



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

LA GENERACION DISTRIBUIDA A PARTIR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.

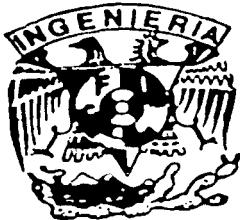
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO ELECTRICO ELECTRONICO

MODULO ENERGIA ELECTRICA PRESENTAN:

ZAYRA LUZ GABRIELA ROMO MERCADO
GRISelda VARGAS VALLE

DIRECTORES DE TESIS: DR. CARLOS VELEZ OCON
DR. PABLO MULAS DEL POZO



MEXICO, D. F.

FEBRERO DE 2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



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.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

**ESTE ESFUERZO SE LO DEDICO
COMO UN TRIBUTO A SU AMOR:**

**A MI MAMÁ
A MI ABUELITA
A MÓNICA
A ROBERTO**

GRISELDA

**DEDICO ESTE TRABAJO
CON TODO MI AMOR
A LAS PERSONAS MÁS
IMPORTANTES DE MI VIDA:**

**MAMÁ, BETITO, THAN
ABUELITA LILA, RODRIGO
REYNALDO**

ZAYRA

AGRADEZCO:

BETITO Y MAMÁ: gracias por su amor y cariño, por la formación que me dieron, la cual ha sido determinante en mi camino y me ha permitido tener grandes satisfacciones en mi vida. Gracias por darme la libertad de decidir desde pequeña y apoyarme en este camino elegido así como acompañarme por mi recorrido. Todas las maravillas recibidas son gracias a su amor.

THAN: mi querido hermano, gracias por tu cariño y apoyo, por aconsejarme con gran inteligencia y madurez, y por toda la alegría que compartimos.

ABUELITA LILA: gracias por tu ejemplo de juventud y vitalidad. Tu fuerza y tenacidad son un motivo de mi admiración. Gracias por tu cariño y apoyo.

RODRIGO: gracias por mostrarme tu cariño, ayuda y nobleza.

REYNALDO: gracias por tu amor y tu deseo de compartir un camino juntos. Te agradezco los momentos felices al igual que esas maravillosas sonrisas que has provocando en mi rostro y que llenan mi corazón.

GRIS: por emprender un maravilloso y enriquecedor trabajo que me permitió formar una valiosa y exigente amistad, la cual deseo que perdure por mucho tiempo.

DR. CARLOS VELEZ OCÓN Y DR. PABLO MULÁS DEL POZO: por guiarnos en este último paso, por su dedicación y paciencia. Gracias por apoyarme en mi búsqueda académica.

ING. JACINTO VIQUEIRA: por revisar nuestro trabajo y mejorarlo con todo su valioso conocimiento. Gracias por inspirarnos a ser buenos y comprometidos ingenieros como usted lo ha hecho con su ejemplo.

ING. LUIS RODRIGUEZ: por brindarnos su invaluable apoyo, además de sus consejos.

FAMILIA CHAVEZ GAZCA: Ana Paula gracias por tu amistad incondicional y por compartir muchos momentos en nuestra querida escuela, y mamá Ana Luisa por su gran apoyo.

ING. FERNANDO ECHEAGARAY MORENO: gracias por su amistad y generosidad. Ha sido un buen ejemplo del cual he podido aprender de su gran experiencia y calidad humana.

A MI UNIVERSIDAD, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA MÉXICO: Por darme la oportunidad de conocer a maravillosas personas con las que pude compartir bellos y divertidos momentos. Salón 133, a la pandilla científica, a mis tres grandotes guardaespaldas, a mis amigos eléctricos y a todos aquellos que conocí a lo largo de mi carrera.

A LA COORDINACIÓN DE SISTEMAS, INSTITUTO DE INGENIERÍA: por las buenas amistades que encontré.

CON MUCHO CARIÑO, ZAYRA

GRACIAS

MAMÁ por tu gran fortaleza, amor incondicional, apoyo permanente, dedicación y cariño. Tus palabras son mi refugio y tu mirada protectora mi horizonte. Te agradezco que me hayas enseñado a levantarme ante la eventualidad, a gozar la felicidad y a aprender de los errores. Siempre serás un ejemplo a seguir durante toda mi vida. Te quiero mucho.

ABUELITA, donde quiera que estés, por todos los años que me regalaste a tu lado. Bolita, todo esto va por ti.

A **MÓNICA**, porque con tu ejemplo me indicaste que la inteligencia no es el único ingrediente para ser feliz.

A mis **Tíos** y a **JUDITH** por jalarme las orejas cuando me lo merezco.

A **JUAN PABLO, ROBERTO, MARIANA** y **SEBASTIÁN, MIS MOUNSTRUOS**, porque siempre logran alegrar mi corazón aún en los peores días con sus ocurrencias.

A **ROBERTO** por toda tu paciencia, comprensión, amor y compañía que me has dado a manos llenas. Fue maravilloso estar contigo durante toda la carrera. Espero que sigamos persiguiendo nuestros sueños codo a codo, porque somos mucho más que dos, por mucho tiempo más. Te amo.

A **ZAYRA** por permitirme construir contigo un trabajo digno pero sobre todo por tu amistad que es de esas que trasciende el tiempo y la distancia.

A mis **AMIGOS**, los de hoy, los de ayer y los de siempre por compartir conmigo la mejor etapa de mi vida. Nunca me olvidaré de ustedes, la pasamos increíble. Gracias.

A mis **MAESTROS** por brindarme sus conocimientos y su amistad sin reparo alguno.

Al **DR. PABLO MULÁS DEL POZO** y al **DR. CARLOS VÉLEZ OCÓN** por ser excelentes directores de tesis, dedicados y comprometidos. Fue un honor trabajar con ustedes.

Al **ING. JACINTO VIQUEIRA LANDA** por contribuir a mejorar este trabajo. Es usted el maestro ideal.

Al **ING. LUIS RODRÍGUEZ VIQUEIRA** por darnos todas las facilidades para trabajar y por la oportunidad de conocer a los **AMIGOS DE LA COORDINACIÓN DE INGENIERÍA DE SISTEMAS**.

Al **ING. FERNANDO ECHEGARAY MORENO** por todo su apoyo, amistad y cariño. Siempre estará presente en mi pensamiento y tendrá mi eterna gratitud.

Al **DR. FRANCISCO VARGAS ARREOLA** por su apoyo.

A la **UNAM**, mi Alma Mater, por su gran generosidad, porque aquí aprendí a valorar las cosas en su justa dimensión y encontré a muchas personas valiosas que todos los días me enriquecieron.

GRISELDA

AGRADECIMIENTOS

A TODAS LAS PERSONAS E INSTITUCIONES QUE SU ATENCIÓN E INFORMACIÓN PROPORCIONADA, NOS AYUDARON A DAR ORIGEN, DESARROLLO Y FIN A LA PRESENTE TESIS, ENTRE ELLOS:

Dr. Pablo Mulás del Pozo, PUE

Dr. Carlos Vélez Ocón, PUE

Ing. Luis Rodríguez Viqueira, Instituto de Ingeniería

Ing. Jacinto Viqueira Landa, Facultad de Ingeniería

Ing. Augusto Octavio Hintze, Facultad de Ingeniería

Ing. Armando Grande, Facultad de Ingeniería

M.C. Georges Naffah Kamel, Grupo CONDUMEX

Ing. Librado Magallanes, CFE

Ing. Julian Adame, CFE

Ing. Vicente Nuñez González, IEEE

M.I Raúl Méndez Albores, LyFC

Ing. Fernando Echeagaray Moreno

Lic. Ana Luisa Gasca Macias

Ing. Ana Paula Chávez Gasca

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Coordinación de Ingeniería de Sistemas del Instituto de Ingeniería

Fundación Telmex

Griselda y Zayra

ÍNDICE TEMÁTICO

INTRODUCCIÓN	I
1. ASPECTOS GENERALES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	
1.1. ¿Qué son las celdas de combustible?	1
1.2. El funcionamiento de las celdas de combustible	2
1.3. Principales tecnologías (tipos de celdas de combustible)	3
1.3.1. Celdas de combustible ácido fosfórico	3
1.3.1.1. Diseño y operación de las PAFC	3
1.3.1.2. Características del funcionamiento de las PAFC	5
1.3.2. Celdas combustible de carbonatos fundidos	6
1.3.2.1. Diseño y operación de las MCFC	6
1.3.2.2. Características del funcionamiento de las MCFC	8
1.3.3. Celdas de combustible de intercambio protónico	10
1.3.3.1. Diseño y operación de las PEMFC	10
1.3.3.2. Características del funcionamiento de las PEMFC	10
1.3.4. Celdas de combustible de óxido sólido	13
1.3.4.1. Diseño y operación de las SOFC	13
1.3.4.2. Características del funcionamiento de las SOFC	14
1.3.5. Cuadro comparativo de las distintas tecnologías	16
1.4. Observaciones finales	18
2. LAS CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE Y DE LOS SISTEMAS DISTRIBUIDOS	
2.0. Introducción general	19
2.1. Definición de sistemas distribuidos	19
2.2. Esquemas de sistemas distribuidos implantados en el mundo	20
2.3. Características de la implementación de celdas de combustible	22
2.3.1. Descripción general del módulo de generación basado en celda de combustible	22
2.3.2. Características de operación	24
2.3.2.1. Características de la salida eléctrica cuando la planta está conectada a la red	25
2.3.2.2. Consumo y composición del combustible	27
2.3.2.3. Capacidades ambientales	28
2.3.2.4. Encendido	28
2.3.2.5. Apagado	29
2.3.2.6. Control	29
2.3.2.7. Mantenimiento	29
2.3.3. Opciones de configuración eléctrica	30

2.3.3. Módulo de enfriamiento	32
2.3.4. Dimensiones e interfaces	33
2.4. Observaciones finales	34
3. NORMATIVIDAD Y PROBLEMAS DE INTERCONEXIÓN	
3.0. Introducción general	35
3.1. Antecedentes históricos	35
3.1.1. Entorno mundial	36
3.1.2. Entorno nacional	36
3.2. Marco legal	38
3.2.1. Artículos de la Ley y Reglamento del Servicio Público de Energía Eléctrica	38
3.3. Normas de apoyo técnico	40
3.4. Interconexión de los productores externos a los sistemas de transmisión y distribución	42
3.4.1. Posibles conflictos de la integración de la generación distribuida	42
3.4.1.1. Regulación de voltaje y pérdidas	43
3.4.1.2. Fluctuaciones de voltaje	45
3.4.1.3. Armónicas	46
3.4.1.4. Impacto sobre los niveles de corto circuito	47
3.4.1.5. Islas	47
3.4.1.6. Aislamiento intencional de la red	49
3.4.1.7. Interfaces de los transformadores y aterrizamiento	50
3.5. Políticas de operación y protección	52
3.6. Prácticas de recierre en líneas de transmisión o distribución que tienen productores externos (permisionarios)	53
3.7. Aspectos técnicos	53
3.8. Observaciones finales	55
4. IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA A PARTIR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	
4.0. Introducción general	58
4.1. Integración de generación distribuida en un sistema típico de distribución	58
4.1.1. Visualización de un sistema eléctrico de potencia con generación distribuida	59
4.1.2. Operación del esquema de lazo	60
4.1.2.1. Operación de los tres interruptores en el esquema de lazo	61
4.1.2.2. Operación del sistema con cinco interruptores en el esquema de lazo	62
4.1.3. Operación del esquema de lazo con unidades de generación distribuida	63

4.1.3.1. Diseño del esquema de lazo y operación con generación distribuida	63
4.1.4. Requerimientos de protección	66
4.1.4.1. Detección de fallas	66
4.1.5. Nuevos interruptores, sistemas de control y relevadores multifuncionales	67
4.2. Impacto en la planeación	67
4.2.1. Beneficios en la planeación con generación distribuida	68
4.3. Impacto ambiental de la generación distribuida a partir de celdas de combustible	71
4.3.1. Estimaciones del impacto ambiental de la generación distribuida basada en celdas de combustible	73
4.3.2. Comparación de las emisiones contaminantes	75
4.4. Observaciones finales	77
5. ANÁLISIS DE COSTOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE Y COMPARACIÓN DE ÉSTOS CON OTROS TIPOS DE CENTRALES GENERADORAS	
5.0. Introducción general	78
5.1. Análisis de costos	78
5.1.1. Costo del kilowatt instalado	78
5.1.2. Costo anual de inversión y costo fijo anual	79
5.1.3. Costo variable de operación por kWh y del costo variable anual por kW en función del factor de planta	82
5.1.4. Costo anual total	85
5.1.5. Costo del kilowatt – hora generado	86
5.2. Escenarios propuestos	87
5.2.1. Primer escenario	88
5.2.2. Segundo escenario	89
5.2.3. Tercer escenario	90
5.3. Comparación entre las distintas tecnologías	91
5.4. Comparación entre los distintos escenarios para celdas de combustible	91
5.5. Recuperación de la inversión	93
5.6. Observaciones finales	97
6. CONCLUSIÓN	99
ANEXO 1	102
ANEXO 2	108

LA GENERACIÓN ELÉCTRICA DISTRIBUIDA A PARTIR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

INTRODUCCIÓN

Objetivo: Estudio de viabilidad para la introducción de los sistemas basados en celdas de combustible como fuentes de generación eléctrica distribuida en los sistemas eléctricos convencionales.

Definición del problema

1.1 Entorno actual

La energía eléctrica es un pilar fundamental de nuestra sociedad moderna, quizá el más importante. La indiscutible correlación entre disponibilidad de energía eléctrica, prosperidad y progreso hace que la electricidad ocupe un lugar muy alto en la lista de prioridades en la mayoría de los países. Su generación, transmisión y distribución solían estar reservadas en el pasado a monopolios integrados verticalmente tanto públicos como privados.

En la actualidad resulta cada vez más difícil la ampliación de los sistemas de transmisión y distribución, por la oposición de la población al establecimiento de nuevos derechos de vía. Por otra parte, el costo unitario de pequeñas plantas generadoras ha estado disminuyendo en forma apreciable. Aunado a estas tendencias, el uso cada vez más generalizado de sistemas de cómputo requiere un suministro de electricidad de alta calidad que no siempre se puede obtener de la red eléctrica. Por todo ello, existe un gran interés en la utilización de la generación distribuida.

Una de las alternativas que por su eficiencia y bajo impacto ambiental cubre los requerimientos actuales es el uso de las celdas de combustible como generadoras de energía eléctrica.

Las celdas de combustible pueden convertir el hidrógeno y el oxígeno en electricidad, calor y agua. Las celdas de combustible son similares a las baterías, ya que ambas utilizan un proceso electroquímico para producir

corriente continua. Pero, a diferencia de las baterías, las celdas de combustible convierten directamente en electricidad, por un proceso electroquímico, la energía contenida en un combustible rico en hidrógeno y funcionan mientras se mantiene el flujo de combustible. Las celdas de combustible se caracterizan por el tipo de electrolito utilizado, algunos ejemplos son las celdas alcalinas, las de membrana de intercambio de protones, las de ácido fosfórico, las de carbonatos fundidos y las de óxido sólido. Dependiendo del electrolito, la celda de combustible funciona a una temperatura de entre 80° y 1200° C. Si se prescinde del calor producido, la eficiencia de una celda de combustible puede variar entre el 40 y el 60%. Si se aprovecha el calor producido, la eficiencia alcanza el 80%.

Los beneficios de las celdas de combustible son fundamentales. A continuación se incluye un resumen sobre tales beneficios:

A) Limpias y Eficientes: Las celdas de combustible podrían reducir de manera dramática la contaminación del aire urbano.

El Departamento de Energía de EUA proyecta que si tan sólo un 10% de los autos de este país fueran movidos por celdas de combustibles, los contaminantes (bajo regulación) del aire serían reducidos un millón de toneladas al año y que 60 millones de toneladas de dióxido de carbono (uno de los gases causantes del efecto invernadero) serían completamente eliminados. DOE proyecta que el mismo número de autos con celdas de combustible reducirían unos 800,000 barriles diarios de las importaciones de petróleo – alrededor de 13% del total de importaciones.

B) Seguridad Energética La dependencia energética de algunos países como los EUA es más alta ahora que durante la "crisis del petróleo" de los setentas y las importaciones de crudo van en aumento. Solamente los vehículos de pasajeros consumen alrededor de 18 millones de barriles diarios de petróleo, equivalente al 85% de las importaciones del mismo país.

Por otro lado en la actualidad existen diversos proyectos a nivel internacional de investigación que nos permiten suponer la gran importancia que están adquiriendo las celdas de combustible

1.2 Descripción del problema a resolver

El problema se está limitado por los siguientes puntos:

- Conocer las tecnologías más avanzadas en celdas de combustibles
- Analizar los problemas técnicos para la interconexión de nuevos centros de generación eléctrica de corriente continua hacia la red central eléctrica de corriente alterna.
- Establecer claramente los requerimientos técnicos necesarios que debe cumplir un productor independiente al vender la energía generada con celdas de combustible.
- Definir diferentes esquemas en los cuales los particulares puedan integrarse a la red eléctrica.
 - Generar energía eléctrica para vender a la red eléctrica
 - Generación de autoconsumo y con la posibilidad de tener el respaldo de la red central eléctrica y vendiendo los excedentes
 - Generación de autoconsumo y sin respaldo de la red
- Conocer el impacto posible de la generación eléctrica por medio de celdas de combustible en la generación de la red central eléctrica
- Analizar el impacto en el proceso de expansión del sistema eléctrico de potencia
- Analizar la viabilidad económica de su utilización

1.3. Relevancia

Conocer las características eléctricas y térmicas de las celdas de combustible para que sean conectada al sistema de eléctrico actual con el fin de fomentar su uso como una opción válida para generar electricidad y reducir así las emisiones de CO₂.

El análisis resultante será el antecedente indispensable para hacer cambios sustanciales en la generación de energía eléctrica, así como su distribución y transmisión. Además dicho análisis podrá servir para conocer los aspectos relacionados a la integración de fuentes generadoras de corriente directa hacia la red eléctrica de corriente alterna, tomando como elementos de estudio la normatividad que deberá seguir un productor independiente al integrarse a la red central eléctrica, el posible impacto en la red central, así como las diferentes modalidades de integración a la red.

Se espera que la generación distribuida proporcione una alternativa al modo en que las compañías suministran electricidad a los consumidores y al mismo tiempo reduzca las inversiones, mejore la calidad del servicio, reduzca los costos así como las emisiones contaminantes.

También podrá influir de forma significativa en la planificación de los futuros sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. La generación distribuida permitirá situar la generación y almacenamiento de electricidad lo más cerca posible del punto de consumo, con mayor eficiencia de conversión y un impacto ambiental mínimo.

En el caso de las nuevas instalaciones, la forma más directa de comparar la generación distribuida y la generación centralizada es considerar la eficiencia, que para las grandes unidades de generación eléctrica varía entre el 28% y el 50% dependiendo del tipo y edad de la unidad. Esto significa que las centrales convierten energía eléctrica útil el 28-50% de la energía contenida en el combustible. Los sistemas pequeños de generación distribuida, que pueden ser aplicados modularmente de forma escalonada, reducen los riesgos financieros del propietario de la red. Con la utilización de las celdas de combustible para la generación de electricidad, alcanzan una eficiencia estimada del 40 o mayor.

Por otra parte debido a la necesidad de aumentar la infraestructura eléctrica se vislumbra la necesidad de contar con otro tipo de esquemas de inversión que se adecuen a la realidad económica de nuestro país. El alto costo por kW de la ampliación de un sistema eléctrico, incluyendo transmisión y distribución, constituye uno de los incentivos para la aplicación de la generación distribuida. Dado que la utilización de celdas de combustibles son unidades de tamaño pequeño, los sistemas se irán construyendo de forma aditiva, lo que permitirá evitar los altos costos iniciales y favorecerá un rápido retomo de la inversión.

1.4. Relación con otras áreas

Para realizar nuestro estudio será conveniente apoyarnos en diversas áreas que inciden en el análisis y solución del problema a tratar, las cuales son:

- ❖ Sistemas eléctricos de potencia
- ❖ Electrónica de potencia
- ❖ Normatividad mexicana
- ❖ Calidad de la energía
- ❖ Impacto ambiental

1.5 Método

Se reunirá información sobre la experiencia mundial, los problemas pendientes y documentos de las naciones sobre la implementación de los sistemas de generación distribuida a partir de celdas de combustible.

Posteriormente, basados en la información obtenida construiremos un panorama claro y completo. A partir de dicho panorama aplicaremos la información al caso de los sistemas eléctricos mexicanos, identificando los problemas específicos y proponiendo soluciones posibles.

Es importante mencionar que no es posible seguir los mismos lineamientos de los programas que se han creado en otros países porque no existe uniformidad en la distribución puesto que las características de ésta varían de un país a otro.

Inventario de materias

- Electricidad y magnetismo
- Análisis de circuitos eléctricos
- Dispositivos y circuitos electrónicos
- Energía e impacto ambiental
- Electrónica de potencia
- Sistemas Eléctricos de Potencia 1
- Sistemas Eléctricos de Potencia 2
- Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia
- Subestaciones Eléctricas
- Plantas Generadoras
- Costos y evaluación de proyectos

1.6 Resultados esperados

Se espera obtener los lineamientos generales para la integración de la generación via celdas de combustible en los sistemas de transmisión y distribución eléctricos. De igual forma se pretende puntualizar las limitaciones que han impedido su realización así como los posible obstáculos inmediatos a resolver

También se pretende determinar el potencial de las celdas de combustible como fuentes fijas de generación de energía. Así como ofrecer un panorama claro sobre el estado del arte de la tecnología y de los aspectos económicos en la actualidad.

Este estudio ayudará a tener una visión general de una posible solución al incremento en la demanda de energía eléctrica que se presenta actualmente.

1.7 Abreviaciones

PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cells, Celda de combustible de ácido fosfórico
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cells, Celda de combustible de carbonatos fundidos.
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Celda de combustible de intercambio protónico
SOFC	Solid Oxide Fuel Cells, Celda de combustible de óxido sólido
LHV	Lower Heating Value
HHV	Higher Heating Value
PC25	Celda de combustible de ácido fosfórico de 200 kW
DOD	Departamento de Defensa de E.U.A.
CFE	Comisión Federal de Electricidad
PPIEE	Planta de Producción Independiente de Energía Eléctrica
CRE	Comisión Reguladora de Energía
PEMEX	Petróleos Mexicanos
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ANSI	American National Standard Institute
IEC	International Electrotechnical Commission
SCR	Rectificador Controlado de Silicio
IGBT	Transistor Bipolar de Compuerta Aislada
THD	Total Harmonic Distortion
LyFC	Luz y Fuerza del Centro
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
EL	Esquema de lazo
PG&E	Pacific Gas and Electric Company
LP	Livermore – Pleasanton
DSM	Designed Demand-Side Management
DOE	Department of Energy
IFC	International Fuel Cells Corporation
TA-Luft	Norma Alemana de Emisiones

1. ASPECTOS GENERALES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

1.1 ¿QUÉ ES UNA CELDA DE COMBUSTIBLE?

Aunque el primer desarrollo científico de las celdas de combustible fue alrededor de 1839, tomó 120 años antes de que la NASA demostrara algunas de sus aplicaciones posibles en generación de electricidad durante un vuelo espacial. Como resultado de estos éxitos, en los años sesenta, la industria empezó a reconocer el potencial comercial de celdas de combustible, pero encontró barreras técnicas y altos costos de inversión.

Las celdas de combustible no eran económicamente competitivas en comparación con las tecnologías de generación de electricidad existentes. Pero a partir de 1984, la Oficina de Tecnologías en Transporte del Departamento de Energía de los Estados Unidos ha apoyado la investigación y desarrollo de tecnología de celdas de combustible y, como resultado del avance tecnológico obtenido, cientos de compañías alrededor del mundo están trabajando con el fin de obtener una celda de combustible económicamente atractiva. Las compañías realizan un esfuerzo técnico - económico para obtener un producto con características de alto desempeño, fiabilidad, durabilidad, costo bajo, y beneficios medioambientales¹

Una celda de combustible es esencialmente una batería primaria de alimentación continua. La electricidad es generada a partir de un proceso de electrólisis inversa para lo cual requiere Hidrógeno y Oxígeno. Este proceso se realiza en forma silenciosa, sin combustión y prácticamente no produce emisiones contaminantes. Además los subproductos generados son agua y calor

La celda de combustible produce corriente directa como una batería, pero al contrario de una batería, nunca se descarga, la celda sigue produciendo energía mientras se siga alimentando Hidrógeno y Oxígeno

Las celdas de combustible fueron desarrolladas para ser utilizadas en el programa espacial, con el fin de proveer electricidad y agua para los astronautas. Una de las nuevas aplicaciones en las que han sido utilizadas son las terrestres y pueden clasificarse en diferentes categorías dependiendo de su uso: para transporte, estacionarias (generación distribuida) o generación portátil.

El sector eléctrico puede ser un lugar donde la aplicación de celdas de combustible incrementaría rápidamente la comercialización del dispositivo. Esto se debe a su alta eficiencia y la facilidad de introducirlas en sistemas ya interconectados. Utilizando las celdas de combustible para la red eléctrica se podría incrementar la eficiencia energética en la generación a un 60% mientras que se reducirían, al mismo tiempo, las emisiones contaminantes.

Las celdas de combustible son sistemas simples, fiables y silenciosos. Requieren el mínimo servicio de mantenimiento y atención. En la mayoría de las celdas el combustible primario es Hidrógeno, el cual puede provenir del gas natural, aunque otros combustibles pueden ser utilizados, como el gas obtenido de la basura, propano u otros combustibles ricos en Hidrógeno. Los anteriores combustibles son reformados antes de entrar a la pila de la celda.

1.2 EL FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible consiste en dos electrodos separados por un electrolito. El Oxígeno pasa sobre un electrodo y el Hidrógeno sobre el otro. Cuando el Hidrógeno es ionizado pierde un electrón y al ocurrir esto tanto el ion de Hidrógeno como el electrón toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El ion de Hidrógeno migra hacia el otro electrodo a través del electrolito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor exterior. Este proceso producirá agua, corriente eléctrica y calor. Para generar cantidades utilizables de corriente las celdas de combustible son apiladas en varias capas.

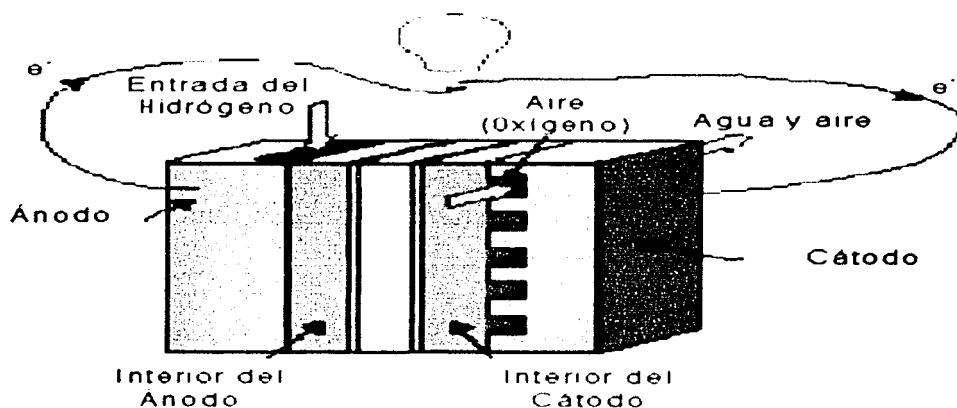


Figura 1. Esquema sobre el funcionamiento de las celdas de combustible basado en una celda de membrana de intercambio protónico

1.3 PRINCIPALES TECNOLOGÍAS (TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE)

Las celdas de combustible son una familia relativamente pequeña de tecnologías diferenciadas principalmente por los tipos de electrolitos utilizados, las temperaturas de operación y la construcción de los electrodos. Actualmente, se concentra la atención en las celdas de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC), las de carbonatos fundidos (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC*), las de membrana de intercambio protónico o polímero sólido (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC*) y las de óxido sólido (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC*). Cada una de estas tecnologías tiende a ser más adecuada para ciertas aplicaciones.

En los siguientes puntos se describe el funcionamiento de los tipos de celdas de combustible más representativos². Posteriormente se muestra un cuadro comparativo de los diversos tipos de tecnologías.

1.3.1 Celdas de combustible de ácido fosfórico

Las celdas de ácido fosfórico (PAFC) son la tecnología más desarrollada de celdas de combustible en términos de investigación y comercialización. Esta tecnología se ha estado impulsando durante más de 20 años. Además se han aportado inversiones de gran magnitud (un poco más de \$500 millones de dólares) por gran número de países a su investigación, desarrollo y programas de demostración.

Esta clase de celdas tiene gran auge porque es la única tecnología, entre las celdas de bajas temperaturas, que ha mostrado relativa tolerancia a combustibles reformados de hidrocarburos y por lo tanto estas celdas pueden ser empleadas en muy variadas aplicaciones.

1.3.1.1 Diseño y operación de las PAFC

Las PAFC emplean ácido fosfórico como electrolito. El ácido fosfórico está contenido en una matriz de carburo de silicio recubierto de teflón. Los pequeños poros de la estructura de la matriz mantienen el ácido en su lugar mediante una acción capilar. Sin embargo, una porción del ácido puede combinarse con el combustible o en el flujo de oxidación. Por otra parte, los electrodos de carbón poroso catalizados con Platino son usados tanto en el ánodo como en el cátodo.

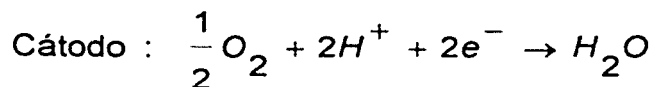
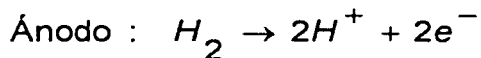
Los gases del oxidante y del combustible son alimentados por detrás de los electrodos por medio de surcos paralelos formados dentro de las placas de Carbono. Estas placas son conductoras y llevan los electrones del ánodo al cátodo de la celda

adyacente. En la mayoría de los diseños las placas son bipolares, si es que tienen surcos en ambos lados; un lado alimenta el combustible al ánodo de una celda mientras el otro lado suministra aire u Oxígeno al cátodo de la celda adyacente.

El subproducto es agua y ésta es removida en forma de vapor en el lado del cátodo de cada celda junto con el exceso de oxidante. Este procedimiento para remover el agua necesita que el sistema sea operado a temperaturas alrededor de los 190 ° C. A menores temperaturas el agua se puede disolver en el electrolito y entonces no puede ser removida en forma de vapor. A 210 ° C el ácido fosfórico comienza a descomponerse.

El exceso de calor se remueve de la pila de celdas por medio de canales de enfriamiento en las placas de carbono cada cierto número de celdas. Se puede utilizar aire o un líquido refrigerante como agua para que pase a través de los canales disipando el calor.

Las reacciones en las PAFC son:



En el ánodo, el Hidrógeno se descompone en dos iones H⁺, los cuales pasan a través del electrolito al cátodo y dos electrones que pasan a través del circuito externo al cátodo. En el cátodo los electrones y el Oxígeno se combinan con los iones H⁺ para formar agua.

¹ Por sus siglas en inglés

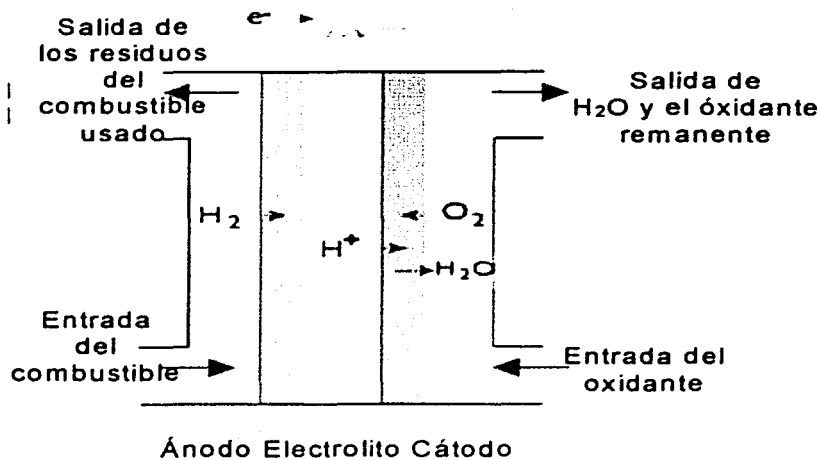


Figura 2. Esquema del funcionamiento de las PAFC

1.3.1.2 Características del funcionamiento de las PAFC

Las plantas de generación de PAFC tienen eficiencias que van del 42% (Lower Heating Value, LHV) hasta 36% (Higher Heating Value, HHV). Los diseños de alta eficiencia operan con reactivos presurizados. El diseño de alta eficiencia presurizado requiere más componentes y por lo tanto es más costoso. Una parte de esta energía térmica puede ser alimentada a temperaturas que van desde 120 ° C a 149 ° C. Sin embargo, la mayoría de la energía térmica es suministrada a 65 ° C. Las PAFC tienen una densidad de potencia de 1722 a 1830 W/m².

Por otro lado las PAFC son muy confiables. Algunas han operado por más de 9000 horas sin ningún tipo de mantenimiento o intervención humana. Un problema con las PAFC es su baja densidad de potencia. Para que estas plantas sean rentables se necesita que sean desarrolladas técnicas de manufactura baratas.



Figura 3. Instalación de varias celdas de combustible de ácido fosfórico en Alaska por parte de International Fuel Cells en colaboración con el Departamento de Defensa norteamericano

1.3.2 Celdas de combustible de carbonatos fundidos

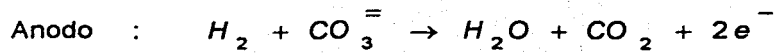
Las celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC) evolucionaron a partir de un trabajo de los años sesenta dirigido a producir una celda de combustible que pudiese operar con carbón. Aunque la operación con carbón parece poco probable en nuestros días, la operación con combustibles derivados del carbón o con gas natural es muy factible.

1.3.2.1 Diseño y operación de las MCFC

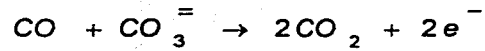
Las MCFC emplean una mezcla de sales de carbonatos fundidos como electrolito. La composición del electrolito varía pero usualmente está constituido por carbonato de Litio y de Potasio. Opera a una temperatura cercana a los 650 ° C, la mezcla de sales es líquida y es un excelente conductor iónico. El electrolito está suspendido en una matriz de cerámica aislante y químicamente inerte (LiAlO_2).

Las reacciones en la MCFC son:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



y



El proceso del ánodo involucra una reacción entre el Hidrógeno, el monóxido de Carbono y los iones de carbonato ($\text{CO}_3^{=}$) del electrolito a partir de los cuales se produce agua y dióxido de Carbono (CO_2) mientras se liberan electrones. El proceso en el cátodo combina Oxígeno y CO_2 del flujo oxidante con electrones del cátodo para producir iones de carbonato los cuales ingresan al electrolito. El hecho de tener CO_2 en el flujo oxidante requiere un sistema para recolectar dióxido de Carbono del ánodo y para mezclarlo con el flujo que alimenta el cátodo.

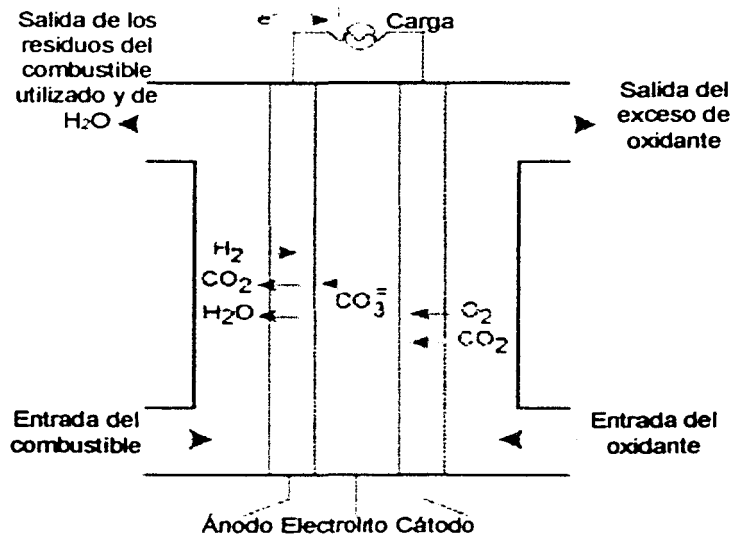


Figura 4. Esquema del funcionamiento de las MCFC

1.3.2.2 Características del funcionamiento de las MCFC

Cuando la temperatura de operación se incrementa, el voltaje teórico de operación para la celda decrece y se obtiene una mayor eficiencia. Por otro lado al incrementar la temperatura de operación aumenta la tasa de la reacción electroquímica y por lo tanto la corriente obtenida también se incrementa. El efecto neto en la MCFC es que el voltaje de operación real es más alto que el de una PAFC con la misma densidad de corriente.

Este alto voltaje de operación de la MCFC significa que mayor energía está disponible y por lo tanto la eficiencia de este tipo de celdas es mucho más grande que el de una PAFC que tenga el mismo tamaño en cuanto a sus electrodos. Puesto que las dimensiones de los electrodos determinan en gran medida el costo de la celda, se puede inferir que una MCFC es de menor tamaño será más barata y constituye una mejor inversión comparada con una PAFC de las mismas características.

Por otro lado una MCFC también produce un exceso de calor a una temperatura a la que es posible obtener vapor a alta presión, el cual podría ser utilizado para mover una turbina y así generar electricidad adicional. Por todo lo anterior se ha previsto que los sistemas de MCFC podrán tener una eficiencia global alrededor del 60%. si se emplea el esquema de ciclo combinado para utilizar el calor de desecho de la celda

La MCFC necesita operar entre 600 ° C y 650 ° C porque en este rango el electrolito tiene la conductividad requerida para este sistema. Para enfriar la celda se pasa un gran volumen de aire a través del cátodo manteniéndose la temperatura de operación. A 650 ° C la mezcla de sales es líquida y es un buen conductor. El desempeño de la celda es muy susceptible a la temperatura de operación. Un cambio de temperatura de 650 ° C a 600 ° C produce una caída del voltaje de casi un 15 %.

Al operar a una temperatura de 650 ° C, se puede prescindir de catalizadores de metales nobles. El ánodo es un material altamente poroso incrustado con Níquel pulverizado y con aleación de Cromo para prevenir el deslizamiento y la aglomeración a las temperaturas de operación. El cátodo es un material de óxido de Níquel poroso dopado con Litio. Se han desarrollado nuevas tecnologías para crear estructuras de electrodos que permitan en un momento dado la ebullición del electrolito durante la operación.

Las celdas de carbonatos fundidos pueden alcanzar eficiencias de 50%, que es considerablemente mayor a las logradas por las celdas de ácido fosfónico.

La primera celda de carbonatos fundidos a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración fueron terminadas para su prueba en California en 1996.



Figura 5. Interior del módulo de las celdas de combustibles MCFC desarrollado por Energy Research Corporation

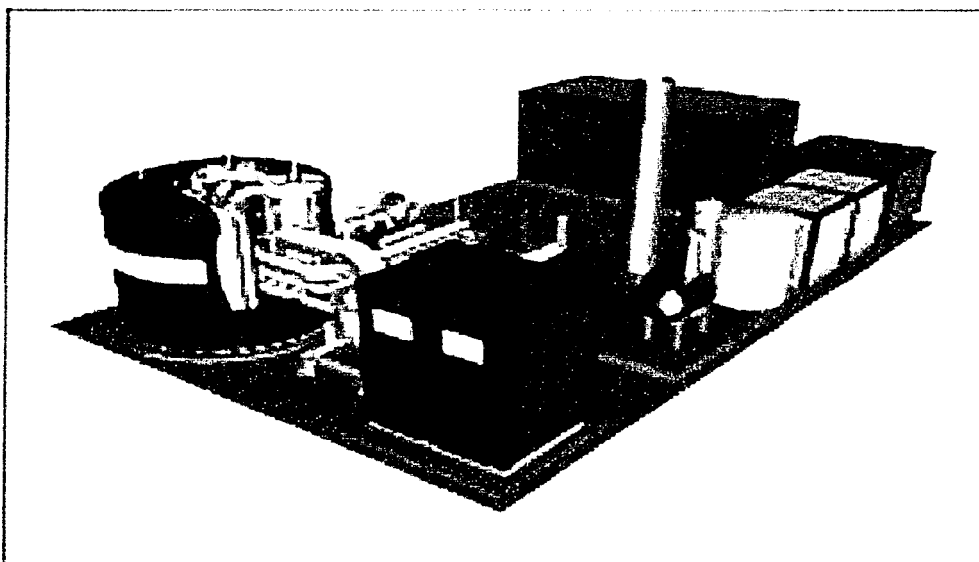


Figura 6. Maqueta de una MCFC de 1.5 MW, desarrollada por Fuel Cell Energy, Inc.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.3.3 Celdas de combustible de intercambio protónico

La celda de intercambio protónico (PEMFC) ofrece una densidad de potencia mayor en comparación con los otros sistemas de celdas. La PEMFC puede operar con combustibles de hidrocarburos reformados y con aire. El uso de un electrolito de estado sólido elimina la corrosión y los problemas asociados con los electrolitos líquidos. Su temperatura de operación es baja y facilita el encendido inmediato del sistema. Además no exige ninguna protección térmica para proteger al personal.

1.3.3.1 Diseño y operación de las PEMFC

Las PEMFC usan como electrolito una membrana polimérica. Esta membrana es un aislante eléctrico así como también un excelente conductor de iones de hidrógeno. El material usado hasta la fecha consiste de un polímero fluorocarbonado, tipo teflón, al cual se le han amarrado grupos de ácidos sulfónicos. Las moléculas del ácido están fijadas en el polímero y no pueden escapar, pero los protones de estos ácidos sí tienen libertad de migrar a través de la membrana. Con el electrolito en forma de un polímero sólido, no existe el problema de pérdida de electrolito que limita la vida útil de la celda.

La membrana de electrolito es una hoja delgada que puede manejarse fácil y seguramente. El ánodo y cátodo son preparados aplicándoles una cantidad pequeña de Platino a una superficie de la hoja delgada porosa, estos a su vez son envueltos con papel grafitado poroso el cual ha sido impermeabilizado con teflón. El electrolito se intercala entonces entre el ánodo y cátodo, y los tres componentes se sellan juntos bajo condiciones de calor y presión para producir un solo "ensamble de membrana/electrolito" (MEA). Este ensamble que es el corazón de la célula de combustible tiene menos de un milímetro de espesor.

Por otra parte, el ánodo y cátodo hacen contacto por la parte de atrás en donde se tienen los canales. Las columnas entre los canales hacen contacto eléctrico con la parte de atrás de los electrodos y dirigen la corriente al circuito externo. Los canales proporcionan combustible al ánodo y oxidante al cátodo.

1.3.3.2 Características del funcionamiento de las PEMFC

Las reacciones del electrodo en la PEMFC son análogas a las que se producen en las PAFC. El Hidrógeno es suministrado al ánodo, produciendo iones de Hidrógeno que entran al electrolito y electrones que viajan al cátodo por circuito. En el cátodo, se combina el Oxígeno suministrado en el mismo, con los iones de Hidrógeno del electrolito y los electrones, para producir agua. Cuando el PEMFC opera a alrededor de

los 80°C, el agua está en estado líquido y es llevada fuera de la celda de combustible arrastrada por el flujo del oxidante excedente.

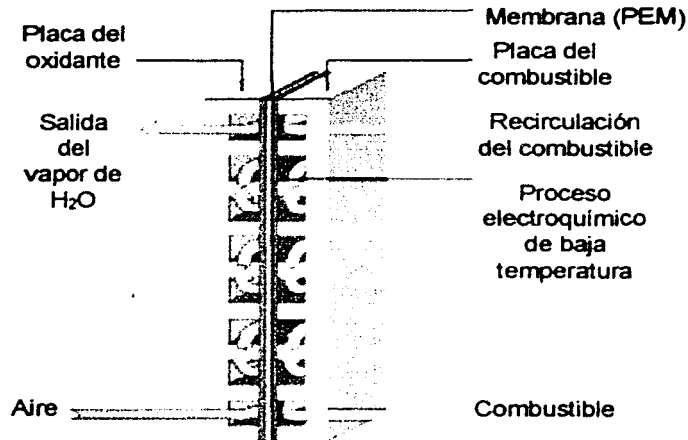
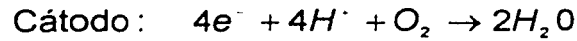
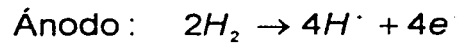


Figura 7. Funcionamiento de una PEMFC diseñada por Ballard

El desempeño de las PEMFC ha mejorado durante los últimos años. Se han logrado densidades alrededor de 9150 A/m² a 0.7 V/celda unitaria bajo las condiciones de 4.5 atm, aproximadamente, de Hidrógeno y Oxígeno, y se obtienen más de 5380 A/m² para aire en lugar de Oxígeno a la misma presión

Por otra parte, en la celda de combustible, la eficiencia es determinada por el voltaje al que ésta opera. La ventaja de la PEMFC es que tiene una densidad energética volumétrica mayor a las otras tecnologías

Además del Hidrógeno puro, las PEMFC pueden ser operadas también con combustibles de hidrocarburos reformados sin remover el CO₂. Pero las pequeñas cantidades de CO producidas durante el proceso de reformación deben ser convertidos a CO₂ por un proceso de oxidación selectivo antes de que el gas de combustible entre a la celda unitaria de combustible, ya que grandes concentraciones de CO disminuyen la vida útil del electrolito. Éste es un proceso catalizador simple que puede integrarse fácilmente en un sistema de suministro de combustible

Las PEMFC puede operar con aire. Como en todas las celdas de combustible, el desempeño es mejorado al presurizar el aire. Esto se verá reflejado en la relación existente entre la energía y el costo financiero asociado con comprimir aire a las presiones más altas y mejorar el desempeño. Pero por otro lado, las presiones arriba de 3 atm no son ventajosas para la mayoría de las aplicaciones.

Debido a que la PEMFC usa un electrolito sólido, un diferencial de presión significativo puede ser mantenido entre los electrodos. Esto permite el funcionamiento del PEMFC con baja presión del combustible y la presión del aire más alta dando como resultado un mejor desempeño.

Una de las ventajas de las PEMFC al operar a temperaturas bajas y utilizar un electrolito sólido es que es posible tener más de 50,000 horas de vida útil. Lo anterior fue demostrado durante el programa de la NASA.

El rango de operación de temperaturas de las PEMFC oscila entre 70°C y 85°C. La baja temperatura de operación también reduce o elimina la necesidad de aislamiento térmico para proteger el personal o al equipo. El exceso de calor es utilizado para la calefacción de espacios en habitaciones o para el calentamiento de agua de uso residencial, pero no es suficientemente caliente para generar el vapor necesario para el proceso de reformación del combustible.

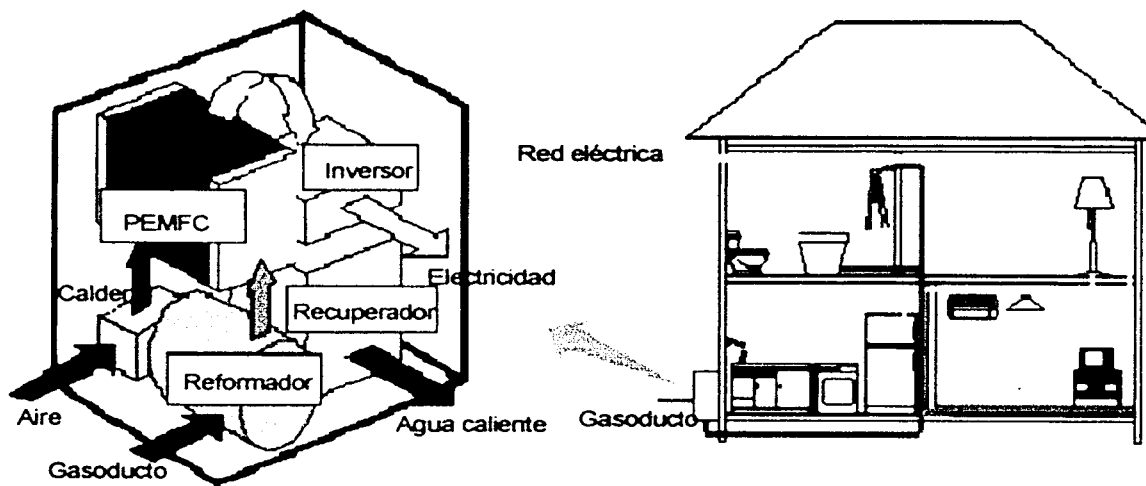


Figura 8. Configuración esquemática de una instalación residencial eléctrica con una PEMFC empleando la cogeneración, diseñado por Ballard

1.3.4 Celda de combustible de óxido sólido

La celda de combustible de óxido sólido (SOFC) usa un electrolito cerámico, que reduce la corrosión y elimina los problemas asociados con los electrolitos líquidos de las celdas de combustible. Para lograr la conductividad iónica adecuada en semejante electrolito cerámico, el sistema debe operar aproximadamente a 1000°C. A esta temperatura, la reformación del combustible tipo hidrocarburo es factible, y el calor desechado del dispositivo sería utilizado fácilmente por las plantas generadoras de electricidad térmicas convencionales obteniendo una alta eficiencia del combustible.

1.3.4.1 Diseño y operación de las SOFC

La SOFC está basada en el uso de un sólido cerámico como electrolito. El material preferido, óxido de Circonio estabilizado con Itrio, es un conductor excelente de los iones a temperaturas altas.

La SOFC es un dispositivo de estado sólido que posee ciertas propiedades y técnicas de fabricación similares a la de dispositivos semiconductores. El ánodo es un cermet (material con propiedades metálicas y cerámicas) poroso de Níquel / Circonio mientras que el cátodo es de Estroncio dopado con manganato de Lantano. El diseño de Siemens - Westinghouse coloca a la celda de combustible alrededor de un soporte tubular de óxido de Circonio poroso a través del cual se suministra el aire al cátodo que se encuentra colocado en la parte exterior del tubo. Después se deposita una capa de electrolito por fuera del cátodo y finalmente una capa de ánodo encima del electrolito. Varias celdas unitarias se conectan juntas por medio de contactos de semiconductor a temperatura altas.

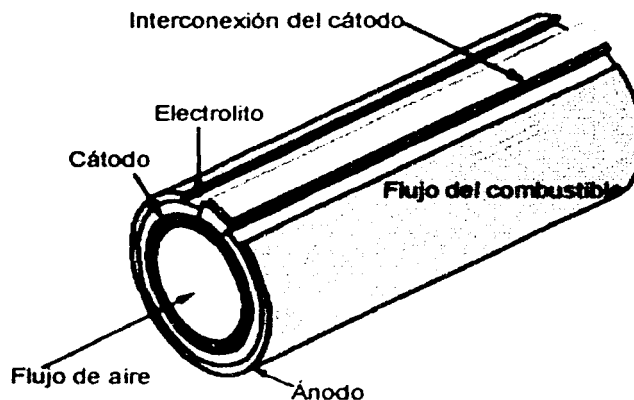
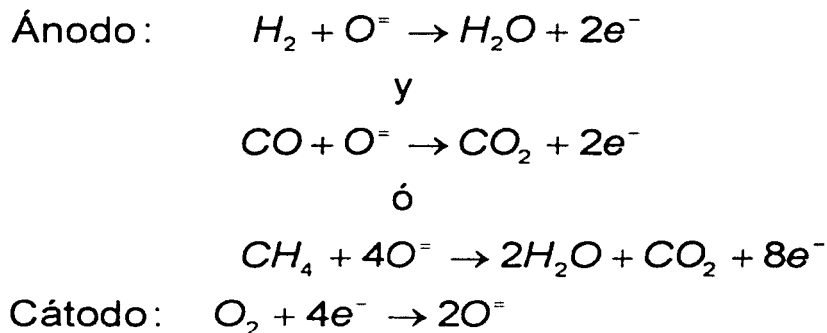


Figura 9. Diseño tubular de una celda SOFC de Siemens - Westinghouse

1.3.4.2 Características del funcionamiento de las SOFC

Referente al funcionamiento, el Hidrógeno o monóxido de Carbono (CO) del combustible reacciona con iones del óxido (O^{2-}) del electrolito para producir agua o CO_2 y generar electrones en el ánodo. Los electrones fluyen a través del circuito, y en el cátodo el Oxígeno del aire se combina con los electrones y se convierte en iones que se inyectan en el electrolito. Es importante recalcar que la SOFC puede usar CO, metano o Hidrógeno como su combustible directo.

Las reacciones de SOFC que ocurren son las siguientes:



En el desarrollo de las celdas, la SOFC se ha obtenido 0.6 V/celda unitaria a aproximadamente 2500 A/m². La vida útil de una sola celda se ha alcanzado de 30.000 horas con varios ciclos de calentamiento y enfriamiento. Actualmente se encuentra disponible la SOFC con eficiencias en el rango de 45%. El Laboratorio Nacional de Argonne sugiere que al presurizar el sistema se podría obtener eficiencias de combustible del 60%. Utilizando el calor de desecho de la celda de combustible para generar vapor y a través del ciclo Rankine generar electricidad adicional, se podría incrementar la eficiencia del sistema de la SOFC.

La SOFC opera a aproximadamente 1000 °C. La regulación de temperatura se logra a través de un adecuado manejo del volumen del flujo de aire dentro de la celda.

Como anteriormente se mencionó, la alta temperatura de operación de la SOFC ofrece la posibilidad de la reformación en su interior. Así como en la MCFC, el CO puede usarse directamente como un combustible. La SOFC puede soportar mayores concentraciones de Azufre en el combustible en comparación de otro tipo de celdas.

El ánodo consiste en Níquel metálico, con esqueletos estabilizadores de óxidos de Circonio y de Itrio que sirven para inhibir las incrustaciones de las partículas metálicas y proporcionar un coeficiente de expansión térmico comparable a los otros materiales de la celda. La estructura del ánodo se fabrica con una porosidad de 20 a 40% para facilitar el transporte de masa de reactante y los productos gaseosos. El Estroncio dopado con manganato de Lantano, que es el más común para el material del cátodo, es un conductor tipo p. Similar al ánodo, el cátodo es una estructura porosa que debe permitir el transporte rápido de masa reactante y los productos gaseosos.

La temperatura de operación de 1000 °C de la SOFC requiere de un tiempo de encendido significativo. El desempeño de la celda es muy sensible a la temperatura de operación. Una caída del 10% de la temperatura produce una caída del ~12% en el rendimiento de la celda debido al aumento de resistencia interna para el transporte de los iones de Oxígeno.

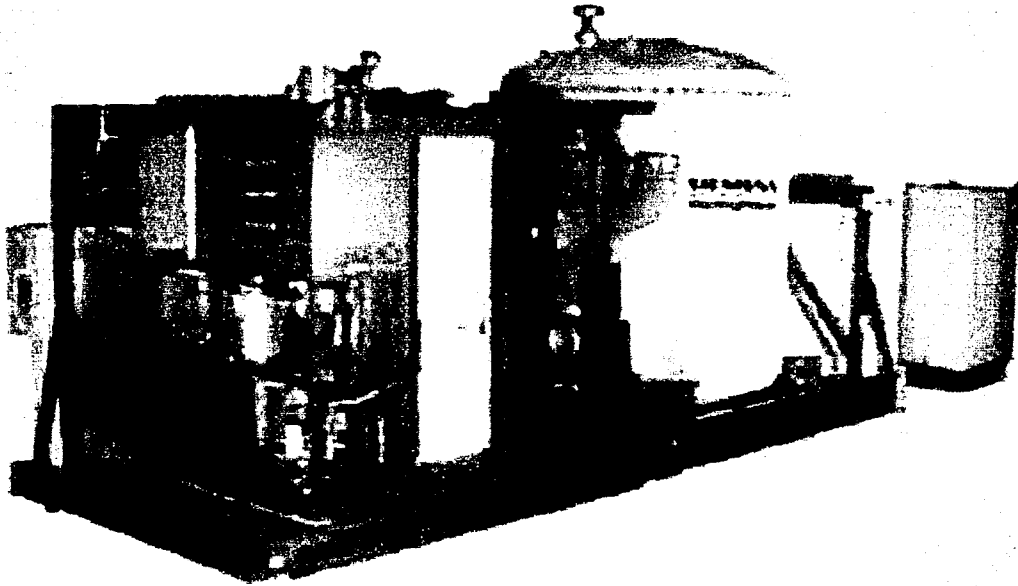


Figura 10. Este sistema fue desarrollado por Siemens - Westinghouse, es el primer híbrido entre una celda de combustible y una turbina de gas. Empezó a operar en Mayo del 2000 y está instalada en la Universidad de California. El sistema utiliza una SOFC y produce 220 kW con una eficiencia del 58%

1.3.5 Cuadro comparativo de las distintas tecnologías

<i>Celda de combustible</i>	<i>Electrolito</i>	<i>Temperatura de operación (°C)</i>	<i>Aplicaciones</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Densidad de potencia Actual (mW/cm²)</i>	<i>Densidad de potencia proyectada (mW/cm²)</i>
Acido Fosfórico (PAFC)	Acido fosfórico líquido	175 – 200	Generación distribuida Transporte	40 – 50%	200	250
Carbonatos fundidos (MCFC)	Solución líquida de carbonatos de Litio, Sodio o Potasio.	600 – 650	Generación distribuida	50 – 60%	100	>200
Intercambio Protónico (PEMFC)	Polímero orgánico sólido	60 – 100	Generación distribuida Transporte Generación portátil	40 – 50%	350	>600
Oxidos sólidos (SOFC)	Oxido de Circonio sólido dopado con Itrio	1000	Generación distribuida	45 – 55%	240	300

Tabla 1.1 Cuadro comparativo de las tecnologías

Celda de combustible	Potencia proyectada (kW)	Ventajas	Desventajas
Acido Fosfórico (PAFC)	100 – 5000	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta eficiencia en cogeneración de electricidad y calor ▪ No necesita H₂ puro ▪ Tecnología actualmente disponible 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Requiere como catalizador Pt ▪ Baja potencia y corriente ▪ Tamaño grande/peso
Carbonatos fundidos (MCFC)	1000 – 100,000	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altas temperaturas que permiten una mayor eficiencia ▪ No necesita un catalizador caro 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altas temperaturas producen corrosión y falla de componentes ▪ Corta vida útil
Intercambio Protónico (PEMFC)	1 – 1000	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El electrolito sólido evita la corrosión y los problemas de mantenimiento ▪ Baja temperatura ▪ Encendido instantáneo ▪ Alta densidad de corriente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bajas temperaturas requieren un catalizador costoso ▪ Sensible a impurezas en el combustible ▪ Es necesario eliminar el exceso de agua que se produce ya que se inunda la pila
Oxidos sólidos (SOFC)	100 – 100,000	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altas temperaturas que permiten una mayor eficiencia ▪ No necesita un catalizador caro ▪ El electrolito sólido evita la corrosión y los problemas de mantenimiento ▪ Larga vida útil 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altas temperaturas producen falla de los componentes ▪ Baja conductividad iónica

Tabla 1.2 Cuadro comparativo de las tecnologías

1.4 OBSERVACIONES FINALES

Al analizar el primer cuadro comparativo (Tabla 1.1) observamos dos principales rangos de temperatura de operación. Las temperaturas se pueden clasificar como altas a partir de los 200°C y como bajas temperaturas cuando no se excede el valor de los 200°C. Esta variación se debe al empleo de diferentes electrolitos.

Una ventaja que presentan las celdas de combustible radica en que la eficiencia no depende esencialmente de la temperatura de operación, por lo que se pueden alcanzar valores altos. En la práctica, se han reportado eficiencias que llegan al 50% y en aquellos casos en que se utiliza el calor generado por la celda, se ha obtenido un 85%. Este calor se puede aprovechar en sistemas de generación eléctrica, calefacción, agua caliente, etc.

Otra de las ventajas que presentan las celdas de combustible es la capacidad de ser modulares y compactas, por lo que no requieren de un espacio con dimensiones grandes y además pueden conformarse de manera aditiva según las necesidades, satisfaciendo cualquier tipo de demanda. Por otro lado estos dispositivos no requieren de sistemas de lubricación y tampoco un mantenimiento exhaustivo ya que no tienen partes móviles. Esta característica se traduce en sistemas silenciosos.

Por otra parte es importante considerar que la celda de combustible puede utilizar casi cualquier combustible que contenga Hidrógeno, aunque hidrocarburos como el gas natural, metano, etano, biogas y propano, así como el diesel y la gasolina son los que mayor atención han recibido por razones de tipo práctico. En algunos casos, se pueden utilizar otros combustibles como el monóxido y bióxido de Carbono, metano, etc. Sin embargo, al utilizar alguno de estos combustibles es necesario incluir una etapa de reformación para extraer el Hidrógeno, lo cual implica ciertos problemas como la producción de CO₂ aunado al alto costo del proceso de reformación.

Las familias de celdas de combustibles se encuentran en una etapa de diagnóstico en diversas aplicaciones. Dependiendo de la tecnología utilizada podemos encontrar aplicaciones en transporte, generación eléctrica portátil y generación distribuida. Esta última aplicación se explicará ampliamente en los capítulos posteriores.

¹ Thomas S., Zalowitz M., *"Fuel cells Green Power"*, Los Alamos National Laboratory, www.education.lanl.gov/resources/fuelcells

² Franklin H. H., Binder J. M., et. al. . *"Phosphoric Acid Fuel Cells"*, USA Army Corps of Engineers and Engineer Research and Development Center, ERDC/CERL TR – 00 – 33, 2000.

2. LAS CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE Y DE LOS SISTEMAS DISTRIBUIDOS

2.0 INTRODUCCIÓN GENERAL

A partir del análisis anterior podemos concluir que las celdas de combustible constituyen una excelente opción, confiable, eficiente y ecológica comparada con otras formas de generación eléctrica. Aunque en la actualidad no tienen un costo competitivo se espera que a medida que se establezca la producción en masa ofrezcan ventajas económicas.

En este capítulo, pretendemos dar un panorama general sobre los tipos de esquemas que se han implementado en el mundo con respecto a la generación distribuida. Esto nos permitirá conocer las alternativas que han sido adoptadas para aplicar esta tecnología.

También hablaremos sobre las características de operación del módulo de generación. Se contemplarán las especificaciones técnicas de la salida eléctrica, con el fin de proveer mayor información para la posible integración en nuestro sistema eléctrico de los módulos de generación de celdas de combustible.

Por último abordaremos las medidas de protección con las que cuenta los módulos de generación, las cuales permiten que las celdas de combustible tengan una alta confiabilidad y continuidad en el suministro de energía eléctrica.

2.1 DEFINICIÓN DE SISTEMAS DISTRIBUIDOS

Los sistemas distribuidos se refieren a la generación eléctrica de forma modular. Consiste en ubicar el punto de generación lo más cercano posible al lugar de consumo. La generación de energía eléctrica para los sistemas distribuidos se ha enfocado principalmente en las siguientes tecnologías: generación basada en biomasa, motores diesel, celdas solares, celdas de combustible, generadores eólicos y microturbinas 1

La utilización de estos sistemas permite colocar la generación eléctrica en comunidades alejadas de la red pública. La construcción de la instalación de distribución a estas localidades de manera convencional resulta muy costosa debido a las dificultades que presenta la lejanía aunado a la inaccesibilidad de las comunidades. Por tal motivo

resulta conveniente trasladar un pequeño centro de generación al lugar de consumo que satisfaga la demanda.

La aplicación de los sistemas distribuidos no queda relegada solo a los puntos no interconectados de la red. Este tipo de esquemas permite crear una mayor capacidad y oferta de energía en ciudades densamente pobladas, donde la ampliación de la red eléctrica se ve limitada por la falta de espacio y los altos costos del derecho de vía.

La generación distribuida es, actualmente, una importante alternativa ante las restricciones que complican cada vez más los esquemas de generación eléctrica convencional.

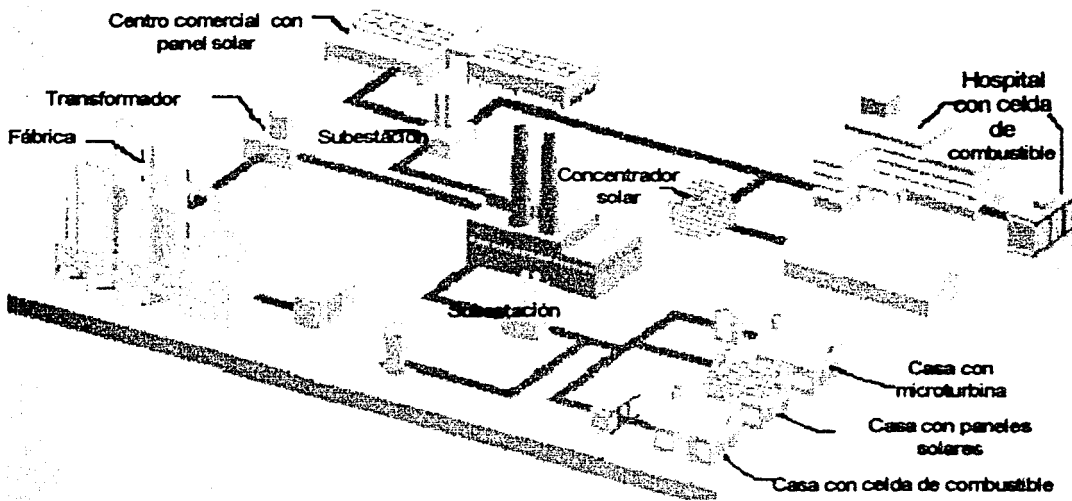


Figura 11. Esquema probable de un conjunto de sistemas distribuidos. fuente Sweet William, "Networking Assets", IEEE Spectrum

2.2 ESQUEMAS DE SISTEMAS DISTRIBUIDOS IMPLANTADOS EN EL MUNDO

Los sistemas distribuidos que son desarrollados en la actualidad se encuentran en la fase experimental. Sin embargo, existen cuatro esquemas definidos claramente a través de los cuales se estudian los beneficios y desventajas de su implementación.

A continuación describiremos las cuatro tendencias principales:

- **Planta generadora de emergencia**

En este esquema la planta generadora de emergencia brinda energía a la carga cuando el sistema eléctrico está fuera de servicio hasta que éste puede ser

restablecido. La aplicación de esta medida de seguridad se enfoca a los usuarios que necesitan un servicio ininterrumpido de electricidad como hospitales, sistemas de seguridad, etc., así como aquellos procesos que no pueden ser detenidos por falta de energía ya que esto representaría un muy alto costo.

- **Horas pico**

La energía eléctrica no puede ser almacenada económicamente en cantidades significativas. Por lo tanto tiene que generarse tanta electricidad como sea requerida en cada instante de tiempo. Por otro lado, la demanda no es constante sino que muestra un comportamiento variado durante el día. Existen horarios en los que la necesidad de electricidad es muy baja y también aquellos en los que la demanda es bastante grande, es decir, las horas pico. Justamente en esas horas de gran demanda muchas plantas generadoras tienen que operar a su máximo y otras, cuya operación es muy costosa, tienen que entrar para cubrir los requerimientos de energía.

Debido a lo anterior las compañías de energía eléctrica han decidido conformar un plan de tarifas en función del horario en el que sean utilizados los servicios de la red eléctrica. Esto último con el objeto de intentar distribuir uniformemente la demanda de electricidad.

Por tal motivo los grandes consumidores programan diversos horarios para operar su maquinaria con el fin de evitar en lo posible consumir electricidad en los periodos de mayor costo.

La generación distribuida presenta una solución para aquellos usuarios a los que les es imposible detener su operación en las horas de alto precio. Para este caso las celdas de combustible trabajan como fuente principal de generación durante el periodo de las horas pico, reduciendo los costos.

- **Generación en zonas inaccesibles**

Existen sitios donde es muy complicado y costoso establecer la infraestructura necesaria para el transporte de la electricidad. Por lo que las unidades de generación distribuida, como las solares y eólicas, son una excelente solución para proveer de energía a estos lugares aislados.

Este tipo de esquema permite llevar el centro de generación al lugar de consumo.

El proceso de generación de energía basado en celdas de combustible requiere de instalaciones que suministren el gas natural por lo que resulta poco viable emplear celdas bajo este esquema. Sin embargo, se están desarrollando celdas cuyo combustible sea metanol, monóxido de Carbono, etc., lo cual permitiría generar electricidad en zonas inaccesibles con celdas de combustible, si se puede producir el combustible localmente.

- **Fuente principal de generación**

Este esquema es el más completo de todos por distintas razones. En primer lugar, son sistemas conectados a la red eléctrica principal pero no obtienen energía a partir de ésta durante su funcionamiento normal. La unidad de generación distribuida se encarga de suministrar totalmente la energía que requiere la carga dedicada. El papel de la red consiste en ser el respaldo a dicha unidad en caso de que falle. Por otro lado, cuando la carga requiere menos energía eléctrica los excedentes de energía generada son integrados a la red. Además se puede aprovechar el calor proveniente de la generación eléctrica con celdas de combustible, incrementándose su eficiencia. Todos los puntos anteriores nos muestran grandes ventajas si es que se utiliza este esquema.

Se decidió abundar sobre las características de la utilización de las celdas como fuentes principales de generación. Lo anterior se debe a que el costo por kWh se reduce significativamente en la medida en la que el tiempo de uso de la celda se incrementa. Por lo tanto, los lugares que tienen celdas de combustible en el mundo siguen este esquema con algunas particularidades que serán descritas más adelante.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

2.3.1. Descripción general del módulo de generación basado en celda de combustible

A continuación daremos una descripción de las etapas que conforman la operación de una planta generadora de electricidad con celdas de combustible:

1) Procesamiento del combustible

La celda de combustible necesita hidrógeno y oxígeno para operar. En la sección del procesamiento de combustible el hidrógeno es extraído o reformado de un energético rico en hidrógeno (generalmente gas natural). El resultado es un gas rico en hidrógeno el cual es enviado a las celdas de combustible en la forma en la que ellas lo requieren.

2) Módulo de potencia

En la sección de potencia encontramos el módulo de generación, la cual es un conjunto de celdas de combustible individuales conectadas eléctricamente entre sí. Una celda de combustible está compuesta de dos electrodos, ánodo y cátodo, y un electrolito como el ácido fosfónico.

Después del proceso realizado por la celda de combustible, el cual se explicó con anterioridad, obtenemos tres productos principales que son calor, agua (en forma de

vapor) y electricidad. Posteriormente para la conexión al sistema es necesario convertir la corriente directa a corriente alterna.

3) Convertidor de corriente

El convertidor de corriente directa a corriente alterna también regula la salida de voltaje y corriente de la celda de combustible con el fin de adaptar las variaciones en los requerimientos de la carga. Por otro lado protege a la celda de combustible y la red eléctrica.

4) Configuración de salidas

En general las celdas de combustible comerciales cuentan con los implementos necesarios para facilitar la conexión de la salida eléctrica y térmica hacia las instalaciones.

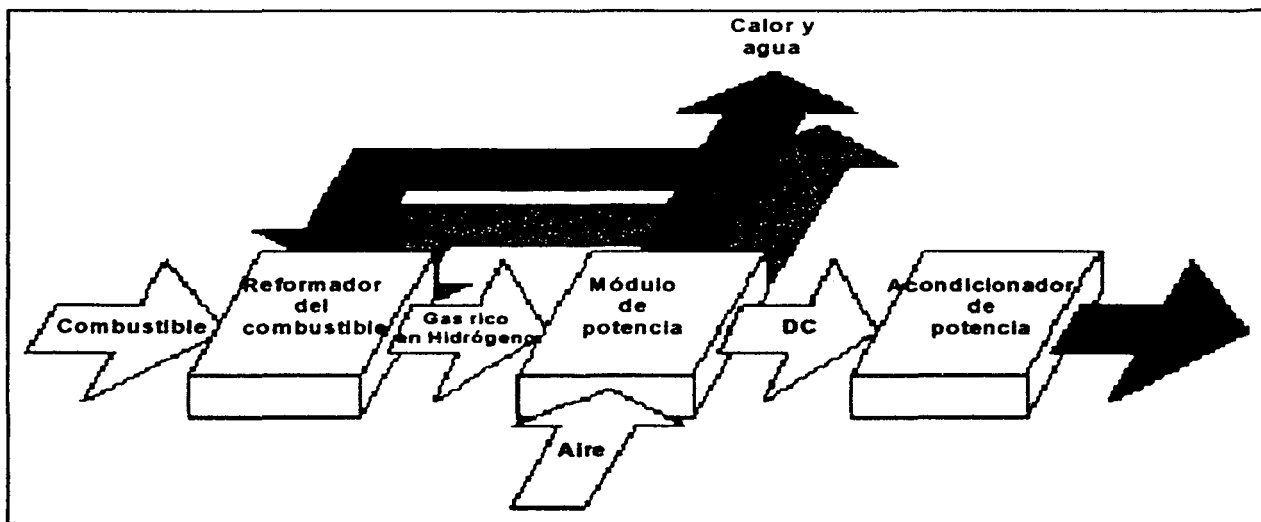


Figura 12. Configuración típica de una planta basada en una celda de combustible. Holcomb Franklin H., Binder Michael J., et al., "Phosphoric Acid Fuel Cells", US Army Corps of Engineers

Los sistemas con celdas de combustible son plantas generadoras completamente integradas que incorporan la pila de celdas de combustible y un equipo que permite la operación de la planta, que generalmente consiste en un reformador de combustible y un equipo de conversión de potencia.

Este tipo de plantas emplean gas natural y operan en paralelo con la red. Además tienen un intercambiador de calor que puede entregar agua caliente. Un módulo de enfriamiento permite que la celda de combustible elimine el exceso de calor cuando la carga térmica de los usuarios es menor en comparación con la salida de la celda de combustible.

2.3.2 Características de operación

El esquema de operación de las celdas de combustible es muy similar en las diversas tecnologías. Sus mayores diferencias radican en el tipo de electrolito y los rangos de temperatura. Sin embargo, se puede hablar de cierta homogeneidad en cuanto a su funcionalidad.

Con el objetivo de ilustrar las características de operación utilizaremos las plantas PC25C de ONSI Corporation² que son celdas tipo PAFC. La razón de esta selección se debe a que las PAFC son las que tienen mayores posibilidades de ser comercializadas a corto plazo. Aunado a lo anterior este tipo de celdas han sido probadas en un programa de demostración a cargo del Departamento de Defensa de E.U.A. (DOD), por lo que se cuenta con bastante información sobre ellas.



Figura 13. Planta instalada en Oficina de Sevicios de Gas Yankee en Meriden, Connecticut

2.3.2.1 Características de la salida eléctrica cuando la planta está conectada a la red

La siguiente tabla describe la frecuencia y el voltaje estándar de la PC25.

Frecuencia, Voltaje y Potencia de la PC25			
Configuración	Frecuencia	Voltaje	Potencia
Estándar	60 Hz	480 V, trifásico, 4 cables	200 kW / 235 kVA

Tabla 2

Las características eléctricas presentadas aquí reflejan las condiciones normales de operación de la planta.

El cuadro que se presenta a continuación resume detalles sobre las características eléctricas de la planta.

Características eléctricas	
Factor de potencia (a voltaje nominal de la línea)	.85 atrasado/adelantado hasta 1.0 (puede ser ajustado)
Corriente de falla o corto circuito	110% de corriente nominal en RMC en 1 ciclo
Armónicos en el Voltaje	menor del 3% a potencia nominal
Características de operación	Se tiene disponible desde 10kW hasta los 200 kW

Tabla 3

La planta opera en paralelo con la red eléctrica en operación normal. A voltajes de línea entre el 95% y el 100% del valor nominal, la planta puede operar entre factores de potencia de 0.85 adelantado y 1. Por otro lado, puede operar entre factores de potencia que van desde la unidad hasta 0.85 adelantado o atrasado para voltajes de línea entre el 100% y 105% del valor nominal. Esta información indica que las plantas basadas en celdas de combustible proveen tanto potencia activa como reactiva.

El módulo de generación cuenta con protecciones contra sobrecorrientes cuya magnitud sea mayor o igual al 110% sobre la corriente nominal, siempre y cuando la duración de éstas sea mayor a un ciclo

Otra de las características eléctricas relevantes es el porcentaje de armónicos que genera la celda de combustible, podemos observar que la planta presenta un porcentaje menor al 3%.

En la última parte de la tabla se aclara que la planta puede suministrar potencia desde un valor mínimo, 10 kW, hasta la potencia nominal, que en este caso es de 200 kW. Por lo tanto, existe gran flexibilidad en cuanto al suministro de potencia a la carga dentro de este rango.

Módulo de protección	
Interrupción / Desconexión	La planta interrumpe su operación si es detectada una condición anormal en la red
	La planta se desconecta si la duración de la interrupción es excesiva o la interrupción se repite frecuentemente. En condiciones anormales cuando la duración de la interrupción rebasa medio segundo se desconecta. Cuando suceden más de tres interrupciones
Recierre	La planta realiza su recierre automáticamente después de haber sufrido la desconexión, siempre y cuando la red se encuentre en condiciones normales
Parámetros de protección	sobrevoltaje ac
	bajovoltaje ac
	desbalance de voltaje ac
	frecuencia anormal
	sobrecorriente ac, instantáneo
	sobrecorriente ac, tiempo inverso
	desbalance de sobrecorriente ac
	pérdida de sincronía
	ajuste y pruebas de las funciones de las protecciones

Tabla 4

La tabla anterior describe bajo que condiciones la celda de combustible interrumpe el suministro de energía. Posteriormente, el recierre se efectúa cuando la red eléctrica presenta condiciones estables.

Las características de protección y la coordinación con la red son consideradas en el controlador. El controlador de la planta tiene la opción de ajustar las características de

protección y los parámetros de reconexión para permitir la coordinación con las protecciones de la red local.

2.3.2.2 Consumo y composición del combustible

La eficiencia eléctrica nominal de la celda de combustible es del 40% en LHV y del 36% en HHV. La planta alcanza este nivel de eficiencia cuando le es demandada la mitad de su potencia. La PAFC consume 54 metros cúbicos en condiciones estándar de gas natural por hora, es decir, gas con aproximadamente 37 MJ/m³ en HHV.

Es importante considerar que la celda de combustible tiene grandes requerimientos de una infraestructura para conducir el gas del punto de distribución hacia la celda, es por ello que se debe realizar un desarrollo integral que incluya el establecimiento de la red para gas.

La planta opera con gas natural entubado. La siguiente tabla muestra los rangos máximos que el gas natural debe tener en su composición. Además se debe elegir la presión con la que el gas es suministrado.³

Composición del Combustible – Gas Natural Entubado	
Composición	Porcentaje máximo en volumen permitido
Metano	100
Etano	10
Propano	5
Butano	1.25
Pentanos, Hexano, C6+	0.5
CO ₂	3
O ₂	0.2
N ₂	4
Azufre totales	30 ppmv máximo y 6 ppmv en promedio
Amoniaco	1 ppmv
Cloro	0.05 ppm (basado en el peso)
Presión de suministro	10 a 35 cm de agua
Valor calorífico del combustible	37 a 45 MJ/m ³ , HHV

Tabla 5

También existen módulos de celdas de combustible que pueden ser configuradas para operar con propano. Esta opción resulta atractiva cuando el suministro de gas natural está interrumpido o no está disponible. El reformador es capaz de alternar entre propano y gas natural instantáneamente. Otra opción para utilizar un combustible diferente son unidades de procesamiento que permiten emplear metano. Debido al bajo poder calorífico de este último combustible, el nivel de potencia nominal de la celda se modifica.

2.3.2.3 Capacidades ambientales

La planta está diseñada para operar apropiadamente en un amplio rango de condiciones ambientales. Los parámetros de diseño a este respecto se proporcionan en la siguiente tabla.

Parámetros ambientales	
Temperatura ambiente	-29°C a 43°C
Altitud	Existe una reducción del 1% de la eficiencia (LHV) a una altura mayor de los 1800 m

Tabla 6

Como se puede observar en la tabla, estas plantas pueden ser situadas en casi cualquier condición ambiental, ya que la eficiencia solo se ve afectada en un 1% cuando la altitud varía.

2.3.2.4 Encendido

Para encender la planta es necesario suministrar al módulo una energía 282 kWh en un lapso de 3 horas. De igual forma es necesario suministrarle combustible. Durante este lapso, la planta generadora estará operando sin carga. En la siguiente tabla se resume la potencia y el combustible requeridos para poder encender la planta de generación

Requerimientos de encendido	
Encendido desde la desenergización total:	
Demanda máxima de potencia (kW)	87
Consumo de energía (kWh)	282

Tabla 7

Después de haberse completado la secuencia de encendido y de haberse revisado que la planta opere en forma adecuada, se conecta la carga a la planta. Es importante señalar que la planta puede ser configurada manualmente para establecer la potencia de salida. Sin embargo, la planta es capaz de operar sola, monitoreando automáticamente la carga y las condiciones de operación.

2.3.2.5 Apagado

Se puede iniciar el apagado de la planta en forma manual para que ésta permanezca en reserva caliente. Una vez iniciada la secuencia de apagado ésta continua en forma automática.

Si en algún momento las condiciones de operación están fuera de los parámetros establecidos, la planta reduce la potencia y si esta acción no normaliza la situación la planta se apaga automáticamente.

2.3.2.6 Control

La planta está diseñada para operar en forma automática. Los controles y la instrumentación de la planta están contenidos en el módulo de potencia para permitir el encendido, apagado y la operación automática, así como el monitoreo de su funcionamiento.

El sistema de control digital interno de la planta monitorea continuamente las condiciones de operación de ésta. El monitoreo remoto permite realizar acciones correctivas con el fin de evitar en la medida de lo posible el apagado total de la planta.

2.3.2.7 Mantenimiento

Existen ciertos dispositivos que pueden recibir mantenimiento mientras está en operación durante periodos cortos de tiempo. Hay otros que implican el apagado de la unidad generadora pero el tiempo que permanece inactiva no es mayor a dos días.

El mantenimiento mayor en cuanto a las celdas y el reformador de combustible es necesario cada 5 a 10 años. Las celdas y los componentes del reformador deben ser llevados a la fábrica para llevar a cabo dicho mantenimiento. El reemplazar todos estos elementos implica un apagado de varios días. El intervalo de tiempo para cambiar estos componentes mayores se fija de acuerdo a los ciclos de servicio, la composición del gas, y la carga. En comparación con otros sistemas de generación convencional, el periodo para llevar cabo el mantenimiento mayor es similar.

Requerimientos de mantenimiento programado			
Actividad	De 4 a 6 meses (Operando)	Anual (Apagada)	De 5 a 10 años. Mantenimiento mayor (Apagada)
Cambio de las bases del sistema de tratamiento de agua y de filtros	X	X	
Cambio de los filtros de aire	X	X	
Inspección de los tubos de presión		X	
Revisión de las válvulas auxiliares		X	
Revisión y servicio a los motores		X	
Lavado del tanque de agua		X	
Unidad generadora (celdas de combustible)			X
Reformador del combustible			X

Tabla 8

2.3.3 Opciones de configuración eléctrica

Como inicialmente se comentó, las celdas de combustible pueden ser utilizadas bajo diferentes esquemas de generación distribuida. A continuación se describen las opciones de configuración que poseen estas plantas para funcionar en los esquemas que han sido explicados anteriormente.

- 1) Conectada a la red/Independiente de la red: En la configuración conectada a la red / independiente de la red, la planta generadora normalmente opera conectada a la red. En el caso de que la potencia de la red se pierda, la planta generadora se desconectará automáticamente de ésta y cambiará a la configuración independiente de la red; en este modo, solo atenderá las cargas críticas dedicadas. En el modo independiente de la red, la planta suministra energía de alta calidad a la carga, además responde automáticamente a los cambios de ésta. Las características eléctricas de la salida descritas en la tabla 9 muestran que la planta puede satisfacer las demandas anticipadas de las cargas independientes de la red y además suministrar electricidad de gran calidad para las mismas. Si existen cargas que exceden los rangos mostrados en la tabla éstas serán desconectadas automáticamente.

La planta también puede ser usada junto con la red y con interruptor electrónico sin partes móviles con el objetivo de proveer una fuente de energía confiable y dedicada a equipo de procesamiento de datos y a otras cargas críticas. En este caso la carga no será afectada por perturbaciones causadas por otras cargas o por operaciones de maniobra en la red debido a que tiene una fuente de potencia dedicada.

La planta opera en sincronía con la red en este modo. Si la planta generadora se desconecta, un interruptor instalado por el usuario transferirá la carga a la red. Para tal fin se pueden emplear tanto interruptores mecánicos como electrónicos. Con un interruptor electrónico la transferencia de cargas se lleva a cabo en un cuarto de ciclo (alrededor de 4 milisegundos) y así se pretende que la carga prácticamente no perciba la falta de energía. Por otro lado si la sincronización con la red se pierde debido a la pérdida de potencia, la planta generadora continua operando empleando una referencia de frecuencia interna. En el momento en el que se restablece el servicio eléctrico, la planta automáticamente se sincroniza con la red⁴.

Características de la salida eléctrica en la configuración independiente de la red	
Sobrecarga transitoria	282 kVA con 240 kW durante 5 segundos
	Los contactos internos de la planta se abrirán cuando la carga exceda una capacidad máxima de sobrecarga y la planta se permanece operando sin carga
Regulación de voltaje en estado estable	$\pm 1\%$ del nominal
Precisión en la frecuencia	Un minuto por año
Separación de fase	120 ± 3 Grados eléctricos
Cargas desbalanceadas	10 % corriente de fase a carga nominal y 190 % de corriente de línea a neutro.
Sincronización con la red	La planta es capaz de sincronizarse con la red a la cual se interconectará

Tabla 9

2) Conectada a la red/Operación en paralelo independiente de la red: Dos o más unidades de generación pueden operar en paralelo con la red o pueden operar en paralelo entre cada una independientemente de la red para soportar cargas mayores a su capacidad individual. Los controles están diseñados para coordinar la operación en paralelo independiente de la red para que así las unidades compartan eficientemente la carga.

2.3.4 Módulo de enfriamiento

La planta basada en celdas de combustible está provista con un módulo de enfriamiento. Este dispositivo ayuda a disminuir las altas temperaturas que se producen por la reacción exotérmica de electrólisis inversa.

Por otro lado el calor es aprovechado para procesos de calentamiento de agua, y con ello se le puede dar un uso doméstico

Otra alternativa para el aprovechamiento del calor consiste en utilizarlo en bombas de calor para generar frío.

2.3.5 Dimensiones e interfaces

Las dimensiones de la unidad de generación son bastante reducidas, además el ruido que produce es bastante bajo. Esto permite que se pueda situar la planta casi en cualquier lugar en términos de espacio y restricciones de ruido.

Sin embargo, es importante considerar que es necesaria cierta infraestructura para suministrar gas natural a la planta. Por otro lado, si la celda opera con respaldo de la red se requiere una conexión con ésta.

Dimensiones, peso y nivel de ruido de la planta	
Módulo de potencia	3 m x 5.5 m x 3 m 18150 kg
Módulo de enfriamiento	1.2 m x 4.3 m x 1.2 m 770 kg
Nivel de sonido	62 dB a 9 m

Tabla 10

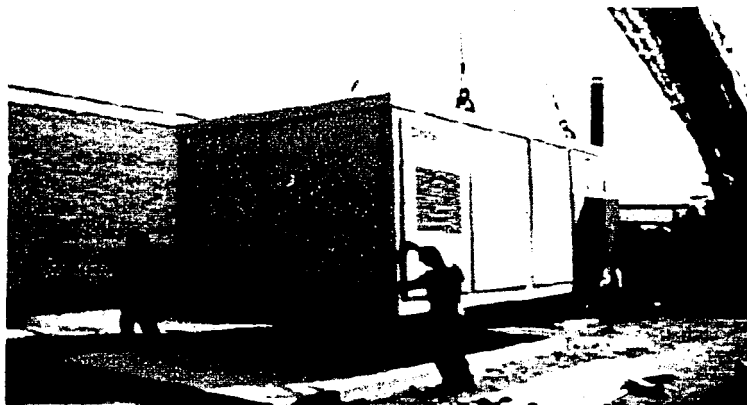


Figura 14. En esta figura podemos observar los requerimientos en cuestión de espacio y cimentación para instalar la celda PC25C de 200 kW. Fuente ONSI Corporation.

Interfaces	
Red eléctrica pública	Opera automáticamente con la red
Gas natural entubado	Presión del gas natural: 10 cm a 35 cm de columna de agua

Tabla 11

2.4 OBSERVACIONES FINALES

Al realizar el estudio de las características eléctricas, físicas y de operación, se puede verificar que las plantas basadas en celdas de combustible están diseñadas para operar bajo diversos esquemas. Dichas opciones le proporcionan al usuario una serie de ventajas frente al empleo de otra clase de tecnologías.

Por otro lado, la unidad de generación cuenta con distintos sistemas de control que le permiten suministrar energía eléctrica de gran calidad a los usuarios.

Las plantas cubren todos los requerimientos establecidos por las normas y regulaciones aplicadas a las redes convencionales. Para ello poseen varios tipos de protecciones que contemplan diversas fallas, lo cual brinda protección a la planta, al usuario y a la red con la que se interconecta.

¹ DOE Distributed Power Program,

http://erendev.nrel.gov/distributedpower/pages/doedpp_frame.html

² Holcomb Franklin H., Binder Michael J., et. al., "Phosphoric Acid Fuel Cells", US Army Corps of Engineers

³ *Idem*

⁴ *Idem*

3. NORMATIVIDAD Y PROBLEMAS DE INTERCONEXIÓN

3.0 INTRODUCCIÓN GENERAL

En este capítulo nos enfocaremos a dar un panorama general de los marcos legales que se han desarrollado y aplicado en torno a la generación distribuida en México y en el mundo.

Posteriormente citaremos artículos de la ley y reglamentos, además de algunas normas de apoyo técnico.

Finalmente comentaremos los problemas de interconexión que se han presentado con la generación distribuida y los mecanismos que se pueden utilizar para evitar dichos conflictos en el caso de utilizar celdas de combustible.

3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Se considera que los sistemas eléctricos se inician en 1882 con las instalaciones de Edison en Nueva York. Edison se planteó el problema de diseñar un sistema de iluminación que fuera superior al existente, que utilizaba gas, tanto en seguridad y comodidad como en precio.

El estudio de Edison concluyó, que por razones económicas las lámparas del sistema eléctrico debían conectarse en paralelo y no en serie como las lámparas de arco eléctrico y en consecuencia deberían ser de alta resistencia y formar parte de un sistema de voltaje constante, característica que siguen teniendo los sistemas eléctricos actuales.

Después del invento del transformador industrial por Gaulard y Gibbs en 1883, basado en el descubrimiento de Faraday de la inducción electromagnética, los sistemas de corriente alterna fueron los que se establecieron. La generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica permitieron ahorros muy importantes en el costo de los conductores al facilitar la transformación de los voltajes, haciendo posible la transmisión a grandes distancias usando altos voltajes y la utilización de plantas generadoras alejadas de los centros de consumo.

Las características de los sistemas de corriente alterna propiciaron que los diferentes sistemas eléctricos se fueran interconectando y, frecuentemente, integrando en forma vertical, abarcando la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica¹.

3.1.1 Entorno mundial

La red eléctrica se ha concebido como sistemas integrados, es decir, incluyen la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. De la misma forma se ha pensado en los sistemas eléctricos como un monopolio natural. El suministro de energía eléctrica se considera como un servicio público independientemente de que la empresa suministradora sea de propiedad privada o pública.

En algunos países, había la preocupación del costo del servicio, ya que si era demasiado se considera alto y dañino para la competitividad de la economía. Dicha situación se empeoraba con la mayor apertura del comercio internacional y la fuerza de asociaciones de libre comercio.

En otros, el problema se debía a las dificultades de algunos gobiernos que no obtenían suficientes recursos tanto para desarrollar nueva infraestructura como para darle mantenimiento a los equipos existentes. Por lo anterior, el sector energético se volvió ineficiente lo cual se vio reflejado en la disminución de la calidad del servicio.

A pesar de que las problemáticas variaban de una región a otra se tomaron soluciones bastante similares con el objetivo de hacer competitiva a la industria eléctrica.

A principios de los años 80 la necesidad de cambios llevó a la decisión en algunos países de tomar una política de mercados abiertos en una gran parte del sector público de servicios, especialmente en el sistema eléctrico.

En Latinoamérica, Chile fue el primer país en impulsar una reforma en el sector eléctrico, seguido por el Reino Unido que decidió hacer lo propio a este respecto².

En Estados Unidos y Europa, desde finales de la década de los setentas y principios de la década de los ochentas, se legisló sobre el servicio público de energía eléctrica, donde se prescriben las disposiciones legales que deben cumplir los permisionarios (autoabastecedores, cogeneradores, productores independientes, pequeños productores, etc.), así como las compañías suministradoras³.

3.1.2 Entorno nacional

A partir de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (1992) se establecieron convenios sobre el papel de la inversión privada en el sector eléctrico mexicano.

Estos convenios abrieron el área de generación eléctrica a particulares bajo las siguientes figuras jurídicas⁴:

➤ Autoabastecimiento

Una empresa podrá adquirir, establecer u operar una planta de generación eléctrica en México para satisfacer sus necesidades de suministro. La electricidad generada

que exceda dichas necesidades debe ser vendida a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y la CFE deberá comprarla bajo los términos y condiciones acordados por la CFE y la empresa.

➤ **Cogeneración**

Una empresa podrá adquirir, establecer u operar una planta de cogeneración en México que genere electricidad por medio de calor, vapor u otras fuentes energéticas asociadas con un proceso industrial. No es requisito que los dueños de la planta industrial sean también los propietarios de la planta de cogeneración. La electricidad generada que exceda los requerimientos de suministro de la planta industrial debe ser vendida a la CFE, y la CFE deberá comprarla bajo los términos y condiciones acordados por la CFE y la empresa.

➤ **Producción independiente de energía eléctrica**

Una empresa podrá adquirir, establecer u operar una planta de producción independiente de energía eléctrica (PPIEE) en México. La electricidad generada por dicha planta para su venta en México deberá ser vendida a la CFE, y la CFE deberá comprarla bajo los términos y condiciones acordados por la CFE y la empresa. Cuando una PPIEE ubicada en México y una empresa eléctrica de otra Parte consideren que el comercio transfronterizo de electricidad pueda ser de su interés, cada una de las Partes de que se trate permitirá a estas entidades y a la CFE negociar los términos y condiciones para la adquisición de energía eléctrica y los contratos de venta de la misma. Las modalidades de ejecución de dichos contratos de suministro se dejarán a los usuarios finales, a los proveedores y a la CFE, y podrán asumir la forma de contratos individuales entre la CFE y cada una de las otras entidades. Cada una de las Partes de que se trate decidirá si los contratos se sujetarán a la aprobación reguladora

Estos acuerdos no concordaban con lo que establecía el artículo 27 de la Constitución, que menciona lo siguiente⁵:

“Corresponde exclusivamente a la nación generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía que tenga por objeto la prestación de servicio público. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la nación aprovechará los bienes y por el Congreso de la Unión como se enuncia a continuación⁶:

Artículo 3° - No se considera servicio público

I. La generación de energía eléctrica para autoabastecimiento, cogeneración o pequeña producción.

II. La generación de energía que realicen los productores independientes para su venta a la Comisión Federal de Electricidad.

III. La generación de energía eléctrica para su exportación, derivada de cogeneración, producción independiente y pequeña producción.

IV. La importación de energía eléctrica por parte de personas físicas o morales, destinada exclusivamente al abastecimiento para usos propios.

V. La generación de energía eléctrica destinada a uso de emergencias derivadas de interrupciones en el servicio público de energía eléctrica.

Tras estas modificaciones se han establecido compañías generadoras bajo los esquemas antes mencionados. Hasta la fecha las compañías privadas y descentralizadas, han solicitado 150 permisos a la Comisión Reguladora de Energía (CRE), de las cuales el 38% se encuentran en operación, con una gran participación de PEMEX.

3.2 MARCO LEGAL

En la actualidad no se cuenta con una normatividad específica en cuanto al tema de generación distribuida en México. Sin embargo, es posible hacer uso de las Leyes y Reglamentos vigentes con el objetivo de basarse en un marco legal y técnico que permita la introducción de plantas generadoras bajo el esquema de generación distribuida.

Por otra parte es importante señalar que estas Leyes y Reglamentos están sujetas a cambios, más aún cuando se vislumbra reformas significativas en el sector energético de nuestro país.

A continuación enunciamos las Leyes mexicanas que contienen las normas que deben ser observadas para llevar a cabo el establecimiento de sistemas de generación distribuida:

1. Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, 1992.
2. Manual de Servicios al Público en Materia de Energía Eléctrica, 1993.
3. Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, 1994.
4. Ley de la Comisión Reguladora de Energía, 1995.
5. Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, en Materia de Aportaciones, 1998
6. Tarifas para el Suministro y Venta de Energía Eléctrica, 1999.

3.2.1 Artículos de la Ley y Reglamento del Servicio Público de Energía Eléctrica

La Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica así como el Reglamento del Servicio Público de Energía Eléctrica contienen artículos que versan sobre los temas que nos ocupan. A continuación comentaremos dichos artículos.

◆ *Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (Anexo 1)*

- El Artículo 36 dice que la Secretaría de Energía es la que otorgará los permisos en cuanto a la generación de energía eléctrica basados en los esquemas comentados.

Se establecen ciertas condiciones que deben cumplir los interesados para que se les pueda otorgar el permiso.

En el caso de autoabastecimiento se puede constituir una sociedad cuyo objetivo sea la generación de energía eléctrica para cubrir sus necesidades energéticas. Dicha sociedad no puede suministrar energía eléctrica a terceras personas físicas o morales. Además, los excedentes de energía deben ser puestos a disposición de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Para cogeneración se debe garantizar que se aumenten las eficiencias energéticas así como la rentabilidad del proceso. En este caso no es necesario que el operador del proceso sea quien recibe el permiso para cogeneración. De igual forma los excedente se pondrán a disposición de CFE.

Para producción independiente los solicitantes deben ser personas físicas o morales registrados bajo las leyes mexicanas. Estos proyectos deben ser considerados en la planeación y programas de CFE para satisfacer la demanda proyectada. Bajo este esquema el permisionario destina el total de la energía eléctrica producida a CFE bajo un contrato de venta. En el caso de que la cantidad de electricidad generada sea menor a 30 MW se considera como pequeña producción independiente y los permisionarios pueden establecer cooperativas de consumo, copropiedades, sociedades civiles o asociaciones para destinar la electricidad a pequeñas comunidades rurales o áreas aisladas sin servicio eléctrico.

Sobre la importación y exportación de energía eléctrica, la Ley dice que es posible integrar la conducción, la transmisión y la entrega de la energía eléctrica a los particulares empleando un sistema de porteo, siempre y cuando no se afecten los derechos de terceros. Para hacer uso del sistema de porteo es necesario contar con el permiso de CFE, el cual es intransferible. Por otro lado, estos permisos estarán sujetos a revisiones constantes para verificar el cumplimiento a las disposiciones de la Ley.

- El Artículo 36 bis hace referencia a que la energía eléctrica generada por las figuras antes mencionadas deben cubrir ciertos requerimientos. Estos requerimientos incluyen un menor costo para CFE en la generación de la electricidad así como ofrecer óptima estabilidad, calidad y seguridad del

servicio público. CFE será el órgano responsable de la planeación del crecimiento de la capacidad de generación del sistema y determinará los criterios con los cuales los particulares podrán participar.

◆ *Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (Anexo 1)*

- El Artículo 72 contempla los fines bajo los cuales un productor independiente podrá generar energía eléctrica. Estos fines son:
 - Venta a CFE
 - Consumo por particulares en las modalidades de autoabastecimiento, cogeneración o pequeña producción
 - Uso de energía eléctrica en emergencias debido a interrupciones en el servicio público
 - Para exportar energía eléctrica
- El Artículo 73 menciona que bajo las modalidades contempladas en el Artículo 72 se puede incluir la transmisión, la transformación y la entrega de la energía eléctrica.
- El Artículo 77 comenta que las modalidades anteriormente mencionadas están sujetas a permisos, los cuales son expedidos por parte de la Secretaría.
- El Artículo 89 dice que no será necesario un permiso para el autoabastecimiento de energía eléctrica, si para éste caso no se excede los 0.5 MW, así como la utilización de plantas de emergencias o respaldo
- El Artículo 114 menciona que el permisionario debe dar aviso a la Secretaría cuando la planta esté ya en operación, también será necesario realizar un informe anual sobre las condiciones generales de operación e instalaciones.
- El Artículo 115 se refiere a que la Secretaría y la Comisión podrá brindar orientación a los permisionarios, en el sentido de planeación, operación y mantenimiento de proyectos de generación.

3.3 NORMAS DE APOYO TÉCNICO

A continuación se proporcionan las normas de apoyo técnico que están relacionadas con la conexión de productores independientes hacia una red pública. De manera general, en estas normas se incluyen los pasos necesarios para solicitar el permiso ante la Secretaría de Energía así como ante la CFE. En esa norma se establecen los procedimientos necesarios para llevar la interconexión al sistema eléctrico.

Las normas proporcionadas por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) son referentes a los requerimientos de un generador para conectarse a la red

eléctrica. Esta guía contempla las instalaciones necesarias para llevar a cabo la interconexión. También se contempla la importancia de tener un sistema de tierras compatible con el del sistema al cual se interconectará así como los métodos para el aterrizamiento de los equipos. Por otro lado se mencionan los procedimientos para que un generador síncrono se conecte apropiadamente a la red, esto es con el fin de que el flujo de potencia que suministrará a la red esté en fase con el que circula por ella. Lo anterior no está limitado únicamente a generados síncronos, puede ser aplicado a cualquier fuente generadora ya que ésta debe estar en sincronía con la red.

Las normas emitidas por American National Standards Institute (ANSI) en conjunto con la IEEE son referentes a las protecciones que debe incluir un generador independiente al interconectarse con la red. Se considera que el interconectar un nuevo punto de generación, la red incrementará las magnitudes de las corrientes de corto circuito por lo que es importante contar con protecciones para disminuir el impacto en la red eléctrica. Por otro lado, se comentan las aplicaciones de los diversos relevadores para dar protección al sistema y al generador en el caso de efectuarse una falla.

Por último se anexan las normas emitidas por International Electrotechnical Commission (IEC) que son referentes a la coordinación de protecciones y los aisladores utilizados en las instalaciones eléctricas.

- 1.- CFE GEN 0170.1999. Procedimiento para la atención de solicitudes de cogeneración, autoabastecimiento y pequeños productores, que se conectan a la red de media tensión del sistema eléctrico.
- 2.- IEEE STD 1001-1989. IEEE guide for interfacing dispersed storage and generation facilities with electric utility systems
- 3.- IEEE STD 62.92.2-1989. IEEE guide for the application of neutral grounding in electrical utility systems, part II, grounding in electrical utility systems, part II, grounding of synchronous generator systems.
- 4.- ANSI / IEEE STD C37.101 – 1993. IEEE guide for generator ground protection.
- 5.- ANSI / IEEE STD C37.102 - 1996. Guide for ac generator protection.
- 6.- ANSI / IEEE STD C37.91 - 1985. Guide for protective relay applications to power transformers.
- 7.- NMX – J – 150/1 – 1978 – ANSI. Coordinación de aislamiento, parte I, definiciones y reglas.
- 8.- IEC 71 – 1 - 1993. Insulation co - ordination, part I, definitions, principles and rules.
- 9.- IEC 71 – 2 – 1996. Insulation co – ordination, part II, application guide.

3.4 INTERCONEXIÓN DE LOS PRODUCTORES EXTERNOS A LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y DE DISTRIBUCIÓN

Los sistemas de transmisión permiten interconectar los generadores de los productores externos al sistema eléctrico.

Los sistemas de distribución están diseñados para alimentar cargas eléctricas a partir de los sistemas de transmisión, por lo que se requiere cambios en las prácticas de operación y protección, para interconectar a los productores externos en el caso de la generación distribuida; se hacen necesarios dispositivos de protección con funciones adicionales y de alta velocidad, para evitar problemas de estabilidad.

Por razones de costo y disponibilidad, la mayoría de los productores externos se interconectan al sistema de transmisión, ya que es necesario crear una nueva infraestructura del sistema de protecciones que garantice la estabilidad del sistema. Por otro lado se plantean nuevos esquemas en el sistema de distribución que implican un costo adicional. A continuación se tratarán algunos problemas de la interconexión de la generación.

3.4.1 Posibles conflictos de la integración de la generación distribuida

Los sistemas de distribución han sido generalmente diseñados para operar sin ninguna generación distribuida. La interconexión de estas fuentes en el sistema de distribución puede causar un impacto significativo en aspectos como los flujos de potencia, en las condiciones de voltaje de los consumidores y de los equipos de la red. Dichos impactos pueden manifestarse de manera positiva o negativa dependiendo de las características del sistema de distribución y de las de la generación distribuida.

Los efectos positivos son llamados generalmente "beneficio en el soporte del sistema" e incluye:

- Soporte en el voltaje y el incremento de la calidad de la electricidad
- Mejor continuidad en el servicio
- Permite dar solución pronta al aumento de demanda retrasando las acciones de ampliación de transmisión y distribución
- Incrementa la fiabilidad del sistema

A pesar de dichos beneficios, los sistemas eléctricos de potencia pueden sufrir un impacto de manera negativa debido a la introducción de la generación distribuida. Esto sucede si no existe un mínimo de reglamentaciones para el control, instalación y requerimientos de mantenimiento.

A continuación mencionaremos los problemas relacionados con la interconexión de la generación distribuida en los sistemas de distribución convencionales.

3.4.1.1 Regulación de voltaje y pérdidas

Los sistemas de distribución radiales comúnmente regulan el voltaje haciendo uso de los cambiadores de derivación de voltaje de los transformadores, mejor conocidos como taps, así como capacitores en los alimentadores. Gracias a estas medidas se logra mantener el voltaje en un rango de $\pm 5\%$ del voltaje nominal.

Cuando se introduce la generación distribuida a la red, se presenta un problema con los flujos de potencia que interfieren con las condiciones normales de la regulación de voltaje.

A continuación se muestra una configuración, la cual ejemplifica el problema.

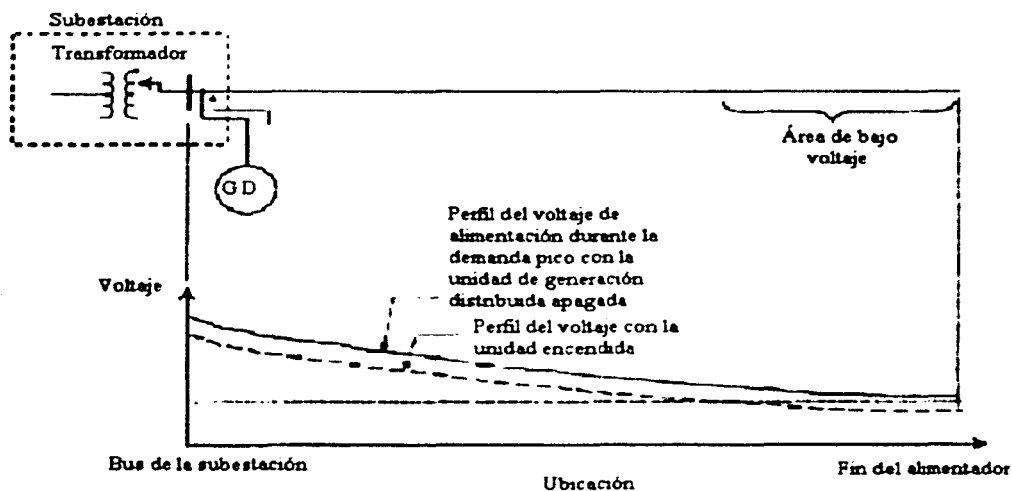


Figura 15. Comportamiento del voltaje con la presencia de generación distribuida

Si la generación distribuida es aplicada justo en el extremo donde se encuentra el transformador y el cambiador de derivación de voltaje encargado de la regulación de voltaje entonces, dicho dispositivo, no operará de manera correcta, ya que existe un aumento de voltaje y corriente que se suministran a la red. En la gráfica se muestra el comportamiento del voltaje cuando se presenta las condiciones antes mencionadas.

En este ejemplo el voltaje se reduce porque la generación distribuida suministra un exceso de corriente a la red y el control compensador es engañado, el cual percibe una disminución de la carga. Esta confusión provoca que el dispositivo encargado de la regulación de voltaje disminuya éste con el fin de mantener los niveles de voltaje especificados. Cuando sucede esta acción, en el extremo de la línea se presenta una caída de voltaje mayor.

Una posible solución es mover la unidad generadora distribuida a un punto intermedio para evitar el problema en el control compensador.

Por otro lado la generación distribuida puede ocasionar incrementos en el voltaje a los consumidores. Por ejemplo, en un sistema residencial de generación distribuida que comparte un transformador de distribución con otros usuarios, puede presentar un incremento de voltaje en el lado del secundario del transformador demasiado alto para los consumidores de ese lado. Esto ocurre si el transformador de distribución es localizado en el punto de alimentación de la generación distribuida aunado a un incremento del voltaje del primario del 1.06% del valor nominal.

Normalmente, sin la generación distribuida, se presenta una caída del voltaje a través del transformador de distribución y por los conductores del secundario, y el voltaje de entrada de los usuarios es menor que el primario.

Los ejemplos anteriores muestran el aumento y la caída de voltaje debido a la interacción de la generación distribuida con los flujos de potencia radiales basados en sistemas de redes convencionales. Como resultado de ello, la influencia de la generación distribuida sobre el voltaje para cualquier aplicación debe analizarse cuidadosamente para asegurar que no llegue a causar efectos negativos a los usuarios.

Una forma de evaluar el comportamiento del sistema eléctrico con la inserción de la generación distribuida es por medio de una simulación a través de un software, el cual nos permitirá analizar las múltiples fuentes distribuidas sobre el sistema de distribución convencional así como observar el comportamiento de la regulación del voltaje en cada punto. En este análisis, el ángulo de fase debe ser considerado, así como la impedancia característica de la línea.

Para determinar si la generación distribuida puede causar impactos significativos sobre el voltaje, es importante considerar la potencia suministrada y la localización del módulo de generación, la impedancia característica de la línea y la sincronía con la red.

Los impactos a la red eléctrica convencional son despreciables si la escala de potencia de la generación distribuida no excede los 10 kW. Sin embargo, cuando la capacidad de muchas unidades pequeñas alcanza un umbral crítico o cuando la capacidad de una sola unidad es sumamente grande, entonces será necesario un estudio de la regulación de voltaje para prever que no se salga de las especificaciones.

Otro criterio que permite saber la conveniencia de un estudio sobre el impacto de la generación distribuida en la regulación de voltaje es cuando la corriente suministrada por el módulo de potencia excede el 5 % de la corriente en la línea de transmisión en condiciones normales.

Como anteriormente se mencionó la localización de la unidad de generación distribuida debe considerarse para evitar la caída de voltaje. La ubicación del módulo de generación para minimizar las pérdidas es como localizar un banco de capacitores con el mismo fin. La única diferencia radica en que el módulo de generación distribuida afecta tanto la potencia reactiva como la potencia real. En cambio el capacitor, solo afecta los flujos de potencia reactiva. También el factor de potencia del módulo es de gran utilidad. El módulo debe operar con un factor de potencia entre 0.85 atrasado y 1.

Por otra parte las unidades de generación distribuida deben ser localizadas considerando los límites de la capacidad de alimentación, es decir, tomar en cuenta los límites térmicos de los conductores y cables que conforman el sistema, en el cual se llevará a cabo la interconexión. En algunos casos, el sistema opera en el límite y si se añaden los flujos de potencia de la generación distribuida se presentarán problemas sobre la calidad de potencia suministrada. Sin embargo dichos problemas pueden ser resueltos con una correcta planeación.

3.4.1.2. Fluctuaciones de voltaje

La generación distribuida puede presentar grandes fluctuaciones de voltaje y cuando se conecta a la red convencional pueden causar daños al sistema. Las fluctuaciones varían dependiendo de la tecnología utilizada. En el caso de los generadores eólicos y las celdas solares, la potencia de salida está asociada con la velocidad del viento y la intensidad luminosa por lo que presentan variaciones aleatorias importantes.

En la generación distribuida basada en celdas de combustible no se presentan fluctuaciones de importancia ya que cuenta en su módulo de potencia un regulador de voltaje. Aunado a lo anterior, las celdas de combustible generan una corriente directa que pasa por un inversor, convirtiéndola en corriente alterna. Por tal motivo este sistema no está sujeto a transitorios ocasionados por encendido o apagado del sistema. Esta particularidad de las celdas de combustible representa una ventaja respecto a otras tecnologías, ya que permiten contar con un voltaje estable y un rango de variación pequeño.

3.4.1.3. Armónicas

Otro de los problemas importantes de la interconexión de la generación distribuida en la red eléctrica son las armónicas. El tipo y la severidad de ellos depende de la tecnología de los convertidores de potencia y la configuración de interconexión.

En el caso de los inversores, se ha presentado una preocupación particular sobre la contribución de las armónicas de corriente sobre los sistemas de potencia. Afortunadamente esas preocupaciones son en parte debidas a los viejos inversores basados en Silicon Rectifier Controlled (SCR) que al conmutarse con la línea producían altos niveles de armónicas en las corrientes. Ahora muchos de los nuevos diseños de los inversores están basados en Isolated Gate Bipolar Transistor (IGBT) los cuales utilizan modulación de ancho de pulso para generar una señal de calidad. Estos nuevos inversores son capaces de generar una salida limpia y normalmente satisfacen los requerimientos de la norma IEEE 519 –1992.

Orden de armónicas	Niveles permitidos respecto a la fundamental (armónica impar)
< 11°	4%
De 11° a 17°	2%
De 17° a 23°	1.5%
De 23° a 35°	0.6%
35° o mayor	0.3%
Distorsión total de armónicas (THD)	5%

Tabla 12. Requerimientos de aportación de armónicas de corriente para generadores distribuidos por IEEE 519-1992

El módulo de potencia basado en celdas de combustible presenta una distorsión máxima del 1%; este valor es mucho menor en comparación con los requerimientos de la IEEE 519 – 1992. Aunque se cumple los requerimientos con relación a las armónicas, es importante conocer los efectos de éstas en los sistemas de potencia.

De manera general existen problemas que han sido identificados en relación con la presencia de las armónicas. Algunos de ellos son resonancia en los bancos de capacitores, en equipos que son sensibles a variaciones y armónicas, y en un caso extremo se presenta un sobrecalentamiento en el equipo.

3.4.1.4. Impacto sobre los niveles de corto circuito

La contribución de la falla proveniente de una pequeña unidad de generación distribuida no es muy grande, sin embargo, la suma de todas estas contribuciones puede alterar los niveles de corto circuito de manera significativa, provocando un problema en la coordinación del sistema de protección. Estos problemas pueden afectar la confiabilidad y seguridad en el sistema de distribución.

Para los inversores, la contribución de la falla dependerá del nivel máximo de corriente y duración, los cuales están dados por el fabricante. En algunos otros inversores la contribución de la falla puede durar menos de un ciclo pero en otros puede tener mayor duración.

Así, la contribución de corriente de la generación distribuida es lo suficientemente grande para causar un impacto en la coordinación de las protecciones, especialmente en aquellos lugares en donde el sistema es débil.

Por otra parte, la configuración y la impedancia del transformador, al cual está conectada el módulo de generación distribuida, juegan un papel importante para los cálculos de los niveles de corto circuito. Por ejemplo, si las interfaces del módulo de generación distribuida no proveen un camino para la secuencia cero hacia el sistema, entonces no contribuirá a la falla a tierra del lado del primario.

3.4.1.5. Islas

Una isla se presenta cuando el generador distribuido o un grupo de generadores distribuidos continúan energizando una porción de la red que ha sido separada de la red principal. Esta separación se puede deber a la apertura de un fusible o de un interruptor.

La isla ocurre solo si el generador o generadores pueden excitar y sostener la carga en la sección desenergizada. En la mayoría de los casos no es deseable que un generador distribuido propicie este fenómeno porque esto puede comprometer la seguridad y la calidad de la potencia que puede afectar a la red y a las cargas que alimenta el generador distribuido. Por ejemplo, si una isla se presenta en un alimentador durante operaciones de recierre convencionales, los generadores distribuidos pronto estarán fuera de fase respecto a la red durante el periodo muerto. Entonces cuando el recierre ocurre la red se conectará fuera de fase con el segmento energizado lo que puede provocar daños al equipo de la red, a los generadores distribuidos que alimentan la sección que debería estar desenergizada, y a las cargas. La isla también incrementa la probabilidad de que las fuentes de generación distribuida permitan que estas secciones incorrectamente energizadas estén fuera de límites de voltaje y frecuencia. Esto representa una seria amenaza cuando se realizan operaciones de reparación ya que los trabajadores están expuestos a manipular circuitos que deberían estar sin voltaje pero que en realidad lo

están. Este fenómeno, además, provoca que sea necesario emplear más tiempo en las reparaciones ya que es fundamental eliminar la isla en primer lugar.

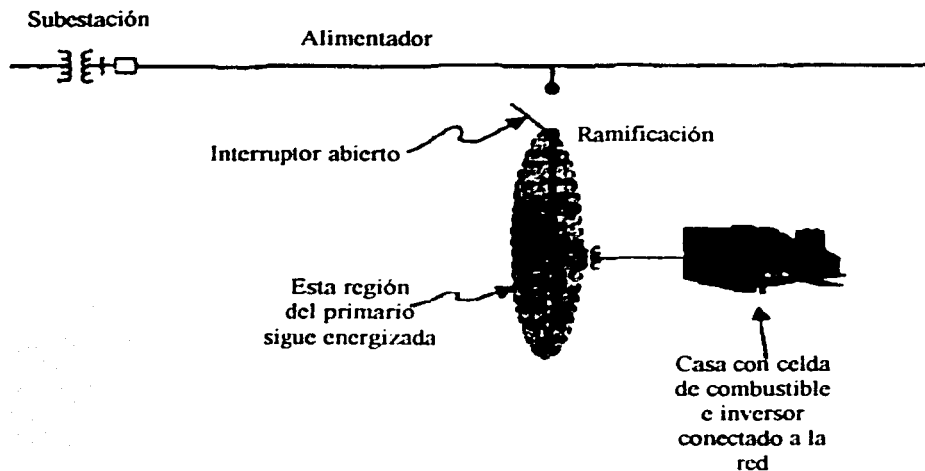


Figura 16. La isla puede ocurrir en varias circunstancias. Por lo anterior es indispensable contar con protecciones necesarias que eviten dicho fenómeno.

Para prevenir el fenómeno mencionado una unidad de generación distribuida que opera en paralelo con la red debe tener un sensor en tiempo real que le permita detectar voltajes fuera de rango o discontinuidad en el servicio en el lado de la red para que en esos casos se desconecte del sistema. Muchos sistemas de redes han establecido que si estas perturbaciones tienen una duración de 10 ciclos implica que la red tiene problemas serios. Sin embargo, el IEEE recomienda que en algunos casos, como en los sistemas fotovoltaicos, deben desconectarse los sistemas si dichos eventos tienen una duración de 6 ciclos. Esto es lo suficientemente rápido, para permitir que las unidades de generación distribuida se desconecten en menos tiempo que el recierre más rápido usado en la industria.

Los relevadores de voltaje y frecuencia son utilizados como protección contra islas. En la mayoría de los casos, si el generador crea una isla éste no será capaz de soportar un cambio tan repentino en su carga sin que provoque un cambio en la frecuencia y / o voltaje, entonces los relevadores detectarán la variación y desconectarán a la unidad. Este tipo de protecciones son llamadas pasivas. Una protección pasiva puede ser

engañada si el generador puede soportar la carga de la isla sin un cambio substancial en voltaje y frecuencia así que, para mayor seguridad, se emplean muchos inversores pequeños como protección activa contra islas. Una explicación del funcionamiento de este tipo de protecciones es lo siguiente: el inversor se "sintoniza" para operar cuando percibe una frecuencia mayor a 60 Hz. Cuando la señal de la red está presente el inversor es forzado a operar a 60 Hz. Durante la falla el interruptor volverá a su frecuencia natural, a la cual fue ajustado, una vez que la función de la red de controlar la frecuencia del inversor ha desaparecido (que es cuando se presentan las islas). En el proceso en el que cambia el inversor a su frecuencia natural, la unidad hará funcionar sus relevadores de frecuencia que están configurados para sacar a la unidad al presentarse el cambio de frecuencia debido a los inversores. Las protecciones activas son más robustas que las pasivas y son muy confiables, aunque llegan a fallar en algunos casos.

El uso de controles de protección contra islas es uno de los más importantes puntos cuando se trata de instalaciones de generación distribuida ya que las islas pueden causar severos problemas de calidad y confiabilidad de voltaje.

3.4.1.6 Aislamiento intencional de la red

La implantación de un generador distribuido puede incrementar la confiabilidad del servicio eléctrico si la unidad está configurada para proveer de respaldo durante caídas de flujo de la red. Para ser eficiente las unidades de generación distribuida requieren de una cuidadosa coordinación de los seccionadores de la red y del equipo de protección. La figura 14 muestra un esquema donde un interruptor automático fuera del área donde se encuentra la carga dedicada es utilizado para crear una isla. El interruptor debe operar durante fallas que se encuentre fuera de la sección que el generador distribuido debe alimentar en caso de un apagón (carga dedicada). El generador debe ser capaz de soportar la carga en la isla manteniendo valores adecuados de voltaje y corriente. El generador asignado para mantener la isla debe ser capaz de reiniciarse y tomar la carga de la isla en cuanto el interruptor se abra. El análisis de flujo de potencia de las posibilidades de crear islas tiene que llevarse a cabo para asegurar que la regulación de voltaje es la apropiada en la isla. La unidad de generación distribuida debe de darle seguimiento al comportamiento de la carga durante la operación de seccionamiento, sensando si es que se presenta una falla de corriente dentro del área que alimenta y en ese caso enviar una señal que bloquee la alimentación de la isla siempre y cuando la falla se presente en dicha zona. Cuando la red se restablece el interruptor efectúa el recierre cuando se garantice la sincronía entre la isla y la red. Lo anterior requiere de una medición de voltaje en ambos lados del interruptor y la transmisión de la información a la unidad de generación distribuida que soportó a la isla para que pueda sincronizarse con la red y en ese caso permitir la reconexión. En la actualidad se cuenta con interruptores y

sistemas de comunicaciones muy avanzados que permiten que se establezca este procedimiento.

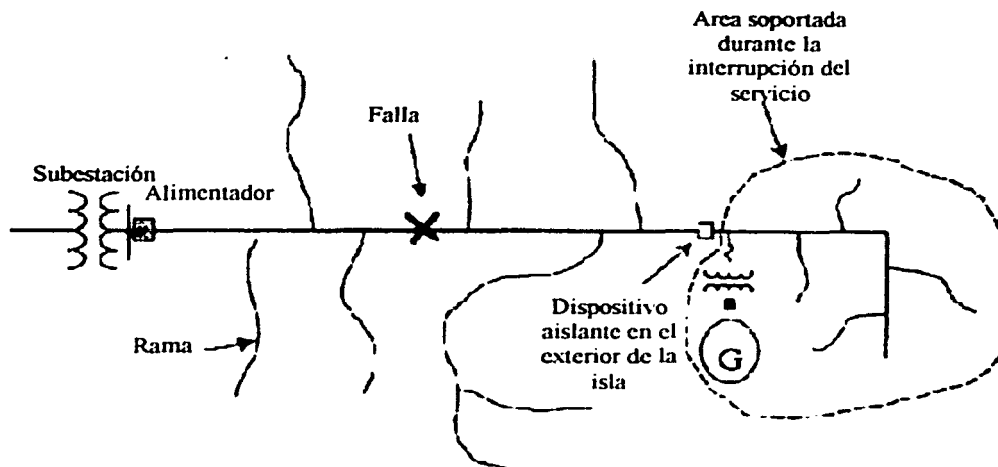


Figura 17. La isla intencional de una porción de la red con un generador distribuido necesita de esfuerzos considerables de planeación y control para trabajar en forma segura y correcta.

El módulo de celda de combustible está equipado con un sistema de control y protección tal que le permite generar una isla intencional sin ningún problema.

3.4.1.7 Interfaces de los transformadores y aterrizamiento

La generación distribuida debe utilizar una configuración especial con el transformador y un arreglo de tierras compatible con la de la red convencional con la que será conectada. De otro modo, los bajos voltajes y sobretensiones suministrados a la red pueden dañarla y además a los usuarios.

Los sistemas de distribución convencionales cuentan con una configuración trifásica y un neutro el cual es puesto a tierra según las condiciones del sistema, siempre respecto a la fuente proveniente de la subestación. Para una falla de fase a tierra, este arreglo limita el aumento de voltaje sobre las fases que no presentaron la falla con un aumento de tan solo un 125 a 135% de las condiciones antes de presentarse la falla.

Por definición del IEEE, un aterrizamiento correcto de tierras significa que la reactancia de secuencia positiva sea mayor que la resistencia de secuencia cero ($X_1 > R_0$) y que la

reactancia de secuencia cero es tres veces menor que la reactancia de secuencia positiva ($3X_1 > X_0$).

Utilizando una fuente de generación distribuida que no proporcione un correcto aterrizamiento de tierras puede ocasionar sobretensiones durante la falla a tierra de la red del sistema. Esta condición es especialmente peligrosa si se generan islas (porciones de la red que son energizadas por el generador distribuido cuando la red interrumpe el servicio) y continua suministrando energía a un grupo de consumidores cuando el sistema de distribución tiene fallas. Los consumidores que se encuentran en las fases sanas pueden, en el peor de los casos, ver un incremento en sus voltajes del 173% sobre el valor nominal por un periodo indefinido. A este alto nivel, la red y los equipos de los consumidores seguramente presentarán daños.

Por otra parte, la saturación de los transformadores de distribución pueden ayudar ligeramente para limitar los incrementos de voltaje. Sin embargo el voltaje puede todavía alcanzar niveles de 150% sobre los nominales.

Para eliminar estos problemas, todas las fuentes de generación distribuida deben contar con un sistema de tierras lo suficientemente efectivo para soportar el efecto de islas. Si esto no es posible, el módulo de generación debe utilizar un sistema apropiado de protecciones para detectar del lado del primario las fallas a tierra así como rápidos recierres de la línea. El primer punto es preferible, ya que limita por diseño los incrementos de voltaje que el sistema puede ver durante la falla. El detectar los rápidos recierres de la línea, es comúnmente usado en las instalaciones eléctricas además de ser sumamente útil, para evitar que el usuario esté sujeto a un gran número de ciclos de un severo sobrevoltaje antes de que la unidad de generación distribuida se desconecte del sistema, y si dicha unidad no es rápidamente desconectada el equipo puede sufrir daños.

Algunas configuraciones comunes de transformadores se encuentran en la siguiente tabla.

Configuración del transformador	Comentarios
Delta - Estrella no aterrizada o Delta - Delta	Ambas configuraciones no proveen de una tierra efectiva a menos que se coloque un banco de tierras
Estrella aterrizada - Estrella aterrizada	Provee de una tierra efectiva si el banco de tierras es provisto o si el generador esta en estrella y aterrizado y además contiene una impedancia de tierra.
Estrella aterrizada - Delta	Provee una tierra efectiva respecto al arreglo

Tabla 13

No todas proveen de una conexión efectiva a tierra. Este problema se puede solucionar utilizando un módulo adyacente (banco de tierra), que es una forma de crear para la unidad generadora una tierra cuando la conexión no la provee.

Es importante considerar que cualquier fuente de tierras adicionales al sistema, aunque este sea con un banco de tierras o usando un transformador, tendrá el efecto de reducir el retorno de la secuencia cero vista en la subestación de la falla de fase a tierra del alimentador. La cantidad de corriente desviada es determinada por la proporción de impedancia de la tierra del módulo de generación distribuida entre la impedancia de tierra de la subestación. Este efecto tiene el impacto de desensibilizar los relevadores de fallas a tierra en subestaciones, ya que ésta verá menos magnitud de corriente de la falla a tierra fuera del alimentador.

Para reducir el impacto en este problema, la fuente de impedancia de tierra de la unidad generadora debe ser analizada para asegurar que ésta no desvíe tan sólo una pequeña fracción de la corriente de falla a tierra (alrededor del 10% de manera general). Para pequeñas unidades de generación distribuida lo anterior no es un problema. Para gran número de plantas generadoras, el nivel de corto circuito requiere ser estudiado para identificar el impacto de éste y ver si algún cambio es requerido en el ajuste del disparo del relevador.

Una resistencia de tierras puede ser usada en la conexión de la unidad de generación distribuida para limitar el impacto. Esto también ayuda a reducir la circulación de corriente en un devanado de una conexión delta del transformador, que es producida por el voltaje de secuencia cero del alimentador.

Una revisión apropiada de las características del generador y del sistema de red al cual se interconectará la unidad generadora distribuida puede asegurar que los problemas ocasionados por las tierras pueden ser tratados adecuadamente. La compatibilidad de la tierra es crucial para asegurar la calidad de potencia y la confiabilidad para que estos beneficios no sean disminuidos por la adición de una unidad generadora distribuida.

3.5 POLÍTICAS DE OPERACIÓN Y PROTECCIÓN

El productor externo puede operar en forma aislada por la presencia de una contingencia en la compañía suministradora. Sin embargo, debido a las limitaciones para alimentar la carga y a la baja constante de inercia inherente en el generador, en Luz y Fuerza del Centro se ha adoptado la política de no permitir que el generador trabaje en forma aislada, para evitar problemas de vanaciones de tensión y de frecuencia, ya que es responsabilidad de la compañía suministradora proporcionar buena calidad en el suministro de la energía eléctrica⁶.

Los esquemas de protección del generador del productor externo no son suficientes para detectar problemas en el enlace de interconexión y en las instalaciones internas, por esta razón se justifica la instalación de sistemas específicos de protección en la interconexión, como: sobrecorriente de fase y de tierra con elementos de tiempo e instantáneo, bajatensión, sobretensión, bajafrecuencia, sobrefrecuencia y comprobación de sincronismo. Se debe dedicar especial atención a los trabajos de ajustes y coordinación de las protecciones, para lograr que opere correctamente en la presencia de fallas internas y evitar su operación con fallas o fluctuaciones externas; por lo que se sugiere ajustar las protecciones con retardo de tiempo.

3.6 PRÁCTICAS DE RECIERRE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN O DISTRIBUCIÓN DE LOS PRODUCTORES EXTERNOS (PERMISIONARIOS)

En EUA, los suministradores no utilizan de manera generalizada la práctica de recierre monopolar en líneas de transmisión o tripolar en líneas de distribución, cuando se interconectan con los productores externos.

En CFE y Luz y Fuerza del Centro (LyFC) se aplica el recierre tripolar en alimentadores con tiempos de 15 y 45 segundos. El esquema está provisto de un bloqueo eléctrico para evitar que se efectúe el recierre estando energizada la línea de distribución.

En el extremo de los generadores externos no se aplica el recierre, por un lado por el problema de sincronización y por otro porque se producen pares por transitorios eléctricos, que pueden afectar las flechas de los generadores sincros, motores de inducción y motores sincros.

3.7 ASPECTOS TÉCNICOS

En México existen personas del sector eléctrico que se han preocupado por los aspectos técnicos que implica la instalación de un generador externo, sea cual sea su tecnología, en el sistema eléctrico de potencia⁹

A continuación se puntualizan tales aspectos:

- 1.- Los equipos primarios, tales como transformadores de potencia, transformadores de instrumento, interruptores, cuchillas, etc. deben estar dimensionados para soportar la máxima corriente de cortocircuito
- 2.- Los niveles de aislamiento que utilice el productor externo para el dimensionamiento de sus instalaciones, deben ser similares a la experiencia de aplicación práctica de la compañía suministradora.

- 3.- Bajo ciertas condiciones de operación de la compañía suministradora, se pueden producir corrientes de secuencia negativa, que fluye al generador del productor externo; por lo que es responsabilidad de éste proteger su equipo contra corrientes excesivas de secuencia negativa.
- 4.- En la interconexión entre la compañía suministradora y el productor externo no se deben instalar fusibles o restauradores.
- 5.- Los transformadores principales no se deben proteger con fusibles.
- 6.- Se deben instalar transformadores de potencial del lado de la compañía suministradora, para evitar que el interruptor cierre o recierre en forma manual o automática, cuando está energizado del lado del productor externo. Los transformadores de potencial para protección y para medición deben tener dos devanados secundarios.
- 7.- Los transformadores de corriente para protección y para medición deben diseñarse con dos núcleos secundarios.
- 8.- La medición de potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, demanda máxima y energía, debe ser direccional y se deben utilizar transformadores de corriente y de potencial con una exactitud de $\pm 0.3\%$.
- 9.- La interconexión del productor externo con la compañía suministradora no debe ocasionar disminución de la calidad del servicio en cuanto al nivel de voltaje ($\pm 10\%$ de la tensión nominal), variación de la frecuencia ($\pm 0.8\%$ de la frecuencia nominal) y número de interrupciones.
- 10.- El productor externo es el único responsable de la sincronización de su generador con la compañía suministradora.
- 11.- En general, el generador del productor externo debe aislarse de la compañía suministradora a través de un transformador de potencia. El transformador debe conectarse de tal manera que se aisle la corriente de secuencia cero de lado del productor externo con respecto a la interconexión con la compañía suministradora.
- 12.- Al productor externo no se le debe permitir que energice el circuito de enlace con la compañía suministradora, cuando éste se encuentra desenergizado.
- 13.- El productor externo debe instalar cuando se requiera dos canales de comunicación, como parte del esquema de protección, medición, comunicación y datos, como: hilo piloto, onda portadora, microonda, fibra óptica, circuito telefónico o cualquier otro medio que determine la compañía suministradora.
- 14.- El productor externo tiene como responsabilidad establecer los esquemas apropiados de protección primarios y de respaldo, del enlace de interconexión de su lado y del generador, así como de las instalaciones internas y de servicio propios.

15.- Los esquemas de protección, criterios de coordinación y valores de ajuste de los relevadores que integran el enlace de interconexión, deben ser discutidos y avalados por el suministrador.

16.- La compañía suministradora ha adoptado la práctica de 2 recierres con tiempos de 15 y 45 segundos, debido a que los recierres de corta duración (menores a un segundo) provocan pares por transitorios eléctricos en las flechas de los generadores. El esquema está provisto de un bloqueo eléctrico para evitar que se efectúe el recierre estando energizado el enlace de interconexión.

17.- Si por alguna causa la subestación remota del enlace de interconexión con el productor externo queda sin potencial, se debe abrir el interruptor propio e interruptor de enlace (si existe) de la interconexión, para evitar que se conecte fuera de sincronismo, una vez que la subestación sea reenergizada.

18.- Cuando el productor externo se encuentra interconectado a través de un alimentador primario se debe diseñar el esquema de protección, de tal forma, que al operar la protección primaria del transformador no mande a cerrar el interruptor de enlace.

19.- Durante la puesta en servicio se debe realizar, lo siguiente: ajuste de las protecciones, faseo de las protecciones, pruebas de disparo reales y pruebas finales al equipo de comunicación.

20.- El productor externo debe proporcionar el diagrama unifilar, diagrama esquemático de protecciones y de disparo, características técnicas, protocolos de prueba de los equipos primarios y secundarios (protección, comunicación y control), y memoria técnica de cálculo del proyecto.

21.- Los costos asociados con cualquier cambio o los requerimientos de equipo nuevo por incremento del nivel de corto circuito o por cambios en las condiciones de operación, protección, medición y control, debe considerarse como parte de la instalación del generador externo.

22.- Finalmente, se recomienda que para lograr un óptimo diseño de la interconexión entre el suministrador y el productor externo, es necesario establecer buena comunicación, entendimiento, colaboración y apoyo mutuo; tomando en cuenta que se dispone de los recursos humanos con nivel técnico especializado.

3.8 OBSERVACIONES FINALES

Los sistemas eléctricos no han sufrido grandes modificaciones de tipo técnico y estructural en las últimas décadas. Sin embargo en años recientes, debido a causas económicas, el sector energético a nivel mundial, ha presentando cambios tales como la

desintegración de los monopolios verticales, la introducción de libres mercados y el importante papel que ha adquirido la inversión privada en ellos.

Ante esta nueva situación se han buscado alternativas de generación que se adapten a los sistemas eléctricos de potencia actuales, de tal forma que se diversifiquen los esquemas de potencia para hacer frente al crecimiento de la demanda.

La generación distribuida constituye una nueva propuesta que contribuye a satisfacer las necesidades de energía de los usuarios. Para ello es importante, contar con una serie de regulaciones que garanticen que la introducción de generación distribuida en sistemas convencionales no afecte la calidad, la continuidad y confiabilidad del servicio. Por el contrario, se busca que las anteriores características mejoren con este nuevo esquema.

En relación con la normatividad existente, no se cuenta con una legislación específica sobre generación distribuida, pero es posible basarse en el marco legal actual para establecer generadores distribuidos. Además organismos como la IEEE, ANSI, IEC, etc., han constituido normas de tipo técnico que pueden ser utilizadas como referencia para la instalación de unidades de generación distribuida.

Las normas desarrolladas por los anteriores organismos dan la pauta para la interconexión de un generador independiente a la red. En el caso de la generación distribuida se plantean diferentes problemas, tales como: regulación de voltaje y pérdidas, fluctuaciones de voltajes, armónicas, impacto sobre los niveles de corto circuito, islas y aterrizamiento de los equipos, entre los más importantes.

Sin embargo utilizando celdas de combustible como fuentes generadoras, los conflictos como fluctuaciones de voltaje, armónicas e islas no representan un problema. En cambio, existen otros obstáculos de la interconexión de las celdas de combustible con la red, pero éstos son ocasionados por la estructura de la red, lo cuales se tratarán en el siguiente capítulo.

¹ Viqueira L. Jacinto, *"Problemas, evaluación y perspectivas de la industria eléctrica en México"*, Informe anual del proyecto de investigación No IN302397, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1998.

² *"International Seminar on Restructuring and Regulation of the Electric Power Sector"* Noviembre 1995, Buenos Aires, Argentina

³ Méndez Albores R., *"Panel de Generación Distribuida y Cogeneración"*, Reunión de Potencia de Verano IEEE, Julio 2001

⁴ Índice del Tratado de Libre Comercio de América del Norte: <http://www.nafta-sec-alena.org/spanish/nafta/chap-06.htm>

⁵ Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
<http://www.congreso.gob.mx/Federal/fed00.html>

⁶ Cámara de Comercio. Leyes y Reglamentos del Sector Eléctrico:
<http://www.ccmexico.com.mx/canaco/elrese.html>

Barker, Philip p., *"Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems"*, Power Technologies, Inc. IEEE

⁷ Méndez Albores R., *"Panel de Generación Distribuida y Cogeneración"*, Reunión de Potencia de Verano IEEE, Julio 2001

⁹ *Idem*

4. IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA A PARTIR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

4.0 INTRODUCCIÓN GENERAL

En este capítulo abordaremos los distintos tipos de impacto que se presentan al utilizar generación distribuida.

En primer lugar se explica un esquema para sistema de distribución que debe utilizarse al conectar generación distribuida. El esquema propuesto ha demostrado ser bastante confiable y junto con los avances en sistemas de protección y control se puede implementar sin muchas dificultades.

Posteriormente, hablamos sobre los beneficios en materia económica que se obtienen al introducir la generación distribuida como parte de la expansión del sistema eléctrico, necesaria para satisfacer la demanda de energía eléctrica.

Finalmente, se detalla el impacto de la generación distribuida a partir de celdas de combustible en el medio ambiente.

De esta manera pretendemos dar un panorama sobre las consecuencias de incluir generadores distribuidos en un sistema eléctrico de potencia.

4.1 INTEGRACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN UN SISTEMA TÍPICO DE DISTRIBUCIÓN

La confiabilidad actual de los sistemas de potencia es del orden de un 99.9%, es decir tienen una confiabilidad de "Tres Nueves" lo cual equivale a 8 horas de pérdida de energía eléctrica al año para un consumidor típico. Consumidores como hospitales, aeropuertos y bases militares necesitan más de tres nueves de confiabilidad, es por ello que han decidido establecer sistemas de emergencia.

Últimamente la necesidad de tener más de tres nueves de confiabilidad se ha extendido hasta las industrias y los usuarios domésticos, en particular por el auge de la "tecnología de la información". Sin embargo, aún con las mejoras realizadas los sistemas de potencia no han sido capaces de rebasar una confiabilidad de tres o cuatro nueves. Las limitaciones que impiden una mejora en la confiabilidad están relacionadas con el

clima y el costo que representa diseñar el sistema para que tenga una mayor confiabilidad.

Los usuarios domésticos demandarán en algunos años que la confiabilidad llegue hasta 6 nueves, lo que equivale a 30 segundos de interrupciones al año. Sin embargo, incluso este nivel es inaceptable para las industrias que utilizan equipo electrónico muy sensible, dichas industrias requieren al menos 99.99999% o nueve nueves de confiabilidad lo cual implica que prácticamente no existan interrupciones en el suministro de energía eléctrica. Por lo anterior, tanto el sistema eléctrico de potencia como los generadores de emergencia deben alcanzar estos niveles de confiabilidad.

La creciente necesidad de contar con los niveles de confiabilidad antes mencionados ha producido gran interés en la generación distribuida. El introducir sistemas de generación distribuida en la red implica que la coordinación de protecciones así como el equipo asociado al control de éstas sea más complicado. Estos aspectos deben ser manejados cuidadosamente ya que un error puede ocasionar que la confiabilidad disminuya e incluso se presente una reducción en la calidad de la energía suministrada.

4.1.1 Visualización de un sistema eléctrico de potencia con generación distribuida

Los sistemas de distribución en EUA son, en su mayor parte, circuitos radiales diseñados para que exista flujo de potencia en una sola dirección. Por lo tanto se ha pensado en introducir un esquema de lazo (EL). El esquema de lazo tiene como característica que tanto los sistemas de control como los de protección son más complejos que en el esquema radial

A continuación se pretende explicar el funcionamiento de un esquema de lazo sin unidades de generación de distribuida, posteriormente se verá el comportamiento del esquema de lazo con unidades de generación distribuida. También se comentarán los requerimientos de protección. Finalmente se describirán las últimas tecnologías de control de recierres y los nuevos relevadores que han sido diseñados.

La siguiente figura ilustra la integración de las unidades de generación distribuida en un sistema eléctrico de potencia (SEP) regional. Se supone que el voltaje generado por la unidad de generación distribuida debe adaptarse al sistema y no debe tratar de regular el voltaje en el Bus 1.

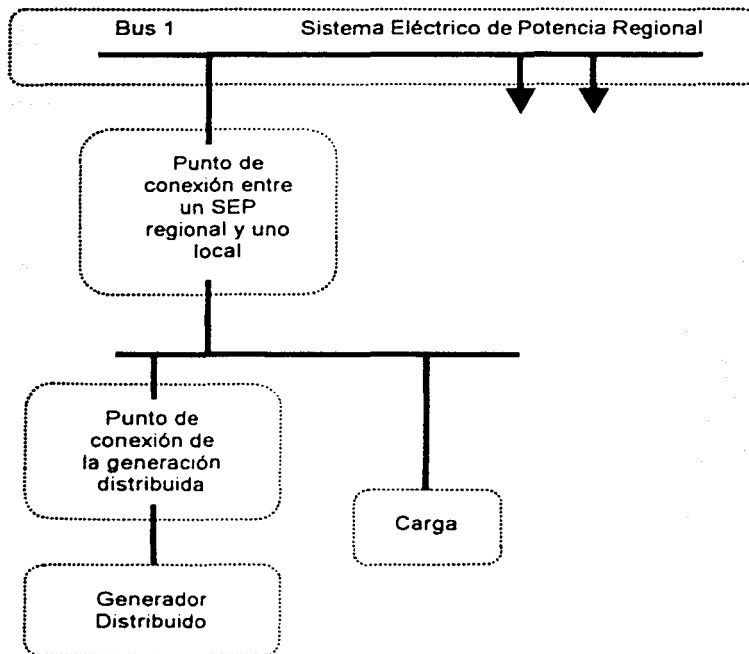


Figura 18. Integración de un generador distribuido en un sistema eléctrico de potencia regional.

4.1.2 Operación del esquema de lazo

Los esquemas de lazo son bastante utilizados en Estados Unidos desde que se comprobó que su implementación reduce las interrupciones en el servicio eléctrico en un alimentador fallado cerca de un 50% comparado con un alimentador radial. Estos esquemas de lazo incluyen de tres a cinco interruptores cuyos controles son programables, que pueden operar tanto en forma seccionada como en forma enlazada.

En forma seccionada, se mide el voltaje en el lado de un interruptor normalmente cerrado que existe en el lado de la fuente, en cuanto se pierde el voltaje, el interruptor se abre. En el modo enlazado, se mide el voltaje en ambos lados de un interruptor normalmente abierto y se activan las protecciones cuando el voltaje se pierde en cualquier lado.

4.1.2.1 Operación de los tres interruptores en el esquema de lazo

El sistema de tres interruptores en el esquema de lazo consiste en tres interruptores que llamaremos 1B, 2B y 1C los cuales están coordinados con los interruptores automáticos de circuito llamados 1A y 2A. Cuando se presenta una falla en F1 el interruptor del alimentador, 1A, se abre y se bloquea. El sistema de control del interruptor 1B percibe una caída de voltaje del lado de la fuente, mientras que el sistema de control del interruptor de enlace 1C observa una pérdida de voltaje del lado en el que se encuentra el interruptor 1B. En ese momento se inicializan los temporizadores en los dos sistemas de control. El tiempo de retardo en el interruptor 1B termina primero, en cuanto esto sucede el interruptor 1B se abre. El tiempo de retardo en el interruptor 1C, normalmente abierto, termina posteriormente justo en ese momento cierra el interruptor. De esta forma se restaura el servicio en el alimentador no fallado en la sección comprendida entre 1B y 1C.

Ahora bien, si la falla ocurre en F2, el interruptor 1B se abre y se bloquea una vez que se completa la secuencia de protección de falla. El control del interruptor 1C registra una pérdida de voltaje en el lado en el que se encuentra el interruptor 1B. El temporizador se inicializa y al terminar su tiempo de retardo el interruptor 1C se cierra. Al cerrarse, el control del interruptor se percata de la existencia de una corriente de falla, se desconecta y se bloquea. La parte no fallada del alimentador que se encuentra entre 1A y 1B permanece en servicio. Todas estas operaciones del interruptor suceden rápida y automáticamente. Las secciones falladas en el alimentador son las únicas aisladas. Este esquema no requiere un control centralizado, ni una atención manual.

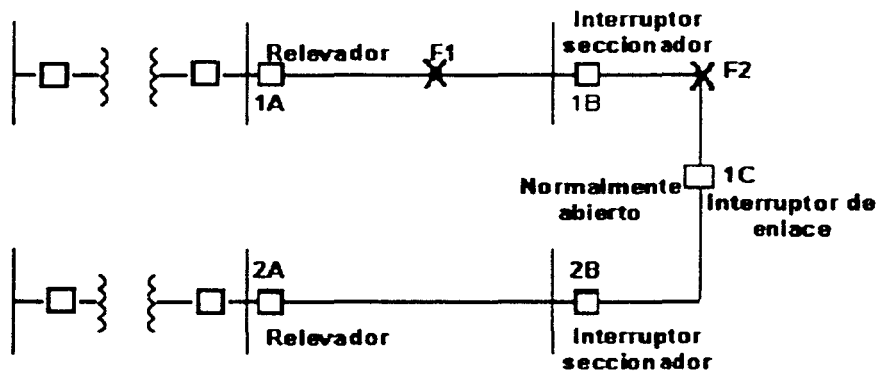


Figura 19. Esquema de tres interruptores.

4.1.1.2 Operación del sistema con cinco interruptores en el esquema de lazo

Este sistema tiene los siguientes interruptores 1B, 1C, 2B, 2C y 1D que están coordinados con los interruptores automáticos de circuito que llamaremos 1A y 2A. Cada alimentador está dividido en tres partes las cuales tienen aproximadamente la misma carga. El impacto de una interrupción en el servicio se puede reducir hasta un 33% comparado con el esquema radial.

Una falla en F1 ocasiona que opere el interruptor 1A. Los sistemas de control de los interruptores 1B, 1C y 1D observan una caída de voltaje, tras lo cual, inician sus temporizadores. El tiempo de retardo del temporizador del interruptor 1B finaliza primero, lo cual provoca que se abra el interruptor. Cuando el tiempo de retardo del interruptor 1C termina su control vuelve a un ajuste de disparo mínimo alternativo programado para una protección de falla coordinada mientras esté retroalimentado. Cuando el tiempo de retardo del interruptor 1D acaba dicho interruptor se cierra. Después de estas maniobras automáticas, la sección fallada es aislada, contándose con dos tercios de la sección total en servicio.

Si se presentase una falla en F2, el interruptor 1B opera y se bloquea, posteriormente se lleva a cabo una secuencia de protección predeterminada. Los interruptores 1C y 1D registran una pérdida en el voltaje, tras lo cual inician los temporizadores. El tiempo de retardo del interruptor 1C termina primero y su control vuelve a niveles de disparo mínimos alternativos con una característica momentánea de apertura. Cuando el tiempo de retardo del interruptor 1D finaliza éste cierra. El interruptor 1C detecta una corriente de falla se desconecta y se bloquea. Las interrupciones debido a fallas en F2 son limitadas automáticamente a una pequeña porción del alimentador.

Una falla en F3 provoca operaciones similares descritas para fallas en F2. Los interruptores 1C y 1D se abrirán en secuencia, lo cual limitará la falla en un tercio del alimentador, mientras que dos tercios del lazo permanecen funcionando.

En ambos casos, la corriente de falla fluye en una sola dirección. Las protecciones de sobrecorriente no direccionales con cambio automático a una desconexión mínima alternativa proveen niveles de protección adecuados.

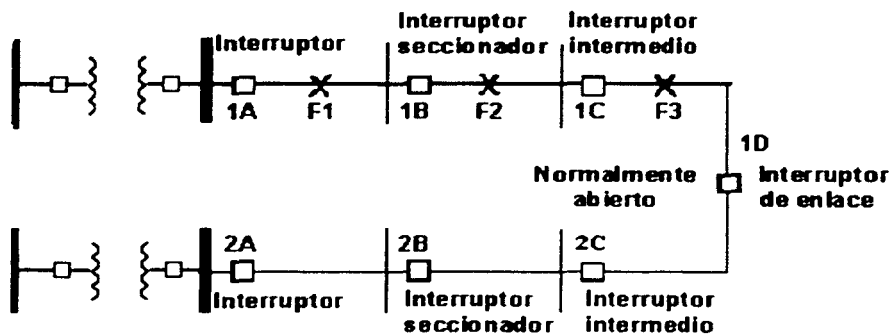


Figura 20. Sistema con cinco interruptores.

4.1.3 Operación del esquema de lazo con unidades de generación distribuida

Se espera que la generación distribuida será usada para suministrar energía confiable a precios competitivos. Se están desarrollando regulaciones que comprenden especificaciones técnicas y requisitos para la interconexión de unidades de hasta 10 MVA con las redes existentes.

Las siguientes secciones incluyen aspectos técnicos para la integración de la generación distribuida, requisitos para la operación del esquema de lazo con generación distribuida y los requisitos de protección.

4.1.3.1 Diseño del esquema de lazo y operación con generación distribuida

Como pudimos observar tanto el sistema con tres interruptores como el de cinco interruptores, operan con interruptores de enlace normalmente abiertos, a los cuales llamamos 1C y 1D. La razón que justifica que estos interruptores estén normalmente abiertos es que se simplifican los sistemas de protección para operar los esquemas de lazo con sistemas radiales donde la potencia siempre fluye en una dirección. Otra razón son los problemas de sincronización en el interruptor de enlace, ya que las dos fuentes pueden estar fuera de sincronía. La sincronización en el interruptor de enlace es necesaria, lo cual complica toda la operación del esquema de lazo.

La introducción de generadores distribuidos puede influir en forma significativa en el diseño y operación de un esquema de lazo. La mayor influencia de la generación distribuida en los esquemas de lazo se da en los requerimientos de protección. Los sistemas de distribución deben ser protegidos de las repercusiones que pueden ocasionar

la generación distribuida durante fallas y condiciones anormales de operación. A su vez las plantas distribuidas deben ser protegidas de fallas y de condiciones anormales de operación de los sistemas de distribución. Estos problemas pueden ser sobrevoltajes, sobre excitación, corrientes desbalanceadas, sobrefrecuencia y bajafrecuencia. Los flujos de potencia se dan en ambas direcciones y la sincronización se vuelve un asunto de importancia.

Los niveles de contribución de corriente durante las fallas en un sistema de distribución es un parámetro indispensable para diseñar los sistemas de protección del esquema de lazo y de los generadores distribuidos. Es importante mencionar, que las contribuciones de corriente varían de acuerdo a la tecnología de generación distribuida que se utiliza.

Varias clases de generadores distribuidos pueden coexistir en un mismo sistema eléctrico de potencia regional, sin embargo se requieren diferentes sistemas de protección. Por otro lado, existen en el mercado nuevos sistemas de control y protección que ofrecen bastante flexibilidad en su empleo, lo cual hace posible que los esquemas de lazo puedan operar con generación distribuida y con interruptores de enlace normalmente cerrados.

La siguiente figura muestra un esquema de lazo con cinco interruptores y con un generador distribuido.

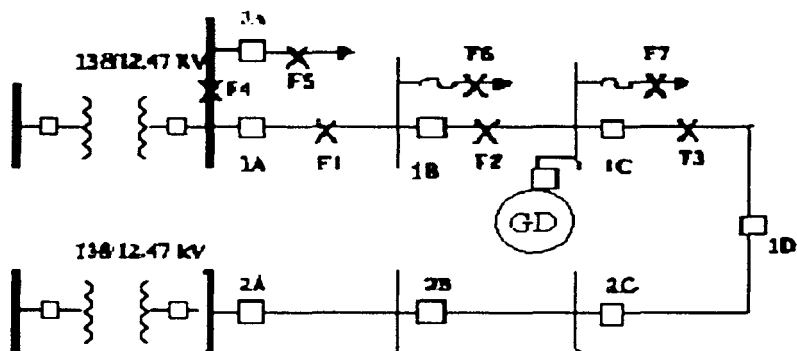


Figura 21. Esquema de lazo con cinco interruptores con generación distribuida.

Para demostrar la complejidad de los requerimientos de protección cuando se opera un esquema de lazo con generación distribuida, se explicará su operación cuando se presentan diversas fallas. Se debe tomar en cuenta, que la función principal de un sistema

de protección es desconectar la menor cantidad de elementos posibles cuando ocurre una falla.

Falla en F1. Para un esquema de lazo radial, el interruptor 1A debe detectar la falla y operar. El interruptor 1B puede o no registrar la falla, esto depende de la magnitud de la corriente de falla suministrada por la generación distribuida. Esto implica que el interruptor 1B debe estar equipado con protección direccional de corriente. Si el interruptor 1B opera, la sección entre 1B y 1D se volverá una isla. En el caso de que la unidad de generación distribuida no este diseñada para crear islas, se deba desconectar la planta. Para un esquema de lazo cerrado, 1A y 1B operarán, mientras tanto el resto del sistema no se verá afectado.

Falla en F2. Para un esquema de lazo radial, el interruptor 1B y el dispositivo de interconexión del generador distribuido deben operar. El recierre del interruptor 1B puede presentarse después de que el generador distribuido se desconecte. Si se lleva a cabo el recierre en forma exitosa, la planta puede ser conectada nuevamente una vez que se sincronice. Para un esquema de lazo cerrado, los interruptores 1B y 1C operarán y el generador distribuido se desconectará.

Falla en F3. Para un esquema de lazo radial, el interruptor 1C debe operar para liberar la falla. La coordinación entre los interruptores 1B, 1C y el generador distribuido debe ser diseñada para una falla en este punto. Para un esquema de lazo cerrado, 1C y 1D deben operar y el resto del sistema no será afectado.

Falla en F4. Para esta falla se necesita una protección de bus diferencial u otra protección selectiva para liberar la falla. El interruptor 1A se accionará. Para un esquema de lazo radial, el generador distribuido debe ser desconectado, a menos que se permita la creación de islas. La generación distribuida puede ser energizada nuevamente después de que el interruptor de enlace 1D se cierre. La sincronización entre todos los elementos es necesaria. Para un esquema de lazo cerrado, el sistema no es alterado si la falla es liberada rápidamente.

Falla en F5. Para un esquema de lazo radial, el interruptor 3A deberá operar y el interruptor 1A no debe dispararse. Una protección direccional de sobrecorriente puede ser necesaria en el interruptor 1A, esto dependerá del tipo de generador distribuido que se utilice. Para un esquema de lazo cerrado, es necesario contar con una protección direccional de sobrecorriente en los interruptores 1A, 1B y 1C.

Falla en F6. En un esquema de lazo radial, se asume que la falla se presenta el fusible y la carga. Con el fin de evitar la fusión del fusible, el interruptor 1A debe operar antes que éste. El interruptor 1B debe operar si la generación distribuida contribuye a la corriente de falla. El generador distribuido debe desconectarse para prevenir la creación de islas. Si existen varias instalaciones de generadores distribuidos, los cuales

contribuyan de manera significativa a la corriente de falla, el fusible puede operar aunque se utilicen protecciones contra sobrecorrientes en los interruptores 1A, 1B y en los generadores distribuidos. Para un esquema de lazo cerrado, al operar el interruptor 1B no se necesita desconectar al generador distribuido. Es necesaria la sincronización para cerrar 1A y 1B. En el caso de que no importe la fusión del fusible, éste puede operar y el resto del sistema no será alterado.

Falla en F7. Tanto para un esquema de lazo radial como para un esquema de lazo cerrado, si se pretende evitar la fusión del fusible, el generador distribuido deberá desconectarse. Si por el contrario no importa la fusión del fusible, éste operará y el resto del sistema no será alterado.

4.1.4 Requerimientos de protección

Las protecciones del esquema de lazo y del generador distribuido deberán detectar tanto fallas de fase como fallas a tierra. Además se requiere que exista coordinación entre las protecciones de la generación distribuida y del sistema de distribución.

4.1.4.1 Detección de fallas.

Para detectar fallas de fase cuando la generación distribuida contribuye con corriente, generalmente se utilizan relevadores de sobrecorriente. Sin embargo, en este caso medir la corriente de falla no es suficiente ya que en ocasiones el valor que alcanza la corriente de falla se equipara a la corriente nominal del generador distribuido. Una opción para resolver este problema es utilizar una protección de sobrecorriente controlada por voltaje. Para los alimentadores que están conectados a una planta de generación distribuida se puede emplear una protección direccional de sobrecorriente. Esta protección debe estar ajustada en forma tal que se dispare en el momento en que se produzca una falla en el alimentador protegido y que no se dispare si la falla se presenta en un alimentador adyacente. Si la unidad de generación distribuida no contribuye a la corriente de falla basta con detectar caídas de voltaje para asumir la existencia de una falla.

La protección de fase a tierra depende de la conexión del transformador de la unidad de generación distribuida y del sistema de tierra del sistema de distribución. Si el transformador de la unidad de generación distribuida está conectado en delta – estrella aterrizada, la protección de sobrecorriente se coloca en el neutro del transformador ya que en caso de que se presente una falla pasará una cantidad de corriente significativa por el neutro. En el caso de que el neutro no esté disponible se puede utilizar una protección basada en la medición de voltaje

El sistema de protección de un generador distribuido puede variar de acuerdo a la tecnología empleada, sin embargo, se puede necesitar una gran cantidad de dispositivos como protecciones de sobrecorriente, de sobreexcitación, de pérdida de excitación, de sincronía, típicas para el transformador, entre otras.

4.1.5 Nuevos interruptores, sistemas de control y relevadores multifuncionales

Se ha explicado la complejidad de los sistemas de protección que requiere un esquema de lazo cuando se utiliza junto con generadores distribuidos y la unidad de generación distribuida. Lo anterior, implica que el número de relevadores utilizados se incrementa así como el cableado necesario para su conexión.

Sin embargo, actualmente existen nuevos relevadores multifuncionales y sistemas de control que integran varias funciones de protección en un solo dispositivo. Por lo tanto, se simplifica la cantidad de elementos requeridos así como el cableado de éstos. De igual forma se han desarrollado programas de computadora que permiten controlar a los relevadores multifuncionales, además es posible obtener datos relevantes sobre el comportamiento del sistema mediante algoritmos para obtener cantidades como componentes simétricas, fasores y frecuencia¹.

4.2 IMPACTO EN LA PLANEACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA

El concepto de generación distribuida proporciona una alternativa para dar nuevas pautas a la expansión de la red eléctrica. La idea fundamental de la generación distribuida se ha tratado ampliamente, pero es importante recalcar que este tipo de esquema podría significar un menor costo, así como atrasar las inversiones en centros de generación convencional y en la expansión del sistema de transmisión así como el de subtransmisión y distribución.

En lugar de invertir en las áreas anteriores, el esquema de generación distribuida sugiere que se realice una inversión en la generación y en el almacenamiento del combustible necesario para generar electricidad de manera local. Estas acciones pueden satisfacer los incrementos de la demanda a un menor costo.

Para responder a las nuevas exigencias del mercado, las compañías eléctricas deben cambiar la forma de operar, la manera de planear su expansión y posiblemente de su estructura.

La economía de escala en plantas centrales de generación permite suministrar energía eléctrica disminuyendo el costo por kWh a los consumidores ayudando a la expansión del sistema de transmisión y distribución. El incremento del costo del combustible, la inflación, la reducción de las economías de escala de las centrales de generación, la consideración

de los impactos ambientales, los problemas de la industria nucleoelectrónica, aunado a otros factores, propiciaron que el costo de la generación eléctrica aumentara.

En 1985 en EUA, la fracción total de la inversión en el sector energético tenía destinado para generación un 69% y para transmisión y distribución un 27%. En 1989 el capital de inversión de los sistemas de transmisión y distribución equipararon la inversión en generación por primera vez. Posteriormente se esperaba un incremento en la inversión de transmisión y distribución. Para 1994, la inversión para la generación fue del 38%, pero para transmisión y distribución aumentó a un 51%².

Las anteriores condiciones sugieren un cambio en la manera de invertir en el sector energético. Es por ello que la generación distribuida representa un beneficio económico ya que al generar electricidad de manera modular y situar las unidades cerca del centro de consumo, se reduce la necesidad de expandir el sistema de transmisión y distribución.

Por otro lado, ya que el sistema de transmisión o de distribución está diseñado para hacer frente a los picos de demanda, por grandes que éstos sean, el lapso de tiempo en el que se presenta esta máxima demanda representa una inversión alta que solo se utiliza en un periodo corto de tiempo. Esto significa que la inversión realizada no es aprovechada en su totalidad. Al tomar en cuenta otras alternativas al realizar la planeación de la red, se diversifica la inversión lo cual permite minimizar riesgos. Estudios recientes sugieren que la generación distribuida puede satisfacer los picos de demanda, además el costo que resulta de la instalación de estas unidades es menor al costo que tiene reforzar o expandir el sistema de transmisión y de distribución.

4.2.1 Beneficios en la planeación con generación distribuida

Con el objetivo de ilustrar los beneficios que se obtienen al realizar la planeación de un sistema eléctrico con generación distribuida, se explicará un ejemplo real. Este ejemplo consiste en la planeación para el crecimiento del sistema eléctrico de potencia en la zona Livermore – Pleasanton llevado a cabo por Pacific Gas and Electric Company (PG&E).

La zona de Livermore – Pleasanton (LP) se encuentra a 64 Km al sudeste de San Francisco. El plan de expansión en el área se basaba en una estimación del valor esperado de la tasa del crecimiento de la demanda pico de 12.3 MW por año, es decir 9.2%, por año, del valor máximo de la demanda pico, la cual fue de 133 MW en 1990. La tasa de crecimiento del sistema de PG&E era de aproximadamente 2% por año. La demanda pico en el área LP se reparte por tipo de usuarios como sigue: residencial (58%), comercios pequeños (33%) y pequeñas industrias y consumidores agrícolas (en conjunto, 9%).

Al realizar el proceso de planeación en forma convencional se llegó a la conclusión de incrementar la capacidad de las líneas de 230 kV y de 60 kV que suministraban a siete subestaciones en el área. Además era necesario realizar la construcción de una línea de transmisión nueva de 230 kV que iría a una subestación (Vineyard). Este punto atrajo la atención de los residentes de Pleasanton pues la línea sería aérea. Los residentes le solicitaron a la compañía que al menos unos kilómetros de la línea fueran subterráneos para evitar el impacto asociado con las líneas de transmisión aéreas.

Debido a lo anterior, PG&E empezó a investigar otro tipo de opciones para no construir una línea subterránea, por los altos costos que esto implicaba. Se decidió que se incluiría la instalación de un transformador de 90 MVA en otra subestación, esta acción permitiría retardar la construcción de la línea subterránea de 230 kV hasta el 2001. Este plan tendría un costo de \$355 millones que incluía tanto los costos directos como los indirectos.

A raíz de esto la compañía se preguntó si existía alguna posibilidad de modificar este plan sin afectar el suministro de energía. La solución convencional al problema de planeación es incrementar la capacidad de los sistemas de distribución y transmisión en el área de manera que el pico de demanda se satisfaga, siendo una planta central la que genere la energía requerida. Por lo tanto, los costos de la expansión en transmisión y distribución se atribuyen a muy pocas horas al año. Esta observación es bastante importante porque la expansión de la capacidad es requerida solo en el caso en el que el pico de demanda exceda la capacidad instalada. Por consiguiente, es necesario establecer un sistema de tarifas el cual sea definido de acuerdo al horario y el área en donde se demande la energía y así se pueda recuperar la inversión.

Al evaluar el impacto de poner en práctica un plan integral, que incluya tanto generación distribuida como generación centralizada, se determinaron varios beneficios. Se observó que la actualización de los sistemas de transmisión y de distribución se difiere hasta el año 2009. Lo anterior implica que el capital invertido en transmisión baja de \$94 millones de dólares hasta \$55 millones de dólares. El valor de la inversión en distribución también se reduce de \$261 millones de dólares hasta \$178 millones de dólares. Por lo tanto, el capital de inversión necesario para llevar a cabo el plan de expansión convencional que era de \$355 millones de dólares se reduce al implementar un plan integral de expansión hasta \$233 millones de dólares. La postergación de la inversión se produce al invertir en un programa diseñado para administrar el tamaño de la demanda (designed demand-side management programs, DSM) y en generadores distribuidos. Los valores presentes de estas inversiones se calculan en \$41 millones de dólares y \$48 millones de dólares, respectivamente. Además los beneficios por evitar los costos de energía y los costos de capacidad de generación (que se producen porque muchas de las grandes centrales generadoras son utilizadas a su máxima capacidad

durante las horas pico) suman \$160 millones de dólares. Por lo tanto el valor presente del plan integral es de \$162 millones de dólares (55+178+41+48-160). Los ahorros netos debidos al plan integral son de \$193 millones de dólares³. Lo anterior se resume en la tabla 12.

	Plan Original	Plan Integral
Actualización en transmisión	94	55
Inversión en distribución	261	178
Costos totales de inversión (convencional)	355	233
Inversión en DSM		41
Generadores distribuidos		48
Ahorros por capacidad de generación y de energía		160
Valor presente neto total	355	162

Tabla 14. Comparación de costos entre ambos planes

Los ahorros del plan integral se producen por instalar generación distribuida y por aplicar políticas de ahorro de energía.

El DSM consiste en la planeación implementación y monitoreo del sistema eléctrico para optimizar el suministro de la energía. Los programas incluyen varias acciones, como administración de la carga, conservación estratégica, generación distribuida, las cuales fueron utilizadas en el ejemplo antes citado.

Los programas DSM son utilizados generalmente para reducir el crecimiento de la carga y / o distribuir la demanda de una forma más uniforme.

Este caso ejemplifica en forma clara los beneficios que se pueden obtener al realizar la planeación en forma integral, pensando en incluir generación distribuida con la expansión de los sistemas eléctricos de potencia que se realiza en forma convencional y utilizando programas DSM.

4.3 IMPACTO AMBIENTAL DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA A PARTIR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

La instalación de sistemas distribuidos de generación eléctrica tiene un potencial que ha crecido ante el nuevo panorama que rige la industria eléctrica.

Existen varias razones que explican el interés en generación distribuida. Las compañías de generación centralizadas pueden reducir costos al utilizar equipo para suministrar cargas pequeñas. Los organismos reguladores gubernamentales en materia de energía se han percatado de que la generación distribuida puede mejorar la confiabilidad del sistema; es una alternativa que permite satisfacer la demanda creciente de electricidad, con un mejor uso de los recursos naturales.

La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA), los promotores del Protocolo de Kyoto y otros grupos afines han señalado que el uso de unidades de generación distribuida reduciría la contaminación del aire e incrementaría el uso eficiente de la energía.

Es por ello que debemos tener presente conceptos importantes como lo es la calidad del aire. Debemos entender que un contaminante del aire es cualquier material que se introduce en el aire en tales cantidades que crea un impacto significativo en diferentes áreas, ya sea locales, regionales o de manera global, y esos impactos se reflejan en la salud, bienestar social así como en la ecología.

Para poder analizar los contaminantes del aire éstos se dividen en cuatro categorías que son:

- a) Contaminantes críticos, los cuales incluyen monóxido de Carbono, óxidos de Nitrógeno, bióxido de Azufre, ozono, componentes orgánicos volátiles y plomo.
- b) Contaminantes tóxicos; podemos encontrar una gran variedad de componentes los cuales tienen propiedades tóxicas graves o pueden causar cáncer. Entre los más comunes podemos entrar el Mercurio, benceno, 1, 3 Butadieno, Cromo, Formaldehído, entre otros.
- c) Componente reductores de la capa de ozono que son predominantemente clorofluorocarbonos.
- d) Componentes que contribuyen al calentamiento terrestre, estos son el bióxido de Carbono, metano y los óxidos de Nitrógeno

Varios contaminantes están relacionados con la evolución de la industria eléctrica. Comúnmente los recursos del combustible fósil han sido concentrados de manera centralizada para la generación de electricidad a gran escala basada en la combustión. Conforme se aumentaba la demanda de electricidad simultáneamente se estimulaba la

extracción, el procesamiento y distribución de los combustibles fósiles, así como la construcción de plantas hidroeléctricas y nucleoelectricas.

Las acciones mencionadas trajeron como consecuencia el rápido aumento de la quema de combustibles fósiles y con ello severos impactos ambientales. En primera instancia se veían afectadas las regiones locales, pero el aumento de la demanda agudizó estos problemas llevándolos al orden regional y hoy, en nuestros días, es un problema global. Dichos impactos son debidos a las emisiones contaminantes arrojadas por el proceso de combustión, principalmente el que se efectúa para producir electricidad.

Por lo anterior es importante tomar en cuenta la generación distribuida con celdas de combustible como una alternativa limpia para obtener electricidad. Para ello es pertinente recordar que la generación distribuida se sitúa en el punto más cercano al consumo y se plantea que para la generación se utilicen fuentes no convencionales en ciertos casos.

Las celdas de combustible son utilizadas bajo el esquema anteriormente explicado. Por medio de esta tecnología se tiene una alta calidad de energía, alta eficiencia y lo más importante con el mínimo nivel de emisiones contaminantes.

Para realizar un análisis de los impactos de la generación distribuida sobre el medio ambiente es necesario considerar tres áreas de influencia sobre las cuales podrá haber un impacto.

a) Contaminación del medio ambiente urbano.

Los niveles más altos de contaminación ocurren típicamente en las áreas urbanas densamente pobladas, y en dichas zonas es donde encontramos los problemas más graves de salud que son ocasionados por la exposición a los contaminantes de manera directa, como son los del aire.

A pesar de los esfuerzos realizados, la mayoría de las grandes ciudades continúa violando las normas de calidad del aire. Un ejemplo de ello es la Ciudad de México. Por ello se necesita de mayores esfuerzos con relación a la emisión de contaminantes para proteger la salud y bienestar de la población.

El hecho de considerar la zona urbana como un área especial se debe a que las unidades de generación distribuida se sitúan en el punto de consumo. En el caso de las grandes ciudades la unidad generadora puede realizar un impacto adicional, por tal motivo debe considerarse su análisis.

b) Contaminación regional

En EUA, la preocupación de la contaminación regional comenzó alrededor de los años de 1970 con el desarrollo de programas para la protección de parques nacionales y áreas de desierto. Estas acciones se derivaron por los problemas determinados problemas como los ocasionados por la lluvia ácida.

De igual forma que en las zonas urbanas, es importante evaluar el impacto de la generación distribuida en el contexto regional.

c) Impacto global

Los niveles de contaminación atmosférica de bióxido de Carbono se han incrementado rápidamente debido a la quema de combustibles fósiles. Simultáneamente, el promedio de temperaturas ha ido aumentando en todo el mundo junto con los problemas ocasionados por la movilidad de componentes que dañan la capa de ozono.

Es por ello que cualquier tipo de unidad generadora debe cubrir ciertos límites de especificaciones, con lo cual se asegura que la contribución de este medio de generación sea la mínima para reducir los impactos ambientales mundiales.

4.3.1 Estimaciones del impacto ambiental de la generación distribuida basada en celdas de combustible

Uno de los propósitos de la generación distribuida es colocar el punto de generación lo más cercano al punto de consumo sin realizar un impacto en el medio ambiente de éste.

Es por ello que resulta de gran importancia evaluar los impactos del sistema generador de energía eléctrica, para conocer de que manera puede integrarse a un sistema predeterminado sin alterar su medio. A las tecnologías de generación distribuida, en nuestro caso las celdas de combustible, es necesario evaluarles las emisiones contaminantes para conocer el impacto que puede efectuar

La introducción de las celdas de combustible como fuentes de generación convencional podrían incrementar la calidad del aire y reducir la utilización de agua para el proceso de enfriamiento. La generación eléctrica convencional produce más partículas contaminantes como lo son: óxido de Azufre, óxido de Nitrógeno y CO_2 en comparación con otras tecnologías que utilizan un proceso combinado

A continuación se muestra datos de las emisiones de NO_x arrojadas por las celdas de combustible dependiendo del tipo de combustible que utilizan. Estos datos han sido recopilados por diferentes fabricantes de dicha tecnología⁴.

Nombre de la planta	Capacidad [kW] ^a	Combustible	NO _x [ppm]
NEDO (Kansai)	1000	Gas natural licuado	10
Tohoku	50	Gas natural licuado	4,5
Tokyo	50	GLP Gas natural licuado	Nulo ^b 2
Okinawa	200	Metanol	Menor de 2
Shikoku	4	Metanol	Nulo
Forklift Truk	5	Metanol	Nulo
Bus (DOE)	25	Metanol	Nulo

Tabla 15. Comparación entre las celdas de combustible de ácido fosfórico.

La siguiente tabla muestra una comparación entre celdas de combustible dependiendo su eficiencia y factor de carga.

Celda de combustible	Fabricante	Horas operadas	Energía generada [kWh]	Factor de carga	Eficiencia		NO _x [ppm]
					Eléctrica	Total	
PC-11 (12.5 kW)	IFC ^c	3509	9923	22.6	30	30	19
PC-18 (40 kW)	IFC	15588	209000	33.5	40	80.5	3
Moon light (200 kW)	Mitsubishi	13038	1797000	68.9	36	80.2	6
FP-50 (50 kW)	Fuji	15037	578000	76.9	40	80	7.5
FP-100 (100 kW)	Fuji	8547	592000	69.1	38	80	7.5
PC-25 (200 kW)	ONSI	10820	1822000	84.2	40	84	2
FP-500 (500 kW)	Fuji	3216	985000	61.3	40	85	7.5

Tabla 16. Comparación de emisiones entre celdas de combustible de ácido fosfórico alimentadas gas natural

^a Todas las medidas son realizadas bajo 100% de su operación

^b Sus emisiones ya no pueden ser detectadas

^c International Fuel Cells Corporation

La tasa de emisiones y la eficiencia de las unidades generadoras son valores que están cambiando debido a que algunas de ellas se encuentran en la etapa de prueba. Es posible que estos valores cambien durante los próximos años en la medida que se encuentren nuevas soluciones y se mejore la rentabilidad de las unidades, la experiencia futura proporcionará mejores resultados y con ello sistemas más eficientes y menos contaminantes.

4.3.2 Comparación de las emisiones contaminantes.

A continuación se realiza una comparación de la tasa de emisiones contaminantes entre las tecnologías utilizadas para generación distribuida.

Para realizar una evaluación es necesario comparar las celdas de combustible con otro tipo de sistema de generación, para poder situarlo en un marco de referencia. También es importante realizar dicha comparación entre tecnologías que utilicen el mismo combustible, o bien, que sean utilizadas para la misma aplicación, en nuestro caso como generación distribuida.

Ahora bien si analizamos el caso de una celda de combustible de ácido fosfórico podemos observar que sus emisiones están muy por debajo de las emisiones de un motor de gas y de las leyes nacionales e internacionales (TA-Luft^d). La siguiente tabla muestra las emisiones de una PAFC PC25 fabricada por ONSI y se compara con las emisiones del motor de gas⁵.

Emisiones	Norma alemana sobre emisiones [mg/Nm ³]	Motor de gas [mg/Nm ³]	Motor de gas con cogeneración [mg/Nm ³]	PAFC [mg/Nm ³]	PEMFC con cogeneración [mg/Nm ³]
NO _x	500	500	250	Menos de 10 (3.1) ¹	Entre 10 y 20
CO	650	650	250	Menos de 20 (5.7) ¹	10
HC	150	150	70	Menos de 15	3

Tabla 17. Comparación de emisiones

^d Norma Alemana de Emisiones

¹ PC25: después de 1700 horas de operación

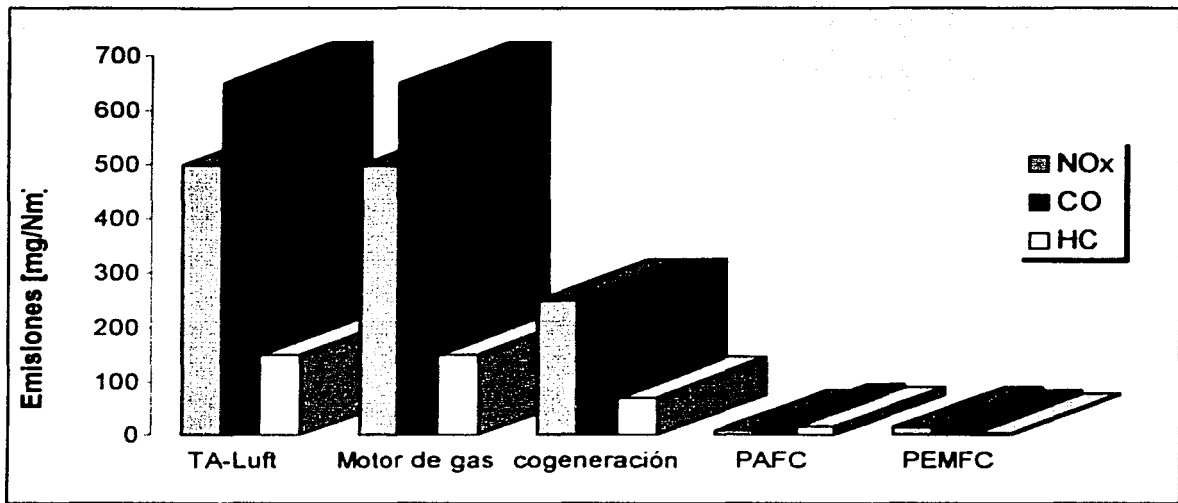


Figura 22. Comparación de emisiones

La comparación anterior se basa en los niveles de emisiones que son estipulados en códigos relacionados con condiciones especiales. Dicha comparación permite observar el bajo impacto ambiental que presentan las celdas de combustibles comparadas con tecnologías convencionales nuevas que pueden tener un proceso para recuperar el calor. Las emisiones de las celdas de combustible son muy inferiores a los límites establecidos por las normas alemanas⁶.

Por otra parte es importante considerar que en los procesos de generación cuando en un proceso paralelo se recupera el calor, las emisiones contaminantes disminuyen. Lo anterior se debe al aumentar la eficiencia del proceso⁷.

La capacidad de aprovechar el calor y energía eléctrica (cogeneración) de un proceso de generación está creciendo rápidamente entre sectores que están sumamente interesados en disminuir los efectos ambientales. Algunas compañías privadas y públicas han reconocido los beneficios que presentan las celdas de combustible y han invertido en la investigación de dicha tecnología

El aprovechamiento del calor en los procesos de generación de electricidad tiene otras implicaciones ambientales importantes. De manera particular, con la utilización de celdas de combustible y el aprovechamiento del calor, existe una reducción significativa en las emisiones de óxido de Nitrógeno (NOx) y del monóxido de Carbono (CO). La importancia de reducir estas emisiones radica en que son nocivas para la salud del hombre. Por lo anterior existen normas que dan niveles y ciertos estándares con respecto a la emisión de contaminantes al generar electricidad.

4.4 OBSERVACIONES FINALES

Para llevar a cabo la interconexión de las celdas de combustible bajo el esquema de generación distribuida es necesario analizar los impactos que pueden presentarse desde diferentes enfoques.

La mejor alternativa es la introducción de la generación distribuida en un sistema de lazo cerrado. Además es necesario contar con las protecciones indicadas que garanticen la coordinación de las protecciones ya existentes para no alterar la estabilidad del sistema. Con la anterior acción se aumenta la fiabilidad del sistema y su continuidad, dándole al sistema características de mayor calidad.

Otro aspecto importante a considerar es el impacto ambiental de una fuente generadora de electricidad. Se ha visto que las emisiones contaminantes asociadas a la generación eléctrica representan una de las fuentes más grandes y es por ello importante buscar nuevas alternativas que tengan un menor impacto ambiental. Las celdas de combustible son una tecnología que presenta una alta eficiencia y un bajo impacto ambiental. Al realizar la comparación de las diversas tecnologías para generación distribuida se pudo observar que las celdas de combustible son la opción más conveniente y si se aprovecha el calor de su proceso es posible aminorar los pequeños impactos ambientales que genera.

Por otro lado, la generación distribuida también tiene un impacto en la planeación de la red eléctrica. El utilizar este esquema, como se explicó en el capítulo, puede retardar la expansión del sistema eléctrico, en particular en transmisión, y con ello realizar ahorros sustanciales. Para poder conocer su impacto en la planeación es pertinente realizar un análisis económico que nos permita conocer la viabilidad de introducir generación distribuida con celdas de combustible.

¹ Kojovic L., Willoughby R., "Integration of Distribution Generation in a typical USA Distribution System", Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution (CIRED), 2001, Amsterdam.

² Feinstein C., Orans R., et al., "The distributed utility: A new electric utility planning and pricing paradigm", Anual Review Energy Environment, 1997, E.U.A., pag. 157

³ *Ibidem*, pag. 162

⁴ Kordesch, Karl, Simander G., "Fuel Cells and their Applications", Ed. VCH, 1996, Alemania, pag. 13

⁵ *Ibidem* pag. 239

⁶ Kohlstruck B., "Applications of proton exchange membrane fuel cells for a deregulated market place", Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution (CIRED), 2001, Amsterdam.

⁷ Lents J., Allison J., "Can we have our cake and eat it, too? Creating distributed generation technology to improve air quality", The Energy Foundation, 2000, E.U.A.

5. ANÁLISIS DE COSTOS Y ESCENARIOS

5.0 INTRODUCCIÓN GENERAL

En la planeación del crecimiento de un sistema eléctrico, la combinación de los distintos medios de generación constituye un problema principalmente de optimización económica: se trata de minimizar la suma de los costos de inversión y operación del sistema, mediante una mezcla óptima de los diferentes medios de generación, transmisión y distribución, satisfaciendo la potencia y la energía eléctrica requeridas con una calidad adecuada del servicio. Por lo tanto, una comparación de costos de generación según el tipo de planta no es el único factor que interviene en la selección.

El costo de la energía generada por cada tipo de unidad depende de los costos de inversión y de operación correspondientes y de la duración del funcionamiento anual de la unidad.

5.1 ANÁLISIS DE COSTOS

El siguiente análisis de costos se realizará con respecto al costo del kilowatt hora generado. Las comparaciones con las tecnologías será de igual manera relacionadas con la generación. Es importante recalcar que el costo resultante no incluye los costos de transmisión y distribución.

Algunas de las tecnologías que se comparan no pueden ser situadas en el punto de consumo por lo que se debe realizar una inversión en la transmisión y distribución. Al comparar estas tecnologías con las celdas de combustibles, las cuales bajo el esquema de generación distribuida no requieren de inversión en transmisión, se verá factibilidad de la utilización de un tipo de planta de generación.

5.1.1 Costo del kilowatt instalado

Existen factores determinantes para la evaluación de cualquier sistema de generación y dentro de ellos podemos encontrar los costos de inversión y operación ya que juegan un papel muy importante para determinar la viabilidad de un proyecto.

En el caso de las celdas de combustible, el costo de inversión de las unidades generadoras están cambiando debido a que algunas de ellas se encuentran en la etapa de prueba. Es posible que estos costos bajen durante los próximos años en la medida que se encuentren nuevas soluciones y se mejore la rentabilidad de las unidades, aunado a una producción a mayor escala que disminuya el costo.

Como ejemplo de lo anterior, a continuación se presentan la variación de los costos de celdas de combustible de ácido fosfórico desde su primer intento de comercialización.

Potencia de la unidad	Costo en USD \$/kW	Año
200 kW	\$5,500.00	1995
200 kW	\$3,720.00	1997
200 kW	\$3,000.00	2000

Tabla 18. Evolución de los costos en función del tiempo de las celdas de combustible PAFC de Onsi Corporation¹

El DOD ofrece la facilidad para integrarse a programas como el Climate Change Fuel Cells Program que tienen como objetivo incentivar el uso de esta tecