un ejemplo, por lo que no está ajustado a las normas y códigos mexicanos

Figura 8 Diagrama de flujo de las metodologías de diseño de la microrred

### 3.4.3. Desarrollo a nivel nacional

Así como hay un proceso a nivel local que nos permite diseñar una microrred, si se desea que las microrredes tengan una mayor participación en la matriz energética nacional, se debe tener una estrategia de desarrollo a nivel federal, la cual debe estar dirigida por las principales instituciones en el país. La CRE establece una serie de medidas, que se desempeñarán principalmente por la CFE, con el objetivo de lograr más interconexiones de los recursos renovables.

La CFE pudiera utilizar los recursos renovables para reducir sus pérdidas técnicas, aplazar la inversión en nuevas instalaciones de transmisión e incluso eliminar la necesidad de la construcción de nuevas infraestructuras de transmisión y distribución.

La siguiente es una lista de los principales retos en la interconexión de los recursos renovables considerando las particulares de las microrredes, y está basada en la lista que propone la CRE, pero para grandes centrales de generación:

- **Creación de zonas de energías renovables:**  
CFE tiene el conocimiento total de su sistema de transmisión, así como el potencial renovable de algunas zonas del país, mientras que los desarrolladores generalmente no poseen dicha información. CFE puede definir las zonas más idóneas para las microrredes de generación renovable donde de preferencia la factibilidad de interconexión esté disponible.
- **Reducción en la inversión y planes de retiro:**  
Los desarrolladores del proyecto pudieran aprovechar los planes de la CFE para la desinversión y el retiro de centrales antiguas e ineficientes para ubicar las microrredes, ya sea de manera aislada o cerca de estos sitios para tomar ventaja de las capacidades de transmisión que estén disponibles.
- **Temporada abierta para solicitudes de interconexión:**  
La CRE podría dirigir un proceso de Temporada Abierta para aceptar las solicitudes de interconexión. El propósito de este proceso es el de crear orden y la oportunidad de que CFE realice los estudios de interconexión considerando grupos de microrredes en lugar de realizar estudios caso por caso.
- **Identificación de proyectos viables:**  
Uno de los retos para CFE será el identificar los proyectos viables y serios, en el caso de las microrredes los riesgos de inversión corresponderían al responsable de la microrred. Aun así, es responsabilidad de la CFE asegurarse de la calidad del proyecto y asesorar a los desarrolladores.
- **Financiamiento para la modernización de la red:**  
La integración de los recursos renovables puede desencadenar la necesidad de reforzamiento del sistema de transmisión en puntos distintos al de interconexión. Si los costos se pasan a los microgeneradores, se debe desarrollar una metodología para asignar esos costos entre aquellos que crean la necesidad de reforzamiento de la red.
- **Estudio de interconexión estandarizado:**  
El concepto de un estudio de interconexión significa que la empresa o responsable proveerá al desarrollador con una lista estándar de los estudios que CFE llevará a cabo. Dependiendo de los resultados de los estudios, se le dará al desarrollador la oportunidad para ajustar el tamaño del proyecto para que sea viable.

- **Reglas de interconexión:**

La mayoría de las empresas eléctricas tienen sus propias normas de construcción y CFE no es la excepción. Para los recursos renovables pueden ser necesarias nuevas normas de construcción. Es importante que el productor tenga claro qué tipo de interconexión es aceptable para CFE. CFE ya cuenta con Reglas de Interconexión. Se recomienda que éstas se extiendan de manera que incluya las tecnologías renovables y se actualice constantemente para hacerlo más útil a los productores.

- **Equipos de certificación:**

Los fabricantes y países tienen diferentes especificaciones y requisitos para los recursos renovables. Se recomienda que en México se desarrolle una lista de los equipos que se consideren necesarios en cuanto a su operación y rendimiento.

- **Opciones de construcción:**

Las empresas de construcción privadas a menudo pueden construir instalaciones de transmisión y distribución usando la normatividad de CFE que puede resultar más económico que si lo hiciera CFE. Se recomienda que CFE certifique una lista de las empresas de construcción que puedan construir centrales, así como instalaciones de interconexión de acuerdo con sus normas.

Los retos precisos que las microrredes tienen en su operación son específicos a cada empresa eléctrica, y se deben considerar conscientemente durante su diseño. Los principales retos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Pronóstico:**

El pronóstico de corto plazo de capacidad aportada y energía generada de los generadores eólicos y solares representa un reto importante. El pronóstico de un día en adelante para las tecnologías solares puede representar un problema complejo que podría requerir herramientas y metodologías especializadas.

- **Centrales No-Despachables:**

Los tipos más comunes de recursos renovables, tales como la eólica y la solar, no son despachables, y, además, son variables. Por lo tanto, el operador y el sistema de control de la microrred tiene que tomar en cuenta estos factores en la operación diaria.

- **Variabilidad:**

La variabilidad de la mayoría de los recursos renovables no sólo puede crear problemas en la calidad de energía, sino también aumentar la complejidad de la operación en tiempo real. El operador de la red tiene que asegurarse de que cuenta con los servicios conexos adecuados para manejar la variabilidad.

- **Seguimiento de la demanda y control de frecuencia:**

El sistema de control de la red puede considerar centrales convencionales en la asignación de unidades debido a su característica de respuesta rápida con el objetivo de hacer un seguimiento adecuado de la demanda manteniendo un valor de frecuencia aceptable.

- **Exceso de generación:**

La generación de energía con recursos renovables, especialmente eólica a menudo no coincide con la demanda. Por lo tanto, puede haber períodos con más generación renovable que demanda y tal vez ésta no sea posible transmitirla al resto del sistema. Por consiguiente, el operador de la

red debe implementar planes de restricción para solicitar la reducción en la generación de energía renovable o de otros recursos menos económicos durante condiciones de exceso de generación.

- **Gestión de potencia reactiva:**

Estos recursos renovables pueden requerir hasta tres niveles de transformación en el nivel de tensión antes del punto de interconexión. Cada etapa de transformación requiere de potencia reactiva. Este problema, se intensifica durante los periodos de máxima generación de energía, ya que muchos inversores y equipos electrónicos de potencia no pueden producir potencia reactiva durante esos periodos.

- **Incremento de las tasas de salida forzada:**

Los recursos renovables no tienen los mismos estándares de construcción que los recursos convencionales y generalmente su mantenimiento no está bajo el control de operador de la red. Por lo tanto, el operador de la microrred debería estar preparado para las salidas forzadas en el suministro de energía y caídas asociados los recursos renovables.

- **Mayor complejidad y riesgos en la operación:**

El impacto real de los aspectos anteriores es que el operador de la microrred, así como los sistemas de monitoreo, instrumentación y control tienen que adecuarse para una mayor complejidad y mayores riesgos en la operación diaria. Una de las microrredes

### 3.5. Modelos de evaluación

Un modelo de evaluación es importante ya que nos permite calificar la eficacia de alguna medida, proyecto o tecnología. Las microrredes necesitan en evaluadas de manera individual, pero también en conjunto como innovación en la gestión de la energía, ya que al tratarse de una tecnología relativamente nueva debemos responder a la duda de si las microrredes responden al modelo de desarrollo sostenible.

Algunas de las áreas que se pueden evaluar para conocer la calidad de una microrred son la infraestructura, la construcción de capacidad de los recursos humanos y la transferencia tecnológica.

#### 3.5.1. Infraestructura

Las tecnologías que se utilizan en una microrred permiten que la red se adapte mejor a la dinámica de la energía renovable y la generación distribuida, ayudará a las empresas, servicios y consumidores a tener un acceso más fácil a los recursos energéticos. Una parte vital para el éxito de las microrredes es comprometer al usuario y para posibilitar la participación del usuario, éstos deben tener la información que necesitan para tomar decisiones.

Utilizar AMI (Infraestructura de Medición Avanzada) como la infraestructura básica hace posible la participación efectiva del usuario ya que proporciona datos sobre precios de electricidad, ofrece a los clientes la capacidad para usar la electricidad de manera más eficiente y brinda a las compañías la capacidad de detectar los problemas de sus sistemas y de su consumo. En este tipo de sistemas hay un flujo dramático en la cantidad de datos que se generan, por lo que la infraestructura en las estaciones y segmentos de distribución necesitarán adaptarse a este aumento.

Las necesidades de la infraestructura en las microrredes deberán:

- Desarrollarse bajo estándares técnicos

- Garantizar la protección de los datos para los consumidores
- Brindar soporte continuo para innovación de tecnología y sistemas

### 3.5.2. Desarrollo de la capacidad de recursos humanos

La industria de la energía limpia es uno de los sectores con mayor crecimiento en el mundo. El desarrollar, diseñar, construir e instalar tecnología para las microrredes es parte de la creación de puestos de trabajo, los empleos que demanda una microrred requieren un conjunto de capacidades diferentes a aquellos requeridos para trabajar en la industria eléctrica convencional. Los sistemas inteligentes posiblemente van a cambiar la combinación de empleos dentro de una empresa eléctrica, es posible que reduzca el número total de empleados y cambien los requisitos de preparación, pero también es posible que más trabajos de tecnologías avanzadas sean creados. Las áreas donde se pueden crear empleos en una microrred incluyen:

- La instalación.
- Técnicos de relevadores y técnicos en comunicaciones
- Seguridad informática
- Técnicos de red

El número de empleos generados por un proyecto es un indicador común que se utiliza para evaluar los beneficios económicos y sociales, adjuntos a dicho proyecto. Vinculados a este mismo indicador, se puede evaluar los salarios, las condiciones de trabajo y las garantías que tienen los trabajadores.

### 3.5.3. Transferencia de tecnología

Cada dispositivo en la microrred puede tener sensores para reunir datos (medidores de luz, sensores de tensión, detectores de fallas, etc.) más comunicación bidireccional digital entre el dispositivo y el centro de operaciones. Los beneficios incluyen mejoras en la confiabilidad, reducción del costo de la electricidad suministrada, nuevos productos y servicios, creación de conciencia de la eficiencia de energía, protección cibernética mejorada, manejo de distintas fuentes de electricidad.

Categorías tecnológicas de la Red Eléctrica Inteligente	Componentes
Categoría de Energía Eléctrica	Generación de energía, transmisión, subestaciones, red de distribución y consumo de energía
Categoría de Comunicaciones	Redes de área local (LAN), redes de área amplia (WAN), red de área de campo (FAN/AMI) y red de área doméstica (HAN) que respaldan la infraestructura de TI
Categoría de Aplicaciones	Facturación de control de respuesta a la demanda, control de apagones, monitoreo de carga, mercados energéticos en tiempo real y una nueva gama de servicios al cliente

Tabla 6 Categorías de tecnologías de la REI

Una microrred con la correcta utilización de tecnología procura satisfacer las siguientes necesidades tecnológicas:

- Una sólida infraestructura de
- Transductores de precisión de alta calidad, Transformadores de Corriente y Transformadores Potenciales son necesarios para el cálculo de precisión de la corriente de salida del sistema.

- Sistema de Gestión de Interrupciones
- Sistema de Asignación de Unidades
- Reporte de Datos Meteorológicos
- Los recursos renovables necesarios para pronosticar la corriente de salida del sistema.
- Monitoreo de la extensión e impactos de la variabilidad y desarrollo de soluciones para su manejo
- Gestión de Variabilidad
- Medidores de Calidad

#### 3.5.4. Análisis Económico

El modelo que desarrollo la CRE para la evaluación del programa de Redes Eléctricas Inteligentes (REI) a nivel nacional podría servir de base para establecer un modelo de evaluación de una microrred, si se toma en cuenta las particularidades de una microrred. Uno de los puntos más importantes a considerar es que una microrred no tiene gastos de transmisión, ya que la energía es consumida donde se produce, solo se tiene que considerar los costos de distribución interna de la microrred.

Con el fin de desarrollar el análisis financiero de un posible programa que presente una combinación de fuentes de energía renovable y almacenamiento de energía se utiliza un planteamiento de modelos que nos permita evaluar los posibles aspectos económicos de un programa de recursos de energía distribuida.

Los pasos claves involucrados son:

1. Se miden las posibles ventajas de acuerdo con los métodos establecidos para demostrar el valor positivo del sistema.
2. Se miden los costos de la inversión para este esfuerzo y los cargos de depreciación anual asociados.
3. Se construye un método de pronósticos para evaluar los aspectos económicos proyectados para el sistema.

Aplicación	Descripción	Metodología para Cálculo de Ventajas
Aplazamiento de Generación	Reduce el consumo de horas pico del sistema con el fin de reducir las inversiones en generación	Reducción de consumo de horas picos x ahorros por kW
Demanda de Recursos de Mercado Mayorista	Reduce el consumo de horas pico del sistema con el fin de proporcionar flexibilidad en los requerimientos de generación durante el consumo de horas pico de verano	Reducción de consumo de horas pico x ahorros por kW
Regulación de Frecuencia	Fuentes de energía en línea, con base a un control de generación automática que puede responder rápidamente a las solicitudes del operador del sistema para movimientos ascendentes y descendentes	Capacidad del sistema x horas por año x precio de autorización de regulación
Reservas Sincronizadas	Fuentes de energía que pueden aumentar la producción inmediatamente en respuesta a la interrupción mayor de generación o transmisión	Capacidad del sistema x horas por año x costo de reserva
Reservas Suplementarias	Los compromisos que pueden disminuirse inmediatamente en respuesta a la interrupción mayor de generación o transmisión	Capacidad del sistema x horas por año x costo de reserva
Integración de Renovables	Involucrarse en (a) atenuar, (b) desplazar y (c) modelar fuentes de energía renovable	Capacidad del sistema x horas por año x ahorros en el costo de combustible
Arbitraje de Energía	Oportunidad para comprar energía a tarifas en horas de carga normal y venderla en tarifas de horas de mayor saturación	Capacidad del sistema x valor de arbitraje
Arranque en negro	Proceso de restaurar una central eléctrica a operación sin el apoyo de la red de transmisión de energía eléctrica externa	Capacidad del sistema x valor contractual x kW
Aplazamiento de transmisión	Reduce el consumo de horas pico del sistema con el fin de reducir las inversiones en la transmisión	Reducción de transmisión x ahorros por kW
Soporte de Voltaje	La inyección o absorción de la energía reactiva para mantener los voltajes del sistema de transmisión dentro de los rangos requeridos	Capacidad del sistema x ahorros de transmisión y distribución por kW
Aplazamiento de distribución	Reduce el consumo de horas pico del sistema con el fin de reducir las inversiones en la distribución	Reducción de distribución x ahorros por kW
Mitigación de Interrupciones	Capacidad de almacenamiento distribuida para mantener la continuidad en el suministro de energía en caso de una interrupción	Reducción de apagones x beneficio por minuto de corte
Calidad de la Energía	Mantener la energía eléctrica que habilita una carga eléctrica y la capacidad de la carga para funcionar correctamente con esa energía eléctrica	Número de eventos de calidad de energía x ahorros por evento
Reducción en Pérdida de Distribución	Las funciones dispersas permiten que la generación existente funcione de manera más eficaz y aumenta la eficacia general del sistema eléctrico	Pérdidas de línea x tasa de mejora x costo de energía al mayoreo

*Tabla 7 Resumen de las ventajas evaluadas del programa de Redes Eléctricas Inteligentes*

Un programa bien diseñado puede entregar una diversidad de servicios, incluyendo:

- Disminución de consumo en horas pico del sistema con el fin de reducir las inversiones.
- Fuentes de generación que pueden incrementar su potencia de salida inmediatamente en respuesta a la pérdida importante de generación.
- Compromisos que pueden ser inmediatamente disminuidos en respuesta a la pérdida importante de generación.
- Participación de fuentes energéticas renovables a) atenuantes, b) cambiantes y c) modeladoras
- Capacidad de almacenamiento distribuido para mantener la continuidad en el suministro de energía en caso de una interrupción
- Mantener la energía eléctrica que habilita una carga y la capacidad de la carga para que funcione correctamente con esa energía eléctrica
- Funciones distribuidas que permiten que la generación existente funcione de manera más eficiente y aumente la eficiencia general del sistema eléctrico
- Disminución de emisiones de GEI con el fin de lograr beneficios en pro del medio ambiente y cumplir con los compromisos del cambio climático
- Gastos de Capital Estimados se anticipa que los gastos de capital vayan a la baja con el paso del tiempo conforme el costo de las fuentes de energía renovable distribuidas se reduce.

Los elementos clave a evaluar para establecer las posibles ventajas de las microrredes incluyen:

- Ahorros en el precio de combustible: Al integrar los renovables a la red eléctrica de modo integral podemos reducir la dependencia en las fuentes de combustible tradicionales y los gastos asociados.
- Regulación de frecuencia: Algunos recursos de energía renovable proporcionan soporte para la regulación.

- Reservas sincronizadas: El programa de energía renovable nos permitirá dar energía a cargas ,se puede aumentar la producción inmediatamente en respuesta a una interrupción mayor de generador.
- Aplazamiento de distribución y generación: La reducción del consumo de horas pico del sistema puede permitir el aplazamiento de las inversiones en las redes de distribución y los recursos de generación.

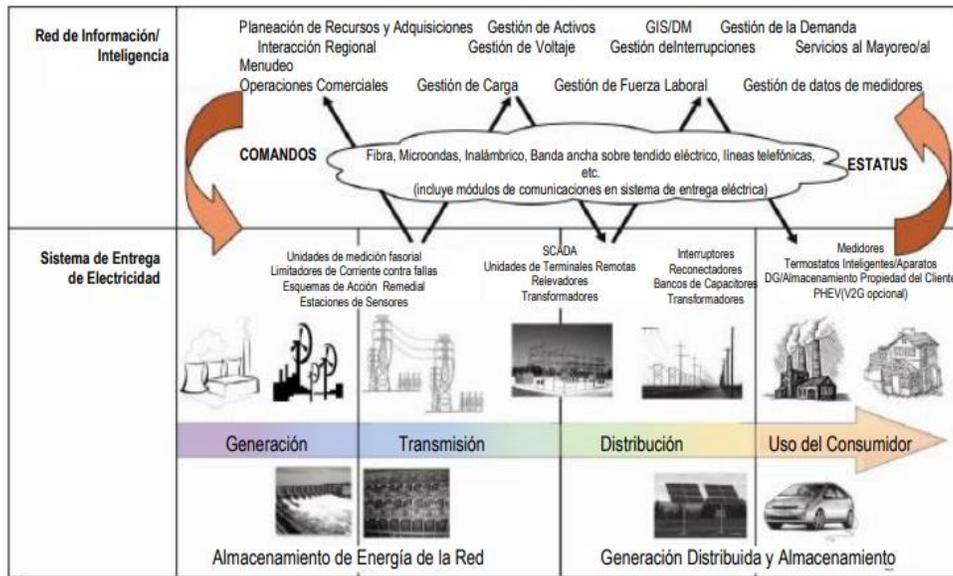


Figura 9 Marco de la red eléctrica inteligente de alto nivel

El diagrama anterior nos muestra la relación entre la red inteligente de información y el sistema eléctrico, aunque está diseñado para centrales de generación, nos da una idea de cómo es el flujo de información dentro de una microrred, pero a mucho menor escala, por lo que habrá algunos elementos que no se deben considerar.

Un segundo modelo para la evaluación de una microrred desde el punto de vista financiero y operativo nos permitiría medir el posible impacto de los sistemas dentro del alcance a) distribución interna y b) carga del cliente.

Los pasos clave incluidos son:

1. Se midieron los potenciales beneficios de cada uno de los programas de automatización de sistemas seleccionados en la distribución (Infraestructura de Medición Avanzada) AMI, conectar/desconectar, detección de fallas, monitoreo de voltaje, equilibrio de fase y carga, monitoreo de la temperatura de la compuerta del alimentador) y programas de cliente (gestión de demanda de energía, recursos de energía distribuida, servicio al cliente).
2. Se evaluaron los costos de capital para cada programa y se evaluaron los costos de depreciación anual asociados.
3. Se construyó un modelo de pronóstico para evaluar la economía general proyectada para el sistema.

El modelo mencionado toma en cuenta los ahorros energéticos que se podrían lograr con la utilización de cada una de las tecnologías evaluadas, con el objetivo de conocer el periodo de recuperación de la inversión de la microrred.

Los cinco aspectos que son vitales para el funcionamiento de una microrred y que se pueden ver reflejados en el ahorro energético son:

- Comunicaciones Integrales - Conectar todos los componentes de la red eléctrica, a través de arquitecturas abiertas
- Monitoreo y Medición - Los dispositivos que monitorean y miden diversos aspectos de la operación de la red y de ese modo soportan la respuesta más rápida y con más exactitud tal como un monitoreo remoto de voltaje, corriente, ángulos de fase, etc.
- Componentes Avanzados - Aplicando las tecnologías más nuevas de superconductividad que reducen las pérdidas de línea, almacenamiento que permite el uso de generación fuera de las horas pico para cumplir con los requerimientos del periodo de horas pico y la electrónica de potencia y el diagnóstico que mejorarán la operación y eficiencia de la red de energía eléctrica.
- Controles Avanzados - Monitoreo de componentes esenciales en tiempo real y de ese modo posibilitar la detección temprana y el diagnóstico rápido con el fin de dar soluciones precisas adecuadas a cualquier evento antes de que estos puedan provocar reacción en cadena hacia mayores problemas.
- Interfaces Mejoradas y Soporte de Decisión – Mejorar la toma de decisiones humana, brindando a los operadores de la red eléctrica y a los gerentes la información y aptitud que les dé la oportunidad de operar como visionarios cuando se trata de ver en sus sistemas.

### 3.5.5. Evaluación de la confiabilidad

Una de las ventajas más importantes de la microrred es mejorar la confiabilidad del suministro de los consumidores. La confiabilidad del consumidor es evaluada típicamente en términos del sistema y el promedio de la frecuencia de interrupciones al cliente y/o duración. La magnitud de estos beneficios depende de la criticidad de carga, el valor de la carga perdida, y la disponibilidad de otras alternativas.

### 3.5.6. Despacho de Energía

Se entiende el despacho de energía como una estrategia de control que permite realizar gestión de energía. La capacidad de atención que se explicará más adelante permite adicionar una restricción a la ecuación de despacho económico, debido a que, para el sistema, no se puede exceder la cargabilidad del sistema. Teniendo en cuenta tales restricciones es como se evaluaría el despacho busca maximizar la utilidad de todos los generadores sujetos al balance de potencia y capacidad. Un concepto similar de despacho puede ser usado en microrredes para coordinar las cargas eléctricas y la capacidad de generación de los generadores distribuidos. El problema de despacho económico bajo estas consideraciones, se formula como sigue:

$$\begin{aligned} \max J(p) &= \sum_{i=1}^N J_i(P_i) + \sum_{k=1}^K J_k(P_{\omega k}) \\ \sum_{i=1}^N P_i + \sum_{k=1}^K P_{\omega k} &= \sum_{j=1}^M P_{lj} + L(P_i) = P_l \\ 0 \leq p_i &\leq P_{\max_i} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \\ 0 \leq p_{\omega k} &\leq P_{\omega \max_i} \quad \forall k = 1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

Donde:

$P_i$  es la potencia suministrada por cada  $DG_i$  convencional.

$N$  es el número de generaciones distribuidas.

$K$  es el número de generaciones distribuidas renovables;  $P_{\omega k}$  es la potencia nominal para el  $k$  –ésimo generador distribuido renovable.

$P_l$  es la potencia total demandada por la microrred, incluyendo pérdidas.

$M$  es el número de cargas;  $P_{lj}$  es la carga demandada del nodo  $j$ .

$L(P_i)$  es la pérdida de potencia en la microrred.

$P_{maxi}$  es la capacidad de generación nominal del  $i$  –ésimo  $DG$ .

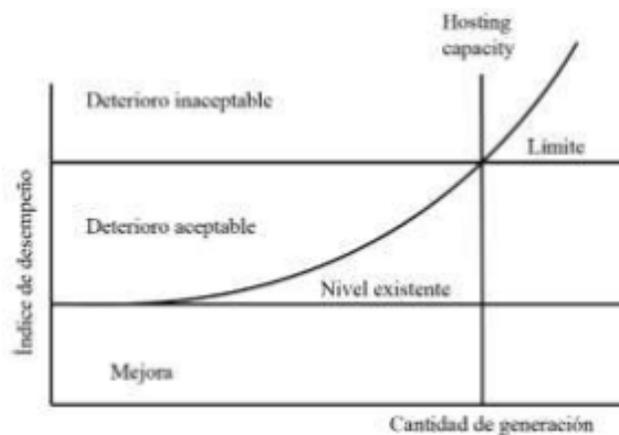
$P_{\omega maxk}$  es la máxima capacidad de generación del  $k$  –ésimo generador distribuido renovable.

$J_i(P_i)$  es la función de cada  $DG$  tradicional y,

$J_k(P_{\omega k})$  es la función de utilidad de cada fuente de energía distribuida renovable.

### 3.5.7. Capacidad de atención

La capacidad de atención es definida como la cantidad de generación distribuida para la cual el desempeño del sistema se vuelve inaceptable, en otras palabras, es la máxima capacidad de generación que puede ser conectada sin resultar en una calidad o confiabilidad inaceptable para otros consumidores. En la práctica, muchos de los índices de desempeño son definidos de forma que un bajo valor en la generación corresponde a un mejor desempeño.

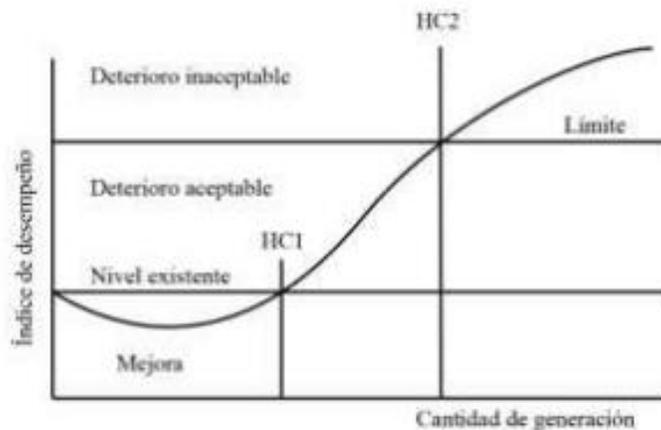


Gráfica 5 Capacidad de atención cuando aumenta la cantidad de generación aumenta el índice de desempeño.



Gráfica 6 Capacidad de atención cuando aumenta la cantidad de generación disminuye el índice de desempeño.

Existen también casos en los cuales la introducción de generación distribuida inicialmente resultará en un incremento del desempeño del sistema, pero, para una gran cantidad de generación el comportamiento se deteriora. Esto se debe al riesgo de sobrecarga y las pérdidas en la red. Ambos inicialmente se reducen, pero se incrementan cuando un gran número de generaciones distribuidas están conectadas.



Gráfica 7 Capacidad de atención en el caso del índice de desempeño

De forma simplificada el método de la capacidad de atención:

- Escoger un fenómeno y uno o más índices de desempeño.
- Determinar un límite o límites adecuados.
- Calcular el índice de desempeño como una función de la cantidad de generación.
- Obtener la capacidad de atención.

Para saber cuánta generación puede ser conectada, es importante definir indicadores de desempeño adecuados. La capacidad de atención está basada en eso. La escogencia de índice y límite tendrá una gran influencia en la cantidad de generación que puede ser aceptada. Esta aproximación da una capacidad de atención para cada fenómeno (magnitud de voltaje, sobrecarga, etc.) o incluso para cada índice (número de interrupciones, duración de las interrupciones, etc.). La conexión de un generador a la red de distribución resultará en una subida de voltaje en las terminales del generador. El aumento relativo de voltaje se calcula como:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{R * P_{gen}}{V^2}$$

Donde:

$R$ : es la resistencia de fuente en los terminales del generador.

$P_{gen}$ : es la potencia activa inyectada.

$V$ : el voltaje nominal.

La capacidad de atención es calculada como:

$$P_{max} = \frac{V^2}{R} * \delta_{m\acute{a}x}$$

Donde:

$\delta_{max} = \frac{\Delta V_{max}}{V}$ : es el margen de voltaje relativo (en porcentaje).

$\Delta V_{max}$ : es el margen de voltaje absoluto (en volts).

Se puede ver que la capacidad de atención es más pequeña para un margen pequeño de sobretensión  $\delta_{max}$  y para una distancia grande de sobretensión principal (mayor  $R$ ). Ambos parámetros varían a lo largo de la línea y no es posible dar reglas generales para cuál ubicación determina la capacidad de atención. El aumento máximo de tensión admisible, con conexión de un generador, es ese que lleva la máxima magnitud de voltaje exactamente al límite de sobretensión.

## 4. Tecnologías para microrredes

### 4.1. Generadores

Entre 1831 y 1832, Michael Faraday descubrió que un conductor eléctrico que se mueve en un campo magnético generaba una diferencia potencial. Aprovechando esto, construyó el primer generador electromagnético, el disco de Faraday, un generador homopolar, empleando un disco de cobre que giraba entre los extremos de un imán con forma de herradura, generándose una pequeña corriente continua. En 1836 Hippolyte Pixii, un francés que se dedicaba a la fabricación de instrumentos, tomando como la base los principios de Faraday, construyó el primer dinamo, llamada Pixii's dynamo. Para ello se utilizó un imán permanente que se giraba mediante una manivela. En 1871 Zénobe diseña la primera central comercial de plantas de energía, que operaba en París en la década de 1870.

Los motores y generadores eléctricos son un grupo de aparatos que se utilizan para convertir la energía mecánica en eléctrica, o a la inversa, con medios electromagnéticos. Los motores y generadores se construyen de la misma manera; así pues, cualquier generador puede operar como un motor y viceversa. Debido a esto, las propiedades fundamentales de los generadores y los motores son idénticas.

Los generadores tienen dos unidades básicas: el campo magnético, que es el electroimán con sus bobinas, y la armadura, que es la estructura que sostiene a los conductores que cortan el campo magnético y transporta la corriente inducida en un generador. La armadura es por lo general un núcleo de hierro dulce laminado, alrededor del cual se enrollan en bobinas los cables conductores.

El principio de operación que utiliza este tipo de máquinas se denomina principio de inducción. Para que puedan funcionar se debe de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos denominados polos. Por la ley de Faraday, al hacer girar una espira dentro de un campo magnético, se produce una variación del flujo de dicho campo a través de la espira y por tanto se genera una corriente eléctrica. En algunos casos se mueve la espira; en otros, se mueve el campo, y aún en otros, se mueven ambos, pero a distintas velocidades.

En la figura anterior, la espira rectangular rota dentro de un campo magnético, por lo que el flujo del campo a través de ella varía. Se crea una corriente que circula por la espira, por lo que entre los bornes (representados en verde aparece una diferencia de potencial  $\Delta V$ ).

En la actualidad existen dos tipos de generadores, los generadores de corriente continua y los generadores de corriente alterna también llamados alternadores.

#### 4.1.1. Generadores de corriente continúa

En los generadores de corriente continua la armadura gira entre dos polos de campo fijos, la corriente en la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución, y en la otra dirección durante la otra mitad. Para producir un flujo constante de corriente en una dirección, o continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. En las máquinas antiguas esta inversión se llevaba a cabo mediante un conmutador, un anillo de metal ranurado, montado sobre el eje de una armadura. Estos generadores funcionan normalmente a voltajes bajos (10V - 100V) para evitar las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a voltajes altos. En algunas máquinas más modernas esta inversión se realiza usando aparatos de potencia electrónica, como por ejemplo rectificadores de diodo.

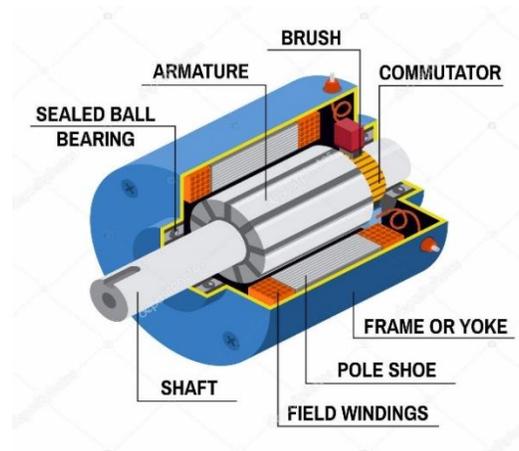


Figura 10 Partes de un generador CD

Los generadores modernos de corriente continua utilizan armaduras de tambor, que suelen estar formadas por un gran número de bobinas agrupadas en hendiduras longitudinales dentro del núcleo de la armadura y conectadas a los segmentos adecuados de un conmutador múltiple que usado con una armadura de tambor conecta siempre el circuito externo a uno de cable que se mueve a través de un área de alta intensidad del campo, y como resultado la corriente que suministran las bobinas de la armadura es prácticamente constante. Los campos de los generadores modernos se equipan con cuatro o más polos electromagnéticos que aumentan el tamaño y la resistencia del campo magnético.

#### 4.1.2. Generadores de corriente alterna (Alternadores)

Los generadores de corriente alterna, denominados alternadores, mueven las bobinas de los conductores, haciéndolas girar en el centro de campos magnéticos. De este modo se producen tensiones eléctricas entre sus bornes cuya polaridad positiva/negativa, se invierte alternativamente con el tiempo. Cuando esta tensión se aplica a un circuito eléctrico, produce en él una corriente alterna que se caracteriza por una inversión alternativa.

La corriente aumenta hasta un pico y cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube otra vez a cero varias veces por segundo. Este tipo de corriente se conoce como corriente alterna monofásica. Sin embargo, si la armadura la componen dos bobinas montadas a  $90^\circ$  una de otra y con conexiones externas separadas, se producirán dos ondas de corriente. Este tipo de corriente se denomina corriente alterna bifásica. Si se agrupan tres bobinas de armadura en ángulos de  $120^\circ$ , se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica. En la práctica de la ingeniería eléctrica moderna se usa sobre todo el alternador trifásico, que es la máquina dinamoeléctrica que se emplea normalmente para generar potencia eléctrica.

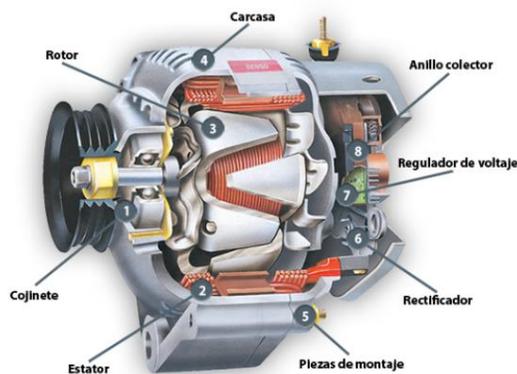


Figura 11 Partes de un generador CA

Este tipo de corriente alterna es ventajosa para la transmisión de potencia eléctrica, por lo que la mayoría de los generadores eléctricos son de este tipo. En su forma más simple, un generador de corriente alterna se diferencia de uno de corriente continua en sólo dos aspectos: los extremos de la bobina de su armadura están conectados a los anillos colectores sólidos sin segmentos, en lugar de los conmutadores, y las bobinas de campo se excitan mediante una fuente externa de corriente continua más que con el generador en sí.

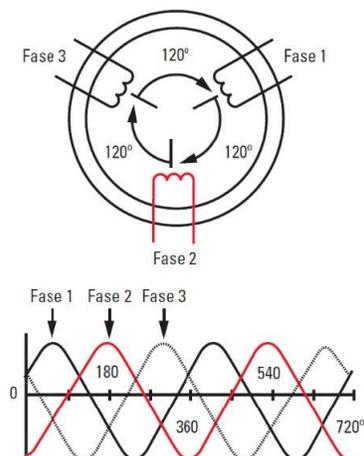


Figura 12 Esquema simplificado de un generador trifásico

#### 4.1.2.1. Generadores síncronos

Todos los generadores trifásicos utilizan un campo magnético giratorio. Cada uno de los tres electroimanes de un generador trifásico está conectado a su propia fase en la red eléctrica trifásica. Cada electroimán produce alternativamente un polo norte y un polo sur hacia el centro. Dado que la duración de la corriente en cada imán es un tercio de la de un ciclo aislado, el campo magnético dará una vuelta completa por ciclo.

Si empieza a forzar el imán para que gire el sistema trabaja como generador, devolviendo corriente alterna a la red. Cuanta más fuerza (torque) le aplique, mayor electricidad producirá, aunque el generador seguirá girando a la misma velocidad, impuesta por la frecuencia de la red eléctrica.

Se puede desconectar completamente el generador de la red y construir una red eléctrica trifásica, enganchando bombillas a tres bobinas arrolladas a electroimanes. Si desconecta el generador de la red principal se tendrá que accionar a una velocidad de giro constante para que produzca corriente alterna a una frecuencia constante. Con este tipo de generador, normalmente se usa una conexión indirecta a red.

En la práctica, los generadores síncronos de imán permanente no son muy usados. Hay varias razones para que así sea. Una ellas es que los imanes permanentes tienden a desmagnetizarse al trabajar en los potentes campos magnéticos en el interior de un generador. Otra de las razones es que estos potentes imanes (fabricados a partir de tierras raras, como el neodimio) son bastante caros.

#### 4.1.2.2. Generadores asíncronos

Lo curioso de este tipo de generador es que fue inicialmente diseñado como motor eléctrico. De hecho, una tercera parte del consumo mundial de electricidad es utilizado para hacer funcionar motores de inducción que muevan maquinaria en fábricas, bombas, ventiladores, compresores, elevadores, y otras aplicaciones donde se necesita convertir energía eléctrica en energía mecánica. Otra de las razones para la elección de este tipo de generador es que es muy fiable, y comparativamente no suele resultar caro. Este generador también tiene propiedades mecánicas que lo hace especialmente útil en turbinas eólicas como el deslizamiento del generador, y una cierta capacidad de sobrecarga.

Un componente clave del generador asíncrono es el rotor de jaula que hace que el generador asíncrono sea diferente del generador síncrono. El rotor consta de un cierto número de barras de cobre o de aluminio, conectadas eléctricamente por anillos de aluminio finales. El rotor se sitúa en el centro del estator, que en este caso se trata de nuevo de un estator tetrapolar, conectado directamente a las tres fases de la red eléctrica.

Si hacemos girar el rotor de forma manual a exactamente la velocidad síncrona del generador, p.ej. 1500 r.p.m. para el generador síncrono tetrapolar, no ocurrirá nada. Dado que el campo magnético gira exactamente a la misma velocidad que el rotor, no se produce ningún fenómeno de inducción en el rotor, por lo que no interaccionará con el estator.

Si se aumenta la velocidad por encima de las 1500 r.p.m. el rotor se mueve más rápidamente que el campo magnético giratorio del estator, lo que significa que el estator inducirá una gran corriente en el rotor. Cuanto más rápidamente hagamos girar el rotor, mayor será la potencia transferida al estator en forma de fuerza electromagnética, y posteriormente convertida en electricidad suministrada a la red eléctrica.

La velocidad de un generador asíncrono variará con la fuerza de giro (Torque) que se le aplique. En la práctica, la diferencia entre la velocidad de rotación a potencia máxima y en vacío es muy pequeña, alrededor de un 1 por ciento. Esta diferencia en porcentaje de la velocidad síncrona es el llamado deslizamiento del generador. El hecho de que el generador aumente o disminuya ligeramente su velocidad conforme el torque varía es una propiedad mecánica muy útil. Esto significa que habrá menor rotura y desgaste en la caja multiplicadora. Esta es una de las razones más importantes para la utilización de generadores asíncronos, en lugar de generadores síncronos. Una de las ventajas del rotor de jaula es que él mismo adapta el número de polos del estator de forma automática. Así pues, un mismo rotor puede ser utilizado con una gran variedad de números de polos.

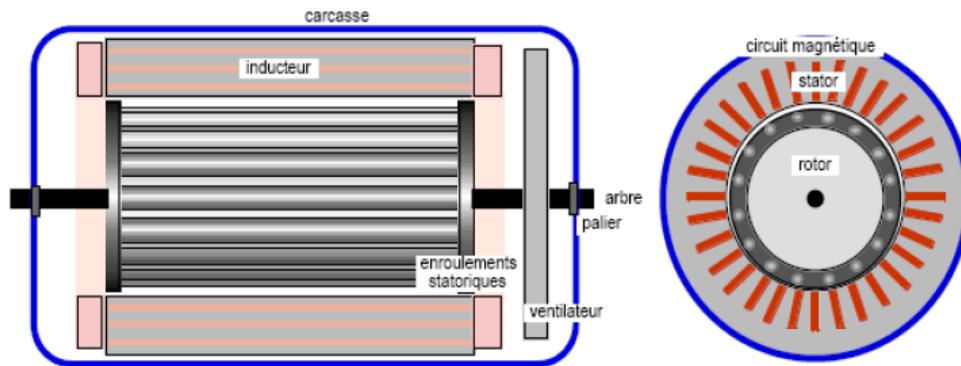


Figura 13 Generador asíncrono

Los generadores necesitan refrigeración durante su funcionamiento. En la mayoría de los casos la refrigeración se lleva a cabo mediante encapsulamiento del generador en un conducto, utilizando un gran ventilador para la refrigeración por aire, aunque algunos fabricantes usan generadores refrigerados por agua.

#### 4.2. Energías renovables

Las energías renovables se definen como energías cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable. Esto quiere decir que una energía renovable no es una energía limitada sino, por el contrario, puede regenerarse de modo ilimitado, provocando así menor daño en el planeta.

Al cierre del primer semestre de 2018 la generación por fuentes limpias alcanzó 24.12 % (40,499.01 GWh), menos de un punto porcentual para cumplir la meta del 25 % de generación de energía limpia establecida por México en la Ley de Transición Energética. Las tecnologías que mayor crecimiento presentaron fueron la fotovoltaica, la eólica y la cogeneración eficiente contribuyendo a que la capacidad instalada por fuentes limpias se incrementara 11.84 % (2,550.41 MW) y la generación en 21.71 % con respecto al primer semestre del 2017.



Gráfica 8 Porcentajes de generación con energías limpias y renovables 2018

#### 4.2.1. Energía solar

La energía solar es la fuente de energía renovable que proviene del sol, donde se producen reacciones de fusión de los átomos de hidrógeno dando lugar a un átomo de helio y liberando gran cantidad de energía que viaja a través del espacio de la cual solo una parte llega a la Tierra.

Existen tres tipos de energía solar, su diferencia radica en la manera en la que se recogen y aprovechan los rayos del sol:

- Energía solar fotovoltaica: transforma los rayos en electricidad mediante el uso de paneles solares.
- Energía solar térmica: aprovecha el calor a través de los colectores solares.
- Energía solar termoeléctrica: transforma el calor en energía eléctrica de forma indirecta.

Aún con toda la energía que se disipa, anualmente la superficie de la Tierra recibe una energía equivalente a más de 7500 veces el consumo de energía primaria mundial, valorado en unos  $473 \times 10^{18}$  J, según datos estadísticos del Consejo Mundial de la Energía. No toda esta energía no puede utilizarse, ya que se trata de una energía renovable, fiable, limpia, pero diluida, por lo que necesita de una captación con superficies de muchos metros cuadrados y durante muchas horas de exposición.

La radiación solar es el flujo de energía que llega del Sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta). Dependiendo de cómo se recibe la radiación solar se puede hablar de los siguientes tipos de radiación:

- Radiación directa: Es la que llega directamente del Sol sin que su dirección sufra ningún cambio. La característica más relevante de la radiación directa es que proyecta una sombra definida en los objetos opacos que la intercepta.
- Radiación difusa: Es aquella que proviene de la atmosfera, por dispersión de la radiación solar en ella. La cantidad de esta radiación aumenta en grandes cantidades si el día es nublado. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.
- Radiación reflejada: es aquella que “rebota” en la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también denominado albedo.

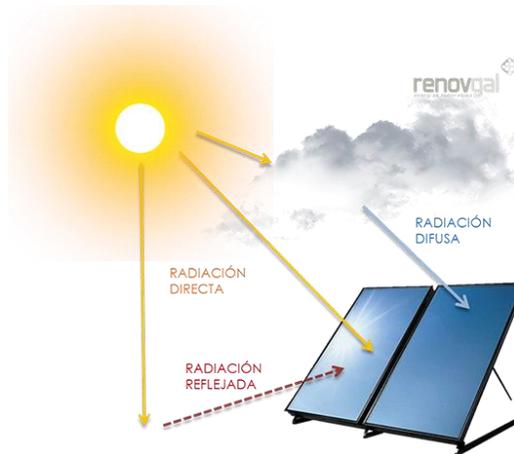


Figura 14 Tipos de radiación

Hasta el siglo XVIII nos encontramos a los primeros sistemas de energía con el sol como fuente. Todo empezó con pequeños experimentos a través de grandes lupas y espejos. Este procedimiento llegó a “profesionalizarse” en el siglo XVIII como método usado para fundir metales. Hacia la segunda mitad del siglo XIX se comenzó a experimentar de forma seria en la posibilidad de aprovechar la energía solar para fines prácticos, fue el ingeniero francés Augustin Mouchot uno de los primeros en lograr construir una máquina capaz extraer energía del sol de forma práctica. El bajo precio del carbón era el motivo al que se aferraban los industriales para no invertir en generadores solares de vapor. En aquella época se veía innecesario gastar tiempo y dinero en seguir al sol con complejos espejos cuando se podía obtener energía barata procedente de la combustión de carbón.

No se puede olvidar, al hablar de energía solar, mencionar los paneles solares. A finales del siglo XIX algunos científicos como Tesla o Einstein descubrieron los secretos del efecto fotoeléctrico. Por la llegada de la 2ª Guerra Mundial y la posterior Guerra Fría se dejó totalmente aparcado el desarrollo de la energía solar hasta mediados de los años 70 y fue gracias a la crisis del petróleo que surgió la necesidad de buscar alternativas energéticas.

#### 4.2.1.1. Criterios de integración para sistemas solares

Para saber la cantidad de energía solar disponible, contamos con tablas de radiación solar, además se pueden recurrir a páginas de centros meteorológicos y finalmente está la posibilidad de medir la radiación en sitio.

La razón de la orientación del sistema solar depende del hemisferio en el que se encuentre y la inclinación depende de la latitud del lugar. Para México la orientación es hacia el sur ya que debido a su posición

geográfica la trayectoria diaria del sol tiene cierta inclinación hacia el sur. Esta posición permite que el sistema reciba los rayos solares de manera más directa y tenga una mayor adsorción de calor en los colectores. Esto también ayuda a evitar las sombras que se propagan en el trayecto del sol en un día.

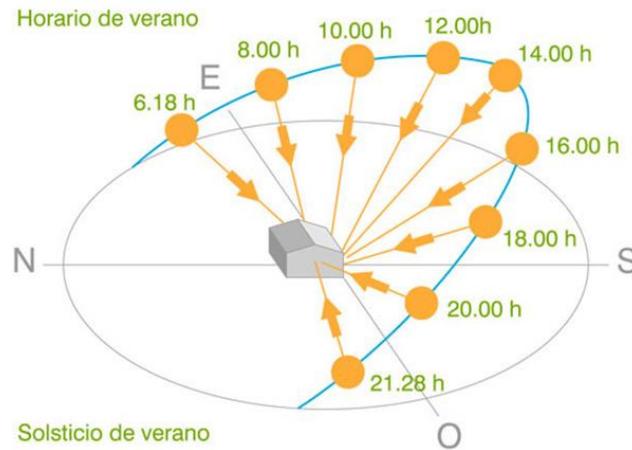


Figura 15 Posición y dirección del sol a lo largo del día

Tampoco pueden recibir sombra de los objetos aledaños o darse sombra entre ellos, es decir, los dispositivos ya sean paneles o calentadores deben colocarse con la distancia suficiente para no taparse.

#### 4.2.1.2. Energía solar térmica.

La energía solar térmica se puede aprovechar a distintas escalas ya sea baja, media o alta temperatura. Para cuestiones de este escrito solo se desarrollan los sistemas de baja y media temperatura ya que se pueden acoplar a la dinámica de una microrred.

- **Baja temperatura**

Estos sistemas utilizan la energía térmica del sol para el calentamiento de agua sin el uso de algún combustible. Este tipo de tecnologías aprovecha el efecto termosifón, es decir, al calentarse el agua se dilata, disminuye su densidad y asciende hacia el depósito. Mientras el agua fría desciende a la parte baja del colector, generando un ciclo que mantiene caliente el agua en el tanque.

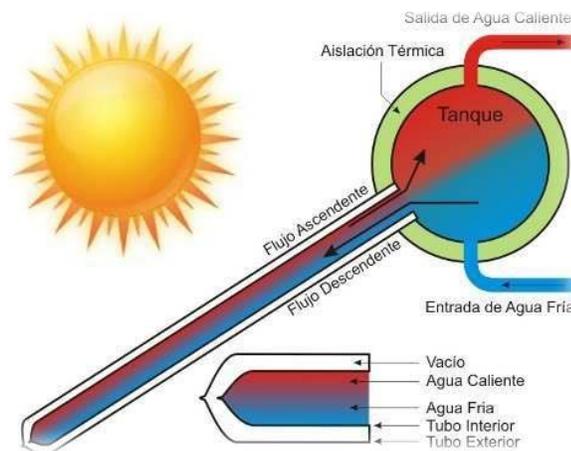


Figura 16 Efecto termosifón dentro de un calentador de agua

- **Media temperatura.**

Estos sistemas alcanzan valores de temperatura desde los 100 °C a los 600 °C. Estas temperaturas se obtienen por semi cilindros parabólicos de concentración que concentran el calor que le llega sobre un tubo que contiene un fluido de transmisión de calor (aceite térmico u otro fluido) que circula hacia un intercambiador de calor, que a su vez produce vapor para la turbina conectada al generador de electricidad.



*Figura 17 Colectores solares*

Como sabemos, la energía solar térmica es inagotable y limpia. Permite un gran ahorro en electricidad y gas, no afecta a la calidad del suelo donde se encuentra ni a la calidad del aire, es fácil de instalar y mantener. En cuanto a los inconvenientes el principal es la confiabilidad debido a que el nivel de radiación varía dependiendo de la hora del día, de la estación del año y del lugar en el que nos encontremos por lo que será necesario complementarla con otro tipo de energía.

#### 4.2.1.3. Energía solar fotovoltaica

Los sistemas fotovoltaicos aprovechan los fotones (luz solar) para transformarlos en energía eléctrica de corriente continua por medio de células fotoeléctricas.

El efecto fotovoltaico se produce cuando la energía solar incide sobre un material semiconductor en el cual se han creado artificialmente dos regiones, positiva y negativa. La positiva (P) contiene ínfimas cantidades de boro con “orificios” cargados positivamente. Por el contrario, la región negativa (N) contiene electrones adicionales. Es la unión de estos dos materiales expuestos a la luz lo que genera un campo electrostático constante, que produce un movimiento de electrones, es decir, la corriente continua, que fluyen al cerrar el circuito con una carga externa.

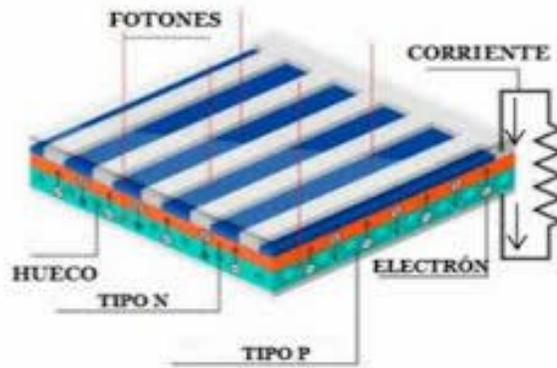


Figura 18 Efecto fotovoltaico

La unión de varias células constituye el módulo fotovoltaico y el montaje en serie, paralelo o mixto de las células permite alcanzar la tensión y corriente deseadas, y se conoce como arreglo fotovoltaico.

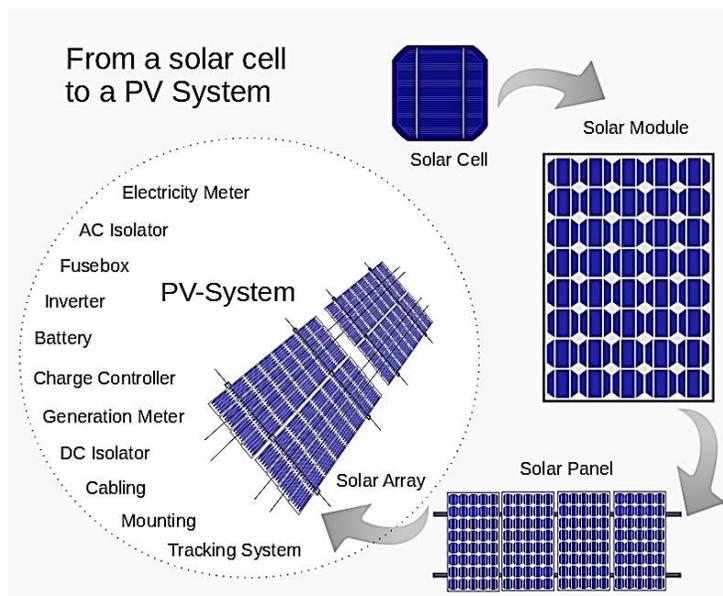


Figura 19 Arreglo fotovoltaico y sus componentes

#### 4.2.1.3.1. Elementos

- Placa solar fotovoltaica. Es el elemento que capta la radiación solar transformándola en energía eléctrica. Está formado por un conjunto de celdas conectadas entre sí. El material base, generalmente silicio, para poder utilizarse en las instalaciones fotovoltaicas, tiene ser tratado para dejarlo en un estado de pureza. Una vez es lo suficientemente puro se le introducen impurezas de átomos de boro o estaño. Con este proceso denominado dopado, el silicio se convierte en un material semiconductor. El silicio dopado se ve alterado por la radiación solar, y los fotones de la luz hacen que, al chocar con la superficie de la celda, se genere una corriente eléctrica, en este caso, corriente continua.
- Seguidor o estructura de soporte. La figura del soporte tiene gran importancia ya que es la estructura que aguanta los captadores y les da la inclinación adecuada.

- Elementos de seguridad: Los elementos de seguridad tratan de evitar posibles accidentes por sobrecargas o cortos circuitos, permiten cortar con el flujo de energía cuando así se requiera.
- Cableados para el transporte de electricidad. Elemento que lleva la energía generada hasta el punto de consumo o de interconexión a la red eléctrica.
- Acumulador. Al igual que con la energía solar térmica, si queremos autoabastecernos, nos hará falta un elemento que guarde toda esa energía generada para su posterior uso. En este caso son sistemas de baterías, normalmente de tipo plomo-ácido, parecidas a las de los coches.
- Regulador. El regulador es el elemento encargado de regular la carga y descarga de las baterías para aumentar la vida de estas, es decir, que esta carga y descarga se realice siempre de forma adecuada. Además, disponen también de funciones de seguridad y de optimización de la producción eléctrica. Aparecen en instalaciones autónomas que disponen de acumulador.
- Inversor. La corriente producida por las celdas fotovoltaicas es corriente continua, el inversor es el elemento encargado de transformar esta corriente continua en alterna para que pueda ser usada en los enchufes de cualquier casa o para vender a la red.
- Medidor bidireccional. Para las instalaciones que no son completamente de autoconsumo, es necesario disponer de un contador bidireccional de energía eléctrica en el cual se hace el balance entre la energía generada y la energía consumida.

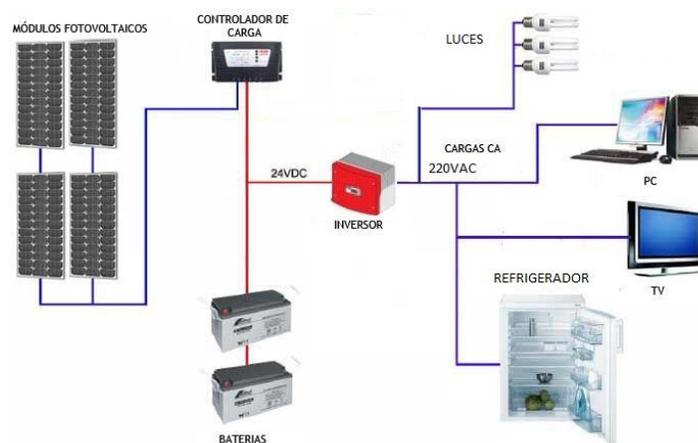


Figura 20 Conexión de sistema FV con baterías y conexión a la red

Dentro del esquema de las microrredes esta tecnología es muy adecuada para la electrificación incluso de manera aislada si se combina con un sistema de almacenamiento, cada vez son más discretas y pueden introducirse en la estructura de la vivienda sin que produzca un gran impacto estético. Para aplicaciones de bombeo de agua, refrigeración, prevención de incendios, electrificación de cercas, etc.

También es muy importante para el alumbrado en general, iluminación y control ciertos procesos como gestión de invernaderos, etc.

#### 4.2.1.3.2. Ventajas e inconvenientes.

Como ventajas se supone, en primer lugar, recursos ilimitados y sin generación de GEI, a excepción del proceso de manufactura. Los costos de producción se han reducido drásticamente en los últimos años, y solo se necesita sencillas tareas de mantenimiento. Si hablamos de los módulos, tienen la facilidad y utilidad de que pueden fabricarse de todos los tamaños y su periodo de vida es bastante elevado, ascendiendo hasta los 30 años. Además, podemos añadir que, se pueden integrar en cualquier tipo de estructura, ya sea una nueva construcción o una ya existente

El principal inconveniente es la necesidad de grandes superficies para generar la energía suficiente para abastecer la demanda de la población. Los costos de la instalación son altos, requieren una gran inversión inicial con un largo periodo de amortización que es difícil de asumir para la mayor parte de la población. Hay falta de elementos de almacenamiento de energía económicos y fiables.

También es una desventaja la intermitencia del recurso solar, hay épocas en las que las radiaciones son más intensas y durante la noche no existe generación por parte del sistema fotovoltaico.

#### 4.2.2. Energía eólica

La energía eólica tiene su origen en la fuerza del viento. El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores que, con sus aspas, transforman la energía cinética del viento en energía mecánica la cual mueve un generador que produce energía eléctrica. La energía del viento puede obtenerse instalando aerogeneradores en tierra firme o mar adentro.

El principio mecánico de funcionamiento es sencillo que ya se usaba en la antigüedad en los molinos de viento que aprovechaban la energía mecánica para moler granos de trigo, para el riego o el bombeo de agua. Los aerogeneradores actuales son más complejos, se le añaden mecanismos para obtener un mayor rendimiento y un generador para producir electricidad.



*Figura 21 Molinos de viento tradicionales.*

La primera vez que se utilizó la energía eólica fue en la navegación a vela. Antes de Cristo ya se utilizaban molinos para labores de extracción mecánica. Eran molinos sencillos que consistían en velas unidas a un eje vertical.

En el siglo XIV aparece el molino de torre. Consistía en una torre fijada al terreno y con el rotor en la parte superior, con aspas móviles que se orientaban al viento mediante un eje horizontal con pequeñas aspas perpendiculares a las aspas principales. Fue en 1892 en Dinamarca cuando se empezó a generar energía eléctrica a partir de los molinos. A cargo del profesor Lacour surgió un generador de 25 metros de diámetro con pocas palas, pero giro muy rápido, generaba un máximo de 25 kW.

Poco más tarde empezaron a aplicarse perfiles aerodinámicos a las palas apareciendo así las palas de ángulo de ataque variable que servían para regular la potencia captada. En 1973, con la crisis del petróleo y el estímulo del estudio de fuentes alternativas, se crearon mapas para cuantificar el potencial eólico disponible y se construyeron máquinas cada vez más potentes.

#### 4.2.2.1. Aerogeneradores

Las partes con las que consta todo aerogenerador son las siguientes:

- Cimentación

Todos los aerogeneradores se instalan sobre hormigón que hace de anclaje en el terreno y asegura estabilidad.

- Torre

Es la parte de acero que aguanta las palas. Tiene que soportar tanto el conjunto aerogenerador como el empuje del aire, por lo que debe ser de construcción robusta. Puede ser de dos tipos, de sección circular o de celosía.

- Rotor

Formado por las palas y el buje, que es la pieza que une las palas. Las palas han de estar muy bien equilibradas entre sí, ya que es el elemento clave y el más delicado de la estructura. La punta de la pala es de vital importancia, su forma puede hacer que se obtenga un 5-6% más de energía, condicionando el ruido que emite el aerogenerador.

- Góndola

Parte trasera del aerogenerador, se encuentra tras el rotor y encima de la torre. En su interior se encuentran todos los mecanismos necesarios para transformar el giro de las palas en electricidad.

Está compuesta por:

- Multiplicador: su misión es la de pasar la velocidad lenta proporcionada por el rotor a la alta velocidad que le interesa al generador.
- Eje motriz: también llamado eje de alta velocidad. Hace girar el rotor del generador. Se encuentra entre el generador y el multiplicador.
- Acoplamiento o eje de baja velocidad.
- Generador.
- Conductores: cables que llevan la electricidad producida.

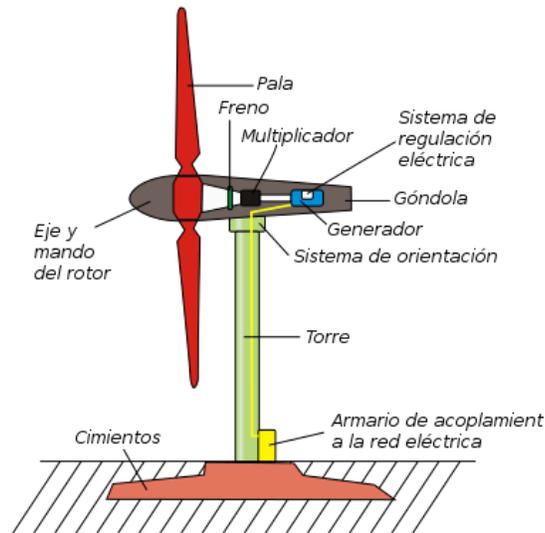


Figura 22 Elementos de un aerogenerador

#### 4.2.2.2. Micro-eólica

No existe una clasificación convencional que defina la generación micro-eólica, nos referiremos a una potencia instalada inferior a 100 kW, el uso que se le dará será el doméstico, comercial o industrial de pequeña escala.

La potencia extraíble de una turbina eólica se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\rho * C_p * h * A * v^3}{2}$$

Donde:

P: es potencia medida en watts

$\rho$ : densidad de la masa de aire medida en  $\text{kg/m}^3$

$C_p$ : coeficiente de potencia máximo de una turbina ideal de eje horizontal, igual a  $16/27 = 0.593$

h: eficiencia mecánica y eléctrica de la turbina

A: área circular de movimiento de las palas del rotor y en la que se mueve la masa de aire

v: velocidad de la masa de aire antes de pasar por las palas, medida en m/s

La potencia extraíble del recurso viento a través de un aerogenerador crece al aumentar el área cubierta por las palas (por lo tanto, al aumentar su longitud), y la velocidad del viento; depende, además, de la densidad del aire, en función de las condiciones meteorológicas del lugar (temperatura, humedad, ...). A causa de inevitables factores de escala, un rendimiento global comprendido entre 0.3 y 0.6, o sea, inferior a los de dimensiones industriales.

La mayoría de los micro-generadores son de eje horizontal con rotor a barlovento respecto a la torre y conicidad nula (el plano de rotación de las palas forma una línea paralela ideal con la horizontal).

Existen diferentes configuraciones de turbinas eólicas: monopala, bipala, tripala, multipala. El aumento del número de palas disminuye la velocidad de rotación, aumenta el rendimiento y encarece el precio de estas turbinas. El mercado se ha concentrado en la bipala y en la tripala, orientándose sobre todo hacia esta última configuración, ya que está caracterizada por un motor más uniforme, la energía se genera con un rendimiento mayor, y, además, son visualmente menos agresivos.

#### 4.2.2.2.1. Aspectos importantes del diseño

- **Material de composición de las palas**  
La mayor parte de las turbinas mini-eólicas utilizan palas fabricadas con metal plaqueado: poliéster reforzado con fibra de vidrio o, en menor proporción, con fibras de carbono, y raramente madera.
- **Orientación**  
El tamaño reducido de las turbinas mini-eólicas no permite colocar motores con orientación del rotor, casi todas las mini-turbinas tienen brazos direccionales para orientar el rotor en la dirección del viento.
- **Robustez**  
Los aerogeneradores más pesados han dado pruebas de ser de mayor robustez y fiabilidad que los más ligeros. El peso de una turbina de mini-eólica comparada con el área batida por su rotor -la llamada masa específica, medible en  $\text{kg/m}^2$ , por lo tanto, un buen indicador de elección entre máquinas diferentes. Normalmente, a una masa específica más alta corresponde un precio más alto.
- **Control de la potencia**  
En régimen de viento fuerte, las turbinas deben tener un sistema de posicionamiento pasivo del rotor que desvíe el eje respecto al de rotación de la pala. La mayor parte de las micro y miniturbinas se dobla sobre una bisagra, de modo que el rotor gire hacia el brazo direccional.
- **Generadores**  
La mayor parte de las turbinas eólicas utiliza alternadores de imán permanente: se trata de la configuración más sencilla y robusta. Para las turbinas de uso doméstico, las configuraciones de alternador pueden ser las siguientes: imán permanente, alternador convencional con devanado del campo y generador de inducción.
- **Modalidad de colocación y elección del lugar**  
El lugar de colocación de la turbina tendrá que ser determinado debidamente a través de un estudio de la zona. Hay que tener en cuenta el impacto del inevitable ruido producido por la turbina. Por otra parte, la lejanía de los elementos hace que los costes de cableado de las líneas eléctricas sean mayores, además de aumentar la dispersión de energía. La instalación más común sigue siendo la torre, de celosía, tubular o arriostrada.



Figura 23 Distintos modelos de turbinas para aplicaciones micro-eolicas

#### 4.2.2.2. Aplicaciones

##### Alimentación de elementos aislados “stand alone” y “off-grid”

- Aunque en número limitado existen usuarios privados o infraestructuras turísticas no conectados a la red. En estos casos, es posible utilizar aerogeneradores de pequeño tamaño junto con sistemas de acumulación (baterías) y sistemas híbridos (con paneles fotovoltaicos y generadores diésel).
- Otras aplicaciones están relacionadas con la alimentación de sistemas de telecomunicación (repetidores, antenas de telefonía móvil instaladas lejos de la red eléctrica, etc.).
- Sistemas de bombeo y drenaje: áreas de cultivo, etc.
- Necesidades de alumbrado público: carreteras, viaductos, túneles, faros, plataformas, semáforos, etc.

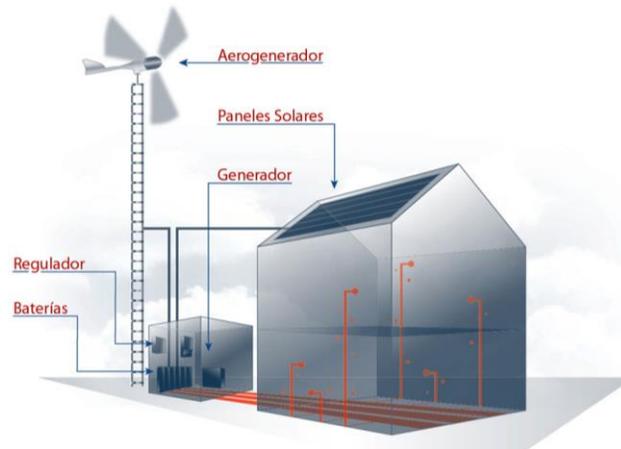


Figura 24 Ejemplo de sistema híbrido

Una importante aplicación potencial de la micro-eólica, por ejemplo, integrada en sistemas híbridos, es la disposición de redes locales en islas pequeñas. En muchas islas, el potencial de la velocidad del viento puede resultar favorable para la instalación de máquinas de tamaño reducido. Esta aplicación necesita una correcta evaluación de la estabilidad de la red, además de las posibles intervenciones de gestión y racionalización de la demanda energética.

#### 4.2.2.2.3. Ventajas e inconvenientes

De forma breve, se puede afirmar que los beneficios de las aplicaciones de la micro-eólica son:

- Suministro a zonas de otra forma aisladas o alcanzables a través de obras de mayor impacto,
- Aplicación de una política de regionalización de la producción eléctrica,
- Contribución a la diversificación de las fuentes,
- Disminución de la dependencia energética de fuentes convencionales.
- Se evita la emisión de sustancias contaminantes.

El impacto medio ambiental de las instalaciones micro-eólicas tiene elementos en común con el de las grandes instalaciones (gran ocupación de suelo, impacto visual, ruido, interferencias en las telecomunicaciones, efectos negativos sobre la fauna y la vegetación, efectos electromagnéticos), ya que interfiere con los mismos elementos naturales, aunque tenga resultados perceptivos diferentes.

Por una parte, las microturbinas tienen un tamaño mucho más pequeño que el de los grandes aerogeneradores y, por tanto, necesitan menos espacio y son relativamente poco visibles. Sin embargo, a menudo están instaladas cerca de otros elementos y pueden suponer una pérdida de espacio que podría estar destinado a otros fines, un impacto visual, interferencias en las comunicaciones y efectos electromagnéticos.

#### 4.2.3. Energía geotérmica

La energía geotérmica consiste en utilizar el calor del interior de la tierra para calefacción, calentar agua o para generar electricidad. Este calor interno, generado en la corteza profunda de la Tierra, es la causa de la lava volcánica en las erupciones y del agua caliente de las fuentes termales. La temperatura en el interior de la Tierra puede ser llegar a temperaturas de hasta 7000 °C, pero en capas más cercanas a unos 5 km al suelo terrestre disminuye hasta los 650-1200 °C.



*Figura 25 Presencia de la energía geotérmica en la naturaleza*

El potencial geotérmico no está distribuido en la Tierra de modo uniforme. Para entender esta distribución necesitamos el concepto de gradiente geotérmico, que es el número de metros que es necesario descender para que la temperatura aumente un grado. El gradiente geotérmico medio para la corteza terrestre es de 1 °C por cada 33 metros.

Hace más de 10.000 años ya utilizaban las aguas termales para darse baños, cocinar o calentarse. Los griegos y, posteriormente los romanos, dejaron ejemplos de la aplicación de la energía geotérmica en la calefacción urbana y en las tradicionales termas y baños públicos.

En 1904, se construyó en Larderello, Italia la primera central eléctrica geotérmica, la cual aún sigue en funcionamiento. Islandia es un país importante en cuanto a aplicaciones de la geotermia, por sus condiciones particulares, en 1928 comienza a utilizar la energía geotérmica para la calefacción de viviendas. Actualmente el aprovechamiento que realiza a esta fuente de energía supone el 60% del total de la energía que consume.

#### 4.2.3.1. Roca Seca Caliente

La tecnología que se utiliza es la llamada Roca Seca Caliente (Hot Dry Rock (HDR)). Consiste en abrir de nuevo las fracturas naturales que existen en las bases de las rocas. Para ello se lleva a cabo una inyección de agua a alta presión cuyo objetivo es expandir las fracturas y mover ligeramente las rocas. Al parar esta inyección de agua, aumenta la permeabilidad de las rocas formándose de este modo espacio para permitir una buena circulación de agua.

Antes de llevar a cabo esta reapertura de fracturas se realizan diversos estudios para explorar el yacimiento. Se efectúa un estudio sísmico de la zona para determinar la existencia de roca granítica y las temperaturas existentes. También debe valorarse la cantidad de agua de la que dispondrá el yacimiento, ya que si es escaseará habrá que recargarla periódicamente. Se procede a practicar perforaciones profundas y, en caso de que no se encuentren mantos freáticos naturales, se crean depósitos permeables artificiales en la roca.

El aprovechamiento de este tipo de energía se efectúa a través de vapor a alta presión que se obtiene al inyectar agua al yacimiento, ya que las rocas tienen baja conductividad térmica y la recarga natural de agua en el acuífero es lenta, por lo que, de este modo, sacaríamos calor del yacimiento de forma mucho más rápida que la capacidad propia de reposición del acuífero. La potencia de salida puede incrementarse aumentando el número de perforaciones del terreno.

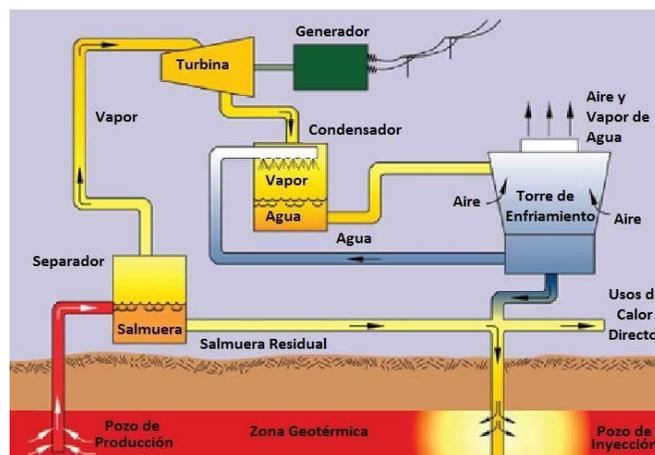


Figura 26 Diagrama de una instalación geotérmica

#### 4.2.3.2. Clasificación de fuentes de energía geotérmica.

- Energía geotérmica de alta temperatura.

Se da en los emplazamientos en los que la temperatura del terreno supera los 150 °C. Es muy difícil encontrar zonas así, deben ser zonas muy activas de la corteza terrestre. En estos casos produciremos electricidad mediante centrales eléctricas haciendo uso exclusivo de la energía geotérmica, sin necesidad de ayuda de combustibles fósiles.

- Energía geotérmica de media temperatura.

Para este tipo el terreno se encuentra entre 100 y 150 °C. Con estas temperaturas se puede utilizar para producir electricidad en centrales eléctricas, pero, y es lo más común, ser utilizado como fluido de calefacción.

- Energía geotérmica de baja temperatura.

La temperatura está comprendida entre 22 y 100 °C. Podremos tener aplicaciones de uso directo para industrias o climatización, es decir, usos domésticos, urbanos y agrícolas.

- Energía geotérmica de muy baja temperatura.

El terreno se encuentra con una temperatura inferior a los 22 °C. Su principal uso, en este caso, es la climatización mediante una bomba de calor.

		Rango de Temperaturas en Terreno	Utilización
MUY BAJA ENTALPIA	Subsuelo (con y sin agua)	5°C < T < 25°C	Calefacción, ACS, Climatización
	Aguas Subterráneas	10°C < T < 22°C	
BAJA ENTALPIA	Aguas Termales	22°C < T < 50°C	Balnearios, Acuicultura
	Zonas Volcánicas	T < 100°C	District Heating
	Almacenes Sedimentarios Profundos		
MEDIA ENTALPIA		100°C < T < 150°C	Generación Eléctrica Ciclos Binarios
ALTA ENTALPIA		T > 150°C	Generación Eléctrica

Tabla 8 Clasificación de la energía geotérmica

#### 4.2.3.3. Ventajas e inconvenientes

Una de las ventajas de todas las energías renovables es que son ilimitadas, y en el caso de la energía geotérmica una vez que se ha creado la infraestructura, el recurso puede ser explotado 24/7.

Sus instalaciones son de gran volumen lo que supone un impacto ambiental considerable, además de que puede dar lugar a contaminación de aguas por arrastre de arsénico y amoníaco. También puede dar lugar a la emisión de ácido sulfhídrico.

No tienen posibilidad de extracción en todos los lugares lo que limita mucho el desarrollo de esta alternativa energética. Además, la energía térmica recuperada debe aplicarse en la zona. En definitiva, es una energía alternativa puntual, para tener en cuenta en los lugares donde se dan las condiciones

favorables. Su principal inconveniente es la inversión inicial necesaria, mucho mayor que la de cualquier otro sistema, pero los beneficios energéticos hacen que sea una alternativa económicamente viable.

En el desarrollo de la energía geotérmica, fue especialmente útil la experiencia de la industria petroquímica en estudios sísmicos, en la modelización de acuíferos y en la evaluación de riesgos.

Se tenía previsto que la generación de electricidad por energía geotérmica aumentará un 45% para el 2020 dado que los acuíferos están principalmente situados en países de desarrollo donde la demanda de energía eléctrica no para de crecer. Sin embargo, por el alto riesgo de inversión que presenta unido a la competencia con otras fuentes renovables, posiblemente el aumento para 2020 sea solo del 10% .

#### 4.2.4. Energía hidroeléctrica

Se denomina energía hidroeléctrica a la energía eléctrica que es generada desde una fuente de energía hidráulica. Las instalaciones donde ocurre este proceso se llaman centrales hidráulicas.

Este tipo de energía tiene su origen en el movimiento del agua, lo que la hace depender de un recurso ilimitado si consideramos que los flujos aprovechados son parte del ciclo del agua por lo cual tienen la capacidad de regenerarse naturalmente. El agua de los ríos dispone de energía potencial que se convierte en cinética al producirse una caída de agua. Esta caída de agua golpea a las turbinas y hace que se muevan, mediante éstas y generadores se produce energía eléctrica.



*Figura 27 Río Papaloapan, Tuxtepec Oaxaca*

Las centrales hidroeléctricas también tienen la función de regular el caudal de los ríos y almacenar agua en los periodos más húmedos del año para ser aprovechada en periodos secos. La regulación del caudal ayuda a evitar accidentes y situaciones descontroladas, mientras que el almacenaje permite que se disponga de agua en las cuencas pudiendo para abastecer las redes de suministro durante todo el año.

La energía del agua fue utilizada ya por griegos y romanos para elevar el agua y mover ruedas de molinos mediante el uso de norias. En algunos lugares se sigue utilizando el sistema de norias para regadío de campos. Durante la Edad Media, las grandes norias de madera llegaban hasta los 50 caballos de vapor de potencia.

La energía hidroeléctrica tuvo una importancia destacable durante la Revolución Industrial, impulsando la industria textil y los talleres de construcción de máquinas. Pero al poco tiempo las ruedas hidráulicas fueron desplazadas por el motor o máquina de vapor, alimentada con carbón.

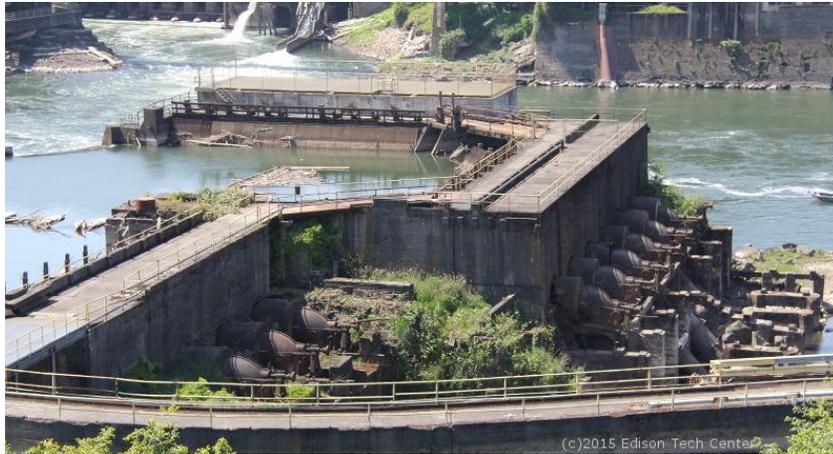


Figura 28 Central hidroeléctrica del Siglo XX

A principios del siglo XX, gracias a la aparición del generador eléctrico y a la mejora de la turbina hidráulica, añadiendo el aumento de la demanda eléctrica, se construyeron numerosas centrales hidroeléctricas en el curso de los ríos.

El esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica es relativamente simple:

- El agua se mantiene contenido por una presa, el caudal se controla y se puede mantener prácticamente constante.
- El agua se transporta por unos conductos o tuberías forzadas, controlados con válvulas y turbinas para adecuar el flujo de agua a la demanda eléctrica presente.
- El flujo llega a alta presión a la turbina, entra en ella incidiendo en sus álabes los cuales hacen que gire el eje que va conectado a un generador produciendo así la energía eléctrica.
- Luego el agua sale por los canales de descarga.

#### 4.2.4.1. Elementos

Las centrales hidroeléctricas se pueden dividir en gran hidráulica y minihidráulica. El límite inferior de generación actual está en 10 MW, por debajo de esta potencia se considera minihidráulica.

Existen dos tipos de centrales: las centrales fluyentes y las centrales de embalse o dique.

- El primer tipo son las que no cuentan con un embalse asociado a ellas, aprovechan el desnivel natural que existe en el descenso de los ríos. Funcionan con un desnivel muy grande, aunque no necesitan grandes caudales de agua. Este tipo de central se construye en los cursos altos de los ríos, lugar donde se dan estas dos características.
- El segundo tipo, cuentan con un embalse donde almacenar el agua. Aquí no se dispone de un gran desnivel, pero sí se tienen caudales muy grandes. Este tipo de centrales son adecuadas para cursos medianos y bajos de los ríos.

Los principales elementos que forman una central hidroeléctrica son los siguientes:

- Presas.

Son las barreras artificiales que se construyen en los cursos de los ríos para embalsarlos y retener su caudal. Los motivos principales para construir presas son concentrar el agua del río en un sitio determinado, regular el agua y dirigirla hacia canales y sistemas de abastecimiento, aumentar la profundidad de los ríos para hacerlos navegables, controlar el caudal de agua durante periodos de inundaciones y sequías, crear pantanos para actividades recreativas. La construcción de presas de altura y con capacidad de almacenamiento considerable, prácticamente indestructibles, se hizo posible gracias al desarrollo del cemento Portland, del hormigón, y al uso de máquinas para mover tierra.

- Embalse o cámara de carga.

Es la zona donde se almacena el agua para que esté disponible en el momento que se requiera la generación de electricidad. En las centrales de embalse, como su nombre indica, este elemento es clave, al igual que la presa, y ocupa mucha superficie. En las centrales fluyentes, al trabajar con menor caudal, no es necesario un embalse, por lo que se utilizan las cámaras de carga.

- Tubería forzada.

Elemento por el que circula el agua desde el embalse o cámara de carga hasta el edificio donde se genera la energía eléctrica. En las centrales de embalse, la tubería forzada es casi horizontal y sale de la parte inferior de la presa. En las centrales fluyentes desciende desde la parte más alta de las montañas hasta la central de generación eléctrica.

- Central de generación eléctrica.

La turbina utiliza la fuerza del agua para girar y que, así, el generador eléctrico pueda producir energía eléctrica aprovechando el movimiento. Estos dos elementos se encuentran instalados en el interior del edificio de la central de generación eléctrica. Las turbinas Pelton son adecuadas para centrales fluyentes, ya que tienen buen rendimiento en cursos de agua con un gran desnivel y poco caudal. Para las centrales de embalse, se utilizan turbinas Kaplan. Sus rendimientos óptimos se dan en cursos de agua con poca altura de desnivel y un gran caudal. Para las grandes centrales hidráulicas se suelen utilizar turbina Francis, otro tipo de turbina de reacción que necesita caudales medianos y saltos entre altos y medianos.

- Red eléctrica.

La central, para poder generar energía eléctrica, necesita un centro de transformación y una línea eléctrica que permita sacar de la central la electricidad producida.

- Canal de descarga.

Cuando ya no necesitamos más el agua utilizada se devuelve al río mediante el canal de descarga.

Las centrales reversibles tienen el fin de actuar como sistema regulador de la red eléctrica. En momentos en los que la red tiene sobreproducción funcionan en sentido inverso, cogen agua de un embalse construido a pie de la central eléctrica y la bombean hacia el embalse superior otra vez. Funcionan como sistema de almacenamiento de energía. Cuando la red eléctrica tiene un pico de demanda, trabajan en sentido contrario y producen electricidad.

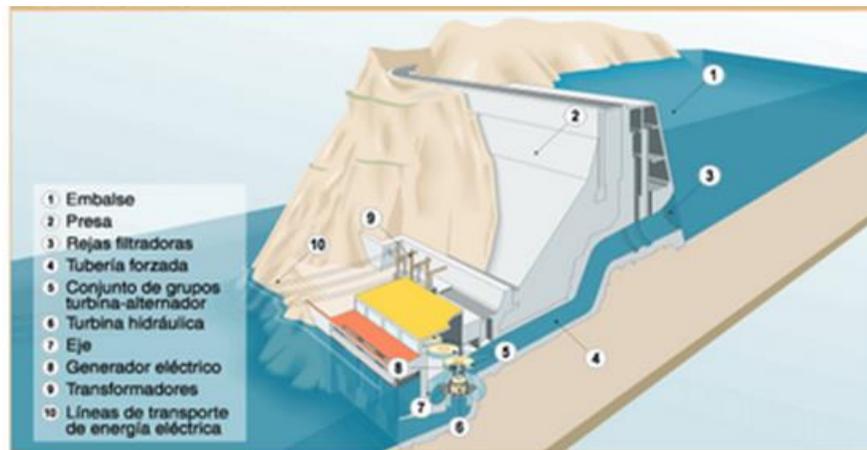


Figura 29 Diagrama de una central hidroeléctrica

#### 4.2.4.2. La minihidráulica

Como su nombre indica, la minihidráulica, es una central hidráulica, pero a pequeña escala. Debido a la disminución del caudal en los ríos, a los altos costos de inversión y al impacto ambiental las grandes centrales no tienen un gran potencial de desarrollo, en cambio, la minihidráulica va adquiriendo cada vez más importancia. Los elementos que la forman son exactamente los mismos, pero, los caudales con los que trabaja son menores.

Las centrales minihidráulicas pueden ayudar al crecimiento de pequeñas comunidades alejadas de la red eléctrica, respetando el cauce del río sin producir efectos negativos en la cuenca de este.

Los lugares ideales para su implantación son ríos con cambios rápidos de nivel, ríos con mucha pendiente y barreras naturales. En el caso de existir presa, esta no debe sobrepasar los 15 metros de altura y los 10 MW de generación. En sitios donde el desnivel del suelo sea importante y paisajes montañosos se puede aprovechar de este tipo de energía.

En las centrales minihidráulicas, se obliga a mantener un caudal mínimo del río. Es decir, no se puede derivar todo el caudal hacia la turbina ni almacenarlo en presas, el río debe contener en todo momento un caudal mínimo, denominado caudal ecológico. Sin esta medida los ríos en los que existiera una central de este tipo quedarían muy afectados.



Figura 30 Central minihidráulica

#### 4.2.4.3. Ventajas e inconvenientes

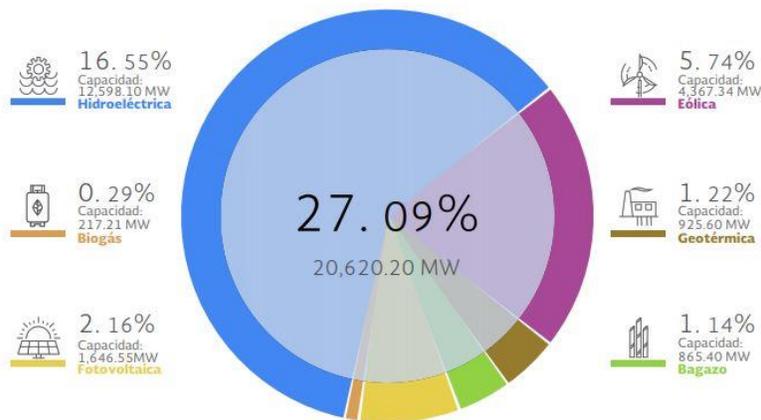
La principal desventaja de esta energía es el impacto ambiental. La construcción de grandes centrales hidráulicas supone la inundación de valles, teniendo que desplazar a la población, alterar la biología de la zona, ocasionando la migración de animales acuáticos y aves, incluso la desaparición de ciertas especies vegetales. La explicación a este hecho es la producción de microclimas y que el almacenamiento de grandes cantidades de agua da lugar a un humedecimiento en el emplazamiento.

Se ha comprobado que los embalses que hay a lo largo del curso del río actúan como sistemas de retención de sedimentos, esto hace que a la desembocadura lleguen menos sedimentos y, en consecuencia, se puede llegar a poner en peligro el mantenimiento de los deltas. Además, es poco probable que una central pueda cubrir las necesidades energéticas de todo el territorio, por lo que siempre se tendrá que contar con una fuente de apoyo.

Otro problema común de las energías renovables es la gran inversión inicial. Tanto para pagar terrenos, acondicionar la zona, hacer la presa, instalar la central, montar el parque eléctrico y la red eléctrica. Además, existe el riesgo de catástrofes por rotura de presas.

Aunque los impactos sean grandes, se pueden solucionarse tomando medidas correctoras, tanto en el diseño como en la construcción de la central. Una de estas medidas es la construcción de minihidráulicas en vez de grandes centrales.

Se puede considerar que la tecnología de este tipo de instalaciones ha llegado a su desarrollo óptimo. Actualmente la energía hidroeléctrica es la energía renovable más utilizada. Un 20% de la energía eléctrica consumida en el mundo tiene origen en la hidroeléctrica, y un 90% de la producción total de renovable tiene origen en este tipo de energía.



Gráfica 9 Aportación de las energías renovables a la matriz energética nacional

Durante los próximos años se estima que la energía hidroeléctrica seguirá siendo la líder de las renovables, pero se le acerca la energía eólica que está sufriendo un gran desarrollo. Por tanto, el futuro de la energía hidráulica es una energía estable y eficaz, que tendrá un crecimiento moderado. Ayudado de las subvenciones de los estados para las minihidráulicas.

#### 4.2.5. Energía oceánica

Los océanos cubren más del 70% de la Tierra y como colector solar capta energía del sol, de los cuales podemos obtener energía por diferentes fuentes. El aprovechamiento de la energía de los mares y océanos no está aún tan implantado como lo están otras energías renovables. No obstante, cada vez se están innovando y mejorando las técnicas para la explotación de este tipo de instalaciones. El coste de operación de estos sistemas no es muy elevado, aunque que la construcción de la implantación si supone una alta inversión. Esto hace que no sea una energía competitiva respecto a otras ya que el costo del kW tiene que ser elevado para que la central sea redituable.

Los costos de inversión irán cambiando, gracias a los avances tecnológicos y el aumento del apoyo de los gobiernos, aunado al encarecimiento del precio de los combustibles fósiles, la energía obtenida de los océanos será económicamente viable.

El viento al entrar en contacto con la superficie del mar produce olas y, la energía undimotriz aprovecha la energía cinética de estas olas para producir energía eléctrica. Existen diversos dispositivos de conversión. Los sistemas más habituales se basan en una serie de boyas que flotan, en su interior disponen de un mecanismo que permite, con la oscilación de las olas, crear corriente eléctrica que se almacena o se transporta para su aprovechamiento. Estos dispositivos se pueden instalar cerca de la costa lo que permite que el transporte de la energía sea más sencillo y barato.

Si comparamos la temperatura a distintas profundidades, podemos detectar un gradiente térmico en el agua, esa diferencia de temperatura sirve para obtener energía a través de ciclos termodinámicos como pueden ser evaporación, expansión en una turbina, enfriamiento y condensación de un fluido como el amoníaco.

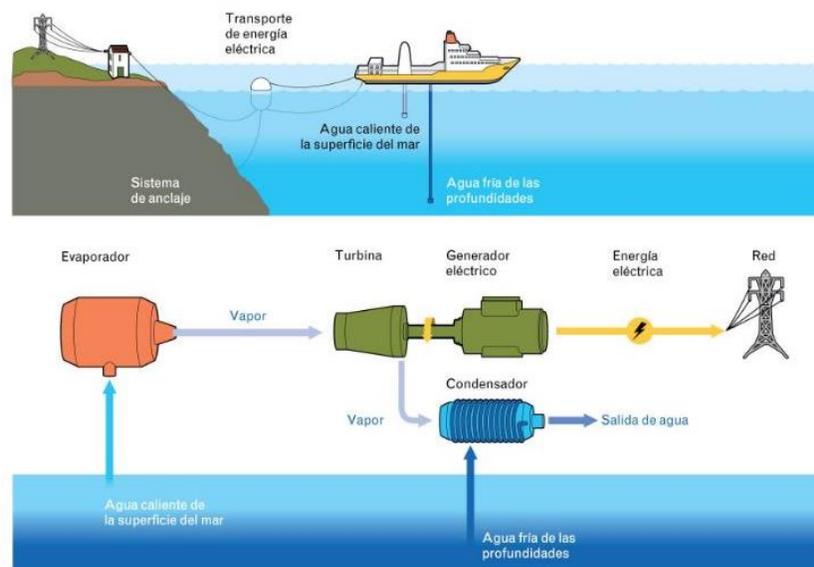


Figura 31 Energía termomotriz

Anualmente se dan, en los océanos, unas corrientes marinas que hacen que grandes masas de agua se trasladen de un lado a otro del planeta. Estos desplazamientos dan lugar a grandes caudales de agua, llegando a alcanzar entre 9 y 14 km/hora en canales entre pequeñas islas o en estrechos entre tierra e isla. Para aprovechar estas corrientes se instalan turbinas, sumergidas a 20 o 30 metros de profundidad, lo que permite generar incluso más energía que las eólicas debido a la mayor densidad del agua.

La energía obtenida a raíz del gradiente salino. Se utiliza la diferencia en la concentración de sal entre agua dulce y agua salada del mar en zonas como deltas o fiordos. La electricidad se produce mediante electrodiálisis inversa. Esta tecnología aún tiene mucho espacio para desarrollarse e innovar, sin embargo, ya existen aplicaciones reales de este principio: en Trapani Italia, se instaló un prototipo que utilizaba salmuera en vez de agua dulce y salada, siendo la concentración mucho mayor, también se instaló otra planta piloto en Afsluitdijk, Países Bajos, utilizando la diferencia de salinidad a ambos lados del dique.

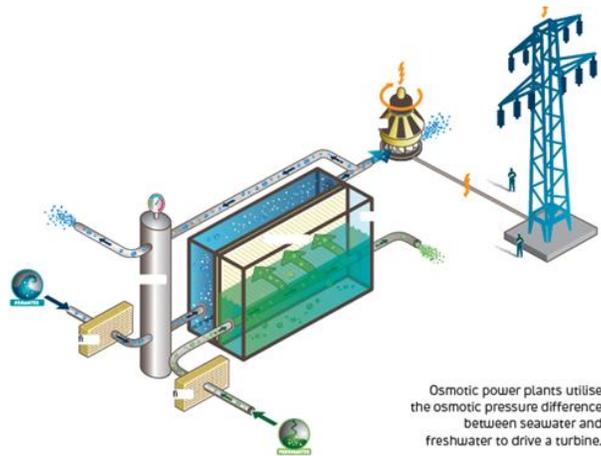


Figura 32 Generación a partir de diferencia de salinidad

#### 4.2.5.1. Energía mareomotriz

La energía de las mareas, producidas por la atracción de los cuerpos celestes, la aprovechan las centrales mareomotrices. Su funcionamiento es similar al de las centrales hidroeléctricas puesto que aprovechan el desnivel creado por las mareas. La instalación de este tipo de centrales únicamente es rentable en las zonas donde la diferencia entre la marea alta y baja supera los cinco metros. Las posibilidades de México En la parte alta del Golfo de California se registran mareas de gran amplitud que llegan a sobrepasar los 6 metros. Esto se debe a que el tiempo que tarda en subir y bajar la marea es el mismo de la onda de marea en ir y regresar hasta el fondo del Golfo, lo cual se conoce como resonancia hidráulica.

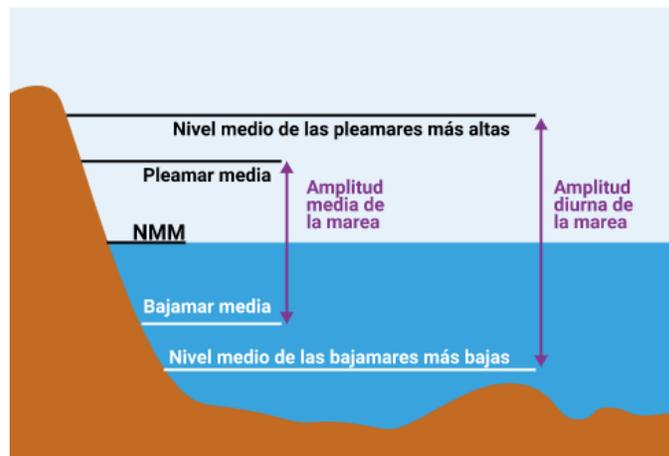


Figura 33 Partes de la marea

Esta tecnología se basa en una concavidad que puede ser natural o artificial. La idea es que esta concavidad se llene cuando la marea suba y cuando la marea esté bajando, el agua va saliendo, haciéndola

pasar por una tubería forzada seguida de una turbina que convierte la energía potencial de este desnivel del mar en energía eléctrica. Necesita de una barrera que retenga gran cantidad de agua y que así puedan moverse las turbinas. En realidad, no existen muchos otros emplazamientos en los que sea rentable este tipo de instalaciones.

Las primeras expresiones del aprovechamiento de la energía mareomotriz se remontan a los molinos de marea, dotados del siglo XI. Los primeros aparecieron en Francia y, estaban instalados en el centro de un dique que cerraba una ensenada. El embalse que se creaba de este modo se llenaba durante la pleamar y se vaciaba con la bajamar accionando una serie de paletas.

Los estudios que más lejos llegaron fueron los realizados por Estados Unidos y Canadá, en 1919, en los que la conclusión fue la construcción de una central en la frontera de ambos países, en la bahía de Fundy. Sin embargo, los estudios fracasaron quedándose a un lado y no fue hasta 1964 cuando volvieron a tenerse en cuenta. Mas actualmente con el giro que dieron los precios de los crudos y su inestabilidad, se volvió para tener en cuenta esta energía como una alternativa para el futuro.

#### 4.2.5.1.1. Ventajas e inconvenientes

Al igual que las centrales hidroeléctricas, responden de forma rápida y eficiente a las fluctuaciones de carga del sistema interconectado. Además, las mareas no dependen de la estacionalidad o anualidad, pudiendo disponer de ella en cualquier momento.

Su coste de mantenimiento es muy reducido y la vida útil de la instalación es muy larga, los equipos que permiten que se genere electricidad pueden tener una vida de unos 40 o 50 años.

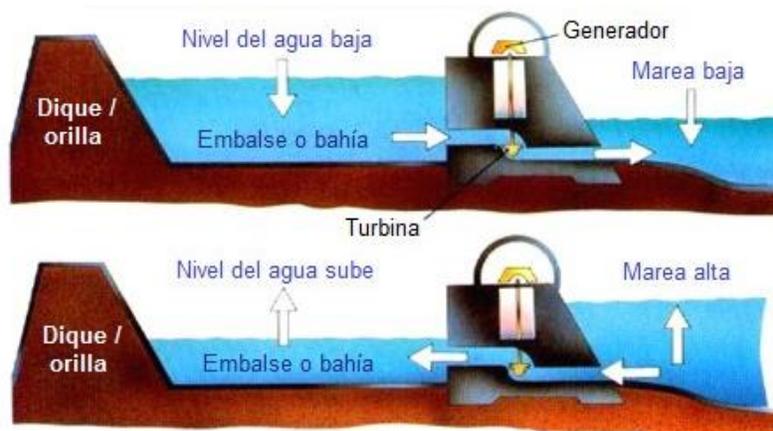


Figura 34 Funcionamiento de una central mareomotriz

Es autorrenovable, no contaminante, silenciosa, la materia prima, es de bajo coste, funciona en cualquier clima y época del año, no presenta problemas de sequía como la hidráulica y, puede proporcionar protección frente a inundaciones en la costa debidas a las altas mareas, gracias a su capacidad de embalse.

Además del enorme aporte económico que supone, su construcción e implantación es larga. Una construcción de esta índole conlleva cambios en el ecosistema, por lo que hay que realizar un estudio previo. Localizar los emplazamientos en los que este tipo de instalaciones sean rentables es complicado, y no son muchos los lugares en el mundo donde sea viable.

#### 4.2.5.2. Energía undimotriz

Las olas tienen la capacidad de desplazarse grandes distancias con un mínimo de pérdida de energía. El agua no solo se mueve de arriba abajo, sino que, en un oleaje suave también se mueve hacia delante en la cresta y hacia atrás en el seno de la ola. Por lo tanto, las moléculas individuales del agua tienen un movimiento similar a un movimiento circular, subiendo cuando la cresta se aproxima, luego hacia delante con la cresta, abajo cuando se atrasa y hacia atrás en el seno de la ola.



Figura 35 Movimiento circular de las olas

Comparándola con la energía eólica, la undimotriz es 1000 veces superior lo que permite construir dispositivos más pequeños. La energía de las olas es más constante que la del viento. Los dispositivos de energía undimotriz son, silenciosos y con muy poco impacto visual. Asimismo, es muy adecuada para la producción de hidrógeno y para la extracción de agua potable del mar.

#### 4.2.6. Bioenergía

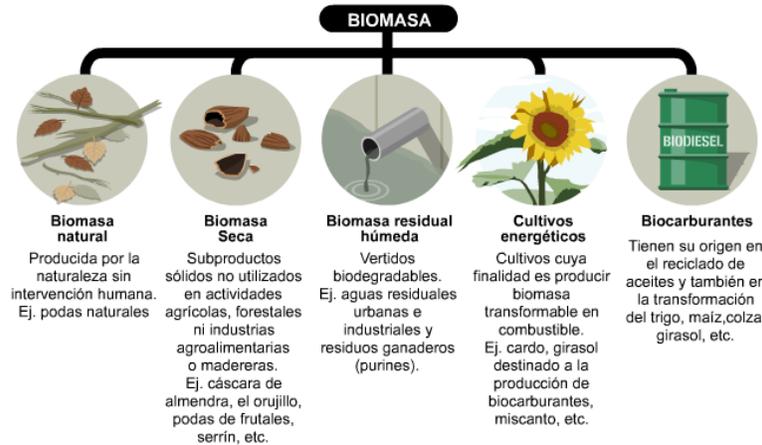
La biomasa es un combustible formado por materia orgánica renovable de origen vegetal que resulta de procesos de transformación natural o artificial en residuos energéticos.

El creciente interés del uso de la biomasa en estos últimos años viene dado principalmente por: la necesidad de no depender de la importación de combustibles, la creación de empleo local, y la reducción de las emisiones contaminantes.

Los principales orígenes de dicha materia orgánica son:

- Madera. Con la combustión de la madera se produce calor que se puede utilizar bien para calefacción o cocción de alimentos, también se utiliza para la producción de electricidad por gasificación.
- Residuos orgánicos provenientes de la industria, el uso doméstico, o agricultura. La fermentación de estos residuos da lugar a la formación de biogases con alto poder calorífico.
- Lodo de los pantanos, resultado de la acumulación de materia orgánica en el fondo de estos.

- Estiércol de animales, a pesar de pasar por un proceso de descomposición aun cuentan con un gran poder calorífico que puede ser aprovechado para ciertas aplicaciones.

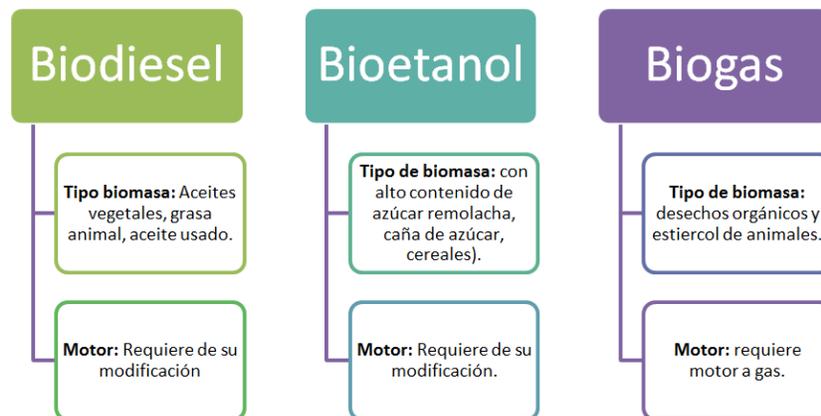


*Figura 36 Orígenes de la biomasa*

De igual manera, esta biomasa puede ser utilizada para la producción de biocombustibles:

- Biodiesel y biogasolina. Son utilizados como biocombustibles líquidos para vehículos o máquinas. Se obtiene a partir de aceites vegetales y grasas animales.
- Biogás. Mediante la digestión anaerobia (ausencia de oxígeno) la celulosa de los excrementos se degrada dando lugar a un gas que contiene un 60% de metano. Las fermentaciones anaeróbicas, también llamadas metanogénicas, producen también gas metano. Este tipo de fermentación ocurren en la naturaleza.
- Bioetanol. Es un alcohol que tiene muchas aplicaciones en diferentes campos como la alimentación, o industria farmacéutica. Se puede obtener a partir de cosechas vegetales tradicionales (maíz y trigo, por ejemplo).

Los biocombustibles no presentan una alternativa total a los combustibles fósiles pero el uso de la biomasa como medio para la obtención de energía reporta beneficios a nivel energético, económico, ambiental y social.



*Figura 37 Tipos de biocombustibles y su biomasa de origen*

Una de las principales ventajas de la biomasa es que puede ser almacenada y puede complementar a otras energías renovables cuya explotación depende de factores meteorológicos. Si se genera de manera sostenible la biomasa puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y al mismo tiempo, el uso de la biomasa reducirá ciertos riesgos derivados de la explotación de las energías como pueden ser el uso de materias primas no sostenibles, la transformación del paisaje natural, o la modificación de los ciclos biogeoquímicos.

La biomasa es utilizada desde los principios de la humanidad para calentarse y preparar alimentos, principalmente a partir de la quema de leña. Hoy en día, sigue siendo la principal fuente de energía para más de 2.000 millones de personas en el mundo. Con ayuda de la biomasa se hacía cerámica, se producían metales y se alimentaba a las máquinas de vapor.

#### 4.2.6.1. Tipos de biomasa

Abarca cualquier tipo de materia que tenga origen inmediato con un proceso biológico, ya sea animal o vegetal.

- Biomasa natural. Es aquella que se puede generar en los ecosistemas naturales, sin ningún tipo de intervención por parte del ser humano. La leña es el ejemplo más significativo de este tipo de biomasa. La explotación intensiva de este recurso sin permitir su regeneración anularía su condición de energía renovable.
- Biomasa residual. Es la que se genera a partir de actividades humanas, ya sean estas agrícolas, ganaderas o industriales. Es el tipo de biomasa más ventajosa, ya que se evita que los residuos generen contaminación o dañen al ambiente, los costes de producción y transporte son bajos.
- Excedentes agrícolas. Hay excedentes agrícolas que por distintos motivos no se utilizan para la alimentación. Se les puede dar el uso como combustible en plantas de generación eléctrica y también como biocombustibles.
- Cultivos energéticos. Son cultivos exclusivamente dedicados a la producción de energía. Algunos de ellos son cultivos tradicionales muy conocidos como los cereales o la caña de azúcar, pero también se han descubierto las grandes propiedades energéticas de cultivos como la cynara, petaca o sorgo dulce, entre otros.

#### 4.2.6.2. Transformación de energía

Podemos considerar dos métodos para transformar la biomasa en energía o combustibles, y se dividen en termoquímico y biológico.

- Métodos termoquímicos.
  - Combustión. Se quema la biomasa con gran cantidad de oxígeno, dando lugar a energía calorífica.
  - Pirólisis. Consiste en quemar leña en una combustión incompleta con algo de oxígeno. Por este método se obtienen también combustibles líquidos.
  - Gasificación. En este caso también se realiza una combustión incompleta a altas temperaturas, pero, con este método, depende de si se le aplica aire u oxígeno puro.

- Aplicando aire se obtiene gasógeno. Actualmente se emplea para generar vapor y electricidad, pero, se llegó a utilizar para mover automóviles.
- Por otro lado, si se aplica oxígeno puro y también vapor de agua, se obtiene un gas de síntesis que se puede transformar en combustible líquido.

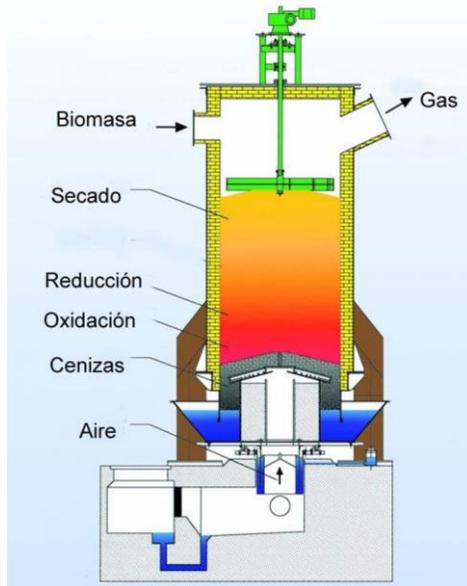


Figura 38 Proceso de gasificación

- Métodos biológicos.

- Las moléculas se degradan a compuestos más simples y de alta densidad energética mediante el uso de microorganismos. Se suele utilizar cuando la biomasa presenta gran cantidad de humedad. Los más utilizados son:
  - Fermentación alcohólica para producir etanol.
  - Digestión anaerobia para producir metano.



Figura 39 Producción de etanol por método biológico

#### 4.2.6.3. Ventajas e inconvenientes

Entre las desventajas se encuentra que no es sencillo recuperar toda la biomasa, aunque sus cantidades sean abundantes, la dispersión de la materia dificulta esta tarea. También se debe considerar que la

densidad energética de la biomasa no es demasiado elevada en comparación con los combustibles fósiles. Para hacer rentable el aprovechamiento de esta energía en instalaciones industriales se necesita tratar grandes masas de producto, con la recolección, transporte y almacenado que esto conlleva.

En ciertas zonas y en ciertas condiciones, la extracción de biomasa puede ser cara. Esto suele ocurrir en proyectos de aprovechamiento que impliquen recolección, procesado y almacenamiento de la biomasa.

#### 4.2.7. Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos nacen de la unión de dos o más sistemas de generación. Donde el sistema de respaldo suele ser de tipo no renovable.

La configuración típica de un sistema híbrido es la siguiente:

- Una o más unidades de generación de fuentes renovables: eólica, fotovoltaica, hidroeléctrica.
- Una o más unidades de generación convencional: diésel, gas natural, gasolina.
- Sistema de almacenaje de tipo mecánico, electroquímico o hidráulico.
- Sistemas de acondicionamiento de la potencia: inversor, rectificadores, reguladores de carga.
- Sistema de regulación y control.

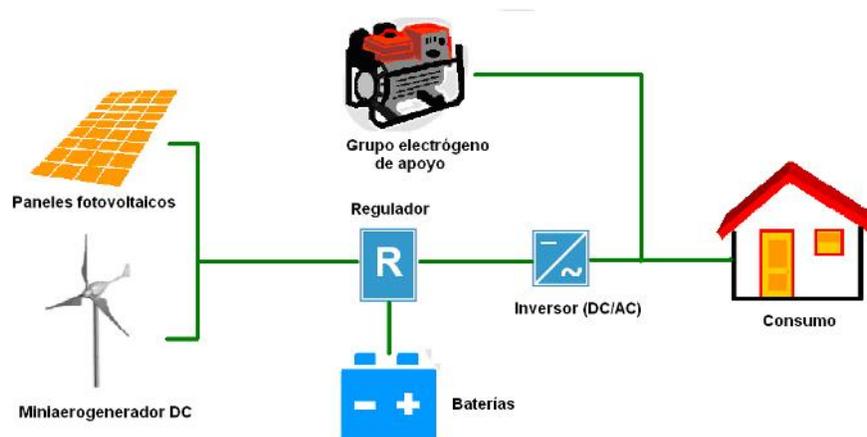


Figura 40 Sistema híbrido con generación renovable y convencional

La tendencia actual es la de proyectar sistemas híbridos en los que las fuentes renovables y el almacenamiento proporcionen hasta el 80-90% de las necesidades energéticas, dejando la utilización de los sistemas convencionales para casos excepcionales.

Los sistemas híbridos representan actualmente una solución viable para las exigencias de energía eléctrica en áreas aisladas o no electrificadas. Los sistemas híbridos permiten reducir los problemas de baja eficiencia y altos costos de mantenimiento de los sistemas convencionales, y aprovechar los recursos renovables existentes en el territorio.

##### 4.2.7.1. Aplicaciones

- Sistemas para usuarios o comunidades aisladas, con consumos alrededor de 100 kW de potencia.
- Sistemas híbridos de retrofit: se trata de sistemas renovables instalados en redes locales en media tensión, con el fin de reducir las horas de funcionamiento de los generadores diésel.

- En algunas situaciones, se pueden instalar sistemas híbridos completamente renovables. Estos sistemas combinan una fuente continua, para cubrir la necesidad energética de primaria (biomasa, energía geotérmica, mareomotriz e hidroeléctrica), y una o más fuentes intermitentes, para cubrir los picos de potencia solicitada ( eólica y solar).

#### 4.3. Celdas de combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica, sin ningún tipo de combustión. Se pueden definir como un generador que transforma la energía interna de un combustible en energía eléctrica a través de un proceso controlado. No son dispositivos de almacenaje a diferencia de las baterías convencionales. La estructura de la celda de combustible no reacciona por si sola, los reactivos son renovados y los productos evacuados permanentemente, para energía en forma de electricidad y calor.



Figura 41 Celda de combustible comercial

La primera celda de combustible fue construida en 1839 por Sir William Grove, quien demostró que la combinación de hidrógeno y oxígeno generaba electricidad además de agua y calor. Pero fue hasta comienzos de los años sesenta cuando empezaron a tener relevancia como tecnología, esto gracias a que el programa espacial de los Estados Unidos seleccionó las celdas de combustible para proporcionar electricidad y agua a las naves espaciales. Hoy en día, las celdas de combustible tienen más aplicaciones prácticas además de la industria aeroespacial, puesto que estos dispositivos están atravesando por un gran momento, al haber alcanzado una etapa que les permite competir con las tecnologías convencionales de generación eléctrica.

##### 4.3.1. Estructura y funcionamiento

La celda electroquímica está conformada por dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un electrólito. El oxígeno proveniente del aire pasa sobre un electrodo y el hidrógeno gas pasa sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado en el ánodo se oxida y pierde un electrón; al ocurrir esto, el protón de hidrogeno y el electrón toman diferentes caminos migrando hacia el segundo electrodo llamado cátodo. El hidrógeno lo hará a través del electrólito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor externo. Ambos se vuelven a reunir en el cátodo donde ocurre la reacción de reducción del oxígeno para formar agua junto con el hidrógeno oxidado. En general este proceso produce agua, corriente eléctrica y energía en forma de calor útil.

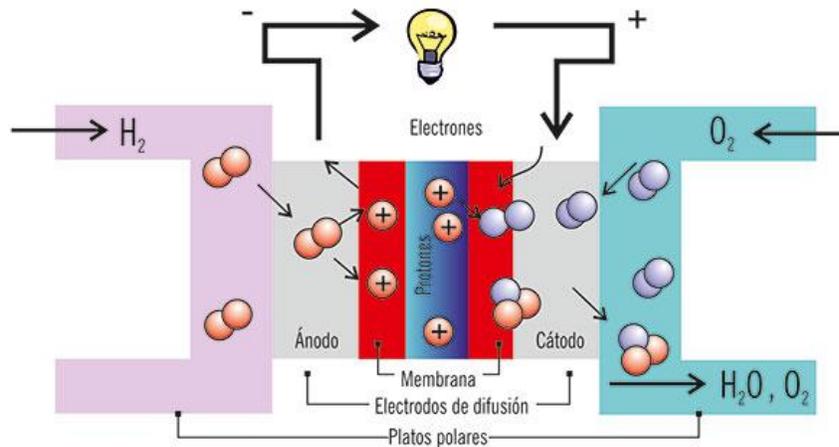


Figura 42 Flujo y reacciones de los átomos en la celda de combustible (PEM)

Existe un límite absoluto para la eficiencia de cualquier máquina térmica, que es la eficiencia de una máquina imaginaria, perfecta y reversible que trabaja con un ciclo denominado ciclo de Carnot. Esta eficiencia máxima se encuentra bastante por debajo del 100% y no es posible superarlo por medios tecnológicos. El rendimiento de una máquina térmica de Carnot sólo depende de la temperaturas máxima y mínima entre las que trabaja. Esto es muy diferente dentro de una celda de combustible, donde la eficiencia teórica está dada por las leyes de Faraday, que relacionan directamente la corriente producida en la reacción con la cantidad de combustible. Esta reacción electroquímica es exotérmica, por lo que además el calor desprendido puede ser utilizado y así aumentar la eficiencia del dispositivo.

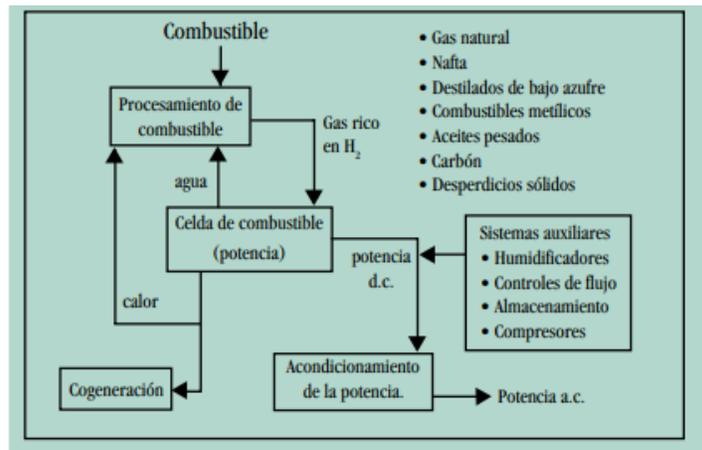


Figura 43 Diagrama simplificado de un sistema de potencia con celda de combustible

La transformación directa de la energía química en energía eléctrica se define por:

$$\Delta G + n \cdot F \cdot E_{eq} = 0$$

$$\Delta G = \Delta G^\circ(T) + RT \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right)$$

Donde:

$E_{eq}$ : es la fuerza electromotriz de la celda en equilibrio (intensidad de corriente nula)

$n$ : número de electrones intercambiados durante la reacción electroquímica elemental.

$F$ : 96500 C/mol constante de Faraday (cantidad de electricidad asociada a un molde electrones).

En el caso de las celdas de hidrogeno-oxigeno, la reacción química global asociada a la combustión de hidrogeno en el oxígeno.

La entalpia libre de reacción a 25°C en 1 atm es -237 kJ/mol de hidrógeno.

$$E_{\max} = \frac{237 \cdot 10^3}{2 \cdot 96500} = 1.23 \text{ V}, \text{ Valor teórico resultado de la reacción.}$$

Las principales perdidas de energía dentro de una pila de combustible se deben a corrientes nulas, subtensiones en los electrodos y en la membrana, fenómenos de transferencia de carga y difusión del combustible.

Por lo tanto, la energía verdaderamente obtenida se le restan las siguientes perdidas.

$$E = E_{\text{eq}} - E_L - n_{\text{act}} - n_{iR} - n_{\text{diff}}$$

Donde:

$E_L$ : fugas de gas

$n_{\text{act}}$ : subtensiones, reacciones lentas en los electrodos

$n_{iR}$ : pérdida óhmica de la celda

$n_{\text{diff}}$ : limitantes de la transferencia de materia

Esta tecnología también ofrece la posibilidad de utilizar casi cualquier combustible que contenga hidrógeno, aunque hidrocarburos como el gas natural, metanol, etanol, biogás y propano, así como el diésel y la gasolina son los que mayor atención han recibido por cuestiones prácticas.

Las celdas de combustible son en realidad una familia de tecnologías que usan diferentes electrólitos y que operan a diferentes temperaturas, donde se clasifican como de alta temperatura para celdas que trabajen a más de 200°C y las de baja temperatura cuya operación puede llegar sólo hasta los 200°C. Esta diferencia en la temperatura de trabajo se debe a las propiedades de los electrólitos. En general, las celdas de combustible de alta temperatura tienen como objetivo la generación para una potencia mayor a 1 MW, mientras que las de baja temperatura se están diseñando para salidas menores a 1 MW.

Las celdas de combustible de alta temperatura tienen una mejor eficiencia que se debe parcialmente a que las reacciones de oxidación y de reducción no requieren de materiales electrocatalizadores. Los electrocatalizadores son una forma específica de catalizadores que funciona en las superficies del electrodo o puede ser la propia superficie del electrodo, tienen la función de ayudar en la transferencia de electrones entre el electrodo y los reactivos, y son materiales costosos basados en metales nobles como el platino.

Además, la generación de vapor de alta temperatura en este tipo de celdas favorece la cogeneración mediante el aprovechamiento de la energía generada en forma de calor incrementando así la eficiencia.

#### 4.3.2. Tipos de celdas

- Celdas de ácido fosfórico (PAFC)

Este tipo de celda es el más desarrollado comercialmente y se puede encontrar en aplicaciones estacionarias y en vehículos grandes, esto a pesar de tener un electrolito corrosivo como lo es el ácido

fosfórico. Estas celdas generan electricidad utilizando gas natural a más de 40% de eficiencia y cerca de 85% si el vapor que produce se emplea en cogeneración.

- Celdas de carbonatos fundidos (MCFC)

Estas celdas utilizan sales fundidas como electrólito y tienen altas eficiencias en el consumo de combustible, los cuales pueden ser a base carbón, incluyendo CO y biocombustibles. Opera a temperaturas alrededor de los 650 °C, permite la reformación del combustible (extracción del hidrógeno contenido en hidrocarburos) dentro de la propia celda y no necesita electrocatalizadores. Algunas desventajas son la corrosividad de las sales fundidas y la necesidad de reposición de CO<sub>2</sub> en el cátodo.

- Celdas de óxido sólido (SOFC)

Una de sus principales ventajas son sus bajos costos de fabricación, además de sus costos de operación competitivos, incluso se puede usar en aplicaciones de gran potencia como estaciones de generación de electricidad. Este tipo de celda utiliza electrolitos en estado sólido permitiendo que la temperatura de operación alcance los 1000 °C. Las eficiencias pueden alcanzar un 60% sin cogeneración y un 80% con cogeneración, al tiempo que la cinética de reacción en estas celdas es muy rápida y no requiere reposición de CO<sub>2</sub> en el cátodo. Al igual que las MCFC, el hidrocarburo alimentado puede ser reformado dentro de la celda. Esta facilidad de morfología es producto de poder vaciar el material sólido en diferentes formas durante la fabricación haciéndolas, por ejemplo, planares, tubulares o monolíticas.

- Celda de polímero sólido o membrana de intercambio protónico (PEM)

Estas celdas utilizan como electrólito una membrana polimérica conductora de protones. Esta membrana se encuentra entre dos electrodos porosos impregnados en el lado interno con un electrocatalizador (usualmente platino) y un material hidrofóbico del otro lado. Operan a temperaturas relativamente bajas (unos 80 °C), pero tienen una densidad de potencia alta y pueden variar su salida rápidamente lo que las hace adecuadas para aplicaciones con una alta demanda inicial. Pueden ser fabricadas para generar varios miliamperes de corriente por centímetro cuadrado, superando en densidad de corriente a los otros tipos de celdas. Su desempeño depende de la presión, temperatura y calidad de los gases, entre otros parámetros. Este tipo de celda produce calor útil que puede aprovecharse en sistemas de calefacción y considerando las características mencionadas, son las principales candidatas para vehículos ligeros.

- Celdas alcalinas

Este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación de hasta 70%. Utilizan hidróxido de potasio como electrólito y suelen ser costosas para aplicaciones comerciales, pero varias compañías están encontrando formas de reducir estos costos. No requieren materiales nobles como catalizadores, sin embargo, tienen el factor adverso del efecto nocivo que el CO<sub>2</sub> produce al reaccionar con el hidróxido presente, por lo cual se necesita un combustible altamente puro, ya sea como hidrógeno o mediante sistemas caros de limpieza de combustible capaces de reducir al máximo la concentración del gas carbónico en el flujo del combustible.

Descripción	Electrolito	Tipo de carga transferida (ion móvil)	Resistencia a la temperatura de la membrana	Combustible	Carburante	Eficiencia (Cogeneración)	Generación (MW)	Aplicaciones
<b>PEM</b>	Membrana de intercambio protónico	H <sup>+</sup>	60-100 °C	hidrógeno	Aire	>40% (>70%)	Hasta 0.25	Generación distribuida, transporte y aplicaciones móviles.
<b>DMFC</b>	Membrana de intercambio protónico	H <sup>+</sup>	60-100 °C	Metanol directo	Aire			Sistemas portátiles de baja potencia, pero larga duración.
<b>AFC</b>	Solución alcalina KOH	OH <sup>-</sup>	60-80 °C	hidrógeno	O <sub>2</sub>	70%		Vehículos espaciales
<b>PAFC</b>	Ácido fosfórico	H <sup>+</sup>	180-220 °C	hidrógeno	Aire	>40% (>80%)	0.2-10	Generación distribuida, cogeneración y transporte.
<b>MCFC Melt carbonante</b>	Carbonato fundido (sal fundida inmóvil)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	600-660 °C	hidrógeno	Aire	>45% (>70%)	0.25-100	Generación distribuida, cogeneración y potencia central
<b>SOFC Solide oxide</b>	Oxido solido (cerámico)	O <sup>2-</sup>	700-1000 °C	hidrógeno	Aire	>50% (>80%)	1-50	Generación distribuida y potencia central

Tabla 9 Clasificación de acuerdo con su temperatura de funcionamiento, capacidad y la naturaleza del electrolito.

### 4.3.3. Aplicaciones

- Aplicaciones estacionarias

Para este tipo de aplicaciones las pilas a combustible tienen la ventaja de que son capaces de producir electricidad ininterrumpidamente mientras se le proporcione el combustible. Además de que no tiene partes móviles, lo que evita el ruido contrario a los generadores convencionales.

- Aplicaciones para transporte

Los tiempos de respuesta y puesta en marcha deben ser cortos, para esta aplicación es fundamental tener un buen depósito para el combustible que permita tener una gran cantidad de combustible en muy poco volumen.

- Aplicaciones portables

Actualmente este tipo de aplicaciones no son tan factibles ya que las celdas de combustible tienen poca autonomía por su dependencia al combustible.

Una aplicación importante de las celdas de combustibles es en la generación distribuida, esto debido su amplia gama de generación, funcionan a base de distintos combustibles y son escalables de acuerdo con la potencia demanda. También son consideradas para otras aplicaciones mucho menores como la sustitución de baterías recargables, telefonía inalámbrica, además de aplicaciones residenciales como iluminación.

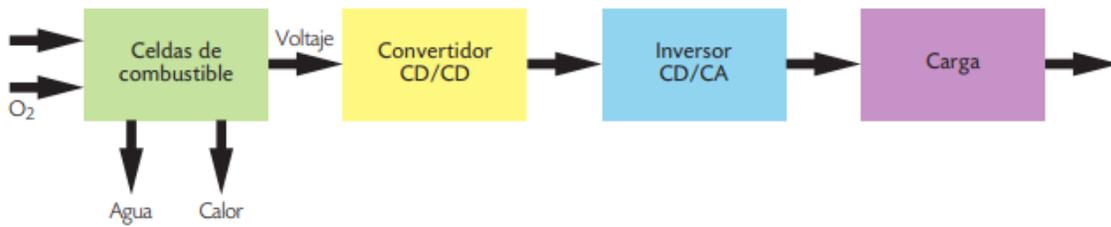


Figura 44 Proceso de conversión de energía a partir de una celda de combustible

#### 4.3.4. Ventajas

Las eficiencias en celdas de combustible pueden alcanzar valores entre 50% y 85%, y tienen la particularidad de ser modulares, teniendo un rango de potencia de <5 W hasta 100 MW, y pueden funcionar desde el 5% al 100% de su potencia nominal.

Una aplicación importante de las celdas de combustibles es la generación distribuida, esto debido a su amplia gama de generación, funcionan a base de distintos combustibles y son escalables de acuerdo con la potencia demanda. Cuando se usan en Generación Distribuida o incluso en una microrred se tendrían ahorros considerables al no requerir líneas de transmisión ofreciendo energía eléctrica donde y cuando es requerida, brindando independencia a la red. También son consideradas para otras aplicaciones mucho menores como la sustitución de baterías recargables, telefonía inalámbrica, además de aplicaciones residenciales como iluminación.

Tienen vida útil de veinte mil a ochenta mil horas (2.5 a 10 años) en generación estacionaria y de cinco mil y diez mil horas ( 7 a 14 meses) para aplicaciones en transporte. Al no tener partes móviles, las celdas de combustible son silenciosas (60 dB a 30 metros), y no requieren sistemas de lubricación.

En cuestión de emisiones de gases de efecto invernadero, las celdas de combustible representan un desarrollo alentador y revolucionario, ya que en lugar de utilizar una reacción electroquímica en lugar de combustión, si se usa hidrógeno como combustible y el oxígeno del aire se produce electricidad, agua y calor. Sin embargo , debemos considerar que los procesos de producción de hidrogeno no siempre son amigables con el medio ambiente, normalmente se usan hidrocarburos como fuente de hidrógeno (gas natural, metanol, etcétera) para lo cual se producirá CO<sub>2</sub>. Aun así, gracias a su capacidad de obtener altas eficiencias de conversión, las celdas de combustible producen menor cantidad de CO<sub>2</sub> que cualquier otra tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar electricidad.

Las celdas de combustible pueden ser un elemento importante para sistemas híbridos, al integrarse con avanzadas de turbinas, incluso sistemas basados en fuentes renovables pueden acoplarse al funcionamiento de las celdas. Por ejemplo, utilizar biocombustibles para alimentar las celdas o bien paneles fotovoltaicos alimenten un electrolizador para generar hidrógeno, y a su vez alimentar la celda de combustible.

#### 4.4. Usos directos

Los usos directos se entienden como aquellos procesos donde se aprovecha la energía proveniente de un recurso renovable, pero sin que allá una conversión del tipo de energía, es decir que, si la fuente de la energía se presenta como luz, energía calorífica o energía mecánica, la aplicación será con este tipo de energía según corresponda. Una de las principales ventajas de este tipo de aplicaciones es que no se

necesitan dispositivos de conversión de la energía, evitando pérdidas y utilizando la energía en su forma final.

Dentro de este apartado también se considera el diseño bioclimático, ya que toma en cuenta las necesidades energéticas de los espacios y no hay conversión directa de la energía, logrando aun así ahorros económicos, energéticos y ambientales significativos.

#### 4.4.1. Solar

Una aplicación de la energía solar de baja temperatura es el secado de productos agrícolas, este proceso se lleva a cabo de manera tradicional a cielo abierto. Sin embargo, en un secador solar el producto se dentro de un colector solar especialmente diseñado, también puede encontrarse en una cámara oscura, donde se hace circular aire calentado previamente con energía solar para remover la humedad. Es importante controlar los flujos de aire y la temperatura dependiendo del producto a secar, para mantener el sabor y evitar el crecimiento de bacterias.

La producción de agua potable a partir del agua de mar utilizando energía solar puede de importancia en los años por venir. Actualmente existen diferentes tecnologías bajo investigación que buscan mejorar los procesos de aprovechamiento del calor solar para proveer agua potable con costos razonables. En la UNAM se cuenta con la presencia de Grupo IIDEA (Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas), quienes han diseñado un equipo que desala agua de mar o salobre mediante osmosis inversa aprovechando el recurso solar para el abastecimiento eléctrico de sus componentes.

#### 4.4.2. Sector industrial

Para las aplicaciones industriales se requieren grandes instalaciones y un alto consumo de energía. Las principales aplicaciones térmicas son procesos de calefacción, evaporación, secado, esterilización, destilación, lavado, descongelamiento y extracción de sales, entre otros.

Las aplicaciones agrícolas de fluidos geotermales son para calefacción de invernaderos, lo que permite alargar el periodo productivo de las plantas a lo largo de todo el año. Para asegurar las condiciones óptimas para el desarrollo de cada planta se debe cuidar la intensidad y cantidad de luz, temperatura diurna y nocturna, la concentración de CO<sub>2</sub>, la humedad del terreno y del aire, así como las corrientes de viento. La calefacción del invernadero puede realizarse a base del recurso geotérmico, a partir de los siguientes métodos: circulación forzada de aire mediante intercambiadores de calor, tuberías de circulación de agua caliente y radiadores, o bien un conjunto de todos estos.

La acuicultura consiste en la crianza de peces, crustáceos o mariscos en varias piscinas artificiales escalonadas, controlando así el crecimiento de cada especie, controlando una temperatura óptima, la alimentación y la calidad del agua. El nivel térmico exigido por las piscifactorías permite el aprovechamiento de los yacimientos de baja entalpía y constituye una aplicación innovadora para el aprovechamiento de aguas geotermales.

#### 4.4.3. Calefacción de distrito

Es un sistema de calefacción centralizado, más comúnmente conocido como “*district heating*”. El sistema satisface la demanda de calor de un conjunto de usuarios, distribuidos dentro de una zona extensa, del tamaño de un barrio hasta el de una ciudad entera. Los sistemas de calefacción por distrito pueden

ser abiertos o cerrados. El sistema cerrado constará de un circuito de calefacción con tubería de impulsión y una tubería de retorno, mientras que, en el circuito abierto, una vez utilizado el fluido es vierte al sumidero. Existen proyectos en los que el agua geotérmica es conducida bajo las carreteras y caminos vecinales, para mantenerlos libres de agua helada o incluso para dispersar la neblina de los aeropuertos.

#### 4.4.4. Bomba de calor

Las bombas de calor constituyen una alternativa, ya que se trata de una tecnología comercial que tiene un costo competitivo, especialmente cuando se usan tanto para enfriamiento como para calefacción. Pueden reducir el consumo de energía entre un 30% a 60% con respecto a los sistemas convencionales, y se pueden instalar prácticamente en cualquier sitio.

Las bombas de calor utilizan el recurso geotérmico en un intervalo de temperaturas de entre 5°C y 30°C, la fuente consiste de un recurso geotérmico a temperatura constante, éste se encuentra ya sea directamente bajo el piso, es decir, en el suelo (2 m a 3 m de profundidad, sistemas de circuito cerrado) o en el agua subterránea (~10 m de profundidad, sistemas de circuito abierto). A profundidades mayores a 5 metros (alrededor de 15 °C) los materiales geológicos permanecen a una temperatura estable, independientemente de las condiciones meteorológicas exteriores.

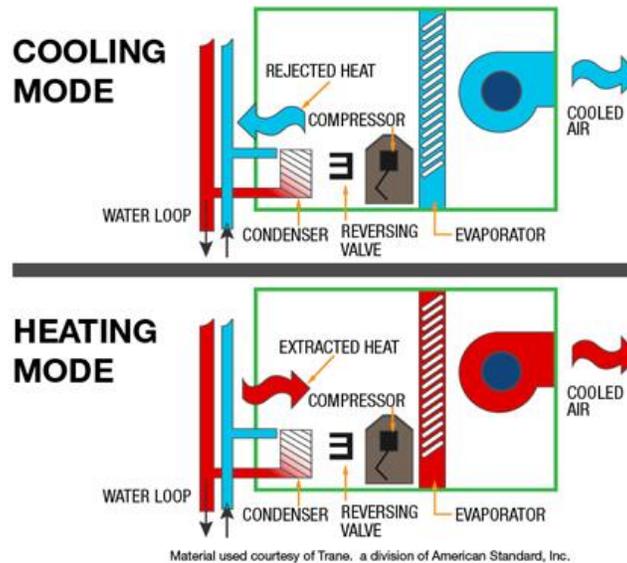


Figura 45 Funcionamiento de una bomba de calor

Debido a que es necesario excavar un área específica de terreno para colocar los tubos intercambiadores de calor o perforar al menos un pozo, las bombas de calor geotérmicas presentan un costo inicial más alto que las que emplean aire del ambiente. Sin embargo, las BCG (Bombas de Calor Geotérmico) consumen menos energía para operar, usan un recurso de temperatura constante, no requieren un suplemento adicional de energía para mantener acondicionado el espacio durante temperaturas exteriores extremas, usan menos refrigerante, son más simples en diseño y mantenimiento, entre otras.

Un análisis estimado elaborado por la Gerencia de Geotermia del IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) para una aplicación en Mexicali, Baja California, demostró que las BCG acopladas al suelo (circuito cerrado) con arreglo horizontal son capaces de satisfacer los requerimientos térmicos (calefacción y aire acondicionado) del domicilio. Al mismo tiempo permitirían tener importantes ahorros

económicos anuales, en comparación con equipos convencionales, y el período de retorno de la inversión se estimó en menos de 5 años.

#### 4.4.5. Refrigeración por absorción

La refrigeración puede ser una opción viable mediante la adaptación de equipos de absorción. Como se explicó anteriormente el ciclo de absorción es un proceso que utiliza el calor como fuente de energía para la producción de frío, y el fluido geotérmico es quien proporcionaría la energía que alimenta a estos equipos. Las máquinas de absorción que están comercialmente disponibles son alimentadas por vapor, por agua caliente o por gases de combustión.

Este tipo de máquinas tienen un gran número de ventajas, entre las que destaca:

- Buena fiabilidad.
- Bajos costos de mantenimiento.
- Desgaste mínimo.
- No requiere personal altamente cualificado.
- No se precisa refrigerantes fluorocarbonados con efecto nocivo sobre la atmosfera
- Control totalmente automatizable.
- Mínimo consumo eléctrico.

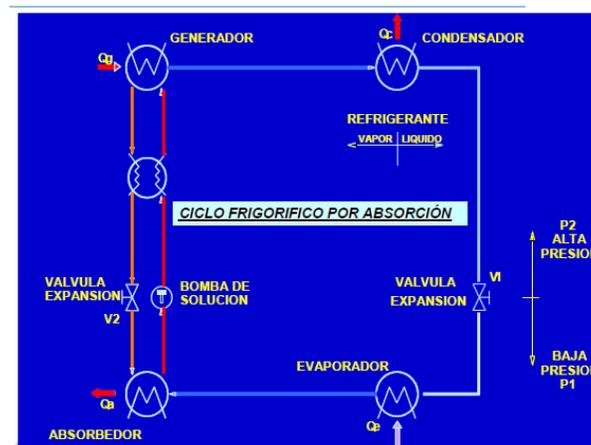


Figura 46 Ciclo de absorción

En términos generales el ciclo se desarrolla conforme a los siguientes pasos:

1. El fluido refrigerante (agua), se expande en la válvula V1 y se evapora en el evaporador instalado en la cámara o espacio donde se desea refrigerar. La válvula de expansión separa las zonas de alta presión P2 y de baja presión P1 de la instalación.
2. El vapor de agua procedente del evaporador pasa al absorbedor donde es absorbido por el absorbente (bromuro de litio), mezclándose y transformándose en solución rica. El proceso de solución en el absorbedor se realiza con refrigeración exterior.
3. La solución rica es bombeada a través de un intercambiador de calor, en dirección al generador, donde se calienta a expensas de un enfriamiento de la solución pobre, que se dirige en dirección contraria; del generador al absorbedor.

4. En el generador, gracias al calor suministrado (fluido geotérmico en este caso) en forma de vapor, agua caliente, o gases calientes se realiza el proceso contrario al que se produce en el absorbedor, el refrigerante se evapora y se desprende en la parte superior de donde pasa al condensador, mientras que la mezcla pobre fluye al absorbedor, donde se repite el proceso de mezcla.
5. En el condensador, el vapor de agua producido en el generador es condensado por el agua de refrigeración. La válvula de regulación V2, sirve para mantener separadas la presión del circuito P1 en el absorbedor y la presión alta en el generador.

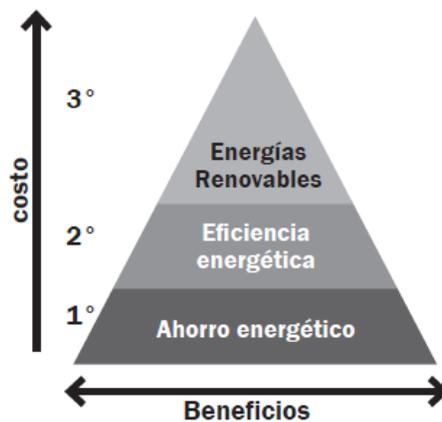
El rendimiento en estas máquinas se denomina COP (coefficient of performance), y es la relación entre la energía retirada (“frío producido”) y la energía calorífica aportada a la misma por el depósito de temperatura alta. El C.O.P. en compresión es mucho mayor que en absorción, sin embargo, las máquinas de absorción utilizan energía residual, de baja calidad y bajo coste mientras los sistemas de compresión utilizan energía eléctrica..

#### 4.4.6. Diseño bioclimático

A lo largo de la historia la humanidad la sociedad ha utilizado dos parámetros para la implementación de los sistemas energéticos: la disponibilidad técnica y la viabilidad económica. Pero en años recientes y tal vez tardíamente se ha contemplado otra nueva variable relacionada con los impactos ambientales que se pudieran ocasionar. Si se quiere optimizar el uso de energía en las edificaciones se deben considerar tres estrategias:

- Disminuir la demanda de energía convencional.
- Reducir los impactos ambientales
- Mantener condiciones interiores confortables con respecto a cambios en la temperatura exterior.

La eficiencia energética es un concepto utilizado para referirse a los resultados conseguidos a través de medidas para disminuir el consumo de energía y mejorar el uso de esta. Es necesario mencionar que estas mejoras en el consumo de energía no implican de manera necesaria el uso de tecnologías más modernas, ya que también pueden resultar de una mejor gestión u organización, de cambios estructurales o de mejoras en la eficiencia económica de la actividad o proceso en cuestión.



Gráfica 10 Estrategias de evaluación energética en edificaciones

#### 4.4.6.1. Criterios ambientales en edificaciones

El diseño de proyectos en edificaciones está siendo fuertemente orientada hacia evaluar la demanda de energía de un edificio y de hacerlos más sostenibles, se consideran los siguientes aspectos:

1. Mecanismo de agua
  - Utilización de aguas lluvias.
  - Equipos ahorradores de agua.
2. Sistemas de energías
  - Aplicación de energías renovables.
  - Aprovechamiento de la luz natural.
  - Aprovechamiento de la ventilación natural.
  - Equipos ahorradores de energía.
3. Sistemas constructivos
  - Implementación de techos verdes.
  - Aislamientos acústicos.
  - Materiales con cumplimiento ambiental.
4. Urbanismo
  - Incorporación de elementos naturales.
  - Mejoramiento de espacios públicos.

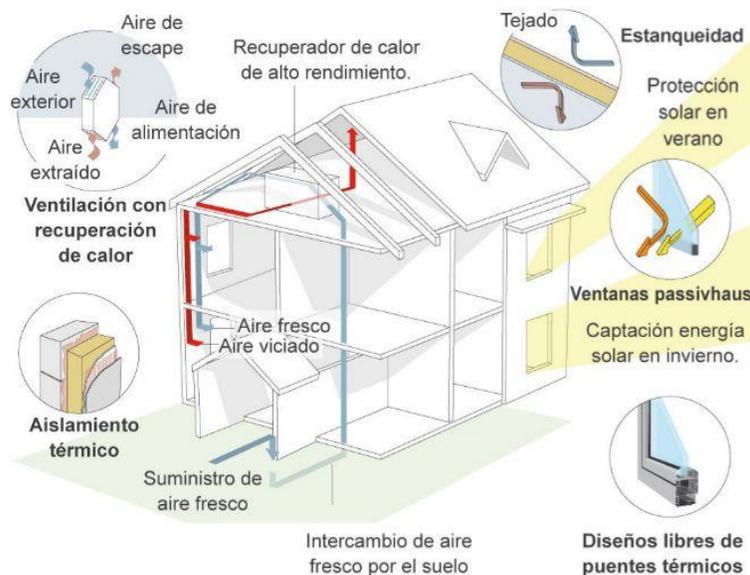


Figura 47 Edificación con diseño bioclimático

#### 4.5. Cogeneración

Cogeneración significa producción simultánea y/o secuencial de dos o más tipos de energía. Normalmente las energías generadas son electricidad y calor, aunque también existe el esquema de energía mecánica y calor (y/o frío). Debido a la producción simultánea, debe haber una proximidad de la planta generadora a los centros de consumo. Las leyes de la termodinámica obligan a la existencia de

un depósito de temperatura alta y otro de baja, que permitan el flujo y la evacuación de una cierta cantidad de calor, esto aplica para todo proceso térmico de producción de electricidad, ya que el calor absorbido no puede transformarse en trabajo completamente. El objetivo de la cogeneración es que no se pierda esta gran cantidad de energía que se presenta como calor remanente.

Este esquema más completo de aprovechamiento de la energía es el que realizan las plantas de cogeneración, llegando a un rendimiento global que pueden oscilar entre el 75% y el 90% de la energía química contenida en el combustible primario.

La cogeneración es la alternativa más eficiente de conversión de la energía primaria a energía útil, por lo que resulta una de las mejores opciones de aprovechamiento de energía orientada a lograr un desarrollo sustentable y con posibles aplicaciones para las microrredes. En la mayoría de los procesos industriales, comerciales o de servicios se requiere calor a una temperatura relativamente baja, gracias a lo cual es posible utilizar el calor remanente para cubrir las siguientes necesidades térmicas, ya que de otra forma se desaprovecharía.

<b>FLUIDO CALOPORTADOR</b>	<b>PRESION</b>	<b>TEMPERATURA</b>
<b>VAPOR</b>	AP (>20 bar)	Saturado
	MP (8...20 bar)	Sobrecalentado
	BP (1...7 bar)	
<b>AGUA CALIENTE</b>	AP	110...180 °C
	BP	60... 95 °C
<b>FLUIDO TERMICO</b>		200...300 °C
<b>AGUA FRIA</b>		5...15 °C
		<5 °C
<b>AMONIACO</b>		-20...-40 °C
<b>AIRE FRIO</b>		10...15 °C
<b>GASES/AIRE CALIENTE</b>		<100 °C
		100...400 °C
		>400 C

Tabla 10 Lista de las principales necesidades térmicas que cubre la cogeneración

El máximo rendimiento alcanzable viene dado por la expresión

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Siendo  $T_2$  y  $T_1$ , la temperatura absoluta del depósito de temperatura fría y alta, respectivamente. A partir de esta expresión podemos ver que entre más grande sea diferencia de temperatura entre el foco caliente y el foco frío mayor será el rendimiento, éste es uno de los principios de la cogeneración por lo cual es fácil entender que, en las plantas de cogeneración, se consigan mayores rendimientos globales

La cogeneración muchas veces se diseña para satisfacer los requerimientos de energía de los procesos industriales; por lo cual debe:

- Ser adecuada para los requerimientos del proceso productivo.
- Ser flexible para variaciones estacionales y horarias.

- Tener un alto grado de confiabilidad y disponibilidad.
- Contar con un nivel de inversión competitivo.
- Generar ahorros económicos sustantivos.
- Lograr menor dependencia de los combustibles.
- Disminuir los costos de producción.
- Generar un menor impacto ambiental.
- Producir la energía donde se consume.
- Aumentar la autonomía de sistema donde se implemente

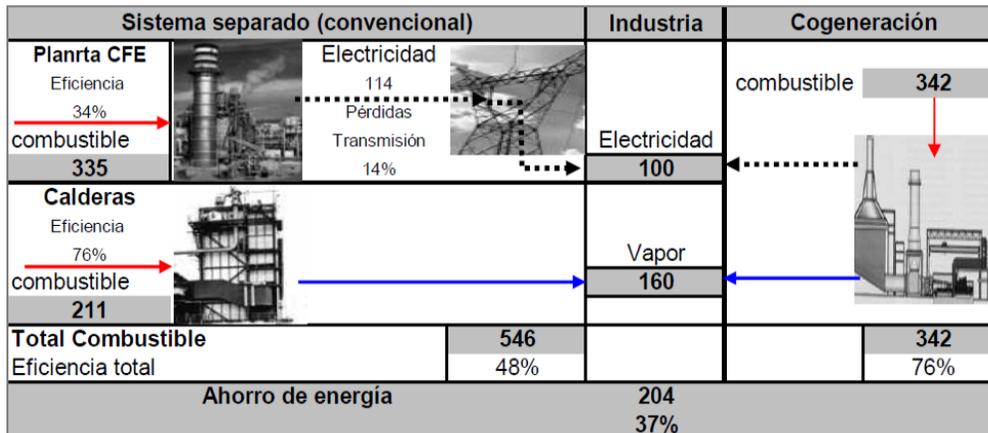


Figura 48 Comparación entre generación convencional y cogeneración

Un indicador importante considerado a nivel internacional es la relación de la capacidad instalada de cogeneración contra la capacidad instalada total en el sistema eléctrico. Hasta el año 2016 el 58.9% de la capacidad instalada corresponde a centrales eléctricas propiedad de CFE, 18.0% a centrales de Productores Independientes de Energía (PIE) y el 23.1% restante a capacidad que los particulares aportan bajo los esquemas de autoabastecimiento, cogeneración (3%), pequeña producción, exportación, usos propios continuos, generador, centrales eléctricas para generación distribuida y los sistemas rurales no interconectados reportados por FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido).

Gracias a que la cogeneración es una forma muy eficiente de aprovechamiento de energía, su mayor rentabilidad se da en los sectores intensivos en energía, con gran consumo térmico y muchas horas de funcionamiento. Este es el caso del sector químico, metalurgia, papel, derivados de madera, cerámicas, textil, minero y alimentario.

En términos generales el requisito para la implantación de cogeneración es que exista un consumo de calor. El tipo de necesidad térmica conducirá a un tipo determinado de motor primario y de instalación, a partir del consumo térmico se determinará la potencia del sistema. Como toda instalación eficiente es más cara que una instalación convencional, por lo cual es necesario evaluar su rentabilidad.

#### 4.5.1. Clasificación

De acuerdo con el orden de producción de electricidad y energía térmica, los sistemas de cogeneración pueden clasificarse en:

- Sistemas superiores
- Sistemas inferiores

En los sistemas superiores, la generación de energía eléctrica constituye el producto primario de la combustión del combustible. El calor residual existente en los gases de escape se aprovecha en el proceso productivo ya sea de manera directa o a partir de un intercambiador para generar vapor o agua caliente. Estos sistemas se utilizan ampliamente en diversos procesos industriales, de los cuales destacan la industria de la celulosa y papel, química, textil, cervecera, azucarera, agroindustria y alimentos.

Los sistemas inferiores, generan la electricidad a partir de la energía térmica no utilizada en los procesos industriales, como los gases calientes de escape de hornos. Estos sistemas se pueden encontrar aplicados la industria del cemento, del acero, del vidrio y en algunas industrias químicas y petroquímicas. Se emplean calderas de recuperación de gases calientes para producir vapor con el que se alimenta a turbinas para generar electricidad. La caldera de recuperación debe producir vapor a presiones altas (20 a 60 bar) y temperaturas de 230 a 520 °C, las calderas de recuperación del tipo HRSG (por su acrónimo en inglés) función para este acometido, ya que aprovechan los gases residuales calientes para producción de vapor con presiones de hasta 180 bar y 565 °C de temperatura.

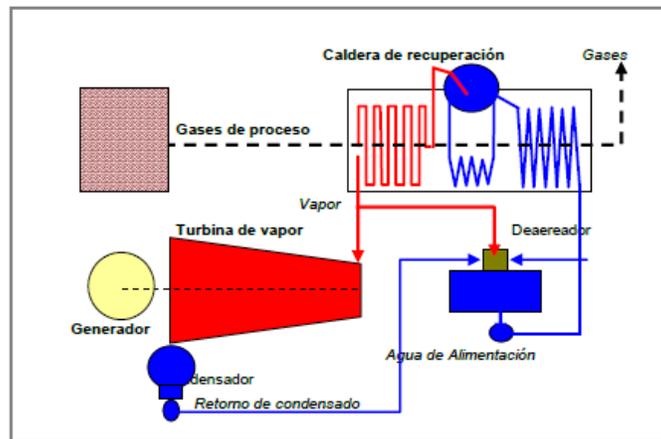


Figura 49 Configuración para aprovechar gases residuales de un proceso (Sistema inferior)

#### 4.5.2. Equipos de recuperación

Una planta de cogeneración es un sistema complejo, donde hay una entrada fundamental (combustible) y varias energías salientes. Los equipos principales definen el tipo de ciclo, los productos y el rendimiento, mientras que los equipos auxiliares sirven para asegurar las necesidades de los equipos principales, por ejemplo, bombean el agua a la caldera, comprimen el gas para la turbina, refrigeran el aceite o los alternadores, etc.

Los equipos de recuperación de calor en dependen de las características de la fuente de calor y de la utilización

que se va a hacer del mismo. En una planta de cogeneración se debe tener muy presente que aguas arriba hay una máquina muy cara y que, especialmente si se trata de una turbina, es muy delicada. Por lo cual hay que darles énfasis a los aspectos de fiabilidad y seguridad de la instalación recuperadora. Una avería en el sistema recuperador puede provocar una parada de larga duración o incluso un daño grave en la máquina principal.

Es importante asegurar que en ninguna circunstancia se cierra el escape de la máquina, los gases siempre han de ir al sistema de recuperación o a la atmósfera. Otro aspecto que cuidar es cuidar que no se produzca autoignición ni explosiones en los conductos o instalación recuperadora, para que alguna de estas

situaciones se presente ha de haber coexistencia de gases combustibles, oxígeno y altas temperaturas. Según la máquina principal, hay que tener en cuenta que durante el arranque las temperaturas son diferentes a las temperaturas en plena carga, con períodos transitorios y picos en algunos momentos. Por último, hay que dedicar especial atención a las temperaturas de diseño de los materiales, no solo hay que fijarse en la temperatura normal de los gases sino en las temperaturas extremas, que pueden darse en condiciones de carga parcial, en transitorios y durante el arranque.

#### 4.5.2.1. Calderas

En calderas se ha definido un parámetro de diseño como índice de dimensionamiento, es el "pinch". Se define "pinch" como la diferencia de temperatura entre los gases que abandonan el evaporador y la temperatura en el mismo. El pinch óptimo disminuye al aumentar el tamaño de la caldera y suele estar alrededor de 5...10 °C.

Es importante considerar en los sistemas de recuperación de calor, como las calderas, la protección del medio ambiente. Aunque el origen de las emisiones en general es el sistema primario (turbina o motor), a veces la reglamentación obliga a determinados niveles máximos de emisiones que sólo pueden ser alcanzados con algún sistema adecuado, para las calderas los sistemas más utilizados son catalizadores de CO y de NO<sub>x</sub>. Aun así, los fabricantes se han esforzado en desarrollar equipos como motores, motores alternativos y turbinas con bajo nivel de emisiones.

#### 4.5.2.2. Intercambiadores y aprovechamiento de gases directos

Para algunas aplicaciones no es necesario utilizar el vapor como fluido transmisor de calor, esto ocurren en fábricas cerámicas y otras con procesos de secado. Muchas veces es posible hacer uso de los gases directamente, logrando una utilización mucho más eficiente puesto que aprovecha la energía residual de forma prácticamente completa. Pero otras veces, por la delicadeza del producto, cuestiones de seguridad, sanitarias, calidad o por tratarse de recuperación de calor de agua caliente de motores, es estrictamente necesaria la interposición de un intercambiador de calor.

Cuando no es posible la utilización directa de los gases de escape y por lo tanto es pertinente instalar un intercambiador es muy conveniente estudiar la posibilidad de combinación de varias fuentes de calor. Esto es especialmente interesante en instalaciones con motores, con varias fuentes de calor con diferente nivel térmico.

#### 4.5.2.3. Sistemas de absorción

La disponibilidad de energía térmica de bajo nivel, recuperable de ciertos procesos hace atractiva la utilización de sistemas de absorción que aprovechan energías de muy bajo coste, entre las que destacan: líquidos calientes como agua o aceite, aire caliente, gases de combustión y vapor de agua a baja presión.

El ciclo de absorción ya fue desglosado y explicado previamente para el apartado de Usos Directos de la geotérmica. La única diferencia sería que, en lugar de fluido geotérmico, se utilizaría el fluido residual de algún proceso industrial.

La fuente energética utilizada influye en gran medida en el rendimiento económico de la instalación. La capacidad de refrigeración disminuye para una máquina de igual tamaño, si se usa un fluido a baja

temperatura (ej. agua caliente). Si se desea mantener la capacidad de refrigeración se deberá utilizar una máquina de absorción de mayor potencia nominal o aumentar la temperatura del fluido.

#### 4.5.3. Rendimiento y dimensionamiento

Para la cogeneración se deben calcular tres rendimientos, en donde se expresan la relación entre el combustible utilizado, la generación de electricidad y el aprovechamiento del calor residual.

El rendimiento eléctrico se define como el cociente entre la energía eléctrica generada por la planta y la energía aportada por el combustible. Para calcular el dato, es necesario convertir la cantidad de combustible en energía, para lo cual hay que multiplicar la masa o el volumen de combustible por su poder calorífico inferior (PCI).

$$\eta_e = \frac{E}{Q}$$

Donde:

$\eta_e$ : Rendimiento eléctrico

$E$ : Energía eléctrica generada en un periodo, en kWh

$Q$ : Combustible consumido por la planta, en kWh

Junto con este valor se utiliza el rendimiento global:

$$\eta_g = \frac{V + E}{Q}$$

Donde:

$\eta_g$ : Rendimiento global

$V$ : Calor útil producido (kWh de PCI)

En las plantas de cogeneración se define también el rendimiento eléctrico equivalente según la siguiente expresión:

$$\eta_{ee} = \frac{E}{Q - \frac{V}{0.9}}$$

Donde:

$\frac{V}{0.9}$ : Combustible para generar  $V$ (kWh) de calor

$Q - \frac{V}{0.9}$  = combustible atribuible a la generación de energía eléctrica.

Se asume que el rendimiento térmico de una caldera en la que se produjera el calor útil  $V$  es del 90%. El rendimiento eléctrico equivalente es uno de los principales parámetros de una planta de cogeneración.

De manera concreta los puntos para determinar la planta de cogeneración adecuada son los siguientes:

1. Inventariar todos los consumos de calor y frío de la instalación y analizar su perfil. Se debe construir la curva de frecuencias acumuladas en los consumos de calor, esta curva indica el tiempo en que la demanda es mayor que un determinado valor ligado al tamaño de la planta y con ello

saber cuánto tiempo hay excedente y cuanto déficit de calor y por ende como se ha de dimensionar el sistema de generación de calor.

2. Determinar el potencial técnico de cogeneración, en función del valor típico de demanda de calor.
3. Determinar el tipo de motor primario: turbina de gas o motor alternativo, en función de los combustibles disponibles, el tamaño de la planta, tipo de demanda (vapor, agua caliente, frío, etc.), y variación en la demanda.
4. Hacer el cálculo energético y económico de varias alternativas en el entorno del potencial de cogeneración.
5. Seleccionar la alternativa que siendo técnicamente factible cumpla con el rendimiento eléctrico equivalente exigido en un periodo anual y de los mejores indicadores económicos.

Tecnología	Planta convencional (%)	Cogeneración (%)
Turbina de vapor <sup>7</sup>	7 - 38	60 - 80
Turbina de gas <sup>8</sup>	25 - 42	65 - 87
Ciclo combinado <sup>9</sup>	35 - 55	73 - 90
Motor – generador <sup>10</sup>	25 - 45	65 - 92
Microturbinas <sup>11</sup>	15 - 30	60 - 85
Celdas de combustible <sup>12</sup>	37 - 50	85 - 90

*Tabla 11 Eficiencias típicas comparativas de generación y cogeneración*

#### 4.5.4. Beneficios

##### Para México

- Ahorro de energía primaria de combustibles nacionales (entre 20 y 45 %).
- Reducción de importación de combustibles.
- Disminución de las emisiones de gases (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera.
- Nuevas inversiones nacionales y extranjeras.
- Desarrollo regional y creación de empleos.

##### Para el Sistema Eléctrico Nacional

- Diferimiento de inversiones con capacidad a instalar en el SEN.
- Reducción de generación eléctrica en el SEN.
- Reducción de pérdidas de transmisión y distribución en el SEN.

##### Para los usuarios industriales

- Mayor disponibilidad y confiabilidad del suministro eléctrico al contar con generación propia y respaldo de la red del SEN.
- Mejor calidad de energía, incrementando la vida útil de los equipos que se utilizan en los procesos.
- Disminución de la factura energética (electricidad + combustible).

- Incremento de la competitividad por reducción de costos de producción y mejor calidad de la energía.
- Dependiendo del combustible utilizado, los precios del combustible y las tarifas eléctricas, la relación térmica/ eléctrica de cada proceso y los factores de carga eléctricos y térmicos en un proyecto de cogeneración, se pueden obtener una reducción de costo de la factura energética de entre 12 y 35%.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero
- Creación de empleos
- Reducción de pérdidas en el SEN

#### 4.5.5. Trigeneración

La trigeneración suele referirse a la generación simultánea de tres tipos de energía: energía eléctrica, energía térmica en forma de calor (agua sobrecalentada o vapor) y energía térmica en forma de frío con equipos de absorción.

Permite que proyectos de cogeneración, que inicialmente, no eran viables en centros que no consumen calor, acceder a la generación de frío en lugar que se produzca con energía eléctrica. Permite la utilización de cogeneración en el sector terciario (hoteles, hospitales, centros educativos, etc.) donde además de calor se requiere frío para climatización, y que debido a la estacionalidad de estos consumos (calor en invierno, frío en verano) impedía la normal operación de una planta de cogeneración clásica.

En realidad, en una planta de cogeneración se pueden producir otros productos útiles, a parte de la electricidad, calor y frío, como puede ser energía mecánica, aire comprimido o incluso CO<sub>2</sub>.

#### 4.6. Hidrógeno

El hidrógeno (H<sub>2</sub>) es el elemento más abundante del universo, suponiendo el 90% de la masa total del mismo, se encuentra homogéneamente repartido en la Tierra, sin embargo, el hidrógeno no se encuentra habitualmente en su forma pura, sino combinado con otros elementos. Tiene propiedades químicas que lo hacen apto para su uso como combustible; por ejemplo, tiene un poder energético por unidad de masa casi tres veces superior a la gasolina, siendo además factible su almacenamiento, transporte y distribución, lo que permitiría su aplicación en cualquier demanda energética.

La serie de sistemas y tecnologías que producen, transportan y utilizan hidrógeno comúnmente se le denomina “economía basada en el hidrógeno”, este concepto empezó a acuñarse alrededor de los años setenta. El empleo de tecnologías del hidrógeno trae consigo un cambio radical en cómo se utiliza la energía, ya que estas presentan mejores eficiencias, reducción drástica de las emisiones GEI y su integración natural con las energías renovables. Las fuentes de energía renovables, que se encuentran distribuidas con mayor o menor abundancia por todo el planeta, tienen como característica intrínseca el hecho de ser puntuales, temporales y no almacenables.

El hidrógeno está actualmente introducido en las agendas políticas de países de todo el mundo. El uso del hidrógeno como combustible no es una novedad en el mundo, viene utilizándose desde hace décadas en la industria, actualmente se producen y utilizan en torno a 50 millones de toneladas de hidrógeno por año en destilerías, en industrias de fertilizantes, metalúrgicas, electrónicas, elaboración de alimentos y en la industria espacial y militar.

La Red Nacional del Hidrógeno ha considerado que el futuro será llamado “la economía del hidrógeno”, por ello, países con un alto grado de industrialización están llevando a cabo acciones que tienden a incentivar el hidrógeno en los procesos, creando e innovando en su tecnología. Las energías renovables no ofrecen una alternativa completa en energía, de ahí la importancia de impulsar las investigaciones que incorporan elementos como el hidrógeno, para ello es necesario un respaldo jurídico que establezca las responsabilidades en el uso y manejo del hidrógeno como fuente alternativa, los alcances y las limitaciones en su aplicación, además de la regulación de sus beneficios.

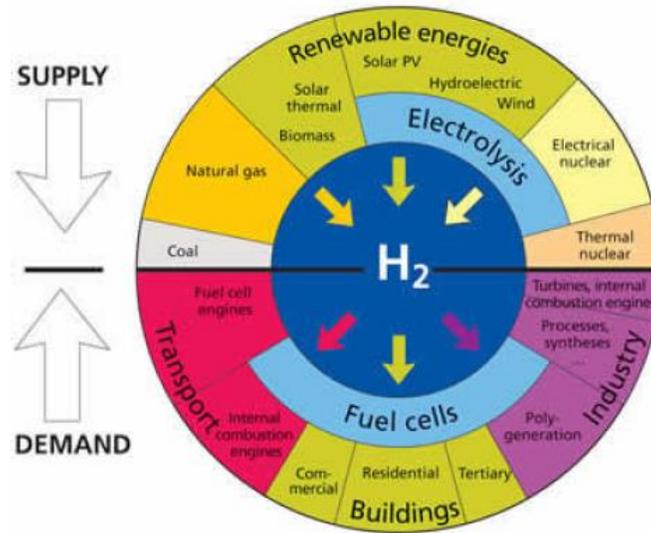
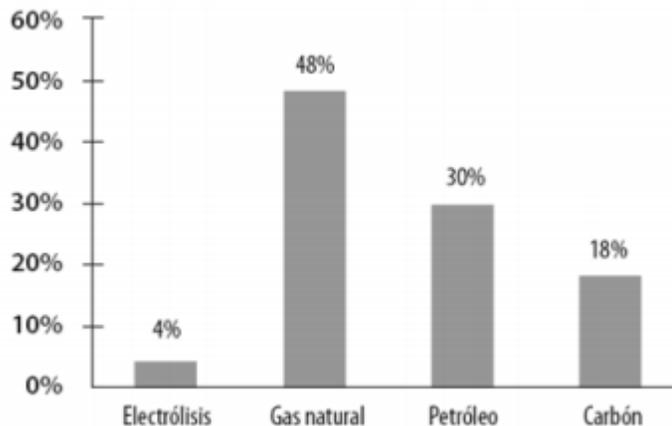


Figura 50 Modelo de demanda y suministro de hidrógeno

#### 4.6.1. Generación

El hidrógeno puede ser producido a partir de una amplia gama de fuentes como el agua, los combustibles fósiles o la biomasa, a través de diferentes procesos según sea la fuente energética utilizada. Actualmente, un 96 % del hidrógeno en el mundo se genera con combustibles fósiles y solo un 4 % a través de la electrolisis del agua. La producción mundial de hidrógeno se estima en 65 Mt/año y emite alrededor de 500 Mt CO<sub>2eq</sub>/año. Se proyecta que esta demanda se incrementará hasta alcanzar las 200 mil toneladas al año, debido a su uso en el sector transporte, según proyecciones para el 2030.



Gráfica 11 Fuentes de energía a partir de las que se produce hidrógeno

Los procesos de producción de hidrogeno se pueden clasificar en:

- Electrolíticos: el agua se disocia en hidrógeno y oxígeno usando electricidad.
- Termoquímicos: usan calor y reacciones químicas para obtener el hidrógeno de combustibles convencionales o biomasa (reformado con vapor de agua, oxidación parcial, reformado autotérmico, pirólisis y gasificación).
- Biológicos: microorganismos, tales como bacterias y algas pueden generar hidrógeno por medio de procesos biológicos propios.
- Otros procesos: como termólisis, fermentación y la descomposición fotocatalítica o biológica del agua.

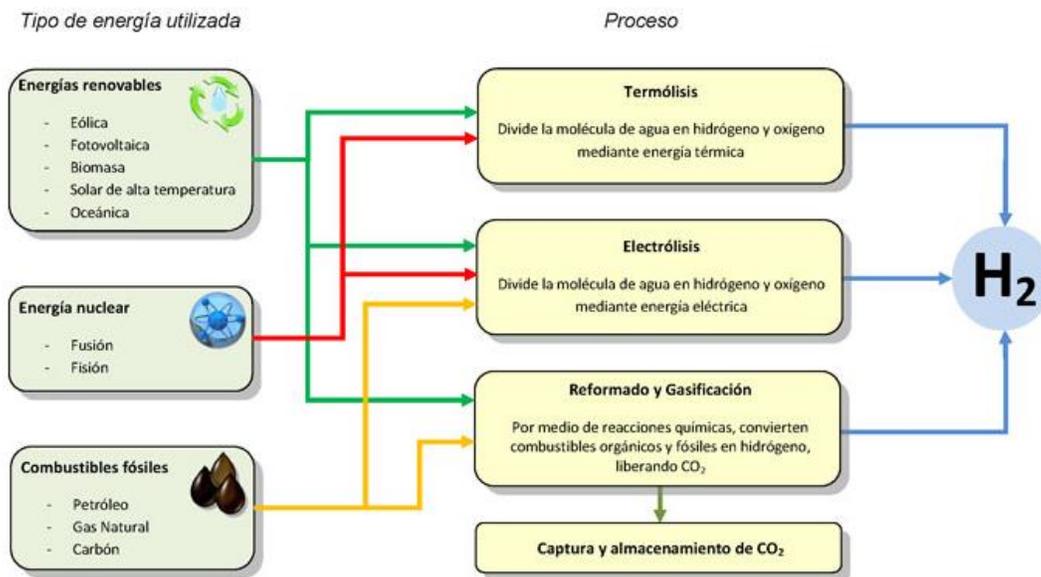


Figura 51 Diagrama general de los métodos de producción de hidrógeno

El agua se presenta como la única alternativa para la producción de hidrogeno renovable a gran escala, con el objetivo de remplazar los combustibles fósiles. Además, cuando el hidrógeno se produce a partir de fuentes renovables, se elimina la dependencia energética del exterior y si se usa en conjunto con celdas de combustible se obtienen grandes beneficios medioambientales, ya que el único residuo generado es vapor de agua, con nulo impacto ambiental.

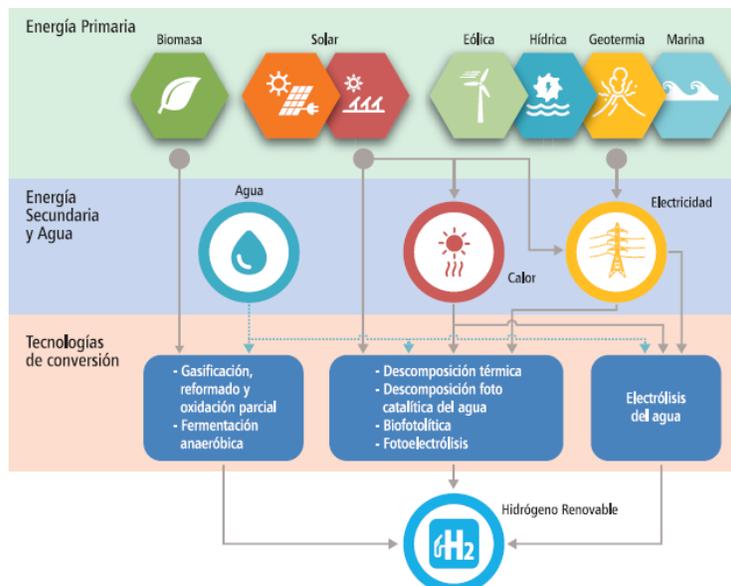
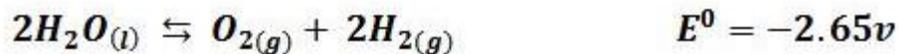


Figura 52 Esquema de rutas de producción de hidrógeno renovable

#### 4.6.1.1. Electrólisis del agua

Un electrolizador está compuesto por una serie de celdas electroquímicas donde tiene lugar la reacción electrolítica, mediante la aplicación de una corriente continua, que provoca la ruptura de la molécula del agua para la generación de oxígeno e hidrógeno gaseosos en los correspondientes electrodos de la celda.



En una reacción de electrolisis a temperatura ambiente se producen 1.02 kJ de hidrógeno por cada kJ eléctrico consumido. Sin embargo, si la reacción transcurre con vapor de agua a 1000°C se producen 1.36 kJ de hidrógeno por cada kJ eléctrico consumido. Por lo cual se está explorando la aplicación de esta tecnología, pero a altas temperaturas.

La electrolisis es una tecnología muy madura que se lleva utilizando desde hace más de 200 años. Actualmente existen diferentes tipos de electrolizadores, siendo los de tipo alcalino los más utilizados en procesos industriales debido a sus altas capacidades de producción y a las eficiencias de operación (60%).

Para implementar la electrolisis con energías renovables se deben superar una serie de barreras tecnológicas, entre las que encontramos:

- Los electrolizadores solo están diseñados para regímenes de potencia continuos, debido a que el hidrógeno es producido con fines químicos
- Los equipos deben poder operar de forma eficiente y segura en entornos de potencia variable, relacionados con fuentes renovables.
- Los costos de los equipos aun no son competitivos, por lo que se debe impulsar el desarrollo de nuevos materiales y componentes, así como mejorar los procesos de fabricación.
- Los equipos que existen en el mercado son de baja potencia, lo ideal sería contar con electrolizadores del orden de MW, para cubrir las demandas actuales.

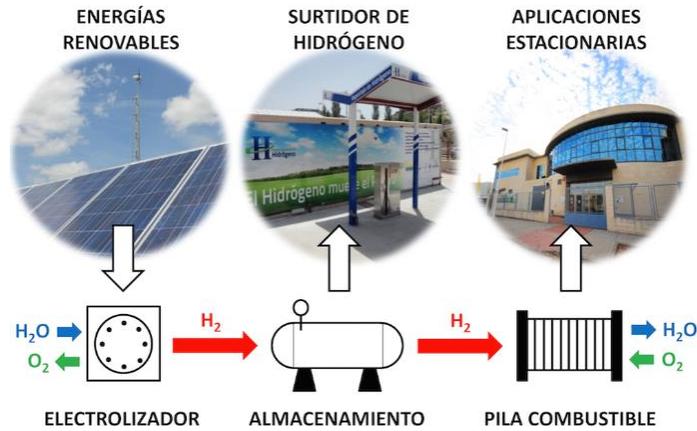


Figura 53 Economía del hidrógeno a partir de fuentes renovables

#### 4.6.2. Almacenamiento

Las tecnologías de almacenamiento del hidrógeno aún tienen que mejorar, para que el desarrollo de un sistema energético basado en este elemento sea factible. Existen dos tipos fundamentales de almacenamiento, el estacionario y el no estacionario.

A pesar de que el hidrógeno tiene uno de los mayores niveles de energía específica (energía por kilogramo), su densidad es muy baja, y tiene un nivel de densidad energética muy bajo (energía por metro cúbico), esto significa que para contener una gran masa de hidrógeno en un pequeño espacio se tienen que utilizar altas presiones. También es muy difícil convertir el gas hidrógeno en líquido, es necesario enfriarlo hasta al menos 22 K, e incluso así mantiene una densidad bastante baja de (71 kg/m<sup>3</sup>). De hecho, una de las mayores barreras para las aplicaciones móviles con hidrógeno es el desarrollo de un sistema de almacenamiento que pueda suministrar una cantidad suficiente de hidrógeno con un volumen, peso, costo y seguridad aceptables.

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno técnicamente se clasifican en los siguientes:

- Tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido (tecnología con más experiencia).
- Tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico (aplicaciones de transporte de larga duración).
- Hidruros metálicos (menor demanda de volumen y una mayor seguridad)
- Hidruros metálicos alcalinos
- Hidruros químicos y nanoestructuras de carbono (gran área superficial, baja densidad y un gran volumen de poros).
- Almacenamiento por metanol

Para el almacenamiento a gran escala se presentan menos problemas, entre las soluciones están el uso de grandes cavidades subterráneas y el almacenamiento en gaseoductos con ligeras variaciones de presión para resolver las fluctuaciones de suministro y demanda.

Existen muchos compuestos químicos que pueden absorber cantidades grandes de hidrógeno. Estos compuestos deben poseer tres características esenciales, para ser realmente útiles:

- Deben ser capaces de ceder su hidrógeno fácilmente.
- Deben ser seguros de manejar.
- La energía y el coste de introducir el hidrógeno en estos compuestos debe ser bajo.

Otro método que, aunque en la actualidad no ha resultado práctico, es el uso de nanofibras de carbono. Esta tecnología aún está en desarrollo ante la falta de claras demostraciones de su factibilidad.

#### 4.6.3. Aplicaciones

El hidrogeno puede quemarse en un motor a combustión en forma individual o como mezcla, también puede ser utilizado en una celda de combustible. Hoy en día, los principales usos del hidrógeno se dan en la industria petroquímica y química, en refinerías de petróleo y en la obtención de amoníaco; aunque también se utiliza en la industria metalúrgica, electrónica y aeroespacial. Un pequeño porcentaje se está empleando como combustible en vehículos de celda de combustible, así como en aplicaciones estacionarias.

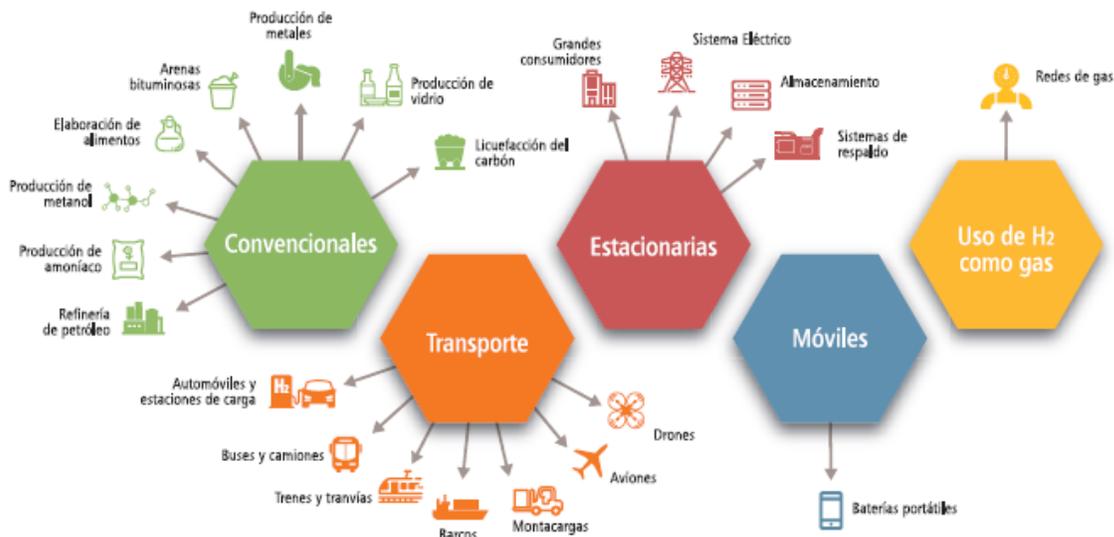


Figura 54 Clasificación de las aplicaciones del hidrógeno

Aparte de las aplicaciones convencionales, se están desarrollando diversas aplicaciones como transporte, estacionarias, móviles o de uso directo en redes de gas.

- Aplicaciones en transporte

La principal forma de emplear el hidrógeno para el transporte en autos de pasajeros, buses, vehículos utilitarios y otros vehículos eléctricos, es a partir de celdas de combustible. Este mercado de movilidad junto a las estaciones de carga se encuentra aún en un estado inicial de desarrollo, a pesar de que ya se tengan varias tecnologías probadas.

- Aplicaciones estacionarias

Las aplicaciones estacionarias consideran cualquier aplicación en la cual las celdas son operadas en una locación fija para energía primaria, energía de respaldo o electricidad y calor. Uno de los usos más destacados es como energía de respaldo para instalaciones de telecomunicaciones, sin

embargo, está comenzando a ser empleado como respaldo para instalaciones eléctricas de distintas índoles.

- **Aplicaciones estacionarias a pequeña escala**  
Las aplicaciones de menor escala difieren de las aplicaciones anteriores en su nivel de potencia, al fungir como sistemas de respaldo energético están presentes en el campo residencial, pequeños comercios y sistemas de telecomunicaciones principalmente.
- **Aplicaciones móviles**  
Las celdas de combustible para aplicaciones portátiles se utilizan para cargar equipos eléctricos y baterías. Su utilización se centra en la alimentación de dispositivos en lugares donde no se cuenta con acceso a la energía de la red.
- **Redes de gas**  
Integrar hidrógeno en las redes de gas requiere analizar los materiales utilizados en las redes de distribución, lo que limita las mezclas en torno al 20 o 30 % dependiendo de la presión de las tuberías y calidad del acero. Al mezclarlo en bajas concentraciones en volumen, hasta un 10-15 %, la posibilidad es viable sin mayores riesgos.

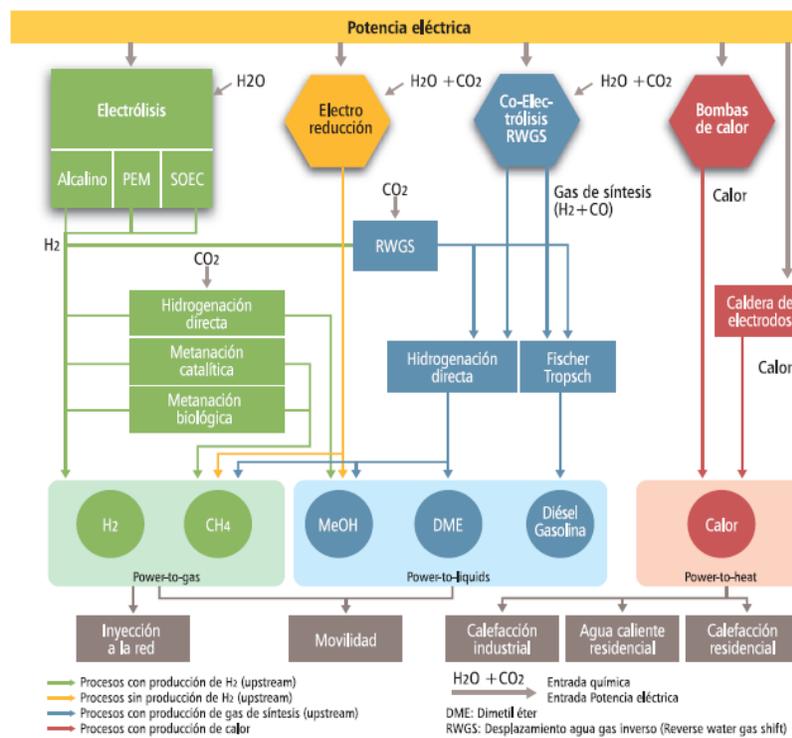


Figura 55 Rutas del "Power to gas", "Power to liquids" y "Power to heat"

#### 4.7. Baterías y sistemas de almacenamiento de energía

Las baterías también se conocen como acumuladores eléctricos, el principio que distingue a un acumulador es que almacenan energía química en su interior para convertirla en eléctrica. Los acumuladores eléctricos mantienen una tensión entre sus dos polos gracias al proceso químico que sucede en su interior. Esta tensión o voltaje hace que al conectar una carga (aparato eléctrico) entre los dos polos circule una corriente, pasando a través del aparato logrando que este se ponga en funcionamiento. El

invento de este dispositivo se atribuye a Alessandri Volta, un físico italiano, y el volt como unidad de tensión es en honor a él.

El acumulador más sencillo se conoce como celda electroquímica, el cual consiste en una caja en cuyo interior hay un líquido llamado electrolito (El electrolito también se puede componer por dos líquidos separados). El líquido tiene sumergido en su interior dos placas metálicas diferentes, llamadas electrodos que corresponden a los polos de la celda. Uno de los electrodos debe ser de un metal que al ponerse en contacto con el electrolito se oxide (reacción de oxidación) y se desprendan iones positivos, quedando el electrodo con carga negativa, por lo cual será el polo negativo o cátodo. Al introducir el otro electrodo en su electrolito se produce una reacción (reacción de reducción) que produce que el electrodo se desprenda de electrones hacia el electrolito, quedando con carga positiva, por eso éste será el polo positivo o ánodo.

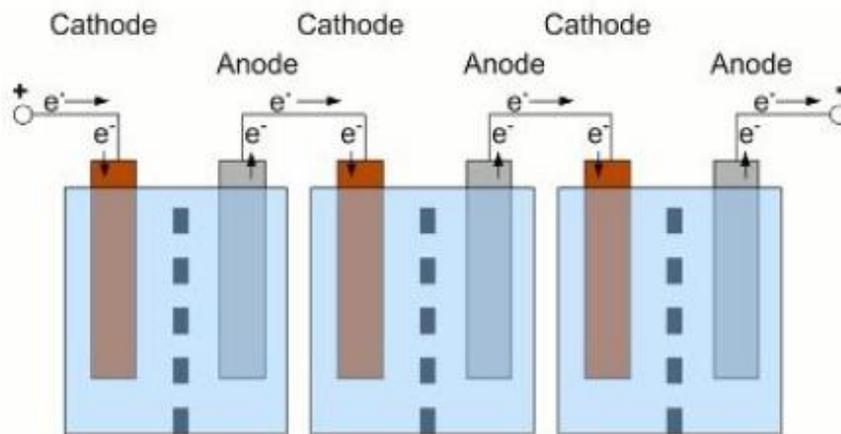


Figura 56 Batería de celdas en serie

Después de estas reacciones, entre los dos electrodos se produce una diferencia de potencial o tensión, uno tiene potencial negativo y el otro potencial positivo. Al unir los electrodos mediante un circuito eléctrico externo se producirá una corriente eléctrica, lo que significa que los electrones sobrantes del cátodo pasarán al ánodo. Una vez que todas las cargas se equilibren dejará de haber tensión, dejará de pasar corriente y la batería estará descargada. Si es recargable se puede aplicar el proceso inverso y cargar la batería metiendo corriente por los dos polos.

Cualquier elemento que haga esto es un acumulador eléctrico, ya que acumula energía en su interior para usarla cuando sea conveniente. La única diferencia entre las pilas y las baterías es que las pilas solo tienen una celda, mientras que una batería está formada por varias celdas unidas en serie, con esto se consigue un acumulador o con más voltaje y energía que una sola celda. Se llama batería porque las celdas se colocan juntas una detrás de otra, en batería, y dependiendo del material de los electrodos y de líquido del electrolito tenemos diferentes tipos de baterías.

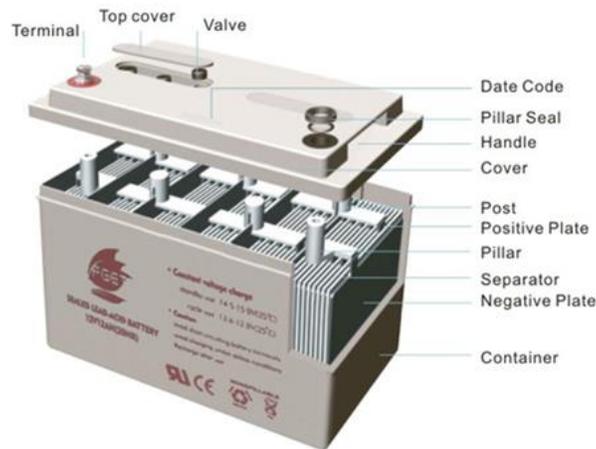


Figura 57 Elementos de una batería

Las baterías son una de las tecnologías disponibles en el mercado con una de las mejores relaciones costo-efectividad. Un sistema de baterías para renovables consta de un conjunto de ellas conectadas en serie y paralelo, según sean los requerimientos por cumplir, un inversor que sirve para conectarlas con la red eléctrica y un controlador que permite cargarlas durante horas de poca demanda.

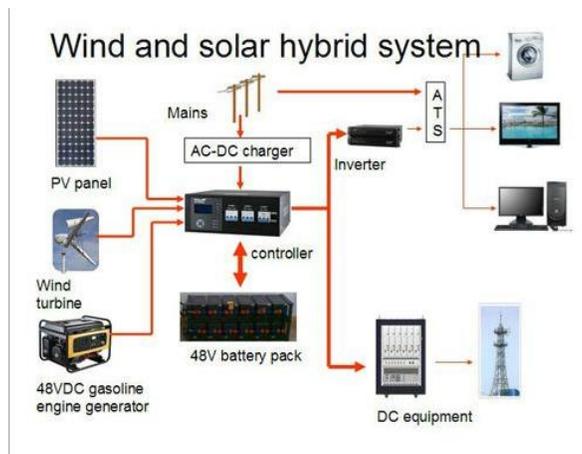


Figura 58 Sistema con baterías y energías renovables

Algunas ventajas de las baterías son, la alta densidad energética, alta eficiencia, largos ciclos de vida (dependiendo de la tecnología seleccionada y de la operación carga/descarga), rápida capacidad de respuesta y fácil integración con renovables. Sus desventajas se centran en que algunas de ellas requieren refrigeración o unidades especiales de almacenamiento, cuentan con complejos convertidores de potencia y tienen un costo inicial alto.

El objetivo de los estudios actuales de baterías es incrementar la densidad energética, mejorar la vida útil y la eficiencia mientras se mantienen costos competitivos. Algunos sistemas de baterías son empleados con capacitores para mejorar la controlabilidad y el flujo de potencia del sistema eléctrico, mejorar el perfil de voltaje y suavizar la potencia de salida de renovables en el punto de acople con la red, también son empleadas para mejorar el factor de potencia, y para control de voltaje y frecuencia.

Una de las tecnologías más empleadas para el gran almacenamiento de energía con integración de renovables son las baterías plomo-ácido, las cuales son de bajo costo, pero poseen baja densidad

energética y limitada vida útil. Otras alternativas serían: níquel-cadmio, sodio-sulfuro, redox de vanadio, ion-litio, cloruro sodio níquel, redox de zinc-bromo y grafeno.

#### 4.7.1. Características de las baterías

Para escoger una batería, se analizan las características técnicas que poseen en busca de cumplir con las condiciones que la aplicación establece, a continuación, se describe las características principales de una batería.

- **Rendimiento:** Es la relación entre la energía que se extrae de la batería y la energía que ingresa en la misma. Hace referencia a las pérdidas en la batería durante la carga y la descarga, especialmente por efectos caloríficos.
- **Ciclos de carga-descarga:** Es la cantidad de veces que se puede cargar y descargar una batería en su vida útil. Si la descarga es profunda el número de ciclos se reduce, y por ende su vida útil. Para aplicaciones de potencia, la batería debe ser capaz de sostener corrientes moderadas, durante varias horas y debe trabajar sin períodos de reposo, ya que está siendo cargada o descargada a lo largo del día, por lo que se recomienda que sean de ciclo profundo.
- **Tensión de la batería:** Es uno de los primeros parámetros a determinar para el funcionamiento de nuestra instalación en corriente continua, antes de llegar al inversor. Como referencia para sistemas con energías renovables se recomienda manejar los voltajes de la tabla a continuación.

Potencia demandada por el sistema (W)	Tensión de trabajo del sistema fotovoltaico (Volts.)
Menos de 1.500W	12V
Entre 1.500W y 5.000W	24- 48V
Más de 5.000W	120-300V

*Tabla 12 Relación potencia del sistema con la tensión de las baterías a utilizar*

- **Vida útil:** La vida útil de una batería no se mide en años, sino por la cantidad de ciclos de carga - descarga que es capaz de realizar. Así, si se la somete a un régimen de trabajo de muchos ciclos diarios, probablemente sólo durará unos meses, mientras que si el régimen es de un ciclo al día o incluso más lento (como ocurre en el caso de iluminación de viviendas con energía solar) la batería puede durar al varios años. Si una batería se descarga en 120 horas, su ciclo de descarga serían esas 120h. Este valor se suele expresar como C120 en la literatura y nos sirven de parámetro para comparar distintas baterías.
- **Profundidad de Descarga (DOD):** Es el porcentaje máximo del total de la carga de una batería que determinamos que se puede llegar a descargar en un ciclo completo (carga y descarga). Si decidimos el 70%, quiere decir que cuando la descarga de la batería llega al 70% de su total, empieza a cargarse por completo, o que nunca se podrá descarga más que el 70%. En función de la profundidad de descarga de las baterías tenemos 2 tipos: baterías con ciclos poco profundos y baterías de ciclo profundos.

Las baterías de ciclo poco profundo no suelen aguantar bien unas descargas mayores del 20% y se suele producir la descarga rápidamente, suelen tener una vida de 500-100 ciclos. De este tipo son las de arranque de los coches o motos.

Las baterías de ciclo profundo soportan una descarga de hasta el 80% de su carga total, pero esta descarga (ciclo) dura mucho tiempo, incluso días. Suelen tener una vida de 1500 ciclos. A menos DOD más ciclos aguanta la batería, con el inconveniente que se aumenta mucho el precio, ya que, si solo usamos un pequeño porcentaje de la batería para suplir el 100% del consumo real, la capacidad de la batería sería muy grande. Lo normal es poner una profundidad de descarga entre el 50% y el 70%.

- Capacidad de la batería: es la cantidad total de corriente que es capaz de suministrar la batería en un determinado tiempo y con una tensión determinada cuando está cargada al 100%. La cantidad de electricidad que puede dar en la descarga. su unidad es el ampere-hora (Ah), (ej., una batería de 280Ah a 12V es capaz de suministrar 28A en 10 horas, o 2,8A en 100horas).

Normalmente lo que se conoce de la instalación que se quiere alimentar es el consumo diario expresado en Wh, los cuales se tienen que pasar a Ah. Esto se logra al dividir la potencia entre la diferencia de potencial de trabajo de la instalación, con lo que tendríamos los Ah que necesitamos para suministrar ese consumo diario a la instalación a través de la batería. Además, se debe tomar en cuenta que las baterías no se pueden descargar por completo, por lo que la capacidad de la batería también dependerá de la profundidad de descarga.

La expresión para el cálculo de capacidad es la siguiente:

$$Cp = \frac{Cd * D}{DOD * V} * 1.15$$

\*Se multiplica por 1.15 para considerar pérdidas por temperatura, rendimiento de equipos, etc  
Donde:

Cp: Capacidad de la batería (Ah).

Cd: Consumo diario (Wh).

DOD: Profundidad de descarga (%)

V: Diferencia de potencial de trabajo (V)

- Temperatura: si la temperatura aumenta se incrementa la capacidad de la batería, pero disminuye su durabilidad, por eso el fabricante especifica la temperatura de funcionamiento (normalmente 25 °C). Con temperaturas muy bajas podría congelarse el electrolito y con temperatura muy altas envejecen más rápido las baterías. También es importante tener en cuenta que las baterías en la carga y descarga se calientan, por eso es necesario que se sitúen en un sitio con buena ventilación.
- Autodescarga: pérdida de capacidad de una batería cuando está almacenada en circuito abierto o sin usar por la reacción entre los materiales que la forman. La autodescarga hay que considerarla como un consumo adicional, que demanda un cierto porcentaje de la energía almacenada, depende del tipo de batería y de la temperatura, su valor es aproximadamente es de un 0,5 a un 1% diario.

#### 4.7.2. Sistema de gestión de baterías

Un sistema de gestión o manejo de baterías, no solo monitorea y controla los parámetros clave durante su carga y descarga (voltaje, corriente, temperatura) para la protección y vigilancia de las baterías; sino que también abarca los procesos para mantener el sistema de almacenamiento listo, para suministrar alimentación completa, y las técnicas para prolongar su vida útil.

##### Funciones del sistema de gestión de baterías

- Protección de la batería: Esta función sirve para evitar que la batería salga de las condiciones de tolerancia de funcionamiento.
- Control de carga: La mayoría de los daños en las baterías se deben a la carga inadecuada.
- Gestión de la demanda: Su objetivo es reducir al mínimo el consumo de corriente de la batería mediante el diseño de técnicas de ahorro de energía y así prolongar el tiempo entre carga y carga de la batería.
- Estado de carga: Puede proporcionar al usuario una indicación de la capacidad restante en la batería, que puede ser útil para asegurar el buen manejo del proceso de carga en un circuito de control.
- Estado de funcionamiento: es un indicador para conocer si se necesitan acciones de mantenimiento.
- Equilibrio de carga: normalmente se producen pequeñas diferencias de tensión entre las celdas, que tienden a magnificarse con cada ciclo. El equilibrio de las celdas mediante la nivelación de la carga en toda la serie extiende la vida útil de la batería.
- Sistemas de comunicación: la mayoría de los sistemas de gestión de baterías incorporan algún tipo de comunicación entre la batería y el cargador. También se necesitan interfaces para permitir al usuario la modificación de los parámetros de control o para el diagnóstico y prueba.

#### 4.7.3. Almacenamiento de energía para sistemas de potencia

La energía eléctrica en su forma CA no puede ser almacenada de una forma eficiente en grandes cantidades. Aun así, esta energía puede ser almacenada al ser convertida en energía electromagnética, electromecánica, cinética, química y como energía potencial. Los principales factores determinantes a la hora de seleccionar un sistema de almacenamiento de energía son la cantidad de energía que requiere ser almacenada, la tasa a la cual dicha energía puede ser almacenada y liberada, además del precio, temperatura, vida útil, entre otros.

Gracias a los avances en la electrónica de potencia y a la reducción de costos de construcción de los sistemas de almacenamiento se hace viable su aplicación en sistemas eléctricos de potencia. Dichas tecnologías incluyen baterías, supercapacitores, baterías magnéticas, aire comprimido, entre otras. Hoy en día estas tecnologías están siendo aplicadas para mejorar la confiabilidad de la red, ayudar a la transferencia de potencia, mejorar la calidad de la energía y suplir energía en condiciones de alta demanda.

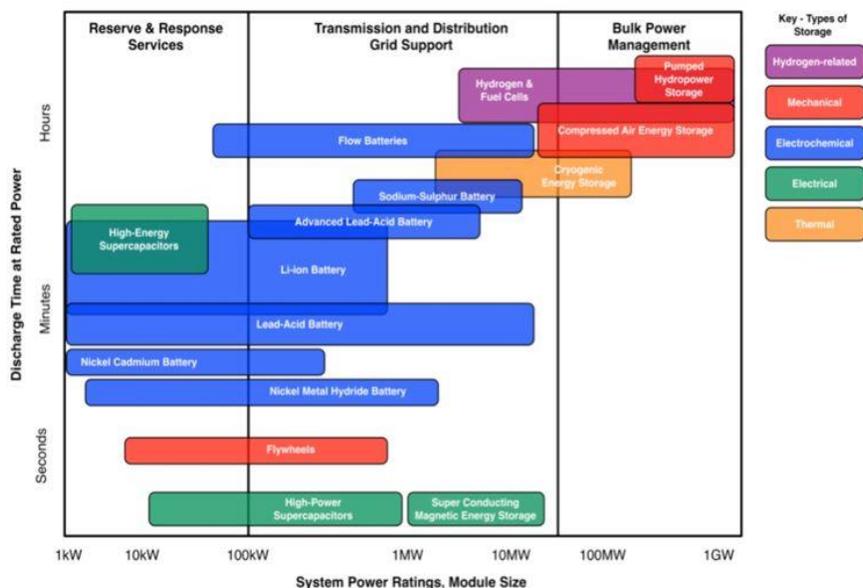


Figura 59 Rangos de potencia contra el tiempo de descarga de los ESS

La integración de estos sistemas con la red eléctrica es posible empleando convertidores o inversores que permitan el intercambio bidireccional de potencia. La etapa de control del convertidor determina cual es el mejor momento para realizar la carga/descarga del sistema de almacenamientos, ya sea de acuerdo con el precio de la energía, o los requerimientos de potencia.

A nivel de transmisión y distribución los beneficios de utilizar sistemas de almacenamiento son:

- Amortiguamiento de las oscilaciones.
- Estabilidad de voltaje.
- Nivelación de la carga, al almacenar la energía durante periodos de baja demanda para ser usada durante periodos de alta demanda
- Reserva rodante de corto plazo, que se refiere a la capacidad de una central de generación para ser sincronizada con la red y cumplir con la demanda en el mediano plazo
- Mejoramiento de la calidad de la energía.

#### 4.7.3.1. Baterías magnéticas (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES)

El fenómeno de la superconducción fue descubierto en 1911, y fue en la década de los 70's que se propusieron las baterías magnéticas como sistema de almacenamiento para aplicaciones de potencia. Actualmente estas baterías sirven para instalaciones especiales, debido a su alta capacidad de respuesta y a su alta eficiencia (carga/descarga por encima del 95%).

Estos sistemas están diseñados para almacenar energía en su campo magnético dada una corriente que fluye a través de una bobina superconductor. Como la energía es almacenada en el campo magnético, tienen una rápida capacidad de respuesta y pueden brindar respaldo desde fracciones de segundo hasta varias horas. La energía almacenada en joules es cuantificada a través de siguiente ecuación.

$$E = \frac{1}{2} * L * I^2$$

Esta tecnología es altamente costosa para ser aplicada en sistemas eléctricos convencionales dada la necesidad de materiales especiales para el núcleo de la bobina, sin embargo, su ventaja radica en que no se requiere de un inversor, con lo cual se incrementa la eficiencia. El desarrollo de nuevos superconductores que soportan altas temperaturas ha hecho posible la reducción en tamaño de estos sistemas, al disminuir los elementos de refrigeración.

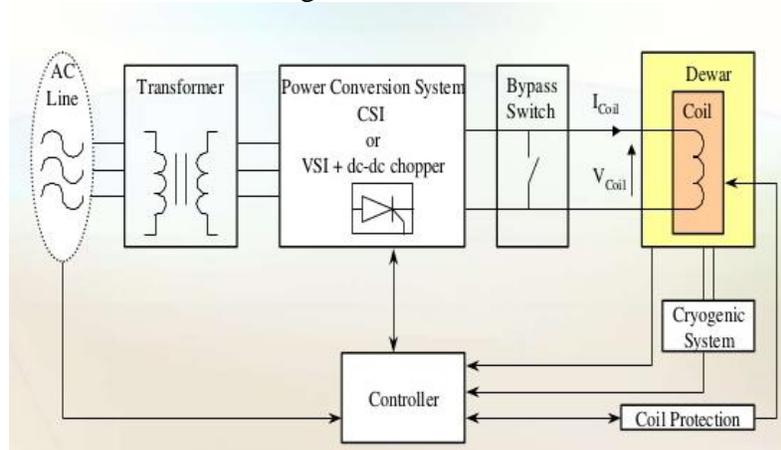


Figura 60 Componentes de un SMES

Existen dos formas de realizar la conversión de energía en una batería magnética, la primera utiliza un *current source converter* (CSC) para conectar la etapa AC con la etapa carga/descarga de la bobina, la otra consiste en usar un *voltage source converter* (VSC). Los modos de carga, descarga y stand-by son establecidos controlando el voltaje en la bobina ( $V_{coil}$ ), el controlador establece, según las condiciones de la red, cuando debe empezar a liberarse o almacenarse la energía. Las baterías magnéticas actuales van desde 1MW hasta 10MW y son diseñadas para proveer energía en el corto plazo (*short-term power*) del orden de segundos.

#### 4.7.3.2. Supercapacitores (Advanced Capacitors)

Los capacitores convencionales operan acumulando energía en el campo eléctrico que se produce en medio de dos capas paralelas separadas por un dieléctrico. La energía que se almacena en el capacitor puede ser calculada con la ecuación siguiente:

$$E = \frac{1}{2} * C * V^2$$

La capacitancia de un capacitor aumenta cuando el área de las placas también aumenta y la distancia entre ellas disminuye. Un supercapacitor difiere de un capacitor ordinario en dos puntos muy importantes: sus capas tienen un área efectiva mucho mayor y la distancia entre estas es menor, debido a que el separador entre ellas funciona diferente que un material dieléctrico convencional. Existe una diferencia entre los términos, ultracapacitor y supercapacitor, relacionada con la manera en que son construidos, los materiales y la estructura de estos dispositivos, lo que se refleja en la cantidad de energía que pueden almacenar, aunque generalmente estos términos se utilizan de forma indiferente.

Al igual que un capacitor ordinario, un supercapacitor tiene dos placas que están separadas. En este caso, las capas son de metal recubiertas con una sustancia porosa en forma de polvo, como podría ser el carbón activado, que en efecto genera una mucho mayor área para almacenar mayor cantidad de carga. Si se hace la analogía, con agua donde un capacitor convencional sería como un paño que puede absorber

solamente una pequeña cantidad, mientras que las placas porosas del supercapacitor funcionarían más como una esponja por lo que puede absorber una cantidad varias veces mayor de agua.

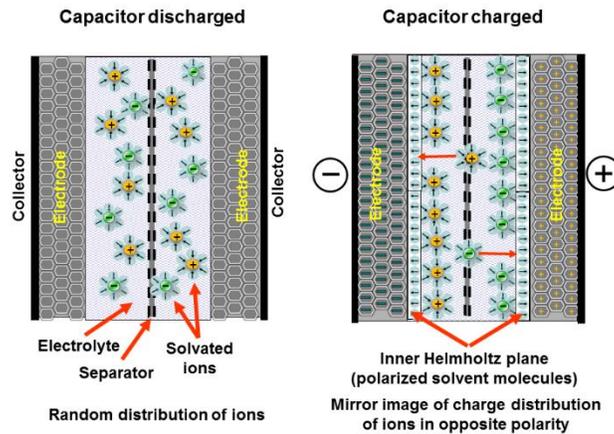


Figura 61 Funcionamiento interno de un supercapacitor

En un capacitor ordinario, las placas están separadas por un material dieléctrico relativamente delgado, que puede ser cerámico, una película polimérica delgada o incluso solo aire. Cuando un capacitor está cargado, se generan cargas positivas en una placa y cargas negativas en la otra, por lo que se crea un campo eléctrico entre las dos. El campo polariza el material dieléctrico y por lo tanto sus moléculas se alinean en la dirección opuesta al campo y reducen su resistencia, lo que permite almacenar más carga para una diferencia de potencial dada. En un supercapacitor, no hay un material dieléctrico como tal; en realidad, las dos placas se encuentran mojadas por un electrolito y separadas por un aislante muy delgado que puede ser, carbón, papel o plástico. Cuando las placas son cargadas, una carga opuesta se forma en cada uno de los lados del separador, creando lo que se conoce como una doble capa eléctrica, aproximadamente del tamaño de una molécula de separación (en comparación con el material dieléctrico de un capacitor normal al cual su grosor va del rango de micro a milímetros). Por esto los supercapacitores también son conocidos como capacitores de doble capa, capacitores de doble capa eléctrica (electric double-layer capacitors - EDLCs). Por lo que, en resumen, los supercapacitores tienen una mucho mayor capacitancia por la combinación de placas con área efectiva más grandes, resultado del recubrimiento con carbón activado, y por la menor distancia entre las placas debido al efecto de doble capa.

Los supercapacitores se caracterizan en poder ser cargados y descargados en brevísimos períodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante necesidades de puntas de potencia o ante interrupciones de suministro de poca duración, esta ventaja les permite ser empleados para compensar la variabilidad de la potencia de salida de plantas solares y eólicas inyectando potencia eléctrica durante periodos cortos de tiempo.

#### 4.7.3.3. Volante de inercia (Flywheel Energy Storage - FES)

Los volantes de inercia son quizás, después de las baterías, una de las tecnologías más implementadas para compensar las fluctuaciones de potencia a baja escala. Su principio de funcionamiento es muy similar al de carga y descarga de los supercapacitores, en este caso se aprovecha la energía rotacional almacenada de una gran masa rotativa manejada por un controlador para compensar fluctuaciones de potencia. La energía almacenada depende principalmente del momento de inercia como se indica en la ecuación siguiente.

$$E = \frac{1}{2} * I * W^2$$

El momento de inercia depende del radio, la masa y la altura del rotor empleado. La energía es transferida al volante durante horas de poca demanda, a través de un motor girando a altas velocidades (etapa de carga). Una vez se requiera, la energía almacenada es liberada por el controlador al enviar una señal lo que ocasiona la desaceleración debido al electromagnético generado, opuesto a la dirección de rotación, al inyectar corriente. Los rangos de potencia van desde 1kW hasta varios MW con períodos de operación de 2 a 30 segundos.

La capacidad de almacenar energía de los volantes de inercia puede ser mejorada incrementando el momento de inercia del rotor o haciendo que este gire a más altas velocidades, sin embargo, esto provocaría que el sistema se vuelva robusto y con problemas en el control de velocidad. Las pérdidas rotacionales limitan la capacidad de almacenar la energía durante periodos largos de tiempo. Sus principales ventajas son que puede almacenar altas cantidades de energía, tiene larga vida útil, es fácil de recargar, relativamente de bajo costo ya que no requiera mucha electrónica de potencia para garantizar su operación, bajo mantenimiento. Las desventajas se centran en que tiene baja densidad de energía, altas pérdidas rotacionales y es peligrosa si algo falla.

#### 4.7.3.4. Almacenamiento de energía en aire comprimido (Compressed Air Energy Storage - CAES)

El almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) ha sido ampliamente utilizado con éxito en diferentes instalaciones. Es un método que utiliza energía de bajo costo disponible durante las horas de poca demanda (*low-cost and off-peak energy*) para comprimir aire en grandes cavernas subterráneas. El aire extraído de las cavernas es calentado usando gas natural en una cámara de combustión, para posteriormente ser empleado para accionar un generador. Si bien este proceso requiere ciclo combinado, el consumo de gas natural para calentar el aire comprimido es menor que si se usaran las centrales de gas convencionales.

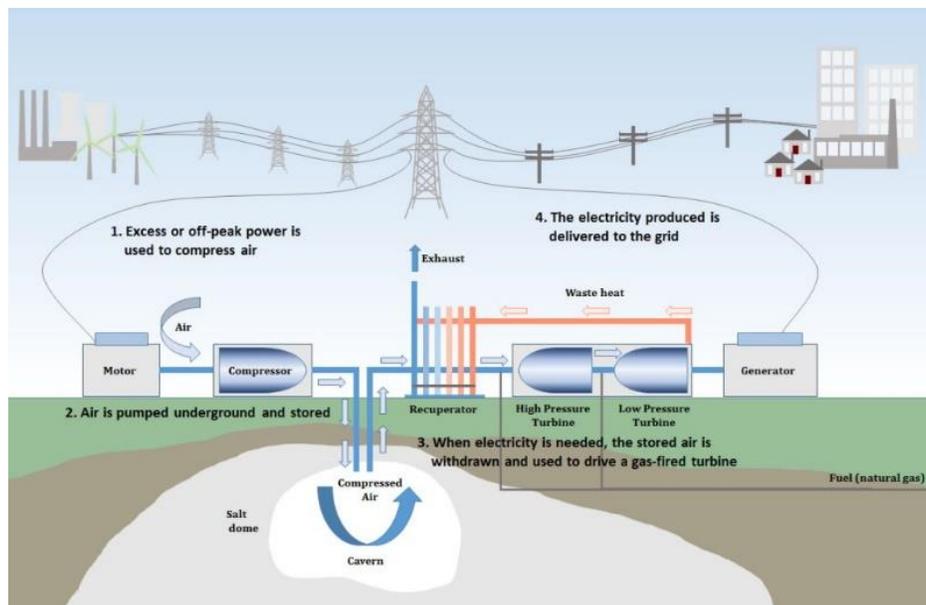


Figura 62 Instalación de un sistema CAES

Las instalaciones más comunes de CAES van desde los 50 MW hasta los 300 MW con una eficiencia entre 70% y 80% y un periodo de respaldo de entre 1 hora y 3 horas en un régimen de alta demanda. Su principal desventaja es que se deben construir o adecuar en donde las condiciones geológicas del terreno lo permitan.

#### 4.8. Software, instrumentación y control

Entre los componentes esenciales de una microrred, además de las nuevas tecnologías de generación y almacenamiento, encontramos dispositivos electrónicos, mediciones avanzadas, nuevas estructuras de telecomunicaciones, estrategias de automatización y despacho, el uso de sistemas de monitoreo y control, seguridad de la red y respuesta de la demanda.

Dentro del marco del desarrollo de los sistemas de generación distribuida, tanto en el ámbito industrial como académico, los sistemas de medición cobran especial importancia. Para realizar esto se necesitan sistemas de medición seguros, confiables y cómodos para un operario. En adición las etapas de medición y de control en los procesos permiten identificar zonas donde se pueda optimizar dicho proceso con el fin de hacerlo más eficiente, es por esta razón que se vuelve importante que las unidades y sistemas productivos tengan asociado un sistema de instrumentación y control.

##### 4.8.1. Gestión de una microrred electrotérmica

El diseño de una microrred debe considerar generadores convencionales y renovables, cargas gestionables, sistemas de almacenamiento, convertidores de potencia y elementos auxiliares como analizadores de red y otros equipos de medición. Para lograr la correcta administración de la microrred es preciso contar con un elemento de adquisición de datos que sea capaz de utilizar distintos protocolos de comunicación, compatible con entradas analógicas y digitales, y que sea lo más modular posible, de forma que se puedan añadir nuevos elementos conforme se vayan acoplando a la microrred. También debe ser capaz de procesar en tiempo real estos datos y de devolver las consignas de potencia a los actuadores de la microrred. Una herramienta añadida es la de implementar elementos virtuales, que son capaces de interactuar con los elementos reales como si estuvieran realmente instalados. Además, es importante que el sistema sea capaz de enviar la información a una base de datos. Esta base de datos permite analizar los resultados utilizando los datos en bruto, o utilizando programas que procesan los datos para devolver los resultados más relevantes, como por ejemplo los balances energéticos de la microrred en un día dado, el análisis de los generadores renovables o el análisis de la calidad del perfil de potencia intercambiado con la red.

##### 4.8.1.1. Captura de datos y monitorización

Los datos provienen de distintos aparatos de medida y de distintos fabricantes, que además utilizan distintos protocolos de comunicación, aun así, es importante obtener las principales variables eléctricas en los distintos nodos de la microrred (tensiones, corrientes, potencias, frecuencia, etc.). Los datos recogidos deben ser visualizados en tiempo real en la estación de control y tener una monitorización tipo SCADA, lo cual permite visualizar los flujos de potencia en la microrred, además de cualquier otra variable eléctrica. Incluso se podría ir graficando en tiempo real los últimos datos de la microrred durante un periodo que puede ir desde una hora, de esta manera es posible visualizar la evolución de distintas variables.

#### 4.8.1.2. Control

El control puede ser totalmente autónomo o con un operador. Este control mide ciertas variables (potencias, estado de carga de las baterías, variables ambientales, etc.) y realiza la toma de decisiones con el objetivo de suavizar el perfil de potencia intercambiado con la red, mandando las consignas necesarias a las cargas variables, generadores y elementos de almacenamiento. El control se realiza de manera automática siempre y cuando así se haya establecido en la estación de control. No obstante, debe existir la posibilidad de pasar a modo manual, lo que permitiría que la microrred se pueda conectar y desconectar de la red eléctrica y establecer la potencia intercambiada con la misma. Además, se puede elegir que la red externa sea la red eléctrica nacional o una red local generada por un generador convencional de energía eléctrica. Finalmente, es importante que dentro de la microrred se pueden conectar y desconectar cargas no críticas de manera manual.

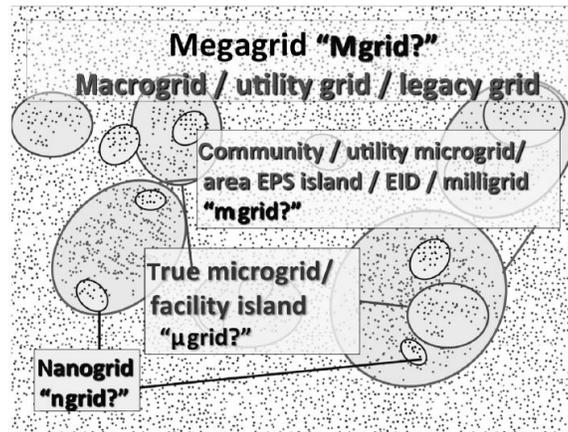


Figura 63 Modelo de redes descentralizado

#### 4.8.1.3. Análisis de datos

Para analizar el funcionamiento de la microrred y estudiar posibles mejoras en las estrategias de gestión energética es necesario guardar todos los datos que se van generando en una base de datos. Esta base de datos acumula cientos de datos por segundo y su manejo manual sería inviable, por lo que se requieren programas específicos que permitan la visualización y administración de dichos datos.

#### 4.8.2. Sistema de control y administración de microrredes

A continuación, se desarrolla las principales características de un sistema de control y administración de microrredes de tipo SCADA, con la particularidad de que la siguiente propuesta considera la participación del usuario o las comunidades dentro de la gestión de estas. Lo anterior es respaldado por el hecho de que un sistema completamente sustentable debe considerar también el factor social, por lo cual se propone que se tome vincule a las comunidades, incluso con los sistemas de administración, control, supervisión y gestión de la energía.

##### 4.8.2.1. Características de la comunidad

Los aspectos más relevantes que se deben obtener de la comunidad a intervenir son los siguientes:

- Estructura socioeconómica: Ésta se obtiene a través del uso de la Cartografía social.

- Estructura organizacional: De la Estructura Organizacional se puede determinar el proceso de toma de decisiones, que consiste en conocer cómo la comunidad toma una decisión frente a una determinada situación.
- Mapa de sueños: Conocer cuál es la visión de la comunidad en el futuro y que les gustaría tener para mejorarlo.

#### 4.8.2.2. Características del sistema

Las características del sistema que deben ser evaluadas, para proyectos en etapa de diseño o implementados, son las siguientes:

- Recursos locales: Conocer cuáles son los recursos locales existentes como: radiación solar, velocidad del viento, caudal de agua, biomasa.
- Red eléctrica: Se debe efectuar un levantamiento del sistema, en él debe constar:
  - Sensores que se encuentran conectados al sistema.
  - Equipos de generación distribuida que forman parte de la red.
  - Topología de la red de distribución de energía.
  - Sistemas de medición de energía.

#### 4.8.2.3. Elaboración de procedimientos

Los procedimientos son documentos que establecen las funciones que las personas deben desempeñar en las tareas de supervisión y mantenimiento del sistema. En él se detallan todos los pasos que se deben cumplir para el desarrollo de este. Los puntos que se debe incluir son:

- Mantenimiento de las unidades de generación distribuida.
- Estructura de mensajes hacia la estructura organizacional.

Es importante que se tengan registros, que apoyen el cumplimiento del procedimiento.

#### 4.8.2.4. Arquitectura del Sistema Social SCADA

El sistema busca fusionar el mundo social con el mundo eléctrico con el afán que la gestión del sistema se produzca desde la comunidad, para que la población a través del tiempo se empodere del proyecto. El sistema posee herramientas que apoyan a la comunidad en la gestión, el manejo y operación del proyecto.

Estas herramientas contemplan:

- Planificación en el mediano y largo plazo.
- Planificación de la operación del sistema.
- Operación en tiempo real.
- Mantenimiento de las unidades.

Con el fin de cumplir con los aspectos mencionados anteriormente, el sistema está compuesto por 3 módulos que se detallan a continuación:

- **Herramienta para la toma de decisiones**

La herramienta para la toma de decisiones busca dar soporte a la población para la gestión del proyecto, ya que a través de esta los miembros de la comunidad podrán dilucidar cambios en el sistema para tomar decisiones. La herramienta para la Toma de Decisiones debe proporcionar las siguientes salidas:

- Alarmas en función de la estructura organizacional
- Lineamientos en función de los recursos naturales

#### • **Optimizador**

El Optimizador tiene la tarea de enviar consignas a los controladores de las unidades de generación distribuida para aprovechar la disponibilidad de los recursos. Por lo tanto, las entradas de esta herramienta son:

- Sistema de supervisión.
- Estimación de la demanda de energía.
- Estimación de los recursos naturales (sol, viento, biomasa, agua, nivel de carga de las baterías)

#### • **Sistema de supervisión**

Este sistema tiene la misión de monitorear y supervisar el funcionamiento de la microrred en función de la instrumentación disponible vinculando a la comunidad. El módulo de supervisión también tiene la misión de alertar cuando se requiera realizar un mantenimiento preventivo, o correctivo a través de los sistemas de alarma.

Las salidas que entrega el módulo de supervisión son:

- Seguridad para acceder al sistema
- Interfaces para el monitoreo del sistema
- Interfaces para que la comunidad alimente al sistema de información
- Almacenamiento de información en bases de datos
- Alarmas
- Gestión del mantenimiento

El sistema de supervisión permite que la comunidad informe al sistema de eventos que pueden ocurrir, ante la falta de la instrumentación necesaria.

#### 4.8.2.5. Diseño de interfaces

El éxito de un sistema de gestión depende en gran medida de la calidad de su interfaz, de tal forma que diseñar interfaces más productivas y fáciles de usar, dan mayor valor al producto y contribuyen a su éxito.

La interfaz debe ser:

- Fácil de aprender.
- Simple de utilizar.
- Directa.
- No muy estricta.

En adición durante el diseño de la interfaz se deben considerar los siguientes aspectos, que nos permiten entender mejor cual es la finalidad de implementar una buena interfaz para la administración de la microrred.

- Cuando se considera una interfaz hombre máquina (IHM), predominan los sistemas visual, táctil y auditivo.
- La mayoría de las interfases se llevan a cabo a través de un medio visual (formas impresas o gráficas).
- El ojo y el cerebro trabajan conjuntamente para recibir e interpretar la información visual basándose en el tamaño, la forma, el color, la orientación, el movimiento y otras características.
- Un sistema interactivo basado en computadora raramente permite a un usuario hacer algo enteramente nuevo.
- En la mayoría de los casos, el sistema se construye para automatizar y hacer más eficientes ciertas tareas que se realizaban antes a mano o utilizando algún otro procedimiento.

#### 4.8.2.6. Flujo de información

El sistema integra a toda la comunidad, la que se encarga de recolectar la información sobre el funcionamiento, los datos se canalizan a través de la instrumentación o de una persona, que es miembro de la comunidad y debe poseer ciertas cualidades, que le permitan ejecutar la labor de interactuar con el sistema de control y administración de la energía.

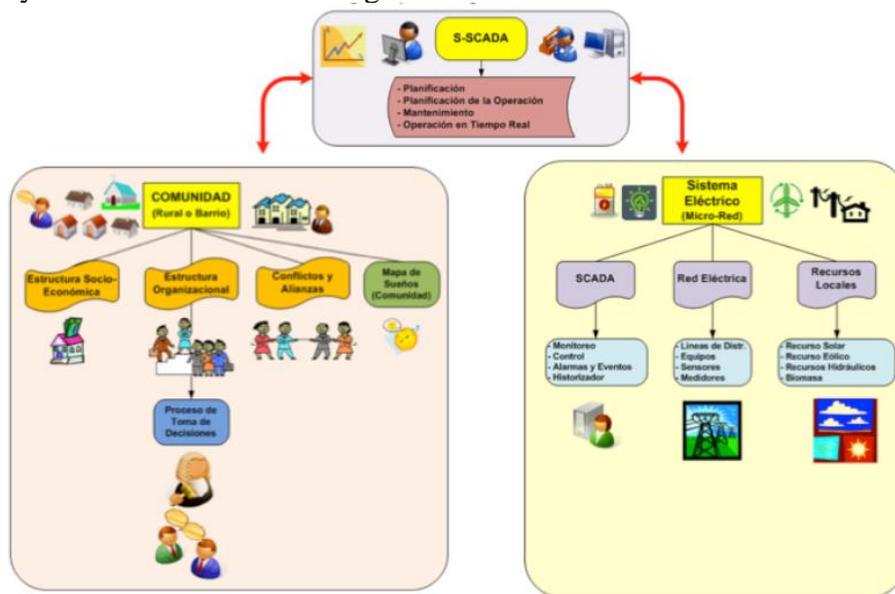


Figura 64 Flujo de información - Social SCADA

La información que se recolecta del sistema a través de la comunidad cumple con ciertos aspectos que son:

- Variables que no son medidas por parte de los sensores que se comunican con el sistema.
- Aspectos que no son medibles como por ejemplo efectos que el sistema puede provocar al ecosistema del lugar.

#### 4.8.2.7. Sistema de comunicaciones

En el sistema de comunicación, los controladores se conectan a una red a través de un protocolo de comunicaciones estándar y los valores de las variables son leídos con un servidor. De esta manera se logra conectividad con las unidades de generación para conocer el estado y parámetros.

Existen varias capas por las que atraviesa la información:

- La primera capa está formada por los dispositivos de campo (controladores), todos ellos tienen que ser capaces de transmitir el valor de sus variables con el mismo protocolo de comunicaciones y respaldar la misma interfaz de comunicación.
- La segunda capa corresponde al software que hace posible la gestión del tráfico de la red de campo, y es el nexo entre las aplicaciones que están ejecutándose dentro de un computador (almacenamiento en base de datos, supervisión, control del sistema, etc.), con el hardware que se encuentra instalado (unidades de generación, sistemas de medición, etc.).
- La tercera capa son las aplicaciones, que leen y escriben valores sobre las variables en los dispositivos de campo, esta capa permite enviar mensajes de texto a los involucrados, y viceversa ya que las personas pueden comunicar al sistema ciertas eventualidades.

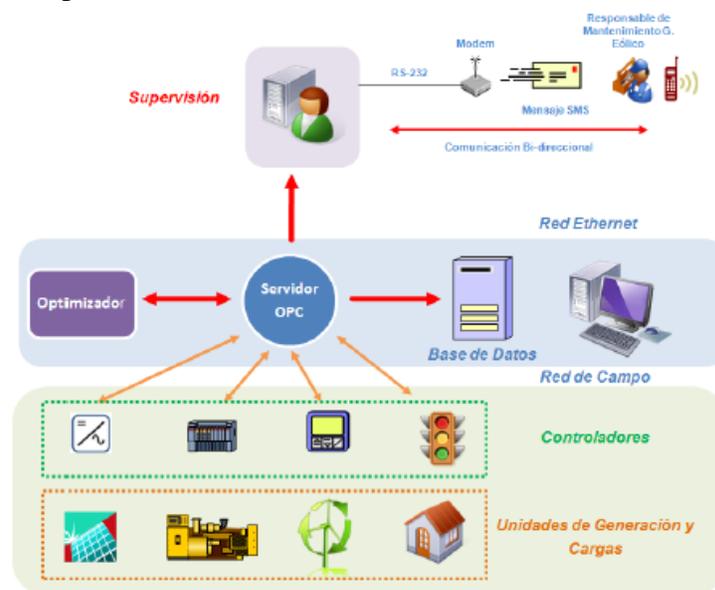


Figura 65 Arquitectura de comunicación

#### 4.8.2.8. Implementación del sistema

Una vez establecidas las características de la comunidad donde se implementará la microrred, así como las implicaciones técnicas del proyecto, se puede definir la información relevante que requiere conocer la comunidad, con el afán de buscar la correcta implementación del proyecto y su interacción con las personas correspondientes.

Los usuarios deben conocer la realidad en el ámbito energético de la microrred, lo que permitiría que el proyecto perdure en el tiempo, ya que esta información les servirá para la toma de decisiones.

Dentro de la implementación, es necesario que se consideren los siguientes aspectos para la comunidad:

- **Supervisión del sistema de generación**

El sistema de generación es la fuente de suministro de energía para la comunidad y por lo tanto es importante que las personas miren de cerca cómo funcionan las unidades de generación para abastecer la demanda. Por lo tanto, la comunidad debe tener la facilidad de supervisar el sistema a través de alguna herramienta computacional.

- **Indicadores de desarrollo sustentable (sostenible)**

Los indicadores de desarrollo sustentable, sirven para establecer una métrica sobre la evolución de la comunidad a través del tiempo. Los indicadores se seleccionan en función de la población, algunos de estos pueden ser:

- **Energía** Es la cantidad de energía eléctrica consumida cada mes, por lo tanto, a través de este indicador las personas pueden evidenciar los hábitos de consumo que tiene la población.
- **Kilogramos de CO<sub>2</sub>** Muestra la cantidad de CO<sub>2</sub> que se dejó de emitir a la atmósfera debido al uso de generadores con tecnología renovable.
- **Ahorro diesel** Se muestra el ahorro mensual de combustible debido al uso de generadores con tecnología renovable. Esto ahorro depende en gran medida de la disponibilidad de recursos (radiación solar, viento), y del uso racional de la energía.
- **Calidad del agua** Indica la calidad de servicio del agua, los aspectos que se consideran son la intermitencia del servicio, y la calidad del agua. Lo anterior se puede relacionar a sistemas de bombeo, filtración o purificación.
- **Organizaciones sociales** Muestra el aumento o disminución de la organización sociales en la comunidad, y como se relaciona con la energía que necesita y emplea la comunidad.
- **Ingresos económicos** indica la variación de las actividades económicas en los miembros de la población, si hubo generación de empleos o ingresos relacionados con la microrred.

- **Gestión del mantenimiento**

La gestión del mantenimiento de las unidades de generación debe estar a cargo de los miembros de la comunidad, estos permiten un seguimiento más cercano y el ahorro de recursos.

- **Consumo de energía domiciliario**

La población puede visualizar el consumo de energía, con el afán de visualizar el desarrollo de cada uno de los usuarios miembros de la microrred, lo que permite visualizar quien tiene mejores hábitos de consumo y las áreas de oportunidad.

- **Control de demanda**

El control de demanda proporciona a la población opciones de consumo variable, por ejemplo:

- Sin restricciones, es decir pueden conectar libremente cargas a la red.
- Consumo en forma medida
- Consumo en forma restringida.

- **Alarmas**

El sistema de Alarmas sirve a la comunidad para visualizar cuando ocurre un evento en la red, con el propósito que se focalicen en el daño y se solucione a la brevedad, es decir el sistema proporciona información del desperfecto en la unidad de generación o en la red.

#### 4.8.3. Respuesta de la demanda

La respuesta de la demanda, es un concepto utilizado en la gestión de la energía donde se utilizan tecnologías de control y comunicación para ajustar la demanda con la intención de reducir emisiones y costos. Genera flexibilidad en la microrred al utilizar señalamientos de precios y volúmenes, incluso incentivos financieros para ajustar el nivel de demanda y los recursos de generación (consumo, generación distribuida y almacenamiento), durante momentos estratégicos del día. Este elemento es crítico para una transición económicamente viable hacia un sistema eléctrico bajo en carbono.

Las políticas energéticas a lo largo del mundo, poco a poco se están volviendo más conscientes de la importancia del concepto de respuesta de la demanda, y empiezan a resolver los desafíos que impiden su aceptación total. Mientras más centrales de generación distribuida se interconecten a la red eléctrica, los programas de respuesta de la demanda se pueden volver más flexibles, incluso pueden reducir la inversión anual en infraestructura eléctrica, en el caso específico de EEUU hasta un 10%. Muchos de estos programas se han enfocado en usuarios comerciales o industriales. Sin embargo, los nuevos dispositivos inteligentes tales como aires acondicionados con preenfriamiento, refrigeradores inteligentes e iluminación superficial pueden detectar automáticamente los signos de precio. Incluso el avance en la digitalización está mejorando las capacidades técnicas de administración de la energía y ayudando a hacer los programas de respuesta de la demanda mucho más fáciles, incluso para usuarios domésticos.

Los proyectos públicos y privados que han implementado programas de respuesta de la demanda parecen tener éxito. Como ejemplo, en la ciudad de Gotland, Suecia cientos de clientes del sector eléctrico participaron en un programa que incluía los signos de precio, (precios bajos en tiempos de poca demanda) dentro de una aplicación para teléfono celular que les permitía escoger entre cuatro niveles predefinidos, la aplicación alerta a los usuarios a través de un mensaje de texto o un email sobre los momentos de mayor demanda. Al principio del programa, el 23% del consumo eléctrico se reflejaba durante las cinco horas más caras del día, esto se redujo a 19% y 20% durante el primer y segundo año del programa.

La flexibilidad en la demanda crea valor para los usuarios y para la misma red al reducir las facturas de los usuarios (incluso a un 40%), reduciendo la demanda pico y desplazando el consumo a menores precios, es decir en horas de baja demanda. Esta flexibilidad en la demanda también es positiva para los generadores, en algunos casos, al evitar inversiones en centrales de generación, en transmisión y distribución, incluso en plantas de respaldo de la demanda. El mercado global de respuesta de la demanda está estimado en 68.8 GW para el 2018, sin embargo, la capacidad tiene la posibilidad de ser reducida con estos programas.

#### 4.8.4. Digitalización

Las tecnologías digitales permiten a los dispositivos instalados, a lo largo de la red, comunicarse y dar información útil para los usuarios, y para la operación y administración de la red. Los medidores inteligentes, los sensores, el control remoto y la automatización de los sistemas, las plataformas digitales que se enfocan en optimizar y concentrar, permiten la operación en tiempo real de la red y de sus recursos,

además de coleccionar información de la red para mejorar el conocimiento de la situación y los servicios de utilidad.

A pesar de que la penetración en el mercado de dispositivos inteligentes (IoT), incluyendo refrigeradores, microondas, lavavajillas es muy baja de 3% al 5% para la mayoría de las aplicaciones. Esta situación está predicha a crecer drásticamente, debido a que los sensores en dispositivos que consumen electricidad se estarán multiplicando para 6 en el 2020. Mientras más áreas de la cadena de valor se digitalicen, impulsado por la reducción de los costos de la tecnología, y se conecten con dispositivos que generen información, la extensión y la calidad de la red y los potenciales casos de uso que se pueden lograr analizando esta información se vuelven definitivamente interesantes y valiosos.

El despliegue de tecnologías digitales en la red puede verse obstaculizada por la falta de regulación, cuando el modelo de remuneración considera una parcialidad de las inversiones en la infraestructura de la red, como expensas de las potenciales alternativas en digitalización y la explotación de recursos distribuidos. Mientras la digitalización continúe y más dispositivos digitales son desplegados, la comunicación entre ellos será vital.

Tres retos principales para la digitalización incluyen servicios legales. El primero sería la falta de una estructura legal alrededor del cliente y los datos de recursos distribuidos no favorecen en avance en esta área. Solo algunas regiones en el mundo tienen bien definidas las reglas de quien tienen acceso, posee y puede compartir los datos de los clientes. En segundo lugar, la falta de un modelo dinámico de precios que ayudaría a brindar seguridad al momento de implementar dispositivos inteligentes. Y finalmente los altos precios y los largos ciclos de remplazo están generando una sobre implementación.

La capacidad de explotar la información digital podría ser todo un reto, debido a que la industria de servicios públicos no está bien posicionada para aprovecharla al máximo. Esta industria carece de incentivos para la investigación e innovación, y los actores externos se ven normalmente limitados por falta de acceso al conjunto de datos integrados que podrían necesitar.

El desarrollo de infraestructura de medición avanzada presenta claras oportunidades para mejorar la calidad del servicio, monitoreo de la red de bajo voltaje y la recopilación de datos. Algunas empresas están aprovechando la oportunidad y están implementando millones de medidores inteligentes en Estados Unidos y Europa.

#### 4.9. Transmisión y distribución

##### 4.9.1. Antecedentes

A inicios del siglo XX México contaba con una capacidad de 31 MW, propiedad de empresas privadas como The Mexican Light and Power Company, de origen canadiense, en el centro del país; el consorcio The American and Foreign Power Company, con tres sistemas interconectados en el norte de México, y la Compañía Eléctrica de Chapala, en el occidente, las tres compañías tenían las concesiones e instalaciones de la mayor parte de las pequeñas plantas que sólo funcionaban en sus regiones. Para 1910 eran 50 MW, de los cuales 80% los generaba The Mexican Light and Power Company, con el primer gran proyecto hidroeléctrico: la planta Necaxa, en Puebla.

En ese período se dio el primer esfuerzo para ordenar la industria eléctrica con la creación de la Comisión Nacional para el Fomento y Control de la Industria de Generación y Fuerza, conocida posteriormente

como Comisión Nacional de Fuerza Motriz. Fue el 2 de diciembre de 1933 cuando se decretó que la generación y distribución de electricidad son actividades de utilidad pública. En 1937 México tenía 18.3 millones de habitantes, de los cuales únicamente siete millones contaban con electricidad, proporcionada con serias dificultades por tres empresas privadas. En ese momento las interrupciones del suministro eléctrico eran constantes y las tarifas muy elevadas, debido a que esas empresas se enfocaban a los mercados urbanos más redituables, sin considerar a las poblaciones rurales, donde habitaba más del 62% de la población.

Para dar respuesta a esa situación que no permitía el desarrollo del país, el gobierno federal creó, el 14 de agosto de 1937, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que tendría por objeto organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, basado en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro y con la finalidad de obtener con un costo mínimo, el mayor rendimiento posible en beneficio de los intereses generales. La CFE comenzó a construir plantas generadoras y ampliar las redes de transmisión y distribución, beneficiando a más mexicanos al posibilitar el bombeo de agua de riego y la molienda, así como mayor alumbrado público y electrificación de comunidades.

Hacia 1960 la CFE aportaba ya el 54% de los 2,308 MW de capacidad instalada, la empresa Mexican Light el 25%, la American and Foreign el 12%, y el resto de las compañías 9%. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de generación y electrificación, para esas fechas apenas 44% de la población contaba con electricidad. Por esta razón el presidente Adolfo López Mateos decidió nacionalizar la industria eléctrica, el 27 de septiembre de 1960. A partir de entonces se comenzó a integrar el Sistema Eléctrico Nacional, extendiendo la cobertura del suministro y acelerando la industrialización. El Estado mexicano adquirió los bienes e instalaciones de las compañías privadas, las cuales operaban con serias deficiencias por la falta de inversión y los problemas laborales.

Cabe mencionar que en los inicios de la industria eléctrica mexicana operaban varios sistemas aislados, con características técnicas diferentes, llegando a coexistir casi 30 niveles de tensión diferentes de distribución, siete de alta tensión para líneas de transmisión y dos frecuencias eléctricas de 50 y 60 Hertz. Dicha situación dificultaba el suministro de electricidad, por lo que CFE definió y unificó los criterios técnicos y económicos del Sistema Eléctrico Nacional, normalizando los voltajes de operación, con la finalidad de normalizar los equipos, reducir sus costos y los tiempos de fabricación, almacenaje e inventariado. Posteriormente se unificaron las frecuencias a 60 hertz y CFE integró los sistemas de transmisión en el Sistema Interconectado Nacional.

En la CFE se produce la energía eléctrica utilizando diferentes tecnologías y diferentes fuentes de energético primario. Tiene centrales termoeléctricas, hidroeléctricas, carboeléctricas, geotermoeléctricas, eoloeléctricas y una nucleoelectrica. Para conducir la electricidad desde las centrales de generación hasta el domicilio de cada uno de sus clientes, la CFE tiene cerca de 672 mil kilómetros de líneas de transmisión y de distribución.

El suministro de energía eléctrica llega a cerca de 188 mil localidades (184,613 rurales y 3,325 urbanas) y el 96.68% de la población utiliza la electricidad. En los últimos diez años se han instalado 42 mil módulos solares en pequeñas comunidades muy alejadas de los grandes centros de población. Esta será la tecnología de mayor aplicación en el futuro para aquellas comunidades que aún no cuentan con electricidad.

La CFE es también la entidad del gobierno federal encargada de la planeación del sistema eléctrico nacional, la cual es plasmada en el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE), que

describe la evolución del mercado eléctrico, así como la expansión de la capacidad de generación y transmisión para satisfacer la demanda en los próximos diez años, y se actualiza anualmente.

#### 4.9.2. Transmisión

Se entiende por transmisión de energía eléctrica al transporte de esta desde los centros de generación (a través de las subestaciones) hasta los distintos centros de distribución para que llegue al consumidor final. Se caracteriza por la transferencia de potencia eléctrica a distancias relativamente grandes, con ayuda de sistemas de alta y media tensión.

Los dispositivos técnicos para la transmisión se dividen en:

- Torres
- Cables
- Subestaciones transformadoras y de distribución

Los sistemas eléctricos pueden clasificarse por su nivel de tensión y se utiliza la siguiente división donde los límites de la clasificación no son estrictos, dependen de criterios y de normas:

- Baja tensión, sistemas de hasta 1.000 V
- Media tensión, sistemas hasta 36 kV, algunos consideran valores más altos (72,5 kV). El límite está en la diferente tecnología entre esta clase y la superior
- Alta tensión, sistemas hasta 245 - 300 kV
- Muy alta tensión, por encima de los 300 - 360 kV

Generación y transporte de electricidad es el conjunto de instalaciones que se utilizan para transformar otros tipos de energía en energía eléctrica y transportarla hasta los lugares donde se consume respectivamente

Las instalaciones eléctricas tienen seis elementos principales:

- La central eléctrica
- Los transformadores, que elevan el voltaje de la energía eléctrica generada a las altas tensiones utilizadas en las líneas de transporte
- Las líneas de transporte
- Las subestaciones donde la señal baja su voltaje para adecuarse a las líneas de distribución
- Las líneas de distribución
- Los transformadores que bajan el voltaje al valor utilizado por los consumidores

#### 4.9.3. Distribución

Un sistema de distribución eléctrico o planta de distribución como comúnmente es llamado, es toda la parte del sistema eléctrico de potencia comprendida entre la planta eléctrica y los apagadores del consumidor.

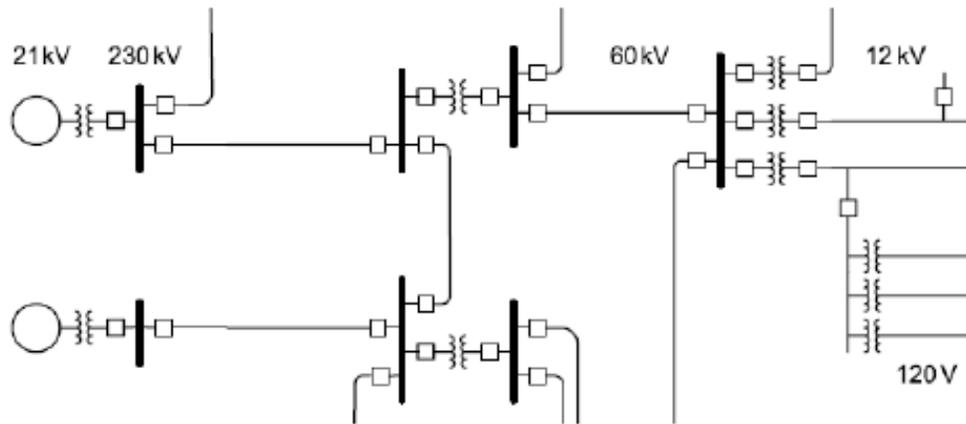


Figura 66 Estructura básica de un sistema eléctrico

Para diferentes áreas de carga o incluso para diferentes partes de la misma área de carga, el sistema de distribución más efectivo podría tomar diferentes formas. El sistema de distribución debe proveer servicio con un mínimo de variaciones de tensión y el mínimo de interrupciones, debe ser flexible para permitir expansiones en pequeños incrementos, así como para reconocer cambios en las condiciones de carga con un mínimo de modificaciones y gastos.

Así pues, la generación se realiza en grandes bloques concentrados en plantas de gran capacidad y la distribución en grandes territorios con cargas de diversas magnitudes. Por esta razón el sistema de distribución resulta todavía más complejo que el sistema de potencia. El sistema eléctrico de potencia (SEP) es el conjunto de centrales generadoras, líneas de transmisión y sistemas de distribución que operan como un todo.

La definición clásica de un sistema de distribución incluye lo siguiente;

1. Subestación principal de potencia. Ésta recibe la potencia del sistema de transmisión y la transforma al voltaje de subtransmisión. Los voltajes de transmisión pueden ser de 230 kV, 400 kV y mayores, pero actualmente existen subestaciones de distribución de 230 kV.
2. Sistema de subtransmisión. Son las líneas que salen de la subestación (SE) principal para alimentar a las SE de distribución. Las tensiones de subtransmisión son de 115 kV y menos, aunque ya 230 kV puede considerarse también como subtransmisión.
3. Subestación de distribución. Se encarga de recibir la potencia de los circuitos de subtransmisión y de transformarla al voltaje de los alimentadores primarios. Su voltaje va desde 66 kV hasta 230 kV.
4. Alimentador primario. Son los circuitos que salen de las SE de distribución y llevan el flujo de potencia hasta los transformadores de distribución. La potencia de los alimentadores depende del voltaje de distribución (2.4 a 34.5 kV)
5. Transformador de distribución. Reduce el voltaje del alimentador primario al voltaje de utilización del usuario. Los voltajes de utilización comunes son de 440 V y de 220 V entre fases. Los transformadores de distribución para poste tienen potencias normalizadas de hasta 300 kVA y los de redes de subterráneas de hasta 750 kVA; en edificios grandes existen transformadores del orden de 2 000 kVA.
6. Secundarios y servicios. Distribuyen la energía del secundario del transformador de distribución a los usuarios o servicios. Las potencias van desde 5 hasta 300 kVA en redes aéreas y hasta 750 kVA y más en redes subterráneas.

Existe en el mundo una amplia gama de combinaciones de voltajes de transmisión, subtransmisión y distribución; Tal vez no esté perfectamente definido internacionalmente, sin embargo, comúnmente se acepta que es el conjunto de instalaciones desde 120 volts hasta tensiones de 34.5 kV encargadas de entregar la energía eléctrica a los usuarios en los niveles de tensión normalizados y en las condiciones de seguridad exigidas por los reglamentos.

#### 4.9.3.1. Tipos de sistemas básicos de distribución

- Sistema radial: Un sistema radial es aquel que tiene un simple camino sin regreso sobre el cual pasa la corriente, parte desde una subestación y se distribuye por forma de “rama”, como se ve en la siguiente figura.

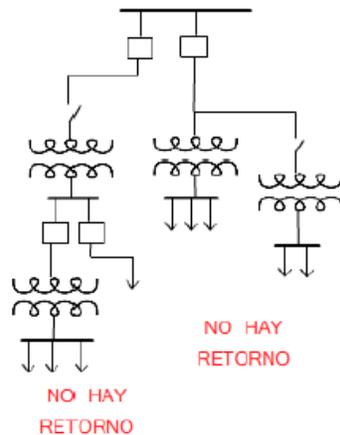


Figura 67 Sistema radial

Este tipo de sistema es el más simple y el más económico debido a que es el arreglo que utiliza menor cantidad de equipo, sin embargo, tiene varias desventajas por su forma de operar:

- Sistema anillo: Es aquel que cuenta con más de una trayectoria entre la fuente o fuentes y la carga para proporcionar el servicio de energía eléctrica. Este sistema comienza en la estación central o subestación y hace un “ciclo” completo por el área a abastecer y regresa al punto de donde partió. Lo cual provoca que el área sea abastecida de ambos extremos, permitiendo aislar ciertas secciones en caso de alguna falla. Este sistema es más utilizado para abastecer grandes masas de carga, donde es de gran importancia la continuidad en el servicio.

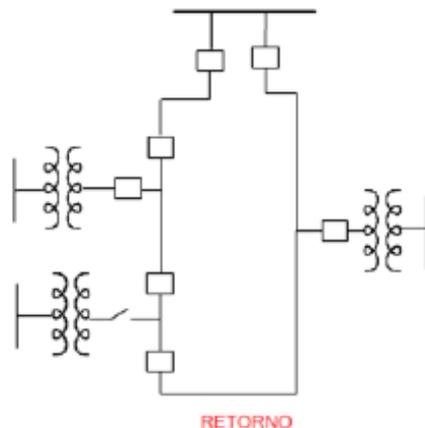


Figura 68 Sistema anillo

- Sistema red o malla: Una forma de subtransmisión en red o en malla provee una mayor confiabilidad en el servicio que las formas de distribución radial o en anillo ya que se le da alimentación al sistema desde dos plantas y le permite a la potencia alimentar de cualquier planta de poder a cualquier subestación de distribución.

Este sistema es utilizado donde la energía eléctrica tiene que estar presente sin interrupciones, debido a que una falta de continuidad en un periodo de tiempo prolongado tendría grandes consecuencias.

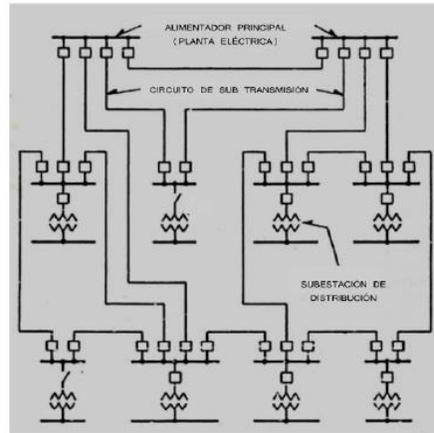


Figura 69 Sistema red o malla

#### 4.9.3.2. Conceptos sobre las cargas

La determinación de las cargas eléctricas es el punto de partida para la solución de problemas técnicos y económicos complejos, relacionados con el proyecto y ejecución de redes de distribución.

La electrificación puede atender en general los siguientes tipos de cargas:

- Residencial: urbana, suburbana y rural. La carga residencial tiene la menor densidad respecto a la carga comercial e industrial y decrece de la urbana a la rural, de tal forma que resulta poco económica la electrificación rural, aunque se justifica desde el punto de vista social.
- Carga comercial: áreas céntricas, centros y edificios comerciales. Las densidades de carga en estos casos son mayores.
- Carga industrial: La carga industrial en general puede tener grandes potencias y contratar el servicio en altas tensiones, como 115 kV o más.

En la actualidad gran parte de los usuarios industriales y comerciales instalan subestaciones eléctricas ya que requieren de la energía eléctrica para abaratar sus costos por el diferencial tarifario y costos menores en la instalación a tensiones mayores.

La distribución secundaria puede ser monofásica o trifásica. En áreas rurales y residenciales la mayoría es carga monofásica, en tanto que las cargas industriales y comerciales son normalmente trifásicas. La distribución monofásica puede ser de 120/240 V, tres fases. La alimentación trifásica es generalmente de 120/208 V, cuatro hilos en estrella.

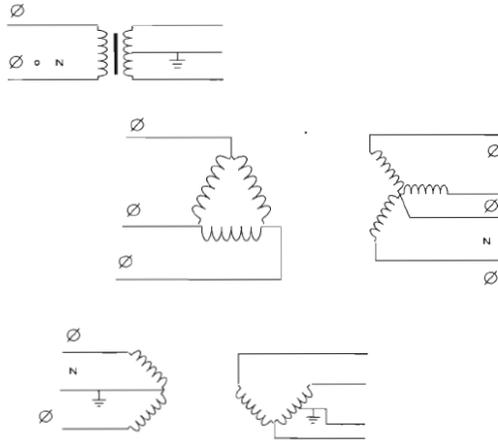


Figura 70 Conexiones de los transformadores de distribución

#### 4.9.3.3. Factor de potencia

El factor de potencia se define como el coseno del ángulo entre la potencia activa P y la potencia aparente S.

$$FP = \cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

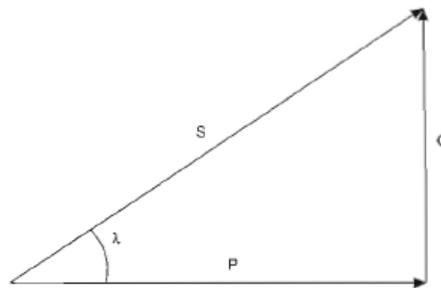


Figura 71 Triángulo de potencias

Esta relación da la definición del factor de potencia como la parte de la potencia aparente que se gasta en realizar trabajo útil. La potencia reactiva se utiliza en la formación del campo magnético en las máquinas eléctricas. En los sistemas de distribución, los principales consumidores de energía reactiva son los motores de inducción, los transformadores y los hornos de inducción.

Para las redes en donde la forma de onda del voltaje y de la corriente es sinusoidal, los valores de las potencias P y Q se determinan sin ningún problema; sin embargo, cuando se tienen grandes cantidades de armónicas es difícil calcular dichas potencias.

El factor de potencia debe ser lo más alto posible (cercano a 1), un factor de potencia bajo, acarrea las siguientes desventajas:

- Aumenta las pérdidas de energía activa, las cuales son proporcionales al cuadrado de la corriente.
- Aumenta la caída de tensión en alimentadores y líneas.
- El uso de la capacidad de las instalaciones se reduce, con lo que se aumentan los costos por depreciación.

#### 4.9.3.4. Impacto ambiental y social

Los principales impactos ambientales en proyectos de transmisión energética están asociados al cambio de paisaje y en algunas ocasiones uso de suelo, dependiendo de las condiciones iniciales del territorio.

El Proyecto de transmisión de energía eléctrica beneficia al país en general y al municipio en particular, de la siguiente manera:

- Disminución de apagones o suspensiones de servicio que pueden generarse por las fallas del sistema eléctrico nacional.
- Aumento en la calidad del servicio de energía eléctrica en la región.
- Un servicio más seguro y confiable de energía eléctrica.
- Aseguramiento del servicio de electricidad, y apoyar el crecimiento económico de la región.
- Inversión social en los municipios y veredas, que será definidas.
- Contratación de mano de obra local no calificada para la construcción.
- Incremento y preservación de áreas de interés ambiental para la región mediante actividades de compensación, restauración y conservación de bosques y flora durante la operación del proyecto

Una política de sostenibilidad de un proyecto de transmisión y distribución eléctrica debe buscar el bienestar de las comunidades, la minimización del impacto ambiental, y la generación de valor compartido en los territorios en donde hacemos presencia, todo esto enmarcado en el respeto de los derechos humanos y en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

#### 4.9.3.5. Distribución para microrredes

Las microrredes comprenden sistemas de distribución en media o baja tensión junto con fuentes de generación distribuida, así como dispositivos de almacenamiento en su caso. La microrred puede ser operada tanto en modo no autónomo como autónomo, mediante su propio sistema de gestión energética.

Las microrredes se componen básicamente de los siguientes elementos:

- Una red de distribución en baja tensión en la que se conectan una serie de fuentes de energía distribuidas para proporcionar electricidad y calor a un conjunto de consumidores
- Una infraestructura de comunicación local
- Un sistema jerárquico de control y gestión
- Sistemas de almacenamiento de energía
- Controladores inteligentes para cargas y consumos

Las diferentes fuentes que componen una microrred deben estar lo más cerca posible del consumidor. En estos procesos el consumidor se convierte en autogenerador de energía, pudiendo el mismo estar o no conectado a la red eléctrica convencional de media tensión o baja tensión, que en muchos de los casos dependiendo de la regulación de cada país se puede verter a la red de distribución los excedentes de energía generadas por estas fuentes.

Dentro de las fuentes de energía convencionales están la cogeneración, turbinas de gas, motores de combustión interna, microturbinas. Y dentro de las energías renovables se recalca las tecnologías minihidráulica, fotovoltaica, eólica, biomasa, geotérmica y marinas.

Los generadores de la microrred suelen tener una respuesta lenta, caso por ejemplo de las microturbinas y pilas de combustible, del orden de decenas de segundos, lo que puede ocasionar problemas de seguimiento de la demanda de la microrred y provocar por tanto problemas de estabilidad al no mantenerse la frecuencia dentro de los márgenes de seguridad establecidos.

Las microrredes cuentan con la capacidad de autoabastecerse y, además de operar de forma aislada cuando sea necesario, pueden contribuir a la operación confiable de las redes generales de distribución. La administración o gestión de la energía es indispensable en una microrred para que opere de manera confiable y eficiente.

#### 4.9.3.5.1. Alojamiento de la generación distribuida en las redes generales de distribución

El objetivo principal del programa de ampliación y modernización de las redes generales de distribución es abastecer de energía eléctrica a los usuarios finales, bajo los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad, a precios competitivos, considerando además la apertura y acceso abierto y no indebidamente discriminatorio para la integración, gradual y ordenada de la generación distribuida.

En la ampliación y modernización de las redes generales de distribución requeridas para llevar a cabo la interconexión de centrales de generación distribuida, se toman en cuenta los siguientes aspectos técnicos:

- Límites térmicos en transformadores y conductores;
- Calidad de la energía;
- Ajustes de los sistemas de protección y control, y
- Confiabilidad y seguridad del sistema.

CFE Distribución en el 2017 instrumentó las metodologías y procedimientos para evaluar la cantidad de recursos energéticos distribuidos, que podrían alojarse en cada circuito eléctrico de media tensión, sin exceder los límites establecidos para los parámetros de confiabilidad y calidad de la potencia eléctrica y pérdidas, creando una plataforma informática en materia de generación distribuida en la cual se puede dar seguimiento a solicitudes de interconexión, consultar las estadísticas de la integración de generación distribuida en las redes de media tensión y la disponibilidad que aún tienen, en función de la ubicación en donde se pretenda instalar una planta de generación, sin incrementar las pérdidas de energía y cumpliendo con los parámetros de confiabilidad y calidad.

En la LIE se plantea como premisa fundamental que el despliegue de la red eléctrica inteligente deberá de contribuir a mejorar la eficiencia, confiabilidad, calidad y seguridad del SEN con la incorporación de tecnologías avanzadas de medición, monitoreo, comunicación y operación, entre otras y permitir la integración de las fuentes de energías limpias y renovables.

#### 4.9.3.5.2. Modos de operación

Respecto a los modos de operación, la microrred puede operar interconectada a la red eléctrica general, a través de uno o varios PCC (point of Common Coupling) o bien puede operar de forma aislada. Los sistemas de control, por lo tanto, buscan mantener niveles de tensión y frecuencia con pocas desviaciones de los puntos de referencia. La seguridad es un aspecto clave, ya que en estos sistemas se define una

barra de referencia, pero al ser un sistema relativamente débil es proclive a que contingencias graves afecten seriamente la estabilidad y la continuidad de servicio.

- Conectado a la red: la microrred procura abastecer la mayor cantidad de la demanda, gestionar la carga/descarga de los sistemas de almacenamiento, de manera que la red funcione como un “slack” (nodo de balance), absorbiendo o entregando las diferencias de energía. Además, el punto de conexión provee una referencia de tensión y frecuencia que ayuda a mantener estos parámetros también en la microrred. Cuando la microrred trabaja conectada a la red de distribución, el sistema de control tiene como objetivo la disminución de coste de la energía para los consumidores que están asociados a ella.

En las microrredes conectadas a red, los valores de referencia de tensión y frecuencia vienen fijados por la red principal, por lo tanto, la prioridad será el control del reparto de la potencia activa y reactiva. El control puede utilizarse para variar la potencia entregada por los inversores en función de la frecuencia y el voltaje, así como controlar el flujo de potencia a través del punto de conexión con la red.

También habrá que determinar los momentos en los que será necesario el intercambio de energía con la red de distribución, ya sea para asegurar el suministro en caso de fallo de la generación disponible o para vender energía a la red en caso de excedentes en la generación.

- Desconectado de la red: esta capacidad de operación de forma aislada y autónoma repercute favorablemente en la calidad y fiabilidad de suministro eléctrico. Este modo será activado cuando:
  - La red brinda suministro con baja calidad de la energía, es decir, alguno de los parámetros del sistema no cumple con las expectativas de las cargas.
  - Como respuesta a los precios de la energía.
  - Durante momentos de estrés del sistema, esto incluye horas pico, estado de alerta de la red, emergencia o recuperación del SEN.

Las microrredes que se aíslan de la red deben continuamente buscar el balance entre la generación y la demanda, por ello la gestión activa de la demanda es un punto muy importante en la operación desconectada sobre todo si la capacidad de almacenamiento o la energía disponible de las fuentes no gestionables no es notablemente grande. En modo aislado no está fijado el valor de tensión y frecuencia por la red principal, por lo que deben ser generados en la propia microrred; normalmente los generadores convencionales o las baterías son los encargados de conformar la red, funcionando como fuentes de tensión.

En cuanto a las estrategias de despacho, dado el caso que la demanda en la microrred sea menor que la generación, el control central debe reducir la potencia generada de las fuentes de generación enviando señales a los controles locales o permitir la carga de las baterías. Si por el contrario la potencia demandada supera la potencia generada, debe ser activado un sistema de deslastre de carga (para cargas no críticas) o ingresar unidades de almacenamiento de energía.

## 5. Principales impactos de las microrredes en los sistemas energéticos

### 5.1. Trilema energético

Uno de los principales estudios del WEC (Consejo Mundial de la Energía), conocido como “Trilema energético”. El Trilema abarca el reto de los gobiernos de garantizar un suministro energético competitivo, proporcionando a su vez el acceso universal a la energía y promoviendo la protección ambiental. El Trilema abarca 3 aspectos fundamentales de la energía:

- Seguridad energética: entendida como gestión eficaz del suministro de energía a partir de fuentes nacionales y externas, fiabilidad de las infraestructuras energéticas y capacidad de las empresas de energía para satisfacer la demanda actual y futura.
- Equidad social: que se refiere a la accesibilidad y asequibilidad del suministro de energía para toda la población;
- Mitigación del impacto ambiental: eficiencia y ahorro energético (tanto desde el punto de vista del suministro como del de la demanda) y desarrollo de oferta de energía renovable y de otras fuentes bajas en carbono.

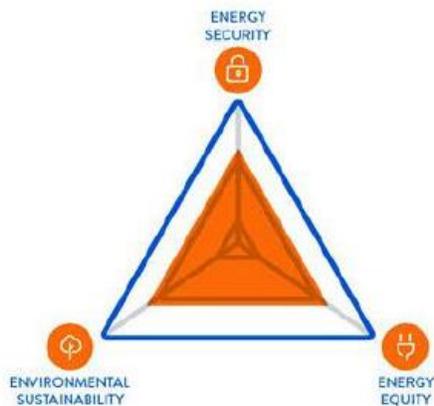


Figura 72 Trilema energético

Existen dos ámbitos clave de impulso para resolver el trilema: el político o regulatorio, y el de la innovación. Los tomadores de decisiones deben ser capaces de equilibrar la necesidad de proporcionar a los mercados decisiones estables con la flexibilidad para adaptarse y cambiar las políticas que se demuestre que no están dando los resultados esperados. Respecto al impulso de la innovación, una vez que se cuenta con un marco normativo estable y transparente, también se dibujan como factores esenciales disponer de medios de financiación, infraestructura, e I+D+i adecuados, así como una sólida protección de los derechos de propiedad intelectual. No existe un instrumento único que puede impulsar el logro de los objetivos del trilema, se evidencia la necesidad de una visión a largo plazo de los programas e instrumentos adecuados, un abanico energético diversificado, que incluya todas las energías, nuevas y convencionales, ambas producidas de modo sostenible y un mayor desarrollo en la generación de energía baja en carbono son elementos indispensables del equilibrio del trilema.

### 5.2. Dimensiones de la sustentabilidad

En el año 2002 la Cumbre Mundial de Desarrollo Sustentable, marca una nueva expansión de una definición estándar con la utilización de los tres pilares del desarrollo sustentable: económico, social y ambiental. La declaración de Johannesburgo creó “una responsabilidad compartida de promover y

fortalecer de manera independiente y mutua el desarrollo sustentable, que implica, desarrollo económico, desarrollo social y protección ambiental a nivel mundial, nacional, regional y local”.

La literatura ha intentado hacer operativo este planteamiento mediante tres enfoques principales:

1. La sustentabilidad es considerada como el mantenimiento del abastecimiento capital. Existen cinco tipos de capital sustentable de donde se obtienen los bienes y servicios necesarios para mejorar la calidad de vida. (capital humano, capital social, capital natural, capital financiero y capital artificial).
2. El enfoque del triángulo que considera la interrelación entre las dimensiones de la sustentabilidad. El mantenimiento de los stocks antes mencionados puede ser entendidos dentro del triángulo de la sustentabilidad.
3. Balance de materiales. Tiene relación con el flujo total de materiales y energía que ocurre en un sistema industrial, desde su extracción hasta su reintegración a los ciclos biogeoquímicos de los elementos naturales.

La dimensión ambiental, apunta a reducir la contaminación local, explotación de recursos naturales en el territorio y conservación de la resiliencia, integridad y estabilidad del ecosistema. La dimensión económica, apunta a mejorar el ingreso per cápita regional, mejorar el estándar de vida de la población local, reducir la dependencia energética y aumentar la diversificación de fuentes energéticas. Finalmente, la dimensión social, se relaciona con obtener sustentabilidad de los sistemas sociales y culturales, que incluya el logro de paz y cohesión social, estabilidad, participación social, respeto por la identidad cultural y desarrollo institucional, reducción del desempleo y aumento en la calidad laboral, aumentar la cohesión regional y reducir los niveles de pobreza.

Para la segunda mitad del propio siglo XX, los sistemas centralizados de generación, transporte y distribución de la electricidad se reafirmaron como un paradigma técnico capaces de garantizar y extender el servicio eléctrico interno de los países, y traspasar las fronteras nacionales; pero las sucesivas crisis energéticas y ambientales motivadas por la sobreexplotación de los recursos naturales ha puesto en entredicho la capacidad de la actual matriz energética para continuar sosteniendo las condiciones actuales del desarrollo económico y social de la humanidad. Las microrredes pueden conectarse con la red de alimentación principal y en muchos casos, donde exista algún tipo de riesgo, pueden funcionar de forma autónoma si se aíslan de la red.

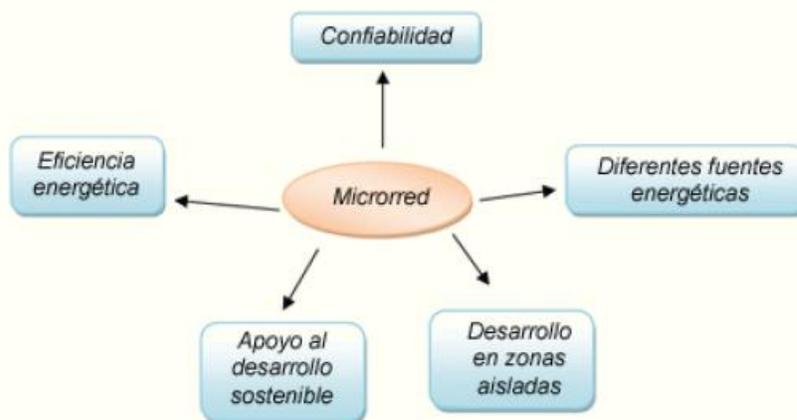


Figura 73 Aportes de las microrredes en caso de riesgos

Una microrred es capaz de suministrar electricidad desde los proveedores a los consumidores, ayudando a ahorrar energía, reducir costes, incrementar la usabilidad y transparencia de la gestión, propiciando el uso de la energía de manera eficiente y la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, y con ello disminuir los efectos del cambio climático. Se necesita una infraestructura eléctrica inteligente para reducir las pérdidas aprovechando las redes de generación y distribución actuales. Paralelamente será necesario asumir un marco regulatorio que propicie el ordenamiento de las relaciones sociales derivadas del nuevo esquema energético y su control, con la intención de reducir el consumo de los combustibles fósiles y lograr una adecuada gestión ambiental.

<b>Indicadores de sostenibilidad de sistemas energéticos</b>		
<b>Energética</b>	Consumo de Energía Primaria per cápita [Toe(p.e.) per cápita]	
	Índice de penetración de EERR [%]	
	Eficiencia energética [%]	
<b>Medioambiental</b>	Huella ecológica [m <sup>2</sup> ]	
	Emisiones GEI per cápita [T. CO <sub>2</sub> eq./cápita]	
	Emisiones GEI per PIB [T. CO <sub>2</sub> eq./cápita]	
	Emisiones de CO <sub>2</sub> por unidad de energía útil [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	
	Emisiones de NO <sub>x</sub> por unidad de energía útil [kgNO <sub>x</sub> /kWh]	
	Emisiones de SO <sub>2</sub> por unidad de energía útil [kgSO <sub>2</sub> /kWh]	
	Indicador de generación de residuos intensivo [kg/kWh]	
	Eficiencia exergética (%)	
	EROI “Energy Return On Energy Investment” [%]	
	EPBT “Energy Payback Time” [años]	
	Energy Internal Rate of Return [%]	
	ASOCIADOS AL AIRE	
	Emisiones de CO <sub>2</sub> al año [kgCO <sub>2</sub> /año]	
	Emisiones de partículas al año [kg/año o kg/obra]	
	ASOCIADOS AL AGUA	
	Calidad del agua [Cumplimiento de la normativa para vida acuática y uso agrícola]	
	ASOCIADOS AL SUELO	
	Geología y morfología [Estabilidad en taludes y túnel]	
	Susceptibilidad de erosión [m <sup>2</sup> y grados de erosión]	
	Inestabilidad del relieve [m <sup>2</sup> ]	
	Disposición de residuos [kg/obra o kg/año]	
	ASOCIADOS A LA FAUNA	
	Fauna terrestre [Densidad de población]	
	Fauna acuática [Densidad de población]	
	Ruidos y vibraciones [Intensidad y población]	
	ASOCIADOS A LA FLORA	
	Capacidad de renegación de la vegetación terrestre [Densidad de población]	
	Vegetación acuática [Densidad de población]	
	ASOCIADOS AL PAISAJE	
	Paisaje [Variabilidad escénica]	
	<b>Económica</b>	Coste de producción energética [\$/kWh]
Inversión por unidad de potencia instalada [\$/kW]		
VAN [\$]		
TIR [%]		
LCOE “Levelized Cost of Energy Cost” LEC “Levelized Energy Cost” [\$/kWh]		

<b>Social</b>	Ratio empleo generado [%]
	Variación de la población [Densidad]
	Uso de suelo [m <sup>2</sup> /uso de suelo]
	Servicios de urbanización [Cantidad y calidad]
<b>Rentabilidad</b>	VAN – Valor Actual Neto
	TIR – Tasa Interna de Rentabilidad
	PR – Período de Retorno

Tabla 13 Indicadores de sostenibilidad de sistemas energéticos

### 5.3. Ambientales

El medioambiente, se refiere principalmente a un sistema conformado por elementos sociales, físicos, culturales, económicos, ecológicos, que se encuentran en permanente interacción entre ellos. Para darle operatividad a este concepto debe ser concretado en un conjunto de variables, que se les denomina factores ambientales, es decir, son aquellos que permiten transmitir información sobre el estado del ecosistema que forma parte:

- Ser humano, fauna y flora
- Suelo, agua, aire, clima y paisaje
- Bienes materiales y patrimonio cultural
- La interacción entre los factores antes mencionados.

Un problema ambiental puede considerarse como la apreciación de un estado no satisfactorio del medioambiente, que puede ser una parte o la totalidad de éste. A nivel latinoamericano surgen una serie de problemas comunes de sostenibilidad ambiental, entre ellos se encuentra: pérdida de la biodiversidad, contaminación de la aguas y borde costero, degradación de los suelos y deforestación, contaminación atmosférica en las principales ciudades y la ocurrencia frecuente de desastres naturales.

El origen de un impacto ambiental surge en momento que se desarrolla un proyecto. Las actividades de este generan modificaciones ambientales que finalmente se traducen en efectos ambientales. A su vez, cuando se incorpora la valoración subjetiva de la calidad de vida humana y con ello la calidad ambiental, se habla de impacto ambiental.

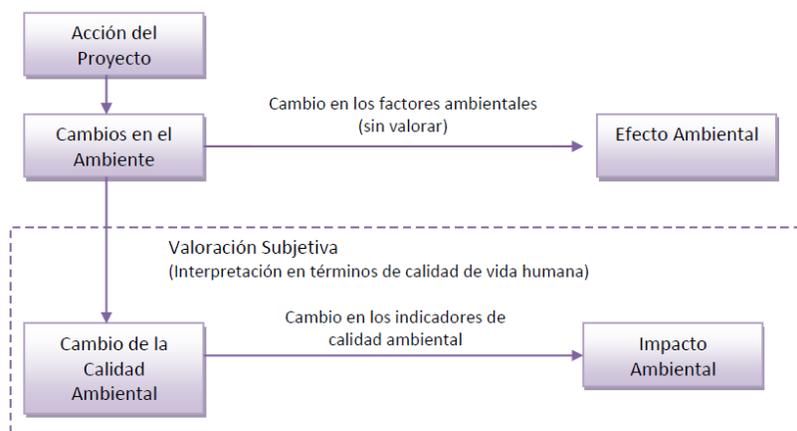


Figura 74 Impacto ambiental proveniente del cambio de la valoración del medio ambiente

### 5.3.1. Impactos de las centrales de generación

- Centrales térmicas:  
Emisiones de dióxido de carbono que contribuyen al efecto invernadero, emisión de dióxido de azufre (que se transforma en ácido sulfúrico que forma parte de la lluvia ácida), emisiones de óxidos de nitrógeno (también forman parte de la lluvia ácida), emisión de hollín y material particulado
- Centrales hidroeléctricas  
Sobre los impactos ambientales que genera la construcción de una planta hidroeléctrica se han desarrollado varios estudios que determinan la afectación que se genera a diversos recursos naturales.

Los ecosistemas terrestres y acuáticos que presentan inundaciones por la construcción y puesta en marcha de proyectos hidroeléctricos presentan cambios en su estructura y funcionalidad, en ese sentido la ejecución de estos proyectos se asocia al cambio y la disminución de servicios ecosistémicos, deforestación, alteración del ciclo hidrológico y modificación y pérdida de hábitats.

La construcción de proyectos hidroeléctricos supone la alteración de los caudales de los ríos. La alteración de los ciclos naturales de un río puede representar la vulneración de derechos colectivos.

- Centrales eólicas  
Emisión de ruidos lo que produce contaminación auditiva, pueden ser visualmente molestas para las personas que viven cerca de ellas. En algunos casos, por el tamaño y localización de los predios en donde deben ubicarse, pueden afectar el hábitat provocando daños a la fauna y flora silvestre.
- Centrales fotovoltaicas  
En donde es posible producirla, la energía solar generalmente es completamente amistosa con el medioambiente, aunque produce efectos ambientales en la producción de los elementos que permiten recogerla y procesarla. La fabricación de células solares provoca la liberación de contaminantes al ambiente, así como las emisiones asociadas con la energía necesaria para instalarlas.
- Centrales geotérmicas  
Puesto que la energía eléctrica se obtiene de la energía geotérmica, el exceso es lanzado bien al aire o al agua, lo que, en cualquier caso, puede interferir con los ecosistemas locales. Las plantas geotérmicas también pueden emitir sales sulfuro de hidrógeno, o radón transportado a la superficie por la corriente geotérmica.

### 5.3.2. Rol de las microrredes

En el aspecto ambiental, el uso de microrredes especialmente con energías renovables contribuye a la mitigación de efectos causados por las emisiones de gases de efecto invernadero que causan el cambio climático, además de una disminución de la concentración de partículas tóxicas en el aire, suelo y agua.

Las microrredes son una solución natural para contrarrestar el impacto ambiental del uso de alta energía. Estos sistemas reducen eficazmente la huella de carbono de un centro de datos al utilizar una o más fuentes de energía locales, más ecológicas y renovables, como energía solar, gas natural, microturbinas, baterías y pilas de combustible de hidrógeno. Sin embargo, esto no considera la huella de carbono de las tecnologías, lo que implica un análisis del ciclo de vida de cada uno de los componentes vinculados al sistema, así como los procesos contaminantes para la elaboración de dichos equipos eléctricos o electrónicos.

Se enfatiza el rol de las microrredes en caso de riesgos naturales al funcionar como respaldo en caso de una falla en el sistema central, mostrando las ventajas que estas le confieren al sistema eléctrico de potencia; además la utilización de las microrredes es una forma de elevar la eficacia del servicio eléctrico,

#### 5.4. Económicos

Financieramente, las soluciones energéticas inteligentes como las microrredes a menudo equivalen a ahorros a largo plazo. Si bien la instalación de microrredes y la generación de energía distribuida cuestan dinero, se puede compensar esos costos con la reducción drástica en los recibos del servicio eléctrico, llegando a alcanzar tiempos de recuperación menores a 5 años para los sistemas interconectados. Además, la Agencia Internacional de Energía Renovable informa que los precios de la generación de energía renovable continúan cayendo.

La penetración actual de los sistemas de generación renovable en la red eléctrica, especialmente con los desarrollos obtenidos para la energía eólica y fotovoltaica, comienza a ocasionar impactos en la red eléctrica, como pueden ser la variación de la magnitud del voltaje de suministro y el incremento del desbalance entre la potencia activa y reactiva entre las fuentes de generación. La falta de gestionabilidad dificulta la competitividad económica de las energías renovables en el mercado energético, por lo cual las microrredes pueden fungir como una posible alternativa al mejorar la gestionabilidad y aumentar la penetración de las energías renovables.

En el aspecto económico, el crecimiento de las energías renovables contribuye positivamente al Producto Interno Bruto (PIB) y a las contribuciones al Estado, aumenta la inversión en investigación, desarrollo e innovación(I+D+i), evita importaciones energéticas y aumenta las exportaciones. Un mayor ahorro económico se obtiene considerando los beneficios de una menor afectación a la salud y a la reducción de emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Sin embargo, no todo es positivo. Existen, por una parte, barreras para el desarrollo de las energías renovables y en especial de las microrredes, como son la falta de una cultura de transición y aprovechamiento, la falta de metodologías para la administración de riesgos, la creación de modelos para promover la inversión, y la falta de estructuras de financiamiento, legales e institucionales que promuevan las microrredes. Además, en México existe una alta dependencia de tecnologías de energías de importación y por tanto costosas.

Se requiere por tanto una metodología que evalúe integralmente el crecimiento de las microrredes, que provea un mayor conocimiento de las variables que las afectan, y que dé mayor certidumbre a la comunidad, a los inversionistas, a los gobiernos y a la academia para generar las plataformas tecnológicas que contribuyan principalmente a reducir la desigualdad social y a la mejora del medio ambiente.

## 5.5. Sociales

Cabe destacar, que la componente social resulta fundamental en el éxito de los proyectos de microrredes, por lo tanto, es muy importante considerar la realidad local antes de realizar cualquier intervención, integrando a la comunidad en la toma de decisiones y considerando su opinión, ya que, son ellos quienes conocen y aprecian su territorio. Es decir, intervenir, sin generar transformaciones territoriales, sociales, económicas y ambientales que haga que el proyecto se convierta en un elemento negativo para la comunidad. Sociedades injustas y desiguales que enfrentan crisis económicas y ecológicas en curso, destruyen factores de cohesión social e incrementan los males públicos; existiendo una fuerte correlación entre desigualdad y problemas sociales y de salud, así como entre desigualdad y confianza mutua, participación comunitaria y niveles de violencia.

Este tipo de proyecto tiene la capacidad de adaptarse a diferentes realidades y generar beneficios a nivel local y nacional, esto debido a que la Generación Distribuida no se restringe a un tipo de energía particular, permitiendo su desarrollo a lo largo del país y que, además, entrega la posibilidad de descentralizar la energía.

En el aspecto social, se pueden mencionar beneficios como: creación de empleos regionales; acceso a un mejor nivel de vida en áreas remotas, a través de electricidad o de contar con estufas y calentadores solares o a partir de biogás; una mejor salud debido a una menor contaminación; y superación técnica o profesional, por el grado de especialización necesario para instalar o producir energías renovables, lo que implica un mejor salario.

Al mejorar el servicio de electricidad se pueden desarrollar ideas como fomentar el turismo, desarrollar artesanía, potenciar los centros de madres, entre otros, de esta manera, el proyecto da la posibilidad de mejorar la calidad de vida. La participación de la comunidad ha sido reconocida como una potente herramienta para el mantenimiento y operación de sistemas que sirven a sus propias poblaciones. Por otro lado, actualmente es posible combinar diferentes tecnologías de generación eléctrica uniendo las tradicionales con fuentes de energía renovables.

Lo antes mencionado, tiene directa relación con la definición de sustentabilidad planteada por el Instituto Internacional de Medioambiente y Desarrollo (IIED), donde la plataforma de solución son las comunidades, que, potenciando su rol de actores relevantes junto con su conocimiento ambiental, permite generar desarrollo local. La población tiene un rol activo, ya que, es el principal agente dinamizador del territorio.

### 5.5.1. Impacto social, factor clave para las microrredes

Si bien, por décadas, México ha desarrollado una gran experiencia en la explotación de los recursos naturales renovables del subsuelo mediante la tecnología geotérmica, las leyes que regulaban las condiciones de expropiación de terrenos ejidales, estaban supeditadas por el bienestar del país y una vinculación de compromiso de pago de indemnización, tal como lo expresaba el artículo 343 de la Ley Federal de Reforma Agraria, que permitía fundamentar peticiones de expropiación en la causa de utilidad pública prevista en el artículo 112 fracciones I, IV y IX del mismo Ordenamiento, así como en el artículo 3.º de la Ley de la Industria Eléctrica.

Un claro ejemplo de las acciones que han creado el descontento de las comunidades principalmente en el sureste del país y que han sido evidenciados en diferentes documentos y medios de información pública son:

- Negociación previa con las comunidades por empresas que han tenido acceso a información privilegiada, por montos y condiciones acorde a un uso de tierra para uso agrícola.
- Posterior venta de proyectos a terceras empresas que dejan grandes ganancias para el negociador inicial, pasando de una forma ilegal el uso de suelo a un régimen de explotación industrial y comercial.
- Amaño en la elaboración de contratos, con información sesgada, que no cumplen con las disposiciones oficiales de protección de tierras comunales ni la de consulta previa a las comunidades cuando se trata de enajenar sus tierras o transmitir derechos sobre ellas, con un mínimo de participación de la población.
- Pérdida irreparable de vegetación reduciéndose el hábitat para todo tipo de fauna.
- Falta de generación de empleos suficientes, estables y permanentes en su fase operativa.
- Además de una pobre remuneración ofrecida por las empresas por la reserva territorial.

En la actualidad las comunidades afectadas y gracias al acceso a diferentes medios de información, son comunidades más informadas y conscientes de lo que representa aprobar proyectos de inversión de capital, prueba de ello son las diferentes solicitudes y denuncias ante organismos nacionales e internacionales donde se menciona:

- El modo de operación de las empresas transnacionales con base en engaños, corrupción e impunidad.
- Derecho a la consulta y al consentimiento libre, previo e informado.
- Pérdida de la visión cultural, tradicional y espiritual de los recursos naturales, a la visión empresarial, donde estos solo son una fuente de riqueza.
- Fondos de organismos internacionales que se otorgan a empresas por concepto de Certificados de reducción de Emisiones de Carbono y que no representan ningún beneficio para las comunidades.
- La ruta del flujo de capital de inversión.

Tales problemáticas, que han sido detectadas por la Secretaría de Energía inicialmente en diferentes comunidades del estado de Oaxaca, corren el riesgo de que se propaguen a otros sitios en donde existen potenciales por explotar de recursos geotérmicos, solares, biomasa, entre otros, o en donde temas como la falta de agua, esclavitud moderna o la falta de salarios dignos sean los detonantes para la expresión de la inconformidad ante la situación económica del país.

Es así como derivado de diferentes protestas sociales, el requerimiento de la industria privada de tener seguridad jurídica en sus inversiones y previendo la replicación de abusos por el control de zonas geográficas donde las energías renovables presentan condiciones favorables para su explotación, la nueva Ley de la Industria Eléctrica (LIE2014), en el Capítulo II del Título Cuarto, Artículos 117 al 120, establece:

*Los proyectos de infraestructura de los sectores público y privado en la industria eléctrica deberán atender los principios de sostenibilidad y respeto de los derechos humanos de las comunidades y pueblos de las regiones en los que se pretendan desarrollar, así como la obligación de llevar a cabo estudios de impacto social y la consulta previa, libre e informada a las comunidades indígenas.*

La implantación de las microrredes exigiría un cambio social al hacer al consumidor un agente activo en la producción de energía. Las comunidades que viven en zonas aisladas muchas veces no cuentan con proyectos de electrificación debido a los altos costos y dificultades técnicas que éstos implicarían. Los proyectos de electrificación que se han desarrollado en estas zonas son en su mayoría vinculados a una sola fuente de energía (por ejemplo: diésel, hidro o solar). El hecho de que permitan la electrificación de comunidades en vías de desarrollo implica una alta componente humanitaria. Por otro lado, no debe olvidarse que existen zonas rurales aisladas en las que la implantación de las microrredes ayudaría a evitar el despoblamiento rural, así como ayudar a proyectos de conservación y evitar la centralización de bienes y servicios.

#### 5.5.2. Violaciones a derechos humanos por proyectos de energías renovables en México

Las respuestas al cambio climático, incluyendo las acciones de mitigación y adaptación, no deben violentar el disfrute de los derechos humanos, como ha sido el caso de algunos proyectos de energía renovable en México, sobre todo en áreas rurales o aisladas donde viven comunidades indígenas o campesinas, produciendo diversas violaciones a sus derechos humanos y causando conflictos socioambientales, agravados entre otras cosas por los siguientes factores:

- Despojo de tierra y territorio. La propiedad social, colectiva y comunal de la tierra (ejidos y comunidades, asiento territorial de poblaciones indígenas) legalmente asignada en el país, corresponde al 51.7% de la superficie nacional; la pequeña propiedad cuenta con el 38.2% y la propiedad pública con el 10.1%. Se ofrecen contratos injustos por la renta de la tierra, resultado de procesos de negociación inequitativos, reflejando incluso desigualdad en los beneficios obtenidos al interior de la comunidad, lo que a su vez puede generar tensiones sociales.
- Impactos sociales y culturales. Varios proyectos en México han resultado en polarización social. En otras ocasiones, la intervención de las empresas en las comunidades ha alterado los usos y costumbres.
- Falta de acceso a información completa, fidedigna, oportuna y culturalmente adecuada sobre el proyecto y sus posibles impactos económicos, sociales, ambientales y culturales en las comunidades y el medio ambiente.
- Falta de consulta libre, previa e informada y consentimiento: El actuar administrativo del Estado mexicano otorga permisos y concesiones para el desarrollo de grandes proyectos energéticos sin garantizar su obligación de consultar a las comunidades indígenas de acuerdo con lo señalado en acuerdos internacionales en la materia.
- Ausencia de beneficios amplios para la comunidad. En muchas ocasiones, los proyectos carecen de planes integrales de desarrollo social, por lo que suelen generar beneficios únicamente para una pequeña fracción de personas. Así, los beneficios del proyecto no se ven reflejados en el desarrollo de la comunidad, en ocasiones ni siquiera en el acceso a energía.
- Ataques contra defensoras y defensores de derechos humanos. En varios proyectos, los defensores comunitarios que buscan la defensa de sus derechos humanos frente al proyecto energético, así como los periodistas, han sufrido ataques, amenazas, hostigamientos,

criminalización y hasta asesinato y en algunas ocasiones, el propio Estado hace uso de la fuerza pública para reprimir la oposición al proyecto.

### 5.5.3. Propuestas para evitar nuevos conflictos sociales

Las propuestas de solución al surgimiento de posibles conflictos sociales deberán agotar toda posibilidad de que los actores involucrados participen en la elaboración de políticas públicas para realmente poder hacer un diálogo en términos de equidad. Tal participación podría reducir los costos de implementación al permitir que las posibles dificultades puedan ser identificadas y mitigadas previamente.

Para México esto debería significar centrarse en programas de desarrollo socioeconómico para el beneficio de las comunidades como la, implementación de programas de capacitación y de actividades productivas, que permitan a sus habitantes alcanzar condiciones de vida digna, y con conocimientos adecuados para tomar decisiones consensuadas, siendo actores de proyectos tecnológicos, como las microrredes. Incluso explorar fuentes de financiamiento comunitario, para desarrollar proyectos de micro generación con energías renovables convirtiéndose en co-proveedores de servicios energéticos desde su hogar bajo diferentes esquemas de participación en la instalación y operación de tecnologías de generación. A nivel mundial, el papel de las cooperativas ha jugado una función de suma importancia para crear la aceptación pública de energías renovables, al incentivar la discusión local en términos de planeación e implementación.

Resulta necesario asegurarse que las acciones de mitigación y adaptación al cambio climático implementadas por el Estado mismo o a través de algún tercero no violen los derechos humanos de los pueblos y comunidades. Se hacen las siguientes recomendaciones:

- Implementar proyectos de energía renovable con los menores impactos posibles en el medio ambiente y en la sociedad. Promover proyectos a pequeña escala, como la generación distribuida.
- Adoptar las medidas legislativas, de política pública y judiciales apropiadas para proteger y respetar los derechos humanos de las personas afectadas.
- Identificar y evaluar, con los más altos estándares científicos, los impactos acumulados, tanto ambientales, sociales y culturales.
- Garantizar el acceso a la información veraz, fidedigna, oportuna y completa sobre el proyecto y sus posibles impactos, con el fin de permitir una toma de decisiones informada.
- Garantizar la participación adecuada y eficaz con mecanismos que tengan en cuenta los usos y costumbres de la población afectada.
- Cuando el proyecto afecte a territorio indígena, llevar a cabo la previa consulta de conformidad con los estándares internacionales de derechos humanos (Convenio 169 de la OIT).
- Realizar la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y la Evaluación de Impacto Social (EIS) de manera previa al otorgamiento de las concesiones, para poder garantizar los derechos humanos de la población afectada.
- Procurar el reparto de beneficios a la comunidad por parte del Estado y los promoventes, incluyendo la creación de empleos, el acceso preferente a energía y el apoyo a proyectos comunitarios.
- Generar y poner en práctica indicadores para verificar el cumplimiento de las mejores condiciones ambientales y sociales.
- Promover la cooperación entre los promoventes, la comunidad, los gobiernos locales y el Estado.
- Establecer mecanismos permanentes de diálogo y solución de controversias entre las partes.

- Garantizar el acceso a la justicia y reconocer la importancia y el papel de las y los defensores de derechos humanos.

## 5.6. Relación de las microrredes en México con el Sistema Eléctrico Nacional

La red eléctrica general conecta nuestros hogares, negocios y otros edificios con las grandes centrales generadoras de energía. Gracias a esa red, la energía eléctrica llega desde donde se produce hasta donde la necesitamos, y al encender nuestros aparatos, estos funcionan.

El actual sistema de energía eléctrica presenta una serie de problemas entre los que cabe mencionar que: su arquitectura centralizada relega conceptos de eficiencia, sostenibilidad y flexibilidad; este hace uso de tecnologías que fueron concebidas antes de la mitad del siglo pasado; presenta altas emisiones de gases contaminantes; los actuales marcos comerciales y de regulación heterogéneos no se ajustan a este modelo convencional. En este sentido, la generación a pequeña escala, en particular el concepto de generación distribuida a través de recursos energéticos distribuidos y especialmente fuentes distribuidas de energías alternativas, ha tenido una amplia acogida dentro de las soluciones que se plantean.

México en el mediano plazo requerirá de aumentar la diversificación de su matriz de generación eléctrica para hacer frente a compromisos de carácter internacional de mitigación del cambio climático y a nivel local para alcanzar la sostenibilidad del sector eléctrico. La falta de estudios previos de impacto social y de condiciones de progreso para las comunidades originarias, han ocasionado barreras locales para nuevos proyectos de instalación de tecnología basada en renovables, con el riesgo de extrapolarse a nivel nacional.

México a nivel mundial es un país privilegiado al contar, en diferentes regiones del país, con sitios geográficos donde el potencial de recursos renovables para la generación eléctrica presenta condiciones óptimas para la instalación de diferentes tecnologías (aerogeneradores, granjas solares fotovoltaicas, solar térmica, geotermia, pequeñas hidroeléctricas, etc.). La concepción de la red eléctrica en unidades más pequeñas de gestión donde el almacenamiento de energía compense tanto las fluctuaciones de generación renovable como la aleatoriedad del comportamiento de los consumidores aparece como una nueva solución estructural.

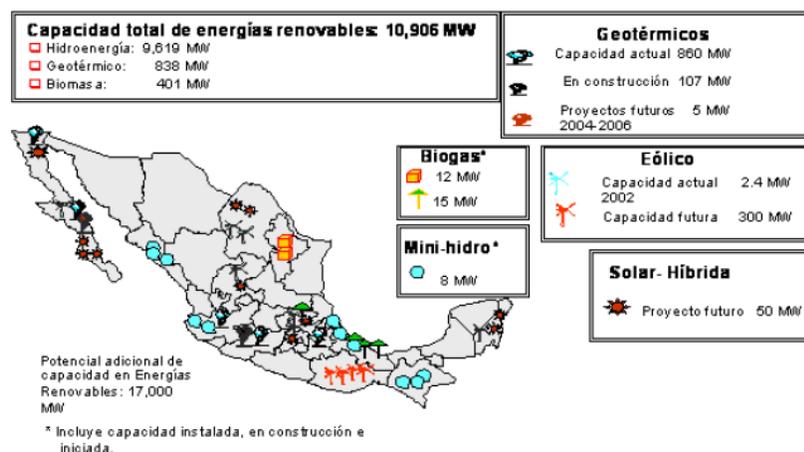


Figura 75 Distribución de fuentes de energía renovables en México

El concepto de las microrredes se entiende como cualquier conjunto de cargas y generadores que operen como un sistema único controlable que puede proporcionar tanto energía eléctrica como térmica o

combustible a cierta zona, este concepto puede permitir la integración masiva de la generación distribuida (especialmente la renovable), ya que los problemas pueden resolverse de forma descentralizada. Además, se aumenta la fiabilidad a nivel local de la microrred, se permite una mejor calidad de suministro también se abre la posibilidad de que la microrred acceda al mercado eléctrico como un agente más. También pueden reducir costes o aprovechar una fuente de energía local que sea demasiado pequeña para la red general. Esto permite un mejor aprovechamiento y también que, en muchos casos, haya un menor impacto ambiental

Si se habla de una microrred con almacenamiento, esta ofrece la oportunidad de decidir la operación óptima, se pueden gestionar los momentos óptimos para intercambiar energía con la red externa. La posibilidad de disponer de un sistema híbrido con diversas tecnologías resulta de gran interés. La utilización de hidrógeno como medio de almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable se basa en la posibilidad de producir este hidrogeno mediante electrolisis, almacenarlo en diferentes formas (baja o alta presión, hidruros metálicos, etc.), y posteriormente utilizarlo para generar nuevamente energía eléctrica.

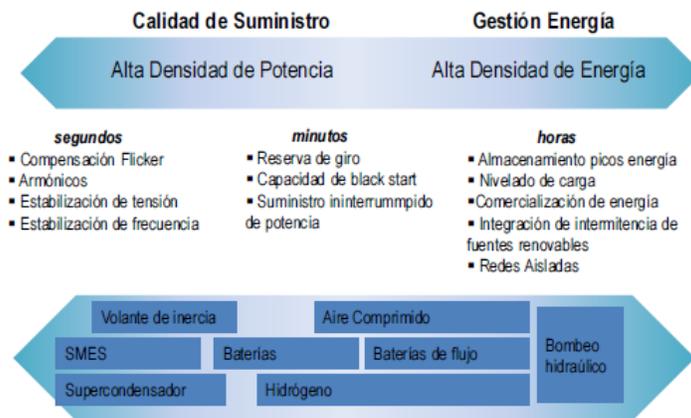


Figura 76 Sistemas de almacenamiento de energía según la relación densidad de potencia/densidad de energía

Otra tendencia básica de las microrredes es que sean inteligentes. Igual que muchos aparatos de nuestra casa empiezan a serlo, y funcionan de manera autónoma y óptima. Las microrredes introducen un número de retos operacionales que deben tenerse en cuenta en el diseño de sus sistemas de control y protección. Las principales funciones que se le pueden solicitar al sistema de control en la microrred son:

- Control de las corrientes y tensiones, siguiendo las referencias y amortiguando apropiadamente las oscilaciones.
- Regulación de frecuencia y tensión tanto en modo aislado como conectado a red.
- Balance de potencia, mientras se mantienen la frecuencia y la tensión en límites aceptables.
- Mecanismos de gestión de la demanda (Demand Side Management, DSM).
- Transición suave entre los modos de operación.
- Resincronización con la red principal.
- Despacho económico, repartiendo la carga entre los distintos generadores y sistemas de almacenamiento de forma que se reduzca el coste de operación, siempre manteniendo la fiabilidad.
- Gestión los flujos de potencia entre la microrred y la red principal y en su caso con otras microrredes

En países como Alemania sobresale la descentralización en la generación, mayor relocalización y regionalización de la actividad económica, un cambio democrático en el control de los recursos y una ruptura en la forma en que la electricidad se ha generado durante el último siglo, donde el mundo se hace más pequeño mientras más conectado y manejable y por lo tanto de alguna manera más grande al mismo tiempo.

Para realmente conocer el potencial de las microrredes en el SEN de México, se necesitan estudios de ordenación territorial de potenciales renovables, para conocer los potenciales renovables y determinar las áreas con condiciones para realizar inversiones en sistemas conectados a red, determinando la eficiencia en el uso de las líneas eléctricas para cada tipo de energía, esta investigación permitiría hacer un análisis para los sistemas interconectados y aislados con microrredes en energía solar, eólica, biomasa e hídrica.

En adición, las microrredes de generación-distribución no conectadas al SEN han sido utilizadas durante muchos años en todo el mundo para prestar el servicio en zonas donde la demanda total no justifica económicamente la extensión de la red eléctrica nacional, pero la concentración de viviendas y otros inmuebles hace viable la opción de suministro por redes, con generación local. Este modelo permitiría reducir la carga sobre el SEN y mejorar las condiciones eléctricas de una zona remota.

Segmentos	Clientes típicos	Factores principales				
		Sociales	Económicos	Medioambientales	Operativos	
		Acceso a la electricidad	Ahorro de combustible y de costos	Reducción de la huella de CO <sub>2</sub> y contaminación	Independencia del combustible	Suministro ininterrumpido
Compañías suministradoras de la isla	Compañía eléctrica (local), PIE*		✓	✓	✓	(✓)
Comunidades remotas	Compañía eléctrica (local), PIE, Institución pública de desarrollo, Banco de desarrollo	✓	✓		✓	
Industrial y comercial	Compañía minera, PIE, Compañía de petróleo y gas, Centro de datos, Hoteles y Centros Turísticos, Alimentación y Bebidas			(✓)	✓	✓
Defensa	Instituciones públicas de defensa		(✓)	(✓)	✓	✓
Comunidades urbanas	Compañía suministradora (local), PIE			(✓)		✓
Instituciones y Universidades	Instituciones educativas privadas, PIE, Instituciones educativas públicas		(✓)	✓		(✓)

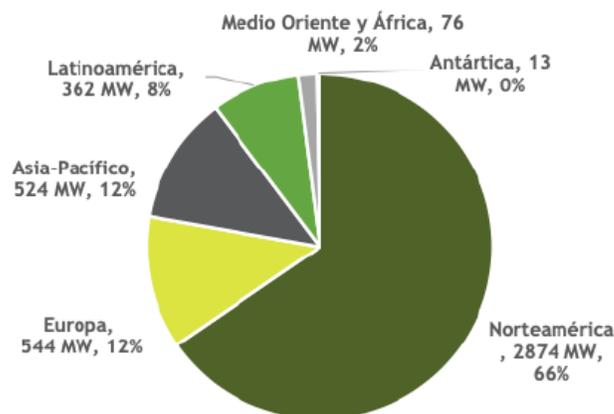
\*PIE: Productor independiente de electricidad      ✓ Factor Principal      (✓) Factor Secundario

Tabla 14 Segmentos de microrredes y factores principales que cubren una diversidad de aplicaciones

## 5.7. Casos de estudio

### 5.7.1. Internacionales

En el mercado global algunos países tienen diversos factores a considerar a la hora de implementar microrredes. Por ejemplo, Estados Unidos para el diseño de las microrredes tienen criterios relacionado con los costos y la confiabilidad de este, debido a poca confiabilidad de su red de distribución convencional. En los países de Europa, existen diversos proyectos bajo los criterios de costos y reducción de emisiones. A su vez, Japón lo concibe bajo el marco de la reducción de emisiones y diversificación de la energía.



Gráfica 12 Capacidad de energía instalada de microrredes en el mundo

### Caso No. 1 Programa de electrificación Rural con Energías Renovables, Chiquitania Bolivia

El Programa de electrificación rural con energías renovables, aprobado en el 2013, fue financiado con recursos del Fondo Nórdico para el Desarrollo (NDF por sus siglas en inglés), administrados por el BID ( Banco Interamericano de Desarrollo), y tuvo entre sus objetivos brindar acceso a energía eléctrica y mejorar la calidad de vida de hogares en zonas rurales de alta dispersión. Este programa incluyó entre sus componentes el financiamiento de proyectos de electrificación, a través de sistemas fotovoltaicos, componente que fue implementado entre 2017 y 2018, beneficiando a 1,566 familias en nueve municipios del departamento de Santa Cruz, específicamente en la demarcación geográfica de la Chiquitania boliviana.

Gracias a los sistemas fotovoltaicos, los pobladores de los nueve municipios de la Chiquitania redujeron en un 10% el uso diario de linternas a pilas, mecheros y lámparas a gas. En este sentido, el estudio muestra que el proyecto habría logrado reducir en 90% el uso de esta fuente de iluminación. Por otro lado, los resultados indican que el proyecto consiguió reducir el gasto mensual en energía en aproximadamente Bs.20.8 (US\$3 aproximadamente) al mes, debido a la caída en el consumo de velas y baterías. Este ahorro representa un 21% del gasto total en este rubro y es mayor al costo de operación, mantenimiento y reposición del sistema fotovoltaico, lo que hace que el proyecto tenga un beneficio social financieramente sostenible.

### Caso No. 2. ESUSCON Huatacondo.

El proyecto ESUSCON en Huatacondo, Chile, corresponde a una microrred inteligente basada en energías renovables y que considera la participación de la comunidad en el uso eficiente de la energía y la operación del sistema. Huatacondo es un pueblo aislado con una población entre 80-500 habitantes. Hasta la fecha se ha logrado una penetración cercana al 75% de energía en base a recursos renovables en Huatacondo, lo que permite afirmar que la comunidad de Huatacondo posee una red eléctrica propia, aislada de la red tradicional.

El proyecto consistió en construir una microrred basada en los recursos renovables particulares de la zona, junto a generador diésel existente, y ofrecer suministro eléctrico las 24 horas del día. Además, en vista de los problemas que tenían con el sistema de abastecimiento de agua, se incluyó un componente para administrar este recurso. Este proyecto concibe su proceso desde la planeación y diseño, evaluación

de los recursos energéticos existentes en la zona a implementar, diseño de la microrred, pruebas piloto e intervención social.

Cuando el sistema tenía 1 año de operación, se realizó un estudio de percepción sobre su impacto a nivel de la comunidad, y se encuestó a un 95 % de los hogares. Los principales resultados indican, en general, que el sistema tiene gran aceptación dentro de la comunidad. A continuación, se revisan los aspectos más relevantes:

1. Impactos sobre la comunidad: 73 % de la gente opina que el proyecto tiene un efecto positivo en su vida diaria, ya que pueden realizar más actividades recreativas y económicas que requieren electricidad; un 20 % considera que trae efectos neutros y el 7 % cree que podría tener efectos negativos en la comunidad.
2. Impactos sobre el medio físico y el paisaje: 57.5 % de la población considera que la microrred no tiene ningún efecto sobre la fauna; mientras que el 42.5 % expresó su preocupación por las posibles colisiones de las aves, como los cóndores que vuelan cerca al generador eólico.
3. Impactos en las actividades productivas: La mayoría de la gente dice que ahora es posible llevar a cabo nuevas actividades económicas o mejorar las existentes. En concreto, el 27 % cree que el proyecto es beneficioso para el desarrollo del turismo y los servicios asociados; el 23 % dijo que va a beneficiar a la agricultura a través de la tecnología de riego; el 18 % sugirió que el proyecto beneficiaría a las actividades de construcción.

Finalmente, algunos resultados que ha conseguido la microrred, en comparación con el esquema anterior son los siguientes:

- El consumo de diésel ha disminuido, reduciéndolo en un 50 %.
- Los niveles de confiabilidad aumentaron.
- Los niveles de calidad de energía aumentaron.

### **Caso No. 3. Fort Carson, Colorado.**

Fort Carson es una instalación del ejército de los Estados Unidos de aproximadamente 550 km<sup>2</sup> ubicada cerca de Colorado Springs, con una población de aproximadamente 15 000 habitantes. La microrred diseñada dentro del programa “Demostración de Infraestructura Inteligente de Potencia para la Fiabilidad y Seguridad Energética” (SPIDERS, por sus siglas en inglés). Su diseño se centró en un conjunto de 7 edificios al interior de un área densamente desarrollada.

Para el Departamento de Energía de Estados Unidos, el programa SPIDERS aborda 4 requisitos críticos necesarios para demostrar una mayor garantía de energía eléctrica:

1. Proteger los activos críticos durante la posible pérdida de energía debido a múltiples factores, por ejemplo, un ataque cibernético.
2. Integrar conceptos de generación de energía renovable y otros que están distribuidos para potenciar tareas críticas en tiempos de emergencia.
3. Sostener operaciones críticas durante apagones prolongados.
4. Administrar la energía eléctrica desde la instalación y su eficiencia de consumo para reducir la demanda de petróleo.

#### Caso No. 4. Sendai, Japón.

Esta microrred, es quizás la más conocida en el planeta, debido a su éxito y rendimiento ante escenarios adversos. Se diseñó inicialmente en el año 2004, como un banco de pruebas para un proyecto de demostración de la Organización de Desarrollo de Nuevas Tecnologías Energética e Industrial (NEDO).

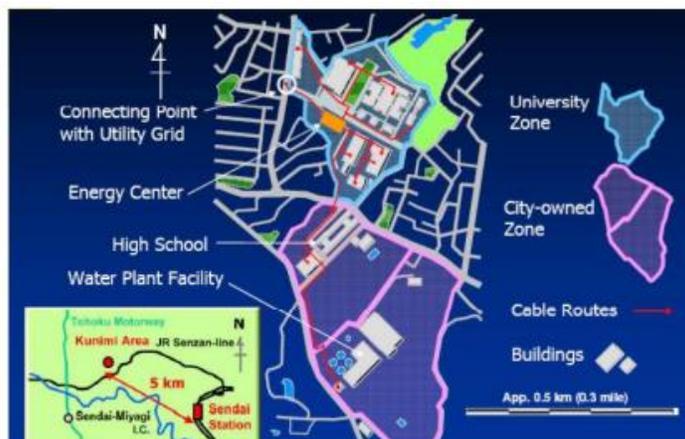


Figura 77 Plano de la microrred de Sendai

Se puede observar que la microrred dispone de puntos de conexión con la red principal, y engloba zonas de la universidad y de la ciudad de Sendai. El suministro de energía procede de dos turbinas de gas de 350 kW de potencia, 50 kW de paneles solares y baterías de almacenamiento.

La microrred en mención suministra energía a las instalaciones de la Universidad Tohoku Fukushi, durante el devastador terremoto del Gran Este de Japón del 11 de marzo de 2011, golpeó el distrito de Tohoku, causando daños catastróficos en el sistema de suministro de energía del distrito durante varios días. A pesar de los escenarios considerados críticos, la microrred en Sendai continuó suministrando energía y calor a los usuarios demostrando efectividad y resiliencia durante 3 días de apagón que afectó a toda la región.

#### Caso No. 5. Kodiak, Alaska.

La microrred de la isla de Kodiak, frente a la costa de Alaska. Esta isla, que cuenta con 15 mil habitantes y no dispone de conexión a una red externa, cubre prácticamente todas sus necesidades eléctricas a partir de fuentes renovables. Obtiene prácticamente el total de sus 28 MW de capacidad a partir de energía hidráulica y eólica, la empresa suiza ABB instaló aquí una tecnología de volante de inercia integrado con dos sistemas de baterías de 1,5 MW. Esto, a su vez, permite la integración de más energía renovable generada en un parque eólico ampliado en su microrred eléctrica y soluciona los problemas de estabilidad de la potencia.

#### Caso No. 6 stoRE

Proyectos que integren baterías existen muchos, pero en términos de innovación se están realizando avances muy interesantes. Se resalta el trabajo realizado por el Departamento de Integración en Red de Energías Renovables (IRE), del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER - España), ya que disponen de una microrred de 100 kW que incluye generación convencional y renovable, así como

diversos sistemas de almacenamiento de energía. Su proyecto más importante en cuestión de almacenamiento de energía se llama stoRE.

El proyecto stoRE trata de facilitar la continuación y logro de los ambiciosos objetivos sobre energías renovables, a partir de desbloquear el potencial de infraestructura de almacenamiento de energía. El almacenamiento de energía, como refuerzo de la red y la gestión de la demanda, además permite la penetración de altos porcentajes de energía renovable intermitente equilibrando la generación y la demanda, y mejorando al mismo tiempo la calidad de la energía.

### 5.7.2. Nacionales

Actualmente en México existen múltiples proyectos enfocados en el aprovechamiento de las energías renovables de manera distribuida, además se busca que esta energía sea utilizada para mejorar la calidad de vida de las personas en el sitio del proyecto. En coordinación con el gobierno se ha logrado dar financiamiento a varias de estas iniciativas, las cuales se presentan a continuación como un ejemplo de la amplitud del campo de aplicación y de las ventajas que representa apostarle a este tipo de proyectos, que resuelven problemáticas inalcanzables para los esquemas convencionales.

El proyecto “Implementación de un sistema eléctrico renovable y sustentable en Punta Allen, reserva de la biosfera de Sian Ka’an, Quintana Roo” presentado por la organización Amigos de Sian Ka’an, le fueron asignados 26.7 millones de pesos. Se tiene como objetivo dotar de energía eléctrica fotovoltaica a la comunidad de Punta Allen, de forma que sus habitantes cuenten con electrificación las 24 horas del día, atendiendo las necesidades de la comunidad.

El proyecto “Jardín solar fotovoltaico de 0.48 MW en la U.T.M. interconectado a red eléctrica de CFE”, fue planteado por el Instituto Tecnológico Mixteco, asignándose para su operación 21.6 millones de pesos para proveer la energía eléctrica necesaria para el auto consumo de la Universidad a través de energía solar.

El proyecto “Ilumínate, Sol para todos”, fue presentado por la Asociación Mexicana de Energía Solar, a la cual se autorizó 1 millón de pesos para brindar una solución de electrificación rural básica a familias que incluya iluminación y recarga de aparatos.

Es importante resaltar la existencia del Proyecto de Eficiencia y Sustentabilidad Energética en Municipios, Escuelas y Hospitales (PRESEMEH), al cual el Comité Técnico otorgó 32 millones de pesos, ya que es un mecanismo para aplicar los modelos de generación distribuida en espacios públicos, llevando los beneficios a un mayor número de personas.

Aunque este último proyecto no busque por sí mismo la aplicación de las microrredes, El “Piloto del Programa Bono Solar” expuesto por la Iniciativa Climática de México, al cual el Comité Técnico otorgó 15 millones de pesos, busca evaluar los impactos técnicos, sociales y ambientales de la implementación de medidas de eficiencia energética y techos solares en viviendas de usuarios residenciales subsidiados y bajo condiciones de alta penetración de sistemas de generación distribuida fotovoltaica.

## 6. Tendencias y prospectivas del uso de las microrredes en los sistemas energéticos

### 6.1. Prospectivas a nivel mundial a mediano y largo plazo

#### 6.1.1. Tendencias generales

De acuerdo a Navigant Research (Global clean technology markets consulter), que ha seguido el despliegue de microrredes desde 2011, Estados Unidos ha sido el líder histórico en capacidad desplegada; sin embargo, actualmente los EE. UU. y Asia tienen aproximadamente la misma capacidad de operación, en desarrollo y microrredes propuestas, cada una con el 42% del mercado, Europa sigue con el 11%, América Latina con el 4% y Oriente Medio y África tienen actualmente solo un 1% de participación. La capacidad total fue de aproximadamente 1,4 GW en 2015 y se espera que crezca a aproximadamente 5,7 GW (considerada una estimación conservadora) y 8,7 GW (en un escenario "agresivo") para 2024.

El desarrollo de microrredes necesita políticas gubernamentales activas en diferentes niveles, financiación y proyectos de demostración para mostrar la viabilidad tecnológica y económica, investigación avanzada sobre tecnologías de recursos energéticos distribuidos, control y herramientas de software.

Los beneficios sociales y económicos de las microrredes deben definirse con precisión al establecer proyectos de investigación y demostración. Es importante que estos beneficios hagan que los proyectos de microrredes sean económicamente viables y faciliten la operación del sistema a largo plazo. En adición, es importante evitar un enfoque tecnológico puro para los proyectos, aunque las tecnologías son elementos centrales de un sistema de microrredes.

Technology	PV	SHP	Wind Onshore	Wind Offshore	Solar Thermal	Biomass	Geothermal
Type of fuel	Solar	Water	Wind	Wind	Solar	Biomass	Earth
Capacity (MW)	<0.001-5	0.05-1	0.5-6+	5-10+	0.001-2	0.001-5	0.5-3+
Development status	Developed/Commercial	Developing/Commercial	Commercial	Developing/Commercial	Developing/Commercial/Demo	Developing	Developing/Commercial/Demo
Economic status	Expensive	Moderate	Moderate	Expensive	Moderate	Moderate	Expensive
Environmental impact	Friendly	Friendly	Friendly	Friendly	Friendly	Friendly	Friendly
Social motivation	High	High	High	High	High	Moderate	Medium
Actual deployment	Small, rapidly increasing	Medium	Medium	Small, rapidly increasing	Small, rapidly increasing	Small, rapidly increasing	High
Industrial application	Usable	Suggested	Suggested	Not suggested	Not suggested	Suggested	Not suggested
Commercial application	Suggested	Usable	Usable	Not suggested	Not suggested	Suggested	Not suggested
Household application	Perfectly matched the requirements of the sector	Not suggested	Not suggested	Not suggested	Not suggested	Suggested	Not suggested
Capital cost (€/kW)	4000-8000	1400-5000	800-2000	1200-3000	1500-2000	800-4000	
Installation cost (€/kW)	40-150	100-200	100-200	600-800	100-200	200-400	
Cost of energy (€/kWh)	20-40	6-14	6-10	8-15	-	-	-
Lifespan (yrs)	20-30	60	20	20	20	20-30	20
Possibility of CHP	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes

Tabla 15 Resumen de tecnologías renovables para microrredes

Según el reciente informe “Tendencias del futuro de la energía distribuida: reflexiones detrás de un crecimiento empresarial sostenible”, elaborado durante 2019, 87% de 1,573 entrevistados de diversos países, incluido México, permitiría que otras organizaciones empresariales utilicen conjuntamente sus activos de energía.

Se predice que las organizaciones que tendrán mayor crecimiento, en los próximos 5 años, son las que están llevando a cabo la digitalización de forma más dinámica. El 55% está pensando en cómo el aumento del uso de la automatización en sus procesos afectará a la energía y cómo pueden construir un sistema energético flexible”. Así, 59% de los encuestados coincidió en que las fábricas y los lugares de trabajo serán las plantas de energía en el futuro.

De acuerdo al reporte de la IRENA, Roadmap for a Renewable Energy Future 2016, algunos avances relacionados con las microrredes, serían: En 2014, la capacidad total instalada de almacenamiento de baterías alcanzó más de 800 megawatts (MW) en todo el mundo, China, Alemania, Japón y Estados Unidos lideran la I + D, mientras que India, Italia y la República de Corea lideran la implementación. De 50 a 250 GW de generadores diésel en microrredes podrían hibridarse con energías renovables, 12 GW de los cuales se encuentran en islas. La capacidad global total de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) (<10 MW en las estadísticas de IRENA) ascendió a 133 GW en 2014, complementada con 0,7 GW de pequeñas turbinas eólicas.

### 6.1.2. Mercado de las microrredes

Numerosos avances tecnológicos, como la introducción de estrategias de control y despacho, la mejora en la gestión de carga están contribuyendo al crecimiento del mercado. Se prevé que otros factores importantes, incluida la creciente utilización de microrredes en proyectos de electrificación, sistemas de generación más localizados y distribuidos, impulsarán el mercado.

Según el último informe de IMARC Group, titulado "Mercado de microrredes: tendencias globales de la industria, participación, tamaño, crecimiento, oportunidad y pronóstico para 2021-2026", el tamaño del mercado global de microrredes alcanzó los 24,2 mil millones de dólares en 2020. De cara al futuro, el mercado se proyecta que el valor alcance los US \$ 43,7 mil millones para 2026, expandiéndose a una tasa compuesta anual del 10,1% .

#### 6.1.2.1. Estructura del mercado

El mercado de Microrred se divide en los siguientes segmentos: Remoto (54%), Comercial / Industrial (5%), Comunidades no gubernamentales (13%), Distribución de Servicios Públicos (13%), Institucional / Campus (9%) y Militar (6%) .

El proyecto de la UE “Más microrredes” presentó cuatro escenarios diferentes de propiedad de recursos de microrredes, que incluyen:

- Propiedad del operador del sistema de distribución, donde el operador es propietario del sistema de distribución y es responsable de las ventas minoristas de electricidad al cliente final;
- Propiedad del consumidor final o incluso de un consorcio de prosumidores (entidades que importan y exportan electricidad);
- Propiedad de un productor de energía independiente; o,
- Propiedad de un proveedor de energía en un acuerdo de libre mercado.

Según Navigant Research, la mayoría de las microrredes conectadas a la red hoy en día son propiedad y están financiadas por sus propietarios, especialmente en la categoría de campus/institucional. Es importante reconocer que las microrredes, especialmente las microrredes comunitarias, pueden utilizar la infraestructura del sistema de distribución existente, reduciendo radicalmente sus costos.

Algunos investigadores proponen que cada microrred, en una futura red de múltiples microrredes, actúe como una planta de energía virtual que licita energía y servicios auxiliares al sistema eléctrico externo, basándose en la agregación de licitaciones de los recursos energéticos distribuidos en la microrred (cargas sensibles, microgeneradores, y dispositivos de almacenamiento).

Que las microrredes sigan siendo una aplicación de nicho o se vuelvan ubicuas depende de dos factores principales:

1. En qué medida se pueden superar con éxito los desafíos regulatorios y legales.
2. Si el valor que brindan a los propietarios y comunidades en términos de calidad y confiabilidad de la energía es suficiente.

Region	Autonomous Basic	Autonomous Full	Interconnected Community
Central America and the Caribbean	■	■	■
South America	■	■	■
Northern Africa	■	■	■
Sub-Saharan Africa	■ ■	■	■
Central and North Asia	■ ■	■	■
East and South Asia	■	■ ■ ■	■
Middle East	■	■	■
Oceania	■	■ ■	■

Tabla 16 Estatus del mercado de las microrredes

### 6.1.3. Almacenamiento

Los beneficios de los sistemas de almacenamiento de energía han sido verificados tanto por la teoría como por la práctica, sin embargo, todavía falta una forma efectiva de optimizar su configuración, especialmente para aplicaciones basadas en microrredes. Los temas clave pueden incluir: cómo organizar la ubicación y la capacidad del sistema, qué tipo de sistema es óptimo, cómo evaluar los impactos en la microrred, etc.

Los sistemas de almacenamiento de energía de nueva generación buscará una densidad de energía y una densidad de potencia aún más altas, una vida útil y un ciclo de vida más prolongados, un tiempo de ciclo de carga y descarga mucho menor, un funcionamiento más confiable y un menor costo, lo que será de gran ayuda en el futuro de las microrredes.

#### 6.1.3.1. Modelado, software y sistemas de almacenamiento inteligentes

Es fundamental desarrollar modelos que se puedan utilizar para realizar un análisis estratégico de los sistemas de almacenamiento para investigar los efectos y el valor del almacenamiento de energía para aplicaciones de red. Hasta ahora, existen modelos comerciales y no comerciales disponibles, algunos modelos típicos no comerciales incluyen: HOMER; ReEDS; NEMS; RETScreen y EnergyPlus. Los modelos comerciales incluyen: GE MAPS; Power World; Energy2020; IPM y Dynastore.

Las herramientas de simulación y modelado basadas en software contribuyen en gran medida a un análisis exitoso del rendimiento del sistema. Diferentes empresas u organizaciones proponen varios modelos de los sistemas de almacenamiento de energía, por ejemplo, Maxwell Technologies y Ansoft han desarrollado conjuntamente un modelo del supercondensador, EPRI ha financiado a Power Technologies International (PTI) para desarrollar SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) y modelos de baterías para PSS / E, y EPRI también ha producido un modelo a medida para evaluar el beneficio de emplear almacenamiento de energía llamado DYNATRAN (Análisis dinámico de sistemas interconectados con almacenamiento de energía).

Los sistemas de almacenamiento de energía inteligente será una plataforma unificada, además, se deberían incorporar interfaces de electrónica de potencia, sistemas de gestión de energía de alta eficiencia, sistemas de control, HMI (interfaz hombre-máquina) e interfaces de comunicación para la interconexión con controladores superiores. Con software y herramientas bien establecidos, el sistema de almacenamiento de energía inteligente se puede utilizar de manera flexible en la red inteligente del futuro como un equipo “plug & play” conectado a una computadora.

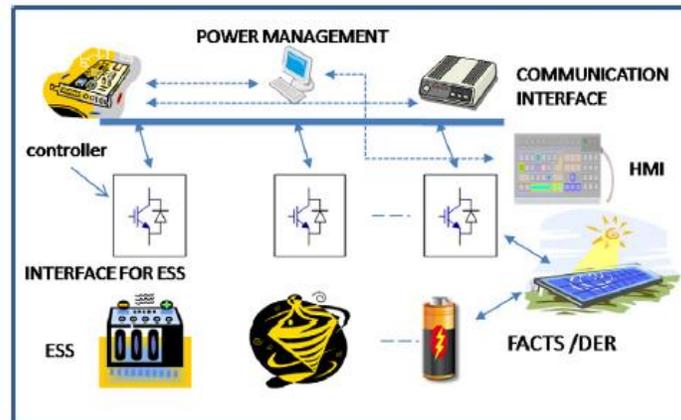


Figura 78 Configuración de un sistema de almacenamiento de energía inteligente

### 6.1.3.2. Nuevas tecnologías de almacenamiento de energía

En la actualidad, solo el 2.5% de la energía eléctrica total entregada en los Estados Unidos pasa por almacenamiento de energía, casi toda es almacenamiento de energía hidráulica por bombeo. Se espera que el almacenamiento de energía crezca de \$ 1.5 mil millones en 2010 a una industria de \$ 35 mil millones en 2020. La mayoría de los ESS son demasiado costosos, y el rendimiento del ESS no es lo suficientemente ideal para lograr un almacenamiento limpio, de larga duración y de buena economía. Algunos avances tecnológicos que se encuentran en desarrollo para mejorar ESS, son los siguientes:

- Plomo-ácido avanzado: ofrecen una gran oportunidad para un uso extensivo si su vida útil pudiera prolongarse significativamente. Al agregar hasta un 40% de carbón activado a la composición del electrodo negativo, aumentaría en gran medida la vida útil de la batería. Las estimaciones de una mejora de la vida útil, de hasta 2000 ciclos, representan una mejora de tres a cuatro veces con respecto a los diseños actuales.
- Supercondensadores CNT: los investigadores del MIT están utilizando nanotubos de carbono para aumentar la superficie del material de almacenamiento de energía del supercondensador. La energía específica esperada debe ser tan alta como una batería de Ni-Cd o Ni-MH (21.6 kJ/kg), con una potencia específica de más de 10 kW/kg. Este valor representa más del doble del valor típico de una batería.
- Tecnologías de vanguardia: también se están desarrollando varias tecnologías novedosas, como baterías de metal-aire, baterías de iones de Na, nuevos tipos de celdas de Na / S, nuevas químicas de iones de litio con mejores características de rendimiento y seguridad, baterías avanzadas de plomo-carbono, ultrabaterías que combinan una batería VRLA (Valve regulated lead-acid) con un condensador electroquímico, nuevos pares de baterías de flujo, nuevos tipos CAES (Compressed-air energy storage), incluidos los CAES sobre el suelo y los MiniCAES, etc.
- ESS híbrido: los ESS son diferentes en densidad de potencia, densidad de energía, tiempo de respuesta y costo; sin embargo, un ESS híbrido integraría la mayoría de las ventajas. Hay muchas

estructuras híbridas, como batería con EDLC (Electric double layer capacitor), FC ( Fibre channel) con batería o EDLC, CAES con batería o EDLC, batería con FESS (Flywheel energy storage systems) y batería con SMES. El principal problema radica en cómo configurar y controlar estos ESS, incluido el control de carga / descarga, la optimización del flujo de energía, etc.

Type	Efficiency (%)	Energy density (W h/kg)	Power density (W/kg)	Response time (ms)	Cycle life (time)	Cost (\$/kW h)
Battery	60-80	20-200	25-1000	30	200-2000	150-1300
SMES	95-98	30-100	1e4-1e5	5	1e6	High
Flywheel	95	5-50	1e3-5e3	5	>20,000	380-2500
SuperCap	95	<50	4000	5	>50,000	250-350
NaS	70	120	120	<100	2000	450

Tabla 17 Comparación de sistemas de almacenamiento de energía

### 6.1.3.3. Otras aplicaciones

- Sistema de distribución de CD: el suministro de CD muestra muchas ventajas, como una menor demanda de aislamiento, menor costo de línea, sin interrupciones con la iluminación y más fácil de usar. El bus de CD en una microrred con integración de un sistema de almacenamiento de energía puede suministrar un suministro de CD constante y de alta calidad.
- Vehículos eléctricos (EV): Las microrredes se verá afectado por una creciente penetración de vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) y EV, lo que representa una nueva dimensión para la gestión de microrredes y se presentarán grandes cantidades de almacenamiento de energía en la red.
- Hidrógeno verde: a medida que el hidrógeno verde se vuelve competitivo en costos en la década de 2030, la demanda de energía "indirecta" para la electrólisis representaría aproximadamente el 40 por ciento del crecimiento de la demanda de electricidad de 2035 a 2050, principalmente en la industria y el transporte. Las baterías juegan un papel importante, pero los picos de gas también siguen siendo relevantes para cubrir períodos más largos de baja producción de energías renovables.

### 6.1.4. Celdas de combustibles

El Departamento de Energía de los Estados Unidos proyecta que, si 10% de sus autos usaran celdas de combustible, se reduciría la importación de unos 800 mil barriles diarios de petróleo, alrededor de 13% de su importación total. Además, se reduciría un millón de toneladas al año de contaminantes, y 60 millones de toneladas de dióxido de carbono serían eliminados.

A la fecha, los costos de generación con esta tecnología están alrededor de los 1 500 dólares/kW, este valor tendrá una disminución a medida que los volúmenes de producción aumenten. Las diferentes tecnologías de estos dispositivos hacen que haya flexibilidad en el combustible a usarse, lo cual favorecería su pronto uso, por ejemplo, para transporte, los combustibles como metanol, etanol, etano, metano, incluyendo el uso de la propia gasolina (oxidación parcial), diésel y gas natural, son buenos candidatos.

Los envíos de pilas de combustible a nivel mundial fueron de aproximadamente 670 MW en 2017, frente a los 500 MW de 2016, y el mercado está creciendo. El mercado estacionario de celdas de combustible

crecerá un 18% sobre el año anterior para alcanzar más de 2.100 millones de dólares para finales de 2019 , según la firma de investigación Fact.MR. Technavio fija la tasa de crecimiento anual del mercado de celdas de combustible en casi un 28% hasta 2023.

Aunque la generación, almacenamiento y manejo de hidrogeno aún presentan retos, las celdas de combustible, se presentan como el medio para generar electricidad con cero emisiones contaminantes, y permiten tener una alternativa flexible que puede adecuarse nuestras necesidades energéticas a corto, mediano y largo plazo.

#### 6.1.5. Prospecciones

Los beneficios de las tecnologías de microrredes van más allá de las aplicaciones domésticas o industriales y pueden ayudar a empoderar a los usuarios y comunidades.

- El alumbrado público/comunitario impulsado por microrredes o los sistemas de iluminación independientes tienen el potencial de crear la oportunidad para actividades / negocios nocturnos dentro de las comunidades locales o remotas.
- Los sistemas de microrredes basados en recursos híbridos de energía renovable pueden ser una opción adecuada para enfriar y refrigerar/conservar alimentos utilizando refrigeradores energéticamente eficientes.
- Las microrredes solares térmicas y basadas en biomasa son una opción prometedora para generar calor para procesos agrícolas y hogares.
- Las microrredes solares fotovoltaicas tienen el potencial de crear oportunidades comerciales en las comunidades remotas, como estaciones de carga de teléfonos, cibercafés y centros informáticos.
- Las microrredes solares fotovoltaicas para bombeo de agua son una opción prometedora para fines de procesamiento agrícola y riego. Una máquina de bombeo de agua impulsada por biodiésel es una posible opción para fines futuros.
- Existen otras tecnologías como cocinas solares, secadores solares y cocinas de biogás, que también son opciones ecológicas para comunidades remotas.
- Debería investigarse más la estabilidad y el control de los sistemas de distribución con mayor penetración de Generación Distribuida, que pueden ser equivalentes a las microrredes conectadas a la red.
- Ship power system (SPS) es un sistema de energía operado en modo isla que proporciona un alto nivel de confiabilidad para sus cargas. Los conceptos de reconfiguración y autorreparación, que se introdujeron en SPS y se sugieren para las redes inteligentes, pueden ser buenas ideas para el funcionamiento seguro de las microrredes.
- Las tendencias actuales en la investigación de la resiliencia requieren que múltiples microrredes interactúen entre sí para mejorar la resiliencia general del sistema. Tal interacción a menudo requiere compensaciones entre beneficios económicos y desempeño resiliente.
- La microrred de CC se vuelve atractiva para entregar energía distribuida a los dispositivos de uso final de manera más eficiente. El interés emergente en las microrredes de CC requiere un nuevo conjunto de desarrollo sobre normas, seguridad y protección, y controles. Este tipo de “nanoredes” con red de comunicación hará que la microrred sea cada vez más inteligente.
- Los paradigmas de la arquitectura de redes se encontrarán como “superredes inteligentes” o “centrales eléctricas virtuales”. Las superredes inteligentes se basan en capacidades mejoradas de

detección, aislamiento y restauración de fallas. Las centrales eléctricas virtuales se basan en software y análisis para administrar recursos energéticos distribuidos ampliamente dispersos.

- La operación cooperativa entre la red de distribución y las microrredes puede garantizar los máximos beneficios económicos de todo el sistema. La operación descentralizada es esencial para el desarrollo en el futuro.
- Sensores y redes de sensores para la predicción de recursos renovables

## 6.2. Prospectivas a nivel nacional a mediano y largo plazo.

En México la integración de generación distribuida a las redes generales de distribución se ha mantenido en un crecimiento considerable, sin embargo, la integración de microrredes es todavía incipiente. Para el desarrollo de microrredes en México es necesario realizar su difusión como política pública a través de la Secretaría de Energía, ya que existen espacios en instituciones públicas, hospitales, escuelas, universidades, mercados y fraccionamientos para su desarrollo.

### 6.2.1. Escenario de transición energética

Los componentes esenciales de la reducción en la demanda de energía son:

- Aumento significativo de la eficiencia energética de equipos y sistemas nuevos.
- Incremento en los procesos de reciclado de industrias clave.
- Sustitución de equipos actualmente en operación por aquellos de alta eficiencia en los sectores industrial y comercial.
- Mayor uso del transporte público en los centros urbanos y reducción al máximo del uso del automóvil individual.
- Electrificación tanto como sea posible de los diferentes medios de transporte tanto públicos como privados.
- Por sectores, el mayor potencial de reducción en la demanda de energía se ubica en el sector transporte, mientras que en industria se estima en 41% y edificios en 35%.

La Ley de Transición Energética (LTE) tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica. Para ello, se establece la elaboración de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, publicada en febrero de 2020.

La Estrategia deberá contener:

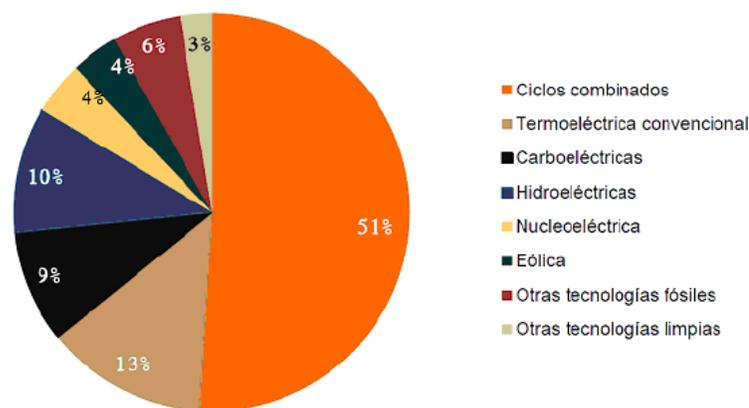
Un componente de planeación de largo plazo para un periodo de 30 años: en este componente se definen los escenarios propuestos para cumplir las metas de energías limpias y la meta de eficiencia energética, que deberá contener una prospectiva con un conjunto de análisis y estudios sobre las condiciones técnicas, científicas, tecnológicas, económicas, financieras, fiscales, ambientales y sociales futuras de la infraestructura de explotación, producción, transformación, transmisión, distribución y uso final de la energía.

Un componente de planeación de mediano plazo para un periodo de 15 años: en este componente se señalan las metas de energías limpias y eficiencia energética a 15 años, así como su grado de cumplimiento y se establece un diagnóstico del estado de la contaminación ambiental, la dependencia de las fuentes de energías fósiles, la evolución tecnológica en materia de generación eléctrica y reducción de costos.

La Estrategia constituye el instrumento rector, a partir del cual se elaborarán el Programa Especial de Transición Energética (PETE) y el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE), así como la Hoja de Ruta de Eficiencia Energética, el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) y los Programas de Ampliación y Modernización de la RNT (PAMRNT).

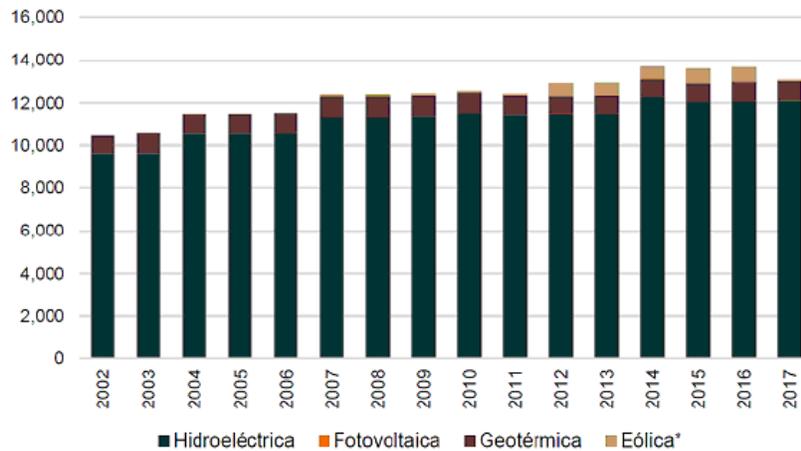
#### 6.2.1.1. Estado actual de la industria eléctrica y la generación mediante energías limpias

En los últimos diez años se ha observado un cambio en la matriz de generación eléctrica en México, transitando hacia el uso de combustibles más limpios y al fortalecimiento de la infraestructura del Sistema Eléctrico Nacional con la integración de nuevas y más eficientes tecnologías, como es el caso de ciclo combinado.



Gráfica 13 Distribución de la generación eléctrica por tipo de tecnología, 2018

En el caso específico de la capacidad instalada de generación con tecnologías limpias, durante el 2017, la energía hidroeléctrica tuvo la mayor participación con 65%, seguida de la eólica con 21.6%, geotermia con 4.8% y bagazo con 4.3%. La solar fotovoltaica y el biogás representan la menor participación con 3.5% y 0.9%, respectivamente. De acuerdo con el Sistema de Información Energética de la SENER, el promedio de la eficiencia de conversión fue 41.2% en 2017.



Gráfica 14 Capacidad instalada de energías renovables, 2002-2017 (MW)

### 6.2.1.2. Prospectiva y metas de mediano y largo plazo

Los escenarios y metas que se establecen en la Estrategia parten de manera fundamental de lo que fijan la LTE y la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), y se reflejan en una contribución de acuerdo con lo establecido en la Ley General de Cambio Climático (LGCC), y en instrumentos que de ellas derivan, tales como la Estrategia Nacional de Cambio Climático, el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional y la Contribución Nacionalmente Determinada de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

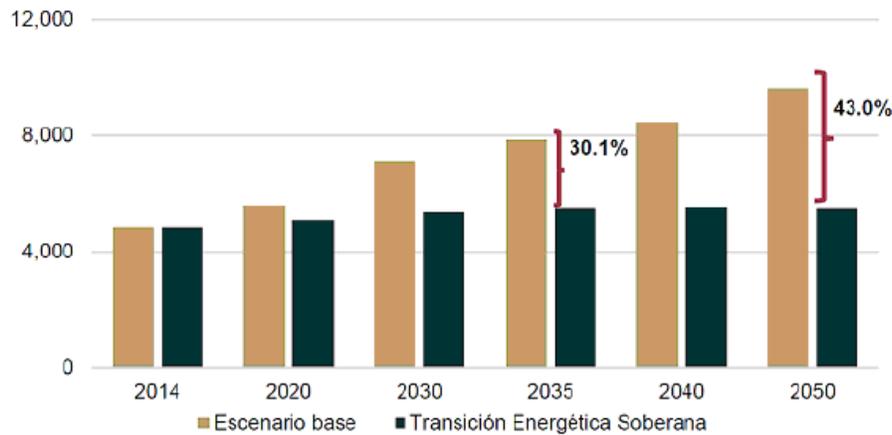
- Energías limpias: El artículo tercero transitorio de la LTE mandata a la SENER a fijar como meta una participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica del 25% para el 2018, del 30% para 2021 y del 35% para 2024.
- Eficiencia energética: La LTE establece que tendrán un carácter indicativo. Además, menciona que la SENER y la CONUEE, en el ámbito de sus competencias, deberán establecer una hoja de ruta para el cumplimiento de dicha meta indicativa.
- Para fines del consumo final de energía se construyeron dos escenarios:
  - Escenario base (EB), que representa las condiciones inerciales de las actuales políticas públicas de eficiencia energética.
  - Escenario de Transición Energética Soberana (TES), que considera la intervención de medidas y políticas públicas de eficiencia energética adicionales que impulsarán y acelerarán el aprovechamiento óptimo de la energía.

Para construir los escenarios de consumo final de energía se utilizó el modelo MedPro versión México, adaptado y desarrollado por la CONUEE, con el apoyo de ENERDATA y ADEME bajo los acuerdos de cooperación técnica con el Gobierno de Francia a través de la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD). A su vez, para el sector industrial los potenciales técnicos de mediano plazo provienen de la Propuesta de Instrumentos para facilitar medidas de eficiencia energética en el sector industrial de México, desarrollado por la CONUEE, la Unión Europea, la GIZ de Alemania y la Fundación Bariloche de Argentina, publicado el 19 de septiembre de 2018 en el portal de la CONUEE, en el cual el principal modelo utilizado fue el LEAP (Long Range Energy Alternatives Planning System); y además se utilizaron como complementarios los modelos RETScreen y SAM (System Advisor Model), mismos que

permitieron modelar medidas de eficiencia energética muy específicas de cada tipo de industria. Al respecto, se usó el escenario macroeconómico medio proporcionado por la SENER como insumo para la elaboración de los escenarios de línea base y Transición Energética Soberana del consumo final de energía del país.

### 6.2.1.3. Escenarios del consumo final energético

Conforme a las variables establecidas, se estima que el consumo final energético en el Escenario de Línea Base aumentará a una tasa anual de 1.9% hasta el año 2035. A su vez, el Escenario de Transición Energética Soberana (TES) presentaría una tasa de crecimiento de 0.6%, esto a partir del potencial técnico de ahorro de energía existente con medidas viables de eficiencia energética.



Gráfica 15 Escenarios del consumo final energético (PJ)

Al analizar las últimas dos décadas, los sectores que más se hicieron eficientes en sus consumos energéticos fueron el residencial, el industrial y el comercial-servicios, los cuales lograron sustituir fuentes de energía térmica por electricidad. Esta tendencia continuará hacia el futuro ya que la electricidad es la forma de energía más fácil de controlar, transportar y distribuir; también es la más limpia en el punto de uso respecto a otros energéticos.



Gráfica 16 Escenarios de demanda de energía eléctrica 2014-2050 (TWh)

El PRODESEN proyecta que en los siguientes años la energía eléctrica producida para abastecer las necesidades del país llegará a 490,047 GWh en 2033. En este sentido la participación de las energías limpias se incrementará gradualmente hasta representar 39.9% del total nacional generado en 2033.



Gráfica 17 Trayectoria de progreso de la meta de generación con energías limpias en el SEN, 2019-2033 (%)

#### 6.2.1.4. Metas de energías limpias y eficiencia energética

Tomando como referencia los escenarios oficiales de la SENER se establecen las siguientes metas para fomentar la Transición Energética Soberana:

Metas de generación de energías limpias		
2024	2033	2050
35.1% de la generación eléctrica total	39.9% de la generación eléctrica total	50% de la generación eléctrica total

Tabla 18 Metas de generación de energías limpias

La meta de eficiencia energética refleja la velocidad a la que se desacopla el consumo de energía respecto al crecimiento de la economía, mejorando su productividad energética.

Metas de eficiencia energética	
2020-2035	2035- 2050
Tasa anual promedio de 2.2% de reducción de la intensidad de consumo final de energía	Tasa anual promedio de 2.5% de reducción de la intensidad de consumo final de energía

Tabla 19 Metas de eficiencia energética

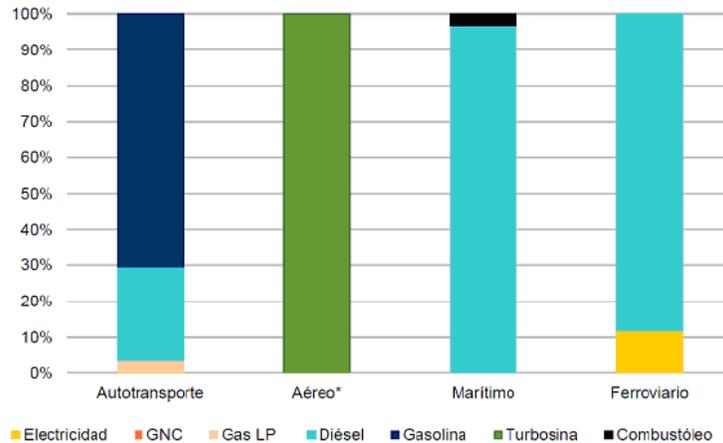
En esta perspectiva las acciones de la Estrategia se definen bajo cinco categorías:

1. Investigación, desarrollo e innovación.
2. Regulaciones y políticas públicas.
3. Instituciones.
4. Capacidades técnicas y recursos humanos.
5. Mercados y financiamiento.

## 6.2.2. Sectores relacionados con las microrredes

### 6.2.2.1. Sector transporte

El sector transporte juega un papel crucial en la economía ya que permite el intercambio de mercancías y la movilidad de personas. Además, es un sector clave en la determinación de costos para los distintos bienes y servicios.

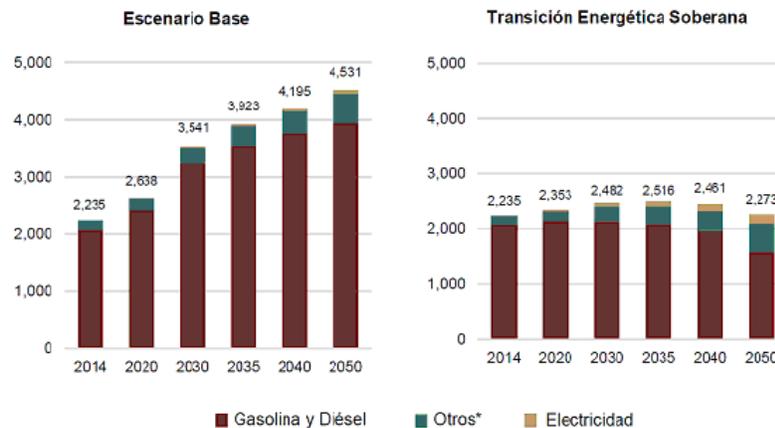


Gráfica 18 Participación de combustibles del sector transporte por modalidad, 2017 (%)

El sector transporte continuará demandando la mayor cantidad de energía en las siguientes tres décadas en cualquier escenario. El escenario base indica que el transporte duplicaría su consumo de energía hacia 2050, y se incrementará aproximadamente a 4,531 PJ. En este escenario considerado como inercial, la electricidad representará apenas 1.4% del consumo de energía del sector en 2050, mientras que las gasolinas continuarían siendo el principal combustible de este sector, representando 69% del total. A su vez, el escenario de TES plantea que el consumo de energía del sector transporte aumente ligeramente 0.6% por año hasta 2035 y posteriormente disminuirá a un ritmo de 0.4% anual en el periodo 2035-2050, lo que generaría un ahorro en el consumo de energía de 49.8% en el 2050 respecto al escenario base.

Las consideraciones fundamentales que impulsarán este escenario son:

- El reordenamiento urbano que llevará a la redensificación de las zonas centrales en las ciudades.
- El desarrollo de infraestructura en las ciudades que favorece la movilidad multimodal.
- El crecimiento de la generación distribuida de electricidad en edificios, que incluye sistemas de almacenamiento y autos eléctricos, conectados a la red eléctrica bajo el esquema de redes inteligentes.
- La electrificación masiva del transporte, tanto el transporte de personas como el de carga.



Gráfica 19 Comparación del consumo de energía del sector transporte 2014-2050 (PJ)

Respecto a las medidas costo-efectivas para el sector transporte, un reciente estudio del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). La medida con los mayores beneficios económicos es la de trenes de pasajeros, -\$154.18 dólares/tCO<sub>2eq</sub> en 2030 por los considerables ahorros en combustible que los trenes generan al trasladar un gran número de personas con una mayor eficiencia; los beneficios son mayores si los trenes son eléctricos. Cabe resaltar que las medidas que resultan menos costo efectivas son aquellas relacionadas con la introducción de vehículos híbridos o eléctricos particulares.

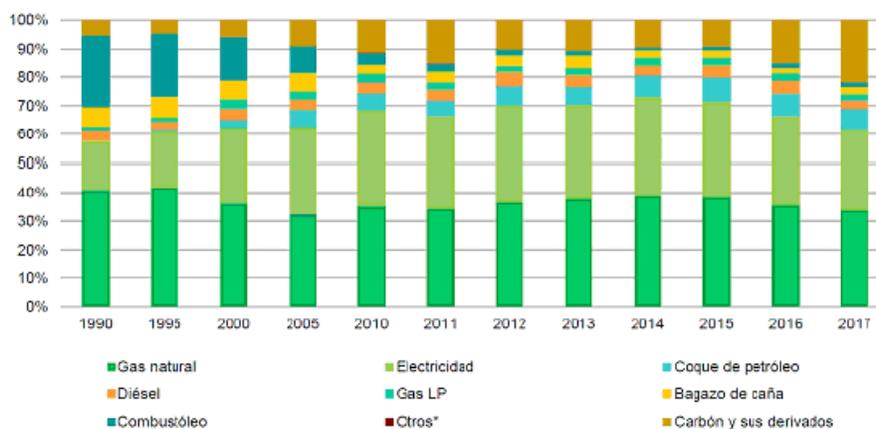
Dada la complejidad y la gran variedad de factores que afectan al transporte, se establecen tres líneas generales de acción para la transición tecnológica y energética de este sector:

Acciones en el sector transporte	
Categorías	Líneas de acción
Acciones en tecnologías vehiculares eficientes	
Regulaciones y políticas públicas	Promover el uso de vehículos híbridos, eléctricos y con tecnologías eficientes.
Investigación, desarrollo e innovación	Desarrollar un mapa de ruta para la sustitución gradual del uso de combustibles fósiles por tecnologías limpias en ciudades.
Acciones en infraestructura que facilite la integración de diversas modalidades de transporte	
Regulaciones y políticas públicas	Desarrollar normas técnicas para los sistemas de recarga eléctrica vehicular.
Instituciones	Fortalecer los esquemas de coordinación subnacional para facilitar la interconectividad del transporte público.
Investigación, desarrollo e innovación	Fortalecer la capacidad de centros de investigación para apoyar el desarrollo, innovación, seguimiento y evaluación de tecnologías y modelos de movilidad urbana.
Acciones en urbanización, planeación de las ciudades y reducción de la necesidad de movilidad	
Investigación, desarrollo e innovación	Fortalecer la capacidad de los centros académicos y de investigación para el desarrollo, seguimiento y evaluación de programas de reordenamiento urbano.

Tabla 20 Líneas de acción para la transición tecnológica y energética del sector transporte

#### 6.2.2.2. Industria

La industria es uno de los sectores principales por su contribución a la economía nacional. El sector secundario representa cerca de un tercio del PIB nacional, asimismo, cerca de un tercio del consumo energético final en los últimos 20 años.



Gráfica 20 Distribución del consumo de energía en la industria por fuente 1990-2017 (%)

En el escenario base se estima que la electricidad se convertirá en el energético más importante del sector, ya que representará 50% de la demanda de energía en 2050, equivalente a cerca de 1,625 PJ. El incremento del consumo de electricidad del sector estará impulsado por la actividad de ramas industriales menos intensivas, tales como la industria automotriz y las PyMEs del sector industrial.

Por otro lado, en el escenario de transición energética soberana se consideran medidas que buscan incrementar la eficiencia energética en distintos subsectores de la industria, entre las que se encuentran:

- Implementación de Sistemas de Gestión de la Energía (SGEn).
- Aprovechamiento de tecnologías de reciclaje para residuos industriales.
- Automatización de los procesos de manufactura.
- Implementación de sistemas de cogeneración.
- Sustitución masiva de equipos ineficientes u obsoletos.
- Desarrollo de estándares de rendimiento energético para equipos y sistemas.
- Aprovechamiento de energías renovables para producir calor de proceso.

De cumplirse este escenario, el consumo de energía de la industria apenas crecería a menos del 1% en promedio anual hasta 2050. En el mediano y largo plazo deben redirigirse los recursos hacia la sustentabilidad, dejando de apostarle a industrias de uso intensivo de energía y reorientando la economía hacia las necesidades internas del país como el transporte público, autosuficiencia alimentaria, salud, educación, turismo nacional y local, etc.

Para incrementar la eficiencia energética y reducir su dependencia de los CF en el sector industrial se consideran algunas acciones prioritarias:

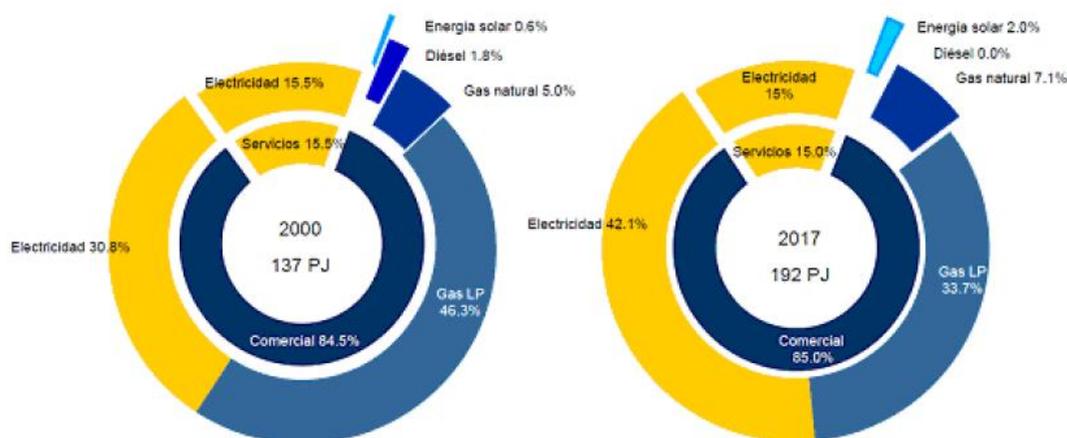
Acciones en industria	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y políticas públicas	Simplificar la regulación para explotar potenciales de cogeneración y de energías limpias. Desarrollar programas de incentivos, acreditaciones y reconocimientos para promover los Sistemas de Gestión de Energía (SGEn). Fortalecer y ampliar los programas de promoción para eficiencia energética y uso de energías limpias en MiPyMEs.
Instituciones	Fortalecer los programas asociados a certificaciones internacionales en materia de eficiencia energética y protección al ambiente. Fortalecer los esquemas de funcionamiento de Empresas de Servicios Energéticos (ESCO) para instalaciones industriales.

Capacidades técnicas y recursos humanos	Establecer programas de gran alcance para el desarrollo de capacidades nacionales para la implantación y certificación de SGE. Establecer programas de capacitación permanente y de soporte para diseñar e implantar proyectos y programas de eficiencia energética y aprovechamiento de energías limpias.
Investigación, desarrollo e innovación	Desarrollar y fortalecer capacidades de investigación, adopción y asimilación tecnológica, equipos, sistemas y procesos de carácter industrial orientados a las necesidades de la industria nacional. Sustitución de combustibles fósiles usados para usos térmicos con bioenergía y energía solar de concentración. Impulsar cogeneración eficiente.

Tabla 21 Líneas de acción para la transición tecnológica y energética de la industria

### 6.2.2.3. Comercio y agropecuario

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía, el consumo de energía del sector incluye la energía utilizada en el sector comercial (servicios privados) y servicios públicos.



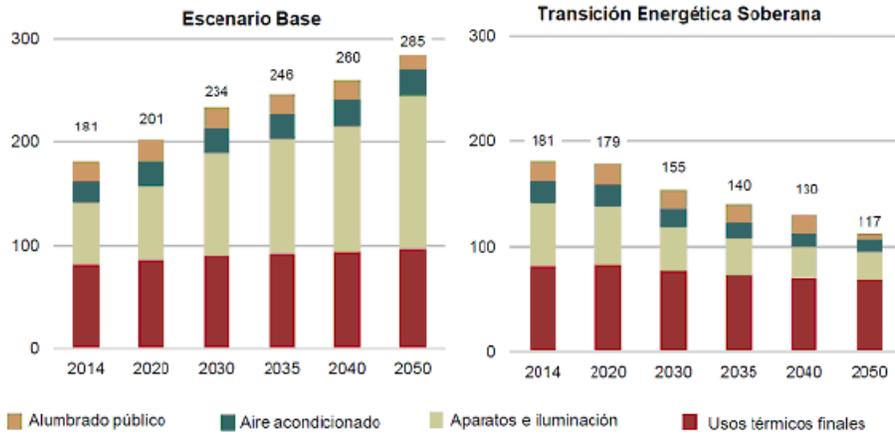
Gráfica 21 Distribución del consumo de energía del sector comercial y servicios 2000-2017 (%)

El sector agropecuario es un sector estratégico en cuanto a seguridad alimentaria, en 2017 representó aproximadamente el 3% del PIB nacional y 3.4% del consumo final de energía del país. Dentro de este sector se incluyen, de manera general, las actividades agrícolas, forestales, pecuarias y pesqueras.

El sector comercial y de servicios posee un potencial técnico de ahorro de energía de 59% que podría captarse hacia 2050. A partir de información disponible en la CONUEE, el principal potencial a nivel nacional dentro del sector terciario se encuentra en la iluminación y equipos eléctricos y electrónicos, siguiendo en importancia los usos térmicos y aire acondicionado. Si tomamos como referencia el estado de las eficiencias energéticas de las distintas tecnologías de uso final instaladas en el año 2000, la CONUEE, ENERDATA y ADEME estiman que el análisis de descomposición muestra que en México se ha ahorrado energía por aproximadamente 846 PJ a 2015, es decir que el consumo nacional de energía hubiera sido 9.9% mayor en el año 2015 si durante este intervalo de tiempo no se hubieran ejecutado las acciones y programas de eficiencia energética.

En este sentido, el escenario de TES plantea la ejecución de una serie de políticas y acciones que se estima pueden impulsar la eficiencia energética del sector de edificaciones comerciales y de servicios en México.

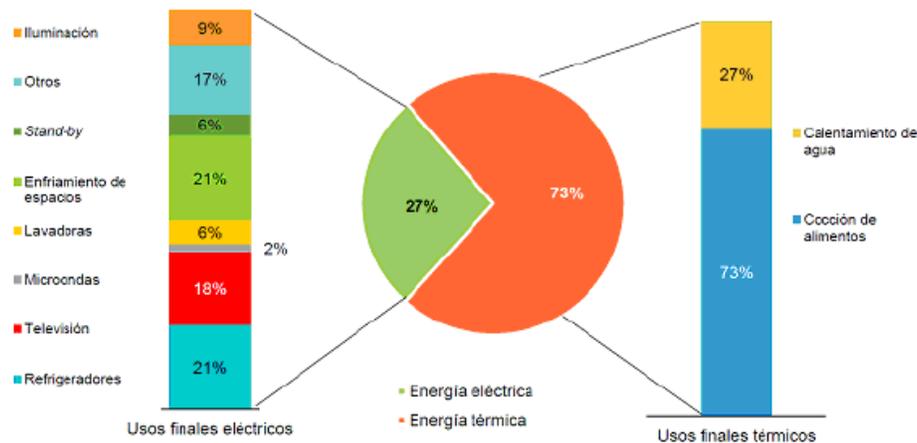
- La obligación generalizada de cumplir con códigos de conservación de energía para toda edificación.
- Diseño y aplicación de esquemas de apoyo que permitan la renovación de equipos y sistemas.
- Mantener, ampliar y fortalecer el sistema de Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia.
- Aprovechar el desarrollo de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC).
- Hacer obligatorio el etiquetado energético de las edificaciones.



Gráfica 22 Consumo de energía del sector comercial y servicios hacia 2050, comparación (PJ)

#### 6.2.2.4. Residencial y edificaciones

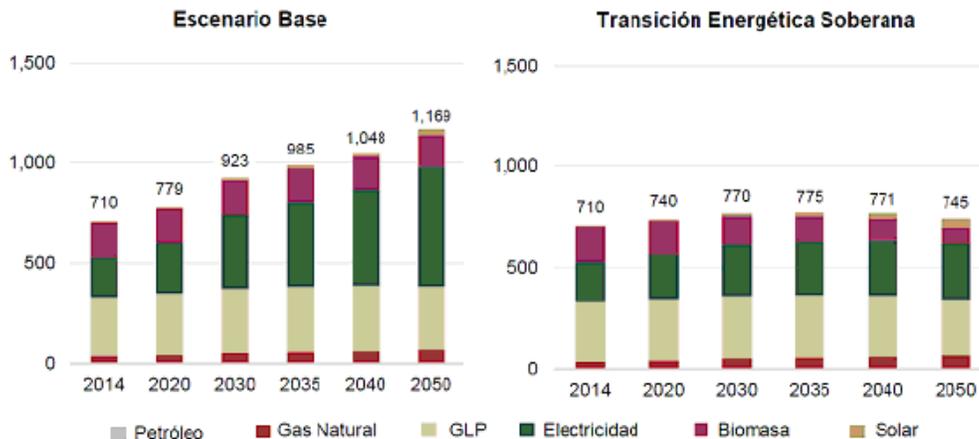
El sector residencial representa el tercer lugar del consumo de energía en México. De acuerdo con el Balance Nacional de Energía, el consumo de energía del sector residencial se integra de seis fuentes (leña, gas LP, electricidad, gas natural, energía solar y querosenos, en orden de importancia en el consumo).



Gráfica 23 Distribución del consumo de energía por uso final en el sector residencial 2015 (%)

En ambos escenarios se espera que después de la siguiente década, el uso de la electricidad supere al consumo del gas LP en el sector residencial. El escenario de TES considera una mayor penetración de los calentadores solares, que desplazan demanda de gas LP y gas natural para uso del calentamiento de

agua sanitaria, además en este escenario se considera reducir el consumo de leña mediante estufas eficientes y ahorradoras.



Gráfica 24 Consumo de energía del sector residencial por fuente hacia 2050 comparación, (PJ)

Los edificios son importantes consumidores de energía, en México representan el 20% del total nacional y presentan oportunidades de mejora en eficiencia energética y para aprovechamiento de energías limpias.

Acciones en edificaciones	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normas de construcción que incentiven el diseño bioclimático, uso de materiales locales y/o con baja huella de carbono.</li> <li>Normas de consumo máximo por aparatos electrodoméstico.</li> <li>Programa masivo de calentadores solares</li> <li>Programa masivo hacia basura cero, reúso de recipientes y envases</li> <li>Programa Nacional sobre consumo responsable de la energía.</li> <li>Mantener, actualizar y fortalecer las NOM de eficiencia energética.</li> <li>Establecer obligaciones y mecanismos de información sobre el desempeño energético de las edificaciones.</li> </ul>
Capacidades técnicas y recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollar capacidades de modelado de desempeño energético.</li> <li>Elaborar normas, programas de capacitación y esquemas de certificación de instaladores y constructores.</li> <li>Generación de electricidad distribuida gestionada por las propias comunidades y personas</li> </ul>
Mercados y financiamiento	Fortalecer programas de financiamiento para adquirir tecnología de eficiencia energética o de energía renovable.
Investigación, desarrollo e innovación	Fortalecer las capacidades nacionales y regionales de investigación relativas al uso de energía en edificios

Tabla 22 Líneas de acción para la transición tecnológica y energética del sector de edificaciones

Norma	Materia
NOM-004-ENER-2008	Bombas y conjunto motor-bomba para bombeo de agua limpia
NOM-021-ENER/SCFI-2008	Acondicionadores de aire tipo cuarto
NOM-004-ENER-2008	Lámparas fluorescentes compactas (LFC) autobalastadas
NOM-023-ENER-20010	Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido, descarga libre y sin ductos de aire
NOM-028-ENER-2010	Eficiencia energética de lámparas para uso general

Tabla 23 Normas mexicanas de eficiencia energía

### 6.2.3. Tecnologías de las microrredes

En un contexto más amplio pero que influye en el desarrollo tecnológico aplicable a las Microrredes Eléctricas, se han identificado las siguientes mega tendencias:

- Seguridad cibernética, protección de datos y privacidad.
- Administración de la energía
- Participación activa del usuario.
- Gestión de la energía (residencial, comercial e industrial).
- Integración de energía renovable.
- Almacenamiento de energía.

Tecnologías avanzadas para el desarrollo e incorporación de microrredes.

- Generación distribuida y tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía eléctrica.
- Apoyo de las microrredes a la regulación de tensión y frecuencia de las redes generales de distribución.
- Potencia reactiva y su impacto en la operación de la microrred.
- Modelado y simulación de microrredes.
- Apoyo de las microrredes a la calidad de la energía de las redes eléctricas de distribución activas.
- Aparatos y equipos inteligentes de los usuarios para su integración a la microrred y REI.
- Programas de Respuesta de la demanda para asistir la operación de la microrred.
- Desarrollo y aplicación de modelos y mecanismo de demanda controlable como un instrumento de participación del usuario.
- Internet de las cosas aplicado a optimizar la operación de las microrredes.
- Inteligencia artificial aplicada a la planeación y operación de las microrredes.
- Manejo de fallas mediante el mejoramiento de convertidores para interconexión de generación distribuida.
- Criterios de conexión y desconexión con base en tecnologías de medición y de predicción de demanda.
- Tecnologías de automatización para el control de GENERACIÓN DISTRIBUIDA, DER y microrredes.
- Optimización de la calidad de la energía en microrredes.
- Microrredes para alimentación del transporte eléctrico.
- Generación y distribución en modo isla para alimentar comunidades alejadas.
- Electrificación rural y de zonas marginadas
- Microrredes en corriente directa.

Tecnología	Potencial Disponible (MW)	Tipo	Fuente
Bioenergía	1,500	Referente al potencial económicamente competitivo.	Iniciativa para el Desarrollo de las Energías Renovables en México: Biomasa (SENER, 2012). <a href="http://www.pwc.com/mx/es/industrias/infraestructura/estudios-energias-renovables.html">http://www.pwc.com/mx/es/industrias/infraestructura/estudios-energias-renovables.html</a>
Cogeneración Eficiente	7,045	Referente al potencial nacional en un escenario medio.	Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México (SENER, 2009). <a href="http://www.cogeneramexico.org.mx/documentos.php">http://www.cogeneramexico.org.mx/documentos.php</a>
Eólica	12,000	Referente conservador del potencial nacional.	Iniciativa para el Desarrollo de las Energías Renovables en México: Eólica (SENER, 2012). <a href="http://www.pwc.com/mx/es/industrias/infraestructura/estudios-energias-renovables.html">http://www.pwc.com/mx/es/industrias/infraestructura/estudios-energias-renovables.html</a>  El potencial eólico mexicano: Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico (Asociación Mexicana de Energía Eólica - AMDEE - y PWC; 2014). <a href="http://www.amdee.org/amdee-estudios">http://www.amdee.org/amdee-estudios</a>
Geotérmica	1,932	De acuerdo a la expectativas de crecimiento de la geotermia.	Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 <a href="http://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico">http://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico</a>
Hidroeléctrica	8,763	De acuerdo con el potencial probable y un factor de planta del 30%.	Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 <a href="http://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico">http://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico</a>
Nucleoeléctrica	1,360	Referente al potencial anual por reactor nuclear con fechas de inicio de operación a partir de 2026.	Estudio de planificación de expansión de generación del Sistema Eléctrico Nacional considerando la incorporación de capacidad de generación nucleoelectrica. Gerencia de Análisis de Redes, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). 2014.
Solar Fotovoltaica	8,000	De acuerdo con el potencial técnicamente viable.	Iniciativa para el Desarrollo de las Energías Renovables en México: Solar FV (SENER, 2012). <a href="http://www.pwc.com/mx/es/industrias/infraestructura/estudios-energias-renovables.html">http://www.pwc.com/mx/es/industrias/infraestructura/estudios-energias-renovables.html</a>  Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029. <a href="http://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico">http://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico</a>

Tabla 24 Potencial de energías limpias

### 6.2.3.1. Solar

El potencial de generación distribuida en el país en términos de irradiación solar y de disponibilidad de techos es del orden de 84 GW si se consideran las 29 ciudades más grandes de México con una superficie de 10,000 km<sup>2</sup> y una disponibilidad en forma de techos de sólo el 10% de esta superficie. Solamente en el sector residencial se puede suministrar hasta el 70% de su consumo eléctrico mediante una capacidad de 25 GW de techos solares que se pudieran alcanzar en el año 2030.

Acciones en energía solar	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	Desarrollar regulaciones para el aprovechamiento de superficies en las construcciones para la instalación de tecnologías solares. Incorporar elementos para la integración de tecnologías fotovoltaicas en la envolvente de las edificaciones en los reglamentos de construcción. Fomentar la creación de programas de aprovechamiento de la tecnología solar con aplicaciones térmicas en procesos industriales.
Instituciones	Fortalecer instituciones subnacionales que impulsen políticas, programas y proyectos que aprovechen el potencial del recurso solar. Coordinar la integración de una red para el aprovechamiento de energía solar térmica en procesos industriales.
Capacidades técnicas y recursos humanos	Desarrollar programas de capacitación y certificación en las áreas de diseño, construcción e instalación de sistemas con tecnologías solares. Promover el incremento de proveedores de sistemas térmicos solares certificados con aplicaciones industriales.
Mercados y financiamiento	Establecer programas de financiamiento para microrredes eléctricas para el aprovechamiento de la energía solar. Crear esquemas de financiamiento que faciliten la adquisición de equipos para el aprovechamiento de la energía solar. Desarrollar modelos de negocio que permitan una penetración acelerada de la tecnología solar térmica.

Investigación, desarrollo e innovación	Fortalecer capacidades de investigación y desarrollo de elementos y componentes tecnológicos de sistemas descentralizados de generación de electricidad a partir de energía solar.
Tecnologías o enfoques sistémicos	Calentadores de agua Celdas Solares fotovoltaicas Concentradores solares Almacenamiento de calor

Tabla 25 Líneas de acción para la transición tecnológica en energías solar

Para la generación de calor de proceso, el 80% del total de energía solar térmica (10 GW) para 2030 se encontraría en la industria de fabricación, del cual el 5% de la sería para la generación de calor de procesos industriales. Dos tercios de este potencial se desplegarían principalmente en sectores con demanda de calor a baja temperatura, como los procesos de producción alimentaria y textil, así como en procesos de producción química.

El potencial de enfriamiento solar en aplicaciones industriales se estima en 23 MW. Esto proporcionaría alrededor del 2-3% de la demanda de energía en la producción de alimentos, reemplazando la demanda de energía para refrigeración.

Las adiciones restantes para el calor se refieren al calentamiento solar de agua en los edificios. La demanda de energía para calentamiento de agua representa el 10% del uso total de energía térmica de los edificios en México en 2030. Alrededor del 90% del potencial del sector de la construcción se encuentra en los hogares y el 10% restante en el sector de servicios. La capacidad total de energía solar térmica en los edificios asciende a más de 23 GW para 2030.

#### 6.2.3.2. Eólica

Los parques eólicos del país aportaron un 3% de la generación total nacional (10,620 GWh).

Acciones en energía eólica	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	Establecer normas y estándares de calidad y desempeño para garantizar el funcionamiento de las tecnologías eólicas en condiciones locales de operación
Instituciones	Crear y fortalecer instituciones regionales que ayuden a prevenir, minimizar y mitigar los impactos sociales y ambientales.
Capacidades técnicas y recursos humanos	Desarrollar programas de capacitación y certificación de profesionistas para la planeación, instalación, mantenimiento y operación.
Investigación, desarrollo e innovación	Desarrollar modelos meteorológicos más precisos, de micro localización y prácticas de mantenimiento que mejoren el rendimiento. Fortalecer y desarrollar capacidades para la aplicación de sistemas de almacenamiento de energía y aplicación de tecnologías inteligentes vinculadas a sistemas eólicos.
Tecnologías o enfoques sistémicos	Aerogeneradores de dos y tres aspas Turbinas de eje vertical Campos eólicos costa afuera Turbinas aerostáticas

Tabla 26 Líneas de acción para la transición tecnológica en energías eólica

### 6.2.3.3. Hidroenergía y energía del océano

La hidroenergía está bien establecida en México para los grandes desarrollos, pero existen oportunidades en plantas a escalas menores. El aprovechamiento de la energía asociada al mar resulta relevante para un país con amplias regiones costeras. De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) existe un potencial de 2,126.48 MW y una generación anual de 15,947.73 GWh para pequeñas centrales hidroeléctricas, los sitios identificados como viables para producir energía a través del oleaje son, la zona norte de Baja California y la zona costera de Oaxaca, en los cuales se cuenta con una densidad de potencia de 15 kW/m.

Acciones en hidroenergía y energías del océano	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	Fortalecer el marco normativo para el desarrollo de proyectos de hidroenergía a pequeña escala.
Instituciones	Promover la modernización, remodelación, rehabilitación y reconversión de plantas hidroeléctricas.
Capacidades técnicas y recursos humanos	Desarrollar capacidades en diseño e implementación de proyectos de centrales hidroeléctricas de pequeña escala y de energías del mar.
Mercados y financiamiento	Actualizar y ampliar bases de datos públicas sobre los recursos hidroeléctricos de pequeña escala en cuencas y el potencial de las energías del mar en litorales del país
Investigación, desarrollo e innovación	Apoyar el diseño y desarrollo de pequeñas centrales de bajos flujos cinéticos para aplicación en canales y pequeños ríos. Apoyar investigaciones sobre potenciales y viabilidad de proyectos que aprovechen las energías del mar.
Tecnologías o enfoques sistémicos	Hidroeléctricas de embalse Hidroeléctricas de pasada (Mini hidroeléctricas) Aprovechamiento de la energía del mar

Tabla 27 Líneas de acción para la transición tecnológica en hidroenergía y energías del océano

Se espera que la hidroelectricidad en México continúe creciendo tanto a partir de grandes instalaciones hidroeléctricas como de pequeños proyectos hidroeléctricos (<30 MW) en construcción o planificados. Se prevén 6,5 GW adicionales para las grandes centrales hidroeléctricas, según el informe Hydropower and Dams (Hydropower & Dams, 2014). El potencial estimado de las pequeñas centrales hidroeléctricas se encuentra principalmente en los ríos de la Cuenca del Pacífico y en los estados de Veracruz, Oaxaca y Chiapas. México tiene una estimación bruta de 3,2 GW en potencial de pequeñas centrales hidroeléctricas (hasta 10 MW).

### 6.2.3.4. Geotérmica

México tiene grandes potenciales de aprovechamiento de la geotermia en diversas manifestaciones en tierra y mar. De acuerdo con el INERE (Inventario Nacional de Energías Renovables), existe un potencial probado y probable de 6,055 MW lo que se traduciría en una generación anual de 47,561.65 GWh.

Acciones en geotermia	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	Desarrollar regulaciones y normas de seguridad, equilibrio ecológico y protección ambiental para sistemas geotérmicos sustentables.
Instituciones	Impulsar el desarrollo de proyectos geotérmicos de media y baja entalpía. Promover casos exitosos de proyectos geotérmicos.

Capacidades técnicas y recursos humanos	Fortalecer la vinculación entre universidades, empresas desarrolladoras de proyectos y tecnologías geotérmicas.
Mercados y financiamiento	Desarrollar programas de financiamiento para proyectos que aprovechen el calor geotérmico.
Investigación, desarrollo e innovación	Fomentar la investigación sobre nuevas aplicaciones para el uso del calor geotérmico y los minerales provenientes del fluido geotérmico. Fortalecer la colaboración internacional en investigación, desarrollo y transferencia de tecnologías geotérmicas.
Tecnologías o enfoques sistémicos	Sistemas hidrotermales Sistemas de calefacción urbana Sistemas geotérmicos mejorados (roca seca)

Tabla 28 Líneas de acción para la transición tecnológica en energías geotérmica

### 6.2.3.5. Bioenergía

La bioenergía tiene potencial de aprovechamiento y retos importantes en cuanto a manejo ambiental sustentable. De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE), existe un potencial probado y probable de 436.8 MW y una generación anual de 2,786.62 GWh.

Acciones en bioenergía	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	Fortalecer el marco de políticas para la producción de bioenergéticos. Establecer normas y regulaciones a la producción de bioenergéticos. Armonizar marcos legales propicios para el aprovechamiento energético de los residuos urbanos y el reciclado de materiales.
Instituciones	Fortalecer capacidades institucionales para la aplicación del marco jurídico relativo a los bioenergéticos.
Capacidades técnicas y recursos humanos	Desarrollar programas de capacitación en planeación y financiamiento de procesos y operación de tecnologías más avanzadas de aprovechamiento de bioenergéticos.
Mercados y financiamiento	Facilitar el acceso a financiamiento para la producción de bioenergía sustentable que favorezcan el desarrollo de cadenas de valor.
Investigación, desarrollo e innovación	Fortalecer las capacidades nacionales y regionales de investigación para aprovechar bioenergéticos. Desarrollar y fortalecer la capacidad de análisis sobre el impacto económico y ambiental de la producción de bioenergéticos.
Tecnologías o enfoques sistémicos	Estufas eficientes y ahorradoras de leña Secado de biomasa y torrefacción Biodigestores para el aprovechamiento de biogás Biocombustibles sólidos: Gasificación para producir hidrógeno Biocombustibles de primera y segunda generación Biocombustibles avanzados

Tabla 29 Líneas de acción para la transición tecnológica en bioenergía

La demanda nacional de energía ha crecido de manera continua en los últimos 60 años. Entre las diferentes fuentes de energía, la que más ha crecido desde el año 2000 es el gas natural, debido a que la producción de electricidad. En consecuencia a las crecientes importaciones de gasolina, diésel y gas natural, desde finales de 2014, México es un importador neto de energía. Con base en los datos proporcionados por el Sistema de Información Energética de la SENER (SIE), el consumo promedio de gasolina y diésel en 2019 varió entre 0.95 y 1.05 millones de barriles diarios, de los cuales se importaron de los Estados Unidos cerca del 86%. En el caso del gas, se consumen cerca de 8,200 millones de pies cúbicos diarios (MMpcd), de los cuales se importan de Estados Unidos el 68%.

La demanda actual de CFE para usos térmicos representa un gasto de \$180,000 millones de pesos al año. Sustituir una parte de estos CFE mediante biocombustibles sólidos representa una gran oportunidad. Por un lado, varios de estos biocombustibles son más baratos que la mayoría de los combustibles fósiles y se encuentran ampliamente disponibles en el país. Asimismo, se estima que podrían sustituir 340 PJ/año con “Calor verde” en el mediano plazo, es decir 35% de la demanda total de CFE. Desde el punto de vista ambiental, los biocombustibles fósiles permiten aprovechar residuos agroindustriales y forestales (bagazos, aserrín, astillas, cáscaras), dependen de tecnología establecida y brindan beneficios tangibles al sector social, particularmente comunidades forestales y productores agrícolas.

En México se podrían utilizar varias formas de biomasa, incluida la madera y los productos derivados de la madera, los residuos agrícolas y forestales y el biogás de los desechos urbanos y el estiércol. El mayor uso adicional de biomasa en 2030 tiene lugar en el sector del transporte en forma de biocombustibles líquidos y en el sector de fabricación para procesos de generación de vapor y energía. Estos ascienden a 53 PJ y 175 PJ, respectivamente (REmap).

La mezcla de combustibles en el sector del transporte tanto en gasolina como en diésel podrían representar una opción viable para la introducción de biocombustibles. Esto supone una mezcla de etanol al 6% en gasolina, equivalente a 86 PJ consumidos por año para 2030. Se asumió una mezcla de biodiésel al 5% para el diésel, esto equivale a 41 PJ / año. Se supuso una mezcla al 30% de bioqueroseno en combustible de aviación para transporte aéreo solo para la aviación nacional. La demanda total de biomasa primaria en los sectores de transporte e industria alcanzaría los 257 PJ y 200 PJ, respectivamente, en 2030 (REmap).

El potencial de suministro total de biogás es de unos 300 PJ. Esto toma principalmente la forma de desechos urbanos en todo el país y estiércol en las regiones del norte y centro oeste. Se asumen 4 PJ adicionales para cocinar y aproximadamente 20 PJ adicionales para la generación de calor del proceso. Esto equivale a un despliegue de alrededor de un tercio del potencial total de suministro de biogás. (REmap).

#### 6.2.3.6. Redes inteligentes y generación distribuida

El proceso de descentralización de la generación de energía y la integración de tecnologías de la información y comunicación al funcionamiento de la red y mercados eléctricos representa uno de los retos más relevantes para el futuro de los sistemas energéticos.

Acciones en redes inteligentes y generación distribuida	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	<p>Desarrollar protocolos, definiciones y estándares técnicos que hagan cumplir los lineamientos de balanceo de fases, estabilidad de voltaje, calidad de energía, interoperabilidad y seguridad informática.</p> <p>Fortalecer la vinculación entre las regulaciones de los sistemas eléctricos con los sistemas de comunicación y manejo de datos.</p> <p>Evaluar la adopción de estándares internacionales para la generación distribuida y redes inteligentes (RI).</p> <p>Fomentar la instrumentación del monitoreo y seguimiento de sistemas de generación distribuida.</p> <p>Promover programas piloto que mejoren la eficiencia, calidad, confiabilidad, seguridad y sustentabilidad del sistema eléctrico.</p>
Instituciones	Fortalecer capacidades para definir tarifas eléctricas en un sistema eléctrico que opere con generación distribuida y redes inteligentes.

Capacidades técnicas y recursos humanos	Fortalecer la creación de capacidades en recursos humanos para el diseño, instalación y operación de sistemas de redes inteligentes.
Mercados y financiamiento	Establecer esquemas de financiamiento para la integración de capacidades de generación distribuida y de redes inteligentes. Apoyar programas piloto de generación distribuida que mejoren las economías del estado y genere ahorros para los usuarios.
Investigación, desarrollo e innovación	Fortalecer programas y proyectos de centros académicos y de investigación para el desarrollo de la generación distribuida y las redes inteligentes.
Tecnologías o enfoques sistémicos	Monitoreo y control de grandes áreas Tecnologías de la información y comunicación Generación distribuida con fuentes renovables Medición Avanzada Infraestructura para carga de vehículos eléctricos Sistemas del usuario final

### 6.2.3.7. Almacenamiento de energía

Es un elemento clave de soporte en la integración de las energías renovables intermitentes, de manera que permitan resolver esa problemática, además de servir a un mejor aprovechamiento de la red eléctrica y de los mercados eléctricos del futuro.

Acciones en almacenamiento de energía	
Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	Desarrollar reglamentación específica para la interconexión de los sistemas de almacenamiento de energía en los códigos de red. Desarrollar reglamentación específica para la construcción, desempeño y retiro de los sistemas de almacenamiento de energía
Instituciones	Desarrollar un mapa de ruta que permita identificar objetivos, necesidades, retos y prioridades convergentes para el despliegue de sistemas de almacenamiento de energía.
Capacidades técnicas y recursos humanos	Integrar el tema de almacenamiento de energía a la formación de recursos humanos en materia energética.
Mercados y financiamiento	Promover el desarrollo de modelos de negocios para dar impulso a la tecnología, productos y servicios para la cadena de valor de almacenamiento de energía.
Investigación, desarrollo e innovación	Promover proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación en almacenamiento de energía. Promover la colaboración nacional e internacional en investigación, desarrollo e innovación en tecnologías de almacenamiento.

Tabla 31 Líneas de acción para la transición tecnológica en almacenamiento de energía

Desde el punto de vista de utilización de la energía almacenada, el sistema de almacenamiento puede ser para aplicaciones de suministro de energía y para aplicaciones de potencia. Para aplicaciones de suministro de energía, la potencia se descarga lentamente (de decenas de minutos a horas), incluyendo el bombeo hidroeléctrico, los sistemas de aire comprimido y baterías de flujo de alta energía; mientras que, para aplicaciones de potencia, el sistema se descarga rápidamente (de segundos a minutos), incluyendo el volante de inercia, los capacitores y superconductores.

La constante mejora en las tecnologías de almacenamiento de energía, permitirán mayor flexibilidad en el sistema de generación de electricidad. Para este elemento de uso creciente en todo tipo de instalaciones se espera una reducción de precio de entre 50% y 66% para el año 2030, impulsado por las ventas de

automóviles eléctricos y la demanda de baterías estacionarias para almacenar el exceso de energía en los edificios.

#### 6.2.3.8. Cogeneración

El Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México realizado por La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE) en colaboración con la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ, hoy GIZ) GmbH (Cooperación Técnica Alemana), que se basó en la información proporcionada por CFE en 2009 y basándose en la definición de factor de carga (demanda media operativa/demanda máxima), nos presenta el potencial energético del uso de la cogeneración en el sector industrial.

Se crearon tres listas de empresas con posibilidad de cogeneración:

- Empresas con demanda mayor a 1 MW, con posibilidades de cogeneración del “tipo superior”, con un total de 2,395 empresas.
- Empresas con demanda menor a 1 MW, con posibilidades de cogeneración del “tipo superior”, con un total de 786 empresas.
- Empresas, con posibilidades de cogeneración del “tipo inferior”, con un total de 55 empresas.

Aunque se eliminaron las empresas que tuvieron factores de carga menores a un 50%, porque esto implicaría inversiones excesivas que no permitirían proyectos rentables.

En los sectores industriales con relaciones térmicas eléctricas altas se efectuó un análisis para satisfacer toda la energía térmica con la cogeneración, además se encontró una capacidad firme excedente de electricidad que podría entregarse al SEN. En todos los casos se consideró la configuración de turbina de gas y caldera de recuperación, así como 8760 horas por año de operación con el factor de carga medio por sector, y 92% de factor de disponibilidad.

El potencial teórico de cogeneración en el sector industrial es de 6 725 MW considerando la entrega de excedentes al SEN, si se elimina la entrega de excedentes, el potencial teórico sería solamente de 2 630 MW, esto denota el papel clave que juega el SEN en la implementación de proyectos de cogeneración. Para el cálculo de los ingresos por la entrega de excedentes al SEN se consideró que el SEN pagaría únicamente por la energía a un valor del 85% de la tarifa HS aplicable. Bajo estas condiciones se obtiene que todos los sectores que entreguen excedentes al SEN sean económicamente factibles con los siguientes resultados:

- En plazos de retorno de inversión de 1.47 a 3.69 años.
- En relaciones beneficio/ costo de 2.76 a 6.18 veces.

#### 6.2.3.9. Desarrollo e impacto social

La legislación vigente en México requiere de acciones y esfuerzos especiales para lograr una observancia efectiva, así como metas de equidad de género, eliminación de pobreza energética y mayor participación ciudadana en los proyectos energéticos.

Para la transición energética es fundamental tomar en cuenta la creatividad y visión que la sociedad en general puede aportar a la construcción de acciones colaborativas. Se debe favorecer y construir una plataforma de diálogo estructurado mediante la cual sea posible identificar retos, oportunidades y acciones específicas.

Acciones de desarrollo e impacto social	
Categorías	Líneas de acción
Pobreza energética	<p>Reducir la pobreza energética mediante la promoción de proyectos incluyentes de energías limpias.</p> <p>Desarrollar programas de acceso universal de energía.</p> <p>Fomentar el aprovechamiento de los residuos sólidos rurales, para la producción de biogás, la instalación de sistemas fotovoltaicos, aislados o conectados a la red, a través de proyectos incluyentes.</p>
Financiamiento	Promover la formación y el desarrollo de microempresas de generación eléctrica limpia de base social en el sector rural y urbano.

Tabla 32 Líneas de acción para el desarrollo e impacto social

Las energías renovables en conjunto con ecotecnologías de uso final son claves para reactivar y dignificar las comunidades rurales de México (vía fuentes de empleo, valor agregado a productos, educación, servicios adecuados) así como la población urbana que vive en pobreza energética. Entre las acciones claves a impulsar en esta área se cuentan:

1. Implementación de sistemas energéticos comunitarios y ecotecnologías de energías renovables que brinden alternativas tanto a nivel doméstico, de servicios comunitarios y de pequeñas industrias locales. Estos sistemas deberán estar adaptados a las condiciones socioculturales y ambientales de las diferentes regiones de México. Ejemplos de estos sistemas son microrredes de generación eléctrica, biodigestores, estufas ecológicas, calentadores y secadores solares y de biomasa, electrodomésticos eficientes, viviendas ecológicas y otros. Dentro de la pequeña industria están hornos eficientes para panadería, secado frutas, alfarería y carpintería.
2. Programas para el acceso a servicios energéticos dignos y eficientes en zonas urbanas y periurbanas. Por ejemplo, calentadores solares de agua, paneles fotovoltaicos, electrodomésticos y dispositivos de uso final eficientes, calefactores o estufas de biomasa para pequeños centros urbanos, etc.
3. Desarrollo de sistemas de producción de energía y en particular, electricidad distribuida. Los esquemas de generación descentralizados pueden jugar un papel primordial en la solución de problemas de inclusión energética además de fomentar el desarrollo de cooperativas, microempresas o empresas familiares. Estos sistemas de generación distribuida tendrán que incorporar elementos básicos de almacenamiento y redes eléctricas inteligentes, que permitan, cuando sea el caso, su incorporación ordenada y creciente al Sistema Eléctrico Nacional.
4. Para lograr la meta de que la población mexicana alcance bienestar, trabajo y horizontes de realización personal en sus sitios de origen, arraigados en sus entornos culturales y ambientales (PND), se debe promover el cambio de un modelo de innovación e implementación convencional de tecnología -basado en procesos verticales, con énfasis en la instalación de dispositivos y con poca o nula retroalimentación del usuario, por un modelo de innovación participativo y transformador, flexible y centrado en las necesidades de los usuarios finales de los sistemas.

## 7. Discusión

### 7.1. Análisis

La presente investigación se realizó con la intención de estudiar la propuesta tecnológica conocida como microrredes y cuál sería su papel e impacto en el contexto del SEN en México. Adicionalmente, se propone generar un marco conceptual y un panorama más claro sobre estos sistemas, desde su definición, componentes, configuraciones, tecnologías, legislación, etc. y a partir de dicha información relacionarlos con el desarrollo del SEN tomando en cuenta las dimensiones del desarrollo sostenible, es decir considerando los aspectos ambiental, económico y social, más allá del análisis técnico que se pueda obtener de estos sistemas. Ya que las microrredes se podrían presentar como una posible solución a los paradigmas o retos tecnológicos que muestra el sistema energético y en específico el SEN, manteniendo siempre una visión sostenible.

Para recabar la información necesaria se consultaron distintas fuentes relacionadas con las microrredes y sus tecnologías, dado que se busca focalizar la información a nivel nacional, se abarcó el panorama internacional con una perspectiva local. La información se extrajo desde artículos de investigación, manuales o informes de agencias internacionales, así como de la legislación actual referente al sector energético.

Si bien una microrred se puede entender como el conjunto de tecnologías que funcionan de manera coordinada y enfocadas a resolver necesidades energéticas a pequeña escala, actualmente no existe un consenso entre agencias internacionales, institutos o universidades en cuanto a la definición exacta, escala o cuáles son los elementos específicos que tendría que cumplir una microrred. A partir del presente trabajo, se encontró que la definición más acertada de una microrred es la siguiente: una microrred se entiende como cualquier conjunto de cargas y generadores que operen como un sistema único controlable, claramente delimitado, que puede proporcionar tanto energía eléctrica como térmica o combustible a cierta zona. Esta definición tiene la ventaja de que contempla los sistemas térmicos y los combustibles como parte de la microrred y no se restringe a los elementos eléctricos, por lo cual tecnologías como redes de gas, biodigestores, refrigeración por absorción, entre otros, pueden tener un rol importante en la microrred y cubrir un porcentaje significativo del consumo energético, dependiendo de la necesidad que se busque cubrir.

Se encontró que las microrredes no son una tecnología ampliamente estudiada y desarrollada en México, a diferencia de Estados Unidos, Asia o incluso Europa; sin embargo, existen aplicaciones del concepto de microrred en algunos proyectos específicos. La importancia de estudiar las microrredes y sobre todo buscar su desarrollo y aplicación en el país es que pueden funcionar como respuesta a algunas problemáticas presentes en el SEN, en primer lugar la capacidad de brindar energía eléctrica a regiones aisladas donde las redes de distribución no llegan, brindar respaldo para aplicaciones críticas como hospitales, centros de telecomunicaciones o sistemas de seguridad, sobre todo en caso de siniestros como huracanes o terremotos, también pueden ayudar en reducir las cargas que debe suplir el SEN, reduciendo la saturación, pueden agregar confiabilidad a la red cuando cumplen la doble función de cargas o generadores según se requiera.

Por otro lado, la generación distribuida se encuentra bien establecida tanto en la legislación como en múltiples aplicaciones a lo largo del país, principalmente con el avance de las tecnologías fotovoltaicas. Aunque no podemos asegurar que la generación distribuida encaja perfectamente con el concepto de microrred, si podemos encontrar una clara relación entre ambos conceptos, por lo cual se puede

establecer que la generación distribuida es un precursor a las microrredes. Sin embargo, se debe reconocer que una gran penetración de generación distribuida en el SEN, puede generar repercusiones más allá de sus beneficios, es por eso que conceptos propios de las microrredes como los sistemas de almacenamiento, software y control avanzado permitirían el aprovechamiento de los recursos energéticos locales, como ya lo hace la generación distribuida, sin significar una carga o problema para el SEN, al tener la capacidad de administrarse de manera independiente. También es necesario la transición del SEN a un sistema más inteligente y eficiente que permita la incorporación de las microrredes a su estructura, es decir que en el enfoque de implementación de las microrredes no solo debe considerar el factor local sino una visión general conjunta que permita la coordinación ente las microrredes y el SEN.

Es evidente que para impulsar la investigación y desarrollo de las microrredes en México se necesita un marco conceptual, así como uno legal e institucional que respalden dichas investigaciones. Para el momento de la presentación de este trabajo no existe una legislación clara que apoye estas tecnologías, en contraste a lo que podemos encontrar referente a las energías renovables, la generación distribuida, o la red eléctrica inteligente, donde ya se tienen normativas y manuales de implementación, así como su mención en distintas leyes como la LIE y LTE, aunque sí existen algunos programas donde se han trabajado las microrredes, por ejemplo en el INEEL, específicamente con el desarrollo del CEMIE-Redes, por lo cual se evidencia la necesidad de conceptualizar las microrredes dentro la legislación del sector energético. En el contexto internacional se tiene la ventaja de que ya se cuenta con normativas, metodologías y estándares específicos de las microrredes, las cuales podrían servir de guía para el desarrollo de las propias en México, pero para lo cual se debe tener presente un factor muy importante de las microrredes que es la localidad, no solamente en términos de recurso energéticos disponibles sino también considerando tecnologías locales e incluso el propio factor social. Por lo que no se trataría solamente de un proceso de tropicalización de normas y estándares, sino que se necesita tener un verdadero enfoque local si se busca el desarrollo de estas tecnologías a nivel nacional.

Una de las grandes virtudes de las microrredes, respaldada por la información del presente trabajo, son las múltiples metodologías de implementación y topologías que puede tener una microrred, si bien solamente se consideraron tres configuraciones con base en el tipo de corriente de la red, ya sea corriente directa o corriente alterna, dichas configuraciones pueden estar integradas por varios generadores, sistemas de almacenamiento, convertidores de corriente, entre otros equipos. Es decir, no existe una lista de componentes específica que integren la microrred, a diferencia de un sistema fotovoltaico donde se conocen los equipos específicos que lo integran, por ejemplo. Lo anterior permite que la microrred tenga una gran capacidad de adaptación, esto permitiría la utilización de tecnologías locales o disponibles y el aprovechamiento de los recursos energéticos de la región. Así como hay muchas maneras de implementar una microrred, también hay múltiples criterios de evaluación para determinar si la microrred es benéfica o está teniendo los resultados esperados, no es lo mismo una microrred con fines económicos para reducir las facturas energéticas, que una microrred que busca brindar energía a una comunidad aislada, o incluso una microrred desarrollada con fines educativos o de investigación.

Una microrred puede ser desarrollada desde un sistema energético existente, como un edificio o una fábrica, pero también puede ser diseñada desde cero, lo cual se presenta como una gran oportunidad para resolver problemáticas que los sistemas energéticos existentes no podrían. La parte de diseño es fundamental ya que permitiría hacer un uso eficiente de la energía y la integración de sistemas bioclimáticos o usos directos, los cuales podrían representar un ahorro significativo en el consumo energético del sistema, y permitiría la integración de equipos generadores de menor capacidad e incluso reducir la dependencia a la red eléctrica. Por ejemplo, si se hace un correcto diseño bioclimático para un edificio con la orientación apropiada y colocación estratégica de ventanas para el flujo de aire, se puede

reducir considerablemente la necesidad de aires acondicionados, lo que haría mucho más viable la integración de energías renovables para la generación de electricidad. Es importante señalar que, tanto en el sector residencial como industrial, la generación de energía calorífica ocupa un porcentaje importante de su consumo energético, por lo cual diseñar con un enfoque dual, es decir térmico y eléctrico, permitiría hacer un uso más eficiente de las tecnologías disponibles.

México cuenta con un alto potencial en energías renovables, para cualquier tipo de tecnología, ya sea solar, hidráulica, geotérmica, eólica e incluso biomasa o biocombustibles. Sin embargo, no todos los recursos se encuentran disponibles para su explotación a gran escala como se ha venido implementando en los últimos años. Es por eso que las microrredes al ser sistemas mucho más pequeños pueden aprovechar los recursos renovables a menor escala y en un margen más amplio de aplicación, algo que las grandes centrales generadoras no hacen, ya que al ser de menor escala se encuentran más fácilmente disponibles a lo largo del país. Se debe reconocer que los sistemas de menor capacidad suelen ser menos eficientes, sin embargo, las microrredes buscan compensar esto con la implementación de sistemas de instrumentación y control avanzados que permitan una gestión más óptima de los recursos. Con la intención de aprovechar el potencial renovable, se debe tener muy presente el factor social, es decir tomar en cuenta a las comunidades donde se implementarán los proyectos, ya que esto puede definir el éxito o fracaso del mismo, un manejo más horizontal y justo de la información puede beneficiar tanto a la comunidad como al proyecto.

Los sistemas de almacenamiento de energía juegan un rol crucial en la estructura de una microrred, ya que es una característica carente del SEN, es decir, que mientras la energía eléctrica de manera tradicional se produce conforme se consume, en una microrred existe la posibilidad de almacenar la energía y consumirla conforme se requiera. Actualmente las baterías son la tecnología más utilizada para el almacenamiento de energía a pequeña escala, sin embargo tienen un límite de capacidad y respuesta, así como sus evidentes implicaciones ambientales, no podemos descartar el uso de generadores eléctricos con combustibles convencionales, como gas LP o diésel, estos tienen la ventaja de ser almacenables y poder servir de respaldo cuando las energías renovables no estén disponibles, algo que se ve claramente en los sistemas fotovoltaicos. El hidrógeno podría significar una solución a estas problemáticas, si se avanza en la generación de hidrógeno verde, es decir sin emisiones contaminantes. El hidrógeno tiene la capacidad de ser almacenado como los combustibles convencionales, ya que para la generación de energía eléctrica, o para usos térmicos a través de redes de gas, además de que en conjunto con las celdas de combustible presentan una solución no contaminante en todos los niveles del sistema energético, desde su generación, almacenamiento y consumo. Por lo cual las tecnologías del hidrógeno y celdas de combustible, aunque aún no representan una solución real, se perfilan a resolver grandes problemáticas de las microrredes como lo es el almacenamiento y respaldo de energía.

Uno de los factores más importantes que ha permitido que las microrredes sean consideradas como una alternativa viable para sistemas energéticos, es el desarrollo de las tecnologías de comunicación y control. Algo que en décadas pasadas era difícil visualizar ya que nos encontrábamos restringidos por la velocidad de respuesta, o la dependencia a la intervención humana para la toma de decisiones. Las nuevas tecnologías de comunicación permitirían el monitoreo en tiempo real, así como la toma de decisiones inteligentes para la correcta administración de la energía, tomando en cuenta factores técnicos, pero también económicos. Todo esto ayudaría a las microrredes a ser más confiables y seguras para los usuarios y para el SEN lo cual se podría traducir a mejores oportunidades de implementación. Si bien, las tecnologías de la comunicación son vitales para la implementación de una microrred, como se ha demostrado en el presente trabajo, los usuarios y la comunidad misma representan un factor clave para una implementación exitosa; es decir, se tienen que tomar en cuenta las verdaderas necesidades y recursos

de la comunidad para el diseño de los sistemas de instrumentación y control, así como programas de capacitación para que pudiera haber cierto nivel de intervención por parte de los usuarios, gracias a lo cual habría mejor retroalimentación y por lo tanto mejor funcionamiento de los sistemas de comunicación y control.

Por último, actualmente en México no se cuenta con un programa o iniciativa que impulse la implementación de microrredes, sin embargo, se puede decir que estamos en sintonía con el desarrollo tecnológico necesario para en algún momento dar el paso hacia las microrredes y los beneficios que conllevan. Si tomamos en cuenta algunas tecnologías actualmente impulsadas y desarrolladas en México, por ejemplo: biodigestores para el aprovechamiento de biogás, sistemas de calefacción urbana o hidroeléctricas de pasada, se puede observar que estas tecnologías bien podrían ser parte de una microrred y podrían implementarse en todos los sectores del país. Si se toma en cuenta la información anterior realmente no nos encontramos tan alejados de un escenario donde las microrredes sean una realidad con una fuerte penetración en el SEN y que modifiquen las dinámicas en las que generados y consumimos energía.

## 7.2. Propuestas de desarrollo y aplicación.

- Apoyar la investigación

La investigación es el punto de partida para el desarrollo de tecnologías, en el caso de las microrredes es necesario seguir apostando a la investigación en centros nacionales para instaurar nuestra visión de este concepto, crear nuestros propios dispositivos, herramientas, metodologías, y reducir la dependencia a conocimiento y tecnología externa, que, si bien pueden ser de mucha ayuda, no deben frenar nuestra capacidad de innovación tecnológica.

- Impulsar programas específicos de microrredes

Si se busca que las microrredes tengan más presencia en el panorama energético nacional, se tienen que crear programas enfocados al desarrollo e implementación de estas tecnologías, lo cual permitiría que haya mucho más conocimiento por parte de la sociedad civil y de los profesionistas relacionados con el sector. Esto ayudaría a que hubiera fondos y herramientas institucionales para apostarle a las microrredes, de lo contrario resultaría muy complicado pasar de la teoría a los proyectos prácticos.

- Vinculación con institutos y universidades

En México ya se cuenta con cierto nivel de avance en el estudio de las microrredes; sin embargo, se debe reconocer que a nivel internacional existen universidades y centros de investigación con desarrollos mucho más avanzados en el tema. Por lo cual generar vinculación con estos actores podría ser fundamental para tener un avance más dinámico e integral, ya sea a partir de cooperación bilateral, programas de capacitación o investigación en conjunto.

- Considerar tecnologías térmicas.

Como se mencionó anteriormente, muchas veces las microrredes solo están conceptualizadas desde el punto de vista de la energía eléctrica. Sin embargo, tomar en cuenta otras tecnologías no eléctricas, como el diseño bioclimático, la refrigeración por absorción o la cogeneración, pueden

tener un impacto importante en el consumo energético, por lo cual es importante su consideración en el desarrollo de microrredes, desde una perspectiva conjunta entre los sistemas eléctricos y térmicos.

- Hidrogeno y celdas de combustible

El hidrogeno y las celdas de combustible podrían ser elementos clave en la búsqueda de la sostenibilidad de los sistemas energéticos, por lo cual es importante su estudio. Impulsar estas tecnologías y su relación con las microrredes permitiría tener un rango más amplio de soluciones, sobre todo para el almacenamiento y generación de energía con bajas emisiones contaminantes.

- Estudios de las áreas de mejora del SEN y de mayor potencial de energías renovables

Es necesario desarrollar estudios a nivel nacional donde podamos conocer de manera precisa cuales son las zonas donde se debe mejorar el SEN para hacerlo compatible con las microrredes. De la misma manera se deben hacer estudios del potencial renovable que hagan énfasis en aplicaciones de microrred, para conocer en que regiones se puede hacer uso de energías renovables a pequeña escala, y en su momento vincular esta información con posibles aplicaciones.

- Desarrollo de una hoja de ruta

Como ya se mencionó existen muchas maneras de desarrollar una microrred, por lo tanto, sería de mucha utilidad el desarrollo de una hoja de ruta donde se muestren herramientas de diseño, posibles tecnologías y metodologías de microrredes según la capacidad del sistema o sector en el que se quiera implementar. Esta hoja de ruta podría servir como base para el desarrollo homologado de futuras microrredes en el país.

- Reconocer la sostenibilidad en todos los niveles del proyecto

Tomando en cuenta el contexto actual referente a la crisis climática, se recomienda que trabajos futuros relacionados con microrredes tengan una visión de sostenibilidad, es decir que contemplen aspectos socioambientales en su aplicación y desarrollo. Lo que haría necesario la existencia de equipos multidisciplinarios que ayuden a generar este enfoque sostenible, más allá del análisis y propuesta técnica que pueda generar la ingeniería.

- Programas públicos para el desarrollo de energías renovables.

Si bien ya existen algunos programas públicos o incentivos fiscales enfocados a promover el uso de energías renovables, aun es necesario abarcar un mayor número de usuarios, sobre todo enfocados en el sector social con menor acceso a estas tecnologías. Un ejemplo muy claro, sería apoyar la instalación de más calentadores solares, si se toma en cuenta el consumo energético y económico que representa el gas en las viviendas y en la industria mexicana.

- Programas públicos para el mejor manejo de la energía.

Cabe señalar que ya existen programas públicos, que, si bien no tratan de microrredes de manera específica, si representan un avance significativo en un mejor manejo de la energía en distintos

sectores, por lo cual impulsarlos, ayudaría a tener una sociedad más sostenible y de alguna manera enfocada a una dinámica de microrred. Entre estos programas destacan: reciclaje y manejo de residuos, mejora de la movilidad pública, asesorías en temas de construcción, cambio de equipos de alto consumo e implementación de la eficiencia energética.

- Generar redes de aprendizaje entre distintos actores

Finalmente, el avance más importante se debe dar a nivel organizacional, al generar redes de aprendizaje entre los distintos actores relacionados con las microrredes, desde especialistas, universidades, centros de investigación, agencias de cooperación y el sector público y privado. Todo esto desde una visión horizontal, ya que ayudaría a generar un mayor flujo de información nutriendo y acelerando el desarrollo de las microrredes.

## Conclusiones

Esta tesis fue el resultado de un arduo trabajo de investigación, gracias a lo cual se pudo compilar y analizar una gran cantidad de información que permitió generar respuestas en relación con los objetivos planteados al principio.

Este trabajo ayudó a mostrar el contexto actual de las microrredes, sobre todo a nivel nacional, con lo cual se tiene una plataforma para trabajos futuros relacionados con este tema. Uno de los grandes aportes fue brindar una idea de la relación entre los proyectos de pequeña escala como lo son las microrredes y los grandes sistemas de potencia que integran al SEN. Esto es de suma importancia, ya que, si bien un proyecto se puede delimitar según las necesidades de aplicación, se sabe que siempre se tendrá un impacto que repercutirá en el sector por más pequeño que este sea, conforme se vayan implementando más microrredes el impacto será más significativo. Si se quiere buscar un futuro sostenible, se tiene que reconocer y estudiar la relación entre las microrredes y el SEN.

Se debe concientizar acerca la importancia de aplicar múltiples tecnologías según se adapten a la necesidad o a los recursos disponibles, siempre habrá más de una manera de generar una solución. Esta es una de las cualidades de las microrredes, que cuentan con un amplio abanico de tecnologías con las cuales puede generar múltiples configuraciones para llegar a la solución más adecuada. Adicionalmente, esto incita a la tarea principal de la ingeniería que es ofrecer soluciones, y en ese sentido las microrredes tienen la capacidad de adaptarse a distintas aplicaciones.

Este estudio se llevó a cabo intentando tener una visión sostenible, aunque se reconoce que no es tarea fácil querer mantener este enfoque, sobre todo porque no siempre se acostumbra considerar los factores socioambientales en proyectos de investigación o desarrollo, principalmente a nivel estudiantil, una tendencia que por fortuna ha venido ganando fuerza en los últimos años y que definitivamente dirigirá la manera en que estudiamos y desarrollamos la ingeniería, por lo que se incita a mantener esta visión sostenible en trabajos futuros.

Es importante reconocer las limitaciones del presente trabajo y sus posibles áreas de oportunidad. Aunque se tenga una gran cantidad de información, es posible y conveniente profundizar en el estudio de los datos aquí presentados, para generar análisis de relación y conocer de manera más acertada cuales son las implicaciones e impactos de la aplicación de microrredes; es decir, generar información estadística como proyecciones que ayuden a la toma de decisiones en cuanto al desarrollo de estas tecnologías. Todo

esto sería un paso adelante en el estudio de las microrredes, por lo cual tendría que considerarse para trabajos futuros y de ser posible con la intervención de un mayor número de especialistas y con mejores herramientas de estudio.

Incluso se podría profundizar en el estudio de las microrredes a nivel de aplicación, con propuestas más reales, para un caso de estudio específico, donde se haga diseño, selección de equipo, estudios ambientales, y el desarrollo de toda la información necesaria para la implementación de un proyecto de este tipo. Es decir, se podría tomar investigación aquí presentada y enfocarla a una aplicación real, donde se haga uso de los conceptos presentados como energías renovables, sistemas de almacenamiento, sistemas de instrumentación y control, etc.

Además, se logró conocer cuales acciones se pueden empezar a realizar para avanzar en la implementación de microrredes. No necesariamente se habla de desarrollar microrredes con todas las implicaciones que tienen, sino la aplicación de tecnologías relacionadas con las mismas, las cuales de alguna manera irán generando un antecedente necesario para en algún momento llegar a nivel de especialidad que tienen las microrredes. Esto es importante, ya que a veces creemos que la implementación de tecnología es un evento puntual, sin embargo, siempre existe un historial importante que poco a poco va permeando en la sociedad hasta lograr la instalación de tecnologías de vanguardia como las microrredes. Lo que hace algunos años se consideraba poco viable, actualmente es una posibilidad gracias al avance gradual de las tecnologías de las microrredes

Gracias al trabajo desarrollado, se puede asumir que una microrred es un concepto con un futuro prometedor, ya que aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo pero que poco a poco va ganando espacio y relevancia en el sector energético, lo que significa que aún hay mucho por hacer en lo relacionado a las microrredes en México.

## Referencias

2. *Sistemas de Distribución* . (s.f.). Facultad de Ingeniería .

Akhtar, H., Van-Hai, B., & Hak-Man, K. (2019). Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied Energy*, 56-72.

Akinyele, D., Belikov, J., & Levron, Y. (2018). Challenges of Microgrids in Remote Communities: A STEEP Model Application. *Energies*, 1-35.

Alegría, A. (21 de 09 de 2018). Sube 80% tarifa eléctrica industrial. *La Jornada*, pág. 28.

Alexandri Rionda, R., Guerrero Gutiérrez, L. G., Rodríguez Bolaños, F., Ubaldo Higuera, A. d., & Ramos Bautista, A. L. (2016). *Prospectiva del Sector Eléctrica 2016-2030*. Ciudad de México : Secretaría de Energía .

Alexandri Rionda, R., Muñoz Cano, L. A., Guerrero Gutierrez, L. G., & Rodríguez Bolaños, F. (2016). *Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030*. Ciudad de México: SENER.

Alexandri Rionda, R., Villanueva Arcos, E., Muñoz Cano, L. A., & Rodríguez Bolaños, F. (2017). *Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031*. Ciudad de México: Sener.

Alvarado Flores, J. J., Espino Valencia, J., & Ávalos Rodríguez, M. L. (2015). La Necesidad de Incorporar el Hidrógeno como Potencial Fuente Alternativa de Energía en la Legislación Mexicana. *Revista Catalana de Dret Ambiental*, 1-39.

Álvarez Pelegry, E., Larrea Basterra, M., & Suárez Díez, C. O. (2017). Energías renovables en calefacción y refrigeración en los sectores residencial y terciario. *Cuadernos Orkestra*, 56.

Álvaro Hermana, R., & Menéndez Sánchez, J. (2020). *Cuadernos Orkestra - Casos de Microrredes* . San Sebastian: Orkestra Instituto Vasco de Competitividad .

Amjad, Ali, Wuhua, L., Hussain, R., Xiangning, H., & Williams, B. W. (2017). Overview of Current Microgrid Policies, Incentives and Barriers in the European Union, United States and China. *Sustainability*, 1-28.

*Análisis de la red eléctrica del país*. (s.f.). Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/662/4/A4.pdf>

Anderson, E. (2021). *Global Microgrid Market Research and Forecast Report 2021-2026*. Wyoming: IMARC Group.

Anzures Mendoza, C. (2018). *Análisis y Diseño de una Mi*. Chetumal: Universidad de Quintana Roo División de Ciencias e Ingeniería .

Arancibia Bulnes, C., & Best y Brown, R. (2010). Energía del Sol. *Ciencia Revista de la Academia Mexicana de Ciencias* , 10-17.

Arce Peña, N. P. (2017). *Evaluación de Impacto Ambiental Proyecto Agro-Energía para la Sostenibilidad*. México.

AREATECNOLOGIA. (s.f.). *Acumuladores Baterías y Pilas*. Obtenido de AREATECNOLOGIA: <https://www.areatecnologia.com/baterias-y-acumuladores.htm>

AREATECNOLOGIA. (s.f.). *Baterías Para Paneles Solares Fotovoltaicos*. Obtenido de AREATECNOLOGIA: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/baterias-para-paneles-solares.html>

- Ariza Melo, D. F. (2020). Microrredes: Una alternativa sostenible para la universalización de la energía eléctrica. *Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería*, 1-12.
- Ballón, S., Alarcón, A. D., & Perez, L. C. (8 de 4 de 2020). *El impacto en el acceso a la energía eléctrica: el caso de la Chiquitania*. Obtenido de Inter-American Development Bank: <https://blogs.iadb.org/energia/es/impacto-acceso-energia-electrica-caso-chiquitania/>
- Baño Nieva, A. (s.f.). *La Arquitectura Bioclimática: Terminos Nuevos y Antiguos. La Introducción al Diseño de Espacios desde la óptica Medioambiental*. Madrid: Dpto. de Arquitectura de la Universidad de Alcalá de Henares.
- Barragán Reyes, R. M., Arellano Gómez, V. M., & García Gutiérrez, A. (2011). Uso directo de la energía geotérmica en acondicionamiento de espacios: Bombas de Calor Geotérmicas. *Boletín IIE*, 166-168.
- Barrales Alcaín, G. (2016). *Micro-redes Aisladas: Un Desafío para los DSO*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad Pontificia de Madrid.
- Beccerra López, H. R. (2011). Desarrollo y aplicaciones de microrredes eléctricas en México. *Taller sobre Minirredes y Sistemas Híbridos con Energías Renovables en la Electrificación Rural* (pág. 65). Sao Paulo: Instituto de Investigaciones Eléctricas .
- Beltrán Rodríguez, L., Alexandri Rionda, R., Cafaggi Félix, F. d., & Barrera Ríos, S. (2018). *Balance Nacional de Energía 2017*. Ciudad de México: Sener.
- Beltrán Rodríguez, L., Villanueva Arcos, E., Muñozcano Álvarez, L. A., & Rodríguez Aguilar, J. S. (2018). *Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2018*. México: Sener.
- BeltránTelles, A., Morera Hernández, M., López Monteagudo, F. E., & Villela Varela, R. (2017). Impacto futuro de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica. *Ciencia UAT*, 105-117.
- Bester. (12 de 12 de 2018). *Energías Renovables vs Combustibles Fósiles*. Obtenido de Bester Building a sustainable world: <https://bester.energy/energias-renovables-vs-combustibles-fosiles/>
- Black & Veatch. (2016). *Microgrid Design & Execution Handbook A consistent project approach for reliable results*. Kansas: Black & Veatch.
- Bordons, C., García-Torres, F., & Valverde, L. (2015). Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 117-132.
- Buehler, T., & Majumder, R. (2016). Microrredes. Las microrredes reducen los costes y las emisiones y aumentan la fiabilidad. *Revista ABB*, 38-40.
- Buehler, T., & Majumder, R. (2017). Microrredes: menos costos, más eficiencia y fiabilidad. *Energy Management Magazine*.
- Calvin, R., Yeager, K., & Stuller, J. (2008). *Perfect Power - How th Microgrid Revolution Will Unleash Cleaner, Greener and More Abundant Energy* . Mc Graw Hill.
- Camacho Parejo, M. (2012). *Papeles de Cuadernos de Energía - El trilema energético*. Madrid : Club Español de Energía.
- Cano Castillo, U. (1999). Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. *Boletín IIE*, 208-215.

- Cano Castillo, U., & Loyola Morales, F. (2017). *Hidrógeno como Almacén de Energía*. Cuernavaca: INEEL.
- CEMDA. (s.f.). *Proyectos de energía renovable y protección de derechos humanos*. Obtenido de Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C: <https://www.cemda.org.mx/proyectos-de-energia-renovable-y-proteccion-de-derechos-humanos/>
- CENER. (s.f.). *Almacenamiento de Energía*. Obtenido de CENER - Centro Nacional de Energías Renovables: [www.cener.com/areas-de-investigacion/departamento-de-integracion-en-red-de-energias-renovables/areas-de-actuacion-en-red-de-energias-renovables](http://www.cener.com/areas-de-investigacion/departamento-de-integracion-en-red-de-energias-renovables/areas-de-actuacion-en-red-de-energias-renovables)
- CENER. (s.f.). *Introducción a las Microrredes*. Obtenido de Centro Nacional de Energías Renovables : [www.cener.com/introduccion-a-las-microrredes/](http://www.cener.com/introduccion-a-las-microrredes/)
- CFE. (2007). Especificación para la Interconexión a la Red Eléctrica de Baja Tensión de Sistemas Fotovoltaicos con capacidad hasta 30 kW., (pág. 16).
- CFE. (2008). *Interconexión a la Red Eléctrica de Baja Tensión de Sistemas Fotovoltaicos con Capacidad Hasta 30 kW*. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad.
- Chacón Guadalix, J. J. (17 de 2 de 2015). *Las microrredes como herramienta de gestión energética*. Obtenido de OpenMind BBVA: <https://www.bbvaopenmind.com/las-microrredes-como-herramienta-de-gestion-energetica/1/>
- Chacon, D. (2013). Situación de las Energías Renovables en México: Retos y Oportunidades. (pág. 32). Latin American Regional Climate Initiative.
- COGENERACIÓN México. (s.f.). *Cogeneración*. Obtenido de COGENERACIÓN México: [www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=73](http://www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=73)
- Comisión Federal de Electricidad. (2019). Energías Renovables. Interconexión a la red eléctrica. (pág. 20). México: CFE.
- Cota Soto, R., Velázquez Limón, N., González San Pedro, E., & Aguilar Jiménez, J. A. (2016). Microrred aislada para una comunidad pesquera de Baja California, México: Caso de estudio. *Centro de Estudios de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California*, 1-8.
- Covarrubias Hernández, M. Á. (2018). *Diseño de un Sistema de Monitoreo Aplicable a Microrredes*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería - UNAM.
- CRE. (2016). Segunda Parte de la Presentación de la CRE y las Oportunidades Laborales. (pág. 35). Ciudad de México: Comisión Reguladora de Energía.
- Dammert Lira, A., García Carpio, R., & Molinelli Aristondo, F. (2013). Trasmisión Eléctrica . En A. Dammert Lira, R. García Carpio, & F. Molinelli Aristondo, *Regulación y supervisión del sector eléctrico* (págs. 163-211). Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Danish Wind Industry Association. (s.f.). *Generadores de Turbinas Eólicas*. Obtenido de [www.windpower.com:drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower web/es/tour/wtrb/electric.htm](http://www.windpower.com:drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/electric.htm) 1/2
- Dávalos Segura, S., Fernández Canalizo, D., & García Jiménez, H. (2010). *Diseño de un Sistema Generador de Energía Eléctrica Mediante Pedaleo* . Ciudad de México: Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional Autónoma de México.

- Dawoud, S. M., & Xiangning, L. (2015). Study of Hybrid PV-Wind Energy System to Isolated Micro-grid. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 221-231.
- de Alaminos, J., Alcor, E., Asensio, M., Bernadó, R., Fernández, L., Gomez, E., . . . Peiró, J. (2020). *Estudio sobre las microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales*. Madrid: Energía sin fronteras.
- de Castro, M., Ramis, C., Cotarelo, P., & Riechmann, J. (2005). Cambio climático: un reto social inminente. En M. de Castro, C. Ramis, P. Cotarelo, & J. Riechmann, *Cambio climático: un reto social inminente* (pág. 64). Madrid: Centro de Investigación para la Paz (CIP-Ecosocial).
- Dobakhshari, S., Azizi, S., & Ranjbar, A. M. (2011). Control of microgrids: Aspects and prospects. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control.*, 38-43.
- DOE. (2012). *Smart Grid Research & Development Multi-Year Program Plan 2010-2014*. Washington: U.S. Department of Energy (DOE), Office of Electricity Delivery & Energy Reliability.
- Energía a Debate. (5 de 8 de 2020). *Conviene a empresas formar microrredes eléctricas, revela estudio*. Obtenido de Energía a Debate: <https://www.energiaadebate.com/tecnologias/conviene-a-empresas-formar-microrredes-electricas-revela-estudio/>
- Enérgya VM. (1 de 2 de 2020). *¿Qué son las micro redes y por qué serán importantes?* Obtenido de Enérgya VM: <https://www.energyavm.es/que-son-las-micro-redes-y-por-que-seran-importantes/>
- Escobar Mejía, A., & Holguín Londoño, M. (2011). Sistemas de Almacenamiento de Energía y su Aplicación en Energías Renovables . *Scientia Et Technica*, 12-16.
- ESTA International LLC. (2014). *Marco Regulatorio de la Red Eléctrica Inteligente (REI) en México*. Virginia : Comisión Reguladora de Energía.
- Estrada Garcia, J. A., Linan Garcia, R., Picasso Blanquel, C., & Silva Farias, J. L. (2013). Microrredes inteligentes en refinerías, caso México. *Boletín IIE*, 11-17.
- Estrada Gasca, C. A., & Arancibia Bulnes, C. A. (2011). Las energías renovables: la energía solar y sus aplicaciones. *Revista Digital Universitaria*, 1-27.
- Fahad Ziaa, M., Elbouchikhib, E., & Benbouzid, M. (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy*, 1033-1055.
- Fenga, W., Jina, M., Liua, X., Baoa, Y., Marnaya, C., Yaod, C., & Jiancheng, Y. (2018). A review of microgrid development in the United States – A decade of progress on policies, demonstrations, controls, and software tools. *Applied Energy*, 1656 - 1668.
- Fraile, D. (2007). *Cogeneración: Aspectos Tecnológicos*. Madrid: EOI Escuela de Negocios.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2010). *Guía de la Cogeneración* . Madrid : FENERCOM.
- Future Energy. (2015). REMAP 2030: El Potencial Renovable de México . *Future Energy* , 85-91.
- Gaona Garcia, E. E., Morales Vega, T., Trujillo Rodríguez, C., & Santamaría, F. (2016). Esquemas de transmisión de datos en una Microrred a través de una Infraestructura de medición avanzada. *UIS Ingenierías*, 85-92.

- García Fariña, M. (2017). *Mercado de Energía Fotovoltaica de Baja Escala Generación Distribuida*. Ciudad de México: Asociación de Bancos de México (ABM).
- García, R., Magar, V., Moreira, J., Rincón, E., del Río, A., Rodríguez, V., . . . Torres, M. (2020). *Hacia una Transición Energética Sustentable en México*. CONACyT.
- Garrido Echeverroa, N. C. (2010). *Proyecto de Sistema de Energización Sustentable para Huatacondo, Comuna de Pozo Almonte, Región de Tarapacá*. Santiago : Universidad de Chile- Facultad de Arquitectura y Urbanismo- Escuela de Geografía.
- Garzón-Hidalgo, J. D., & Saavedra-Montes, A. J. (2017). Una metodología de diseño de microrredes para zonas no interconectadas de Colombia. *TecnoLógicas*, 15.
- Gaviria Cataño, F. A., & Gómez Leal, J. C. (2018). *Metodología de Optimización para Microrredes Eléctricas en Zonas no Interconectadas* . Sanitago de Cali: Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Occidente .
- GE Reports Latinoamérica. (5 de 1 de 2017). *La energía del futuro: ¡las microrredes y los sistemas digitales están transformando las redes eléctricas!* Obtenido de GE Reports Latinoamérica:  
<https://gereportslatinoamerica.com/la-energía-del-futuro-las-microrredes-y-los-sistemas-digitales-están-transformando-las-redes-el-f52f81827e94>
- Gil Mera, I. (2010). Capítulo 2. Baterías y Supercondensadores. En I. Gil Mera, *Diseño de un Sistema de Almacenamiento de Energía Híbrido Basado en Baterías y Supercondensadores para su Integración en Microrredes Eléctricas* (págs. 20-31). Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros - Universidad de Sevilla.
- Gil, G. (2009). El sector energético en México. Situación actual y perspectivas. *Este País Tendencias y Opiniones* , 8.
- Giraldo, A., Muñoz, A., Rodas, S., Cala, E., Graffe, H., & Pulgarín, S. (s.f.). *Preguntas Frecuentes Transmisión de Energía Eléctrica*. Bogotá: Grupo Energía Bogotá .
- Godínez Enríquez, H. (2020). *Microrredes Eléctricas: Estructura, Análisis y Parámetros Eléctricos*. Cuernavaca: Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería - Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Gómez Asensio, B. (2018). *Estudio de utilidad de energías renovables y su implantación en el ámbito social*. Sevilla : Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad de Sevilla.
- González Cubero, J. (2011). 5 Sistemas de transmisión. En J. González Cubero, *Análisis de los Requisitos Análisis de los Requisitos Parque Offshore de Energía Undimotriz* (págs. 106-137). Sevilla : Universidad de Sevilla .
- González Velasco, J. (2009). *Energías Renovables* . Barcelona: Reverté S. A.
- González, N., Cusgüen, C., Mojica Nava, E., & Pavas, A. (2017). Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales. *Revista UIS Ingenierías*, 93-104.
- GRN. (s.f.). *Optimización Ambiental de Proyectos*. Obtenido de GRN Gestión de Recursos Naturales :  
<https://www.grn.cl/optimizacion-ambiental-proyectos.html>

- Grupo de Integración Ambiental Empresarial S.A. de C.V. . (2006). *manifestación de Impacto Ambiental Sector Eléctrico - Modalidad Particular para el Proyecto. Ampliación de la Planta Hidroeléctrica Las Truchas* . Ciudad de México: Desarrollos Mineros San Luis S.A. de C.V. .
- Guamán Sanchez, C. F. (2017). *Diseño de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur*. Valencia: Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales de Valencia.
- Guerra Menjívar, M. R. (2013). Arquitectura Bioclimática como parte fundamental para el ahorro de energía en edificaciones. *Ing-novación. Revista semestral de ingeniería e innovación de la Facultad de Ingeniería, Universidad Don Bosco*, 123-133.
- Haghia, E., Raahemifar, K., & Fowler, M. (2018). Investigating the effect of renewable energy incentives and hydrogen storage on advantages of stakeholders in a microgrid. *Energy Policy*, 206-222.
- Hansen, L. H., & Lundsager, P. (2000). *Review of Relevant Studies of Isolated Systems*. Roskilde: Risø National Laboratory.
- Haun, A. (21 de 10 de 2019). *Colocación + microrredes: asegurar un futuro sostenible*. Obtenido de DCD: <https://www.datacenterdynamics.com/es/opinion/colocacion-microrredes-asegurar-un-futuro-sostenible/>
- Hernández Ochoa, C. E. (2016). Generación Distribuida. (pág. 11). Ciudad de México: Secretaría de Energía .
- Hernández Romero, A. (2016). 7. Baterías para Almacenamiento de Energía. En A. Hernández Romero, *Análisis económico de un sistema de almacenamiento para la disminución de desvíos de producción en un parque eólico*. (págs. 45-59). Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros - Universidad de Sevilla.
- Hirscha, A., Parag, Y., & Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 420-411.
- IBERDROLA México. (2017). La eficiencia como driver en el diseño de Proyectos de Cogeneración. *Desarrollo de Negocios* (pág. 11). Ciudad de México: IBERDROLA.
- ICOGEN. (s.f.). *Refrigeración Térmica no Convencional* . Obtenido de ICOGEN Eficiencia Energética : [icogen-sa.com/eficiencia-energetica-3/refrigeracion-termica.html](http://icogen-sa.com/eficiencia-energetica-3/refrigeracion-termica.html)
- Impacto Social Consultores. (s.f.). *Panorama 2020 de Energías Renovables en México* . Obtenido de Impacto Social Consultores: <https://impactosocialconsultores.com/blog/>
- INEEL. (2018). *Microrredes eléctricas Tema de discusión, Antecedentes y preguntas guía*. Cuernavaca: Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias .
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2015). *Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (PECC)*. Ciudad de México: Gobierno de la Republica.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2008). *Manual de geotermia*. Madrid: IDAE.
- Instituto Tecnológico del Petróleo y Energía. (6 de 12 de 2018). *El futuro de los proyectos de energía renovable en México*. Obtenido de Noticias de ITPE: <https://blog.itpe.mx/el-futuro-de-los-proyectos-de-energ%C3%ADa-renovable-en-m%C3%A9xico>

- International Renewable Energy Agency. (05 de 10 de 2016). *Solving the Energy Access Problem with Renewable Mini-Grids*. Obtenido de Irena: <https://irena.org/newsroom/articles/2016/Oct/Solving-the-Energy-Access-Problem-with-Renewable-Mini-Grids>
- IRENA. (2015). *Renewable Energy Prospects: Mexico, REmap 2030 analysis*. Abu Dhabi.: IRENA.
- IRENA. (2016). *REmap: Roadmap for a Renewable Energy Future*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA).
- Islas Samperio, J. M., Sánchez Juárez, A., Manzini Poli, F., Grande Acosta, G., González Carrasco, F., & Zenón Olvera, E. (s.f.). *Potencial de los Sistemas Fotovoltaicos en México- Análisis de los sectores Residencial, Público e Industrial por Entidad Federativa*. Temixco: Instituto de Energías Renovables UNAM.
- ITPE. (7 de 2 de 2020). *El impacto de las energías renovables en la sociedad*. Obtenido de Instituto Tecnológico del Petróleo y Energía: <https://itpe.mx/el-impacto-de-las-energias-renovables-en-la-sociedad/>
- Jiancheng, Y., Marnayb, C., Ming, J., Cheng, Y., Liub, X., & Fengb, W. (2017). Review of Microgrid Development in the United States and China. *Energy Procedia*, 1-6.
- Juárez Cervantes, J. D. (1995). *Sistemas de distribución de energía eléctrica*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., & Dimeas, A. (2008). Microgrids Management Controls and Operation Aspects of Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 54-65.
- Khavari, F., Badri, A., & Zangeneh, A. (2020). Energy management in multi-microgrids considering point of common. *Electrical Power and Energy Systems*, 1-9.
- La Energía Eléctrica, Generación, Distribución y Consumo*. (s.f.). El Salvador: Universidad Dr. José Matías Delgado.
- Lache Muñoz, A. (2015). Producción de hidrógeno a partir de energía solar. Panorama en Colombia. *Revista Elementos*, 95-111.
- León Trigo, L. I., Reyes Archundia, E., Gutiérrez Gneccchi, J. A., Méndez Patiño, A., & Chávez Campos, G. M. (2019). Smart Grids en México: Situación actual, retos y propuesta de implementación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 1-12.
- Leyva Ramos, J., & Martínez Cruz, M. (2015). Una alternativa limpia para la generación de energía eléctrica. *Ciencia Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 68-71.
- Lilienthal, P. (6 de 8 de 2018). *Three Phases in Designing Successful Microgrid Projects*. Obtenido de Homer Microgrid News : <https://microgridnews.com/three-phases-in-designing-successful-microgrid-projects/>
- Lundsager, P., Bindner, H. W., Clausen, N.-E., Frandsen, S., Hansen, L., & Hansen, J. C. (2001). *Isolated systems with wind power. Main report*. Dinamarca: Forskningscenter Risoe.
- Madrigal Martinez, M. (2017). Potenciando la Generación Distribuida en México: Nuevos Instrumentos de Regulación. (pág. 12). Ciudad de México: Comisión Reguladora de Energía .
- Marnay, C. (2016). Chapter 3 Microgrids: Finally Finding their Place. En F. P. Sioshansi, *Future of Utilities - Utilities of the Future: How Technological Innovations in Distributed Energy Resources Will Reshape the Electric Power Sector* (págs. 51-74). San Francisco: Academic Press.

- Marnay, C., Chatzivasileiadis, S., Abbey, C., Irvani, R., Joos, G., Lombardi, P., . . . Appen, J. v. (2015). Microgrid Evolution Roadmap Engineering, Economics, and Experience. *Ernest Orlando Lawrence Berkely National Laboratory* , 1-8.
- Martí, R. J. (2015). *El mercado de la energía solar en México*. Ciudad de México: ICEX España Exportación e Inversiones.
- Martín Chicharro, G. J. (2016). *Sistemas de Almacenamiento de Energía*. Valladolid: Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales.
- Martínez Dalmau, A., Fernández Morodo, I., & Reyes Bravo, E. (2012). Potencial competitivo de la cogeneración y beneficios de su desarrollo. (pág. 41). Ciudad de México: PricewaterhouseCoopers Asesores de Negocios, S.L.
- McKinsey & Company. (2021). *Global Energy Perspective 2021*. McKinsey & Company.
- Méndez Treviño, M. E. (2007). *Planificación del Sistema de Distribución de Energía Eléctrica: Técnicas de Optimización*. Sevilla: Escuela Superior de Ingenieros - Universidad de Sevilla.
- Meneses Ruiz, J., Montero Cervantes, J. C., & Godínez Enríquez, H. (2019). Las Microrredes Eléctricas y la Transición Energética de México. *Transición Energética* , 18-22.
- Ministerio de Industria, Energía y Minería . (2014). *Impactos de la Generación de Energía Eléctrica* . Obtenido de Energía Solar: <https://www.energiasolar.gub.uy/index.php/aula-didactica/energia-y-medio-ambiente/impactos-de-la-generacion-electrica>
- Mondragón Navarrete, V., Pineda Jiménez, W., & Trejo González, C. (2015). *Generación de Energía Eléctrica por Imanes de Neodimio* . Ciudad de México: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-Instituto Politecnico Nacional .
- Morales Valdés, R. (2018). ¿Los sistemas fotovoltaicos en México, están listos para una Smartgrid? *Revista de Energías Renovables*, 13-16.
- Nava, D. (15 de 4 de 2019). México tiene reservas de crudo para ocho. *El Financiero*.
- Noriega Giral, L. E., & Rehovot, C. (2009). *Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México*. Ciudad de México: CONUEE/ CRE/ GTZ.
- Núñez Mata, O., Ortiz Villalba, D., & Palma Behnke, R. (2013). Microrredes en la Red Eléctrica del Futuro - Caso Huatacondo. *Ciencia y Tecnología* , 1-16.
- Orduña Landero, M. (2019). Energías limpias y renovables, situación actual y propuestas. *Bien Común* , 34-41.
- Ortiz Villalba, D. E. (2011). *Sistemas SCADA para Micro-redes con Sistemas Híbridos de Generación para Comunidades*. Santiago: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile.
- Osorio Rosado, C. A. (2018). *La Consulta popular ante los impactos ambientales de la construcción de Proyectos Hidroeléctricos en Colombia. Estudio del Caso de la hidroeléctrica El Quimbo*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia,.
- Páez, A. (2011). Energía y ciudad: Un enfoque postambiental. *Biblio 3W Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*, 14.

- Pascual de Vega, S. (2018). *Micro Redes y Redes Inteligentes*. Valladolid: Escuela de Ingenierías Industriales - Universidad de Valladolid.
- Pascual, J. M., Muñoz, M., Corres, J. M., Sanchis, P., & Marroyo, L. M. (2017). Gestión de una microrred electrotérmica: Adquisición de datos, estación de monitorización y control y gestión de base de datos. *Revista española de electrónica*, 109-111.
- Patnaika, B., Mishra, M., Bansal, R. C., & Kumar Jena, R. (2020). AC microgrid protection – A review: Current and future prospective. *Applied Energy*, 1-18.
- Pérez Betin, C., & Pernet, C. (2018). Sistema de medición para micro-red IEEE 13 nodos escalada a 42 V. *16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1-3.
- Pérez Fernández, P. (2017). *Descripción e Infraestructura de una Microrred para un Entorno Residencial*. Valladolid: Escuela de Ingenierías Industriales - Universidad de Valladolid.
- Philippe, J., Beguery, P., & Barto, P. (2017). Microgrid Implementation Challenges and Key Technologies. *Life is On Schneider Electric*, 6.
- Piacente, P. J. (17 de 05 de 2010). *Nuevo sistema para producir y almacenar hidrógeno a partir de la energía solar*. Obtenido de Tendencias de la Ingeniería : [https://www.tendencias21.net/Nuevo-sistema-para-producir-y-almacenar-hidrogeno-a-partir-de-la-energia-solar\\_a4447.html](https://www.tendencias21.net/Nuevo-sistema-para-producir-y-almacenar-hidrogeno-a-partir-de-la-energia-solar_a4447.html)
- Pino Priego, A. (2009). *Aprovechamiento de Recursos Energéticos Renovables no Integrables en la Red Eléctrica - El Caso de la Producción de Hidrógeno*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla.
- PROMÉXICO; GIZ; IER. (2017). *La Industria Solar Fotovoltaica y Fototérmica en México*. Ciudad de México: ProMéxico.
- PV Magazine. (25 de 8 de 2016). *México: Inauguran micro red híbrida aislada en Baja California*. Obtenido de PV Magazine: <https://www.pv-magazine-latam.com/2016/08/25/mxico-inauguran-micro-red-hbrida-aislada-en-baja-california/>
- Ramón Ducoy, F. J. (2012). *Implantación de Energías Renovables en un Planta de Producción de Amoniaco*. Sevilla : Universidad de Sevilla Escuela Superior de Ingenieros .
- Ramos Andino, K. M. (2018). *Estudio de Impacto Ambiental y Social - Proyecto Hidroeléctrico Jilamito*. Honduras: INGELSA.
- Red Ambiental de Asturias . (6 de 12 de 2018). *Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero*. Obtenido de Portal de Medio Ambiente: <https://www.asturias.es/portal/site/medioambiente/menuitem.1340904a2df84e62fe47421ca6108a0c/?vgnnextoid=9d3706e98057d210VgnVCM1000009>
- Renedo, C. J. (s.f.). Otros Ciclos de Producción de Frío. (pág. 33). Santander: Universidad de Cantabria.
- Riaño, E. (2009). Consumo de energía eléctrica por habitante. *Procesos de Ocupación, Poblamiento y Urbanización*, 12.
- Rivas Ascaso, D. M., Sicilia López-Vailo, M. Á., Santamaría Rubio, M., Aguado Alonso, M., & Carrilero Borbujo, I. (2016). *Proyecto LIFE Factory Microgrid: desarrollo e implantación de una microrred en una planta industrial*. Navarra: SMARTGRIDSINFO.

- Rivera, G., Felix, A., & Mendoza, E. (2020). A Review on Environmental and Social Impacts of Thermal Gradient and Tidal Currents Energy Conversion and Application to the Case of Chiapas, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1-18.
- Rodado Nieto, G. (2018). Hidrógeno, un gran aliado para almacenar las energías renovables. *Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias*, 56-59.
- Rojas Blasco, J. (s.f.). Capítulo 1 Red de Distribución de Energía Eléctrica. En J. Rojas Blasco, *Análisis de los requisitos Hardware de un Sistema para la Lectura Remota Automática de Contadores* (págs. 1-46). Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla.
- S. R., L. (s.f.). *Baterías de ion-litio se acercan a su fin*. Obtenido de Ibertrónica: <https://www.ibertronica.es/blog/actualidad/baterias-de-ion-litio-su-fin/>
- Salam, A. A., Mohamed, A., & Hannan, M. A. (2008). Technical Challenges of Microgrids. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 64-69.
- Saltos A., M., Rodríguez G., M., Vázquez P., A., & Castro F., M. (s.f.). Las Microrredes Vistas desde un Sistema de Información Geográfica . *Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas*, 1-9.
- Saltos Arauz, W. M., Vilaragut Llanes, M., & Castro Fernández, M. (2014). Las microrredes y los riesgos de desastres. *Eco Solar*, 1-8.
- Sánchez, L. (2012). Hogares y consumo energético en México. *Revista Digital Universitaria*, 8.
- Sandoval García, E. (2016). Impacto socio-ambiental de las fuentes renovables de energía, un factor clave a resolver para un despliegue masivo de energía limpia en México. *RUDICS*, 39-52.
- Santillan Tituña, A. (2016). *Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- SEGOB. (2013). *Plan Nacional de Desarrollo 2013 - 2018*. Ciudad de México : Secretaría de Gobernación .
- SEGOB. (2014). *Ley de la Industria Eléctrica*. Ciudad de México: Secretaría de Gobernación.
- SEGOB. (2015). *Ley de Transición Energética* . Ciudad de México: Secretaría de Gobernación .
- SEGOB. (2016). *Ley de Impuesto Sobre la Renta*. Ciudad de México: Secretaría de Gobernación .
- SEMARNAT. (2013). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012*. Ciudad de México: Semarnat.
- SEMARNAT. (12 de 2 de 2019). *Impacto Ambiental y Tipos - Criterios de Evaluación*. Obtenido de Semarnat: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/impacto-ambiental-y-tipos/criterios-de-evaluacion>
- SENER . (2014). *Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014 - 2018*. Ciudad de México: Secretaría de Energía .
- SENER. (2016). *ACUERDO por el que se emite el Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad menor a 0.5 MW*. Ciudad de México: Secretaría de Energía .
- SENER. (2018). *Informe pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la industria eléctrica nacional 2017*. Ciudad de México: Secretaría de Energía.

- SENER. (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional PRODESEN 2018-2032*. Ciudad de México : Secretaría de Energía .
- SENER. (11 de 2018). Se realizan las sesiones ordinarias 2018 del consejo consultivo para la transición energética. *Boletín de ENERGÍAS LIMPIAS*, págs. 1-11.
- SENER. (2020). *ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Usode Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética*. Ciudad de México: Secretaría de Energía.
- Shafiee, Q., Dragicevic, T., Quintero, J. C., & Zapata, J. M. (2014). Modeling, Stability Analysis and Active Stabilization of Multiple DC-Microgrids Clusters. *Proceedings of the 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 1284-1290.
- Shah Danish, M. S., Senjyu, T., Funabashia, T., Ahmadi, Mikaeel, Ibrahim, A. M., . . . Sediqi, M. M. (2019). A sustainable microgrid: A sustainability and management-oriented approach. *Energy Procedia*, 160-167.
- Shaikh, P. H., Shaikh, A., Memon, Z. A., Lashari, A. A., & Leghar, Z. H. (2021). Microgrids: A review on optimal hybrid technologies, configurations, and applications. *Internationa Journal Energy Research*, 2564–12597.
- SHCP. (2017). *Acuerdo por el que se autorizan las tarifas finales de energía eléctrica del suministro básico a usuarios domésticos*. Ciudad de México: Secretaría de Hacienda y Crédito Publico.
- SIEMENS. (s.f.). *Microgrid Software as a Service (MSaaS) Innovative and affordable*. Obtenido de SIEMENS: [usa.siemens.com/microgrid](https://usa.siemens.com/microgrid)
- Social Futuro. (5 de 4 de 2019). *Baterías de grafeno, una revolución industrial de presente y futuro*. Obtenido de Social Futuro: <https://www.socialfuturo.com/actualidad-tecnologica/baterias-de-grafeno-promesa-de-futuro-o-presente/>
- Soluciones de Ingeniería Solventa . (s.f.). *Introducción a las Energías Renovables* . Obtenido de Solventa: [www.solventa.com.es](http://www.solventa.com.es)
- Styles, R. (24 de 10 de 2019). *Aplicación viable de microrredes renovables: Caso de Estudio*. Obtenido de Norvento Enerxía: <https://www.norvento.com/blog/caso-estudio-microrredes/>
- Suarez, K. (2014). *Ciclo de Refrigeración*. Obtenido de Física Fluidos y Termodinamicas: <https://athanieto.wordpress.com/tematicas/segundo-principio-de-la-termodinamica/ciclo-de-refrigeracion/>
- Tolón Martín, T. I. (2013). *Operación y Gestión de Microrredes Energéticas Urbanas en un Entorno de Sostenibilidad Energética y Ambiental*. Barcelona: Universidad Politecnica de Barcelona.
- Ton, D. T., & Smith, M. A. (2012). The U.S. Department of Energy’s Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 85-94.
- Torres Barrón, B., González, R., & Adriana. (2013). *Guía Fácil del Marco Normativo de la Cogeneración*. Ciudad de México: CRE / GIZ.
- Torres Reyes, E. (s.f.). *Generación Distribuida con Energías Ranovales para el Desarrollo Regional Sustentable*. Obtenido de Comisión Reguladora de Energía : <https://www.cre.gob.mx//documento/1529.pdf>

- U.S. Department of Energy. (2015). Chapter 3: Enabling Modernization of the Electric Power System. En U. D. Energy, *Quadrennial Technology Review An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities* (págs. 52-99). Washington: U.S. Department of Energy.
- U.S. Department of Energy. (s.f.). *The Smart Grid*. Obtenido de SmartGrid.gov: [https://www.smartgrid.gov/the\\_smart\\_grid/smart\\_grid.html](https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid.html)
- Uche-Soria, M., & Rodríguez-Monroy, C. (2018). Special Regulation of Isolated Power Systems: The Canary Islands, Spain. *Sustainability*, 2572.
- Valbuena, J., Mancera, M., & Pavas, A. (2017). Assessment on Microgrid Reliability Applying Demand Side Management Scenarios. *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL*, 6.
- Valbuena, J., Mancera, M., & Pavas, A. (2017). Evaluación en la Confiabilidad de una Microred aplicando Escenarios de Gestión en la Demanda. *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL*, 1-6.
- Valenciano López, A. (2015). *Estudio de una Microrred Inteligente en la Ciudad de Huesca*. Madrid : Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad Pontificia de Madrid.
- Vásquez, R., Salinas, F., & GIZ. (2018). *Tecnologías del Hidrógeno y perspectivas para Chile*. Santiago: GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit).
- Velázquez Sánchez, R., Sarmiento Uruchurtu, H. G., Silva Farías, J. L., Vidrio López, G., & Nieva Gómez, R. (2010). Introducción al concepto de microrredes. *Boletín IIE Tendencias tecnológicas*, 102-108.
- Verazaluce Silva, J. (2018). *Oportunidades de negocio en el nuevo Mercado Eléctrico Generación Distribuida y Abasto Aislado Unidad de Electricidad*. Ciudad de México: Comisión Reguladora de Energía .
- Villanueva M., E. (2010). Tecnología de las baterías. (pág. 23). Valparaíso : Universidad Técnica Federico Santa María .
- Wimmler, C. (2016). *Towards electrical isolated systems based on 100% renewables*. Porto: Program in Sustainable Energy Systems, Faculty of Engineering, University of Porto.
- Woodford, C. (18 de 08 de 2018). *How do supercapacitors work?* Obtenido de Explain that Stuff: <https://www.explainthatstuff.com/how-supercapacitors-work.html>
- World Economic Forum, Bain & Company. (2017). *The Future of Electricity New Technologies Transforming the Grid Edge*. Davos - Kloster: World Economic Forum.
- Xiaoqian, Z., Qian, A., & Muhammad, Y. (2019). Two kinds of decentralized robust economic dispatch framework combined distribution network and multi-microgrids. *Applied Energy*, 1-16.
- Xingguo, T., Qingmin, L., & Hui, W. (2013). Advances and trends of energy storage technology in Microgrid. *Electrical Power and Energy Systems*, 179-191.
- Yadav, P., Davies, P. J., & Sarkodie, S. A. (2019). The prospects of decentralised solar energy home systems in rural communities: User experience, determinants, and impact of free solar power on the energy poverty cycle. *Energy Strategy Reviews*, 1-12.
- Yusta Fernández, M. J. (2014). *Análisis y Coordinación de una Microrred Eléctrica*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI).

Zhang, L., Wang, S., Zhao, Y., Tang, W., & Zhang, L. (2010). Prospects for and Applications to Microgrid Technology. *IEEE*, 28-31.

Zuñiga Cortés, F. A., Caicedo Bravo, E. F., & López Santiago, D. m. (2016). Gestión óptima de la potencia eléctrica en una microrred conectada, basada en el algoritmo genético para optimización multiobjetivo MOGA. *UIS Ingenierias*, 17-33.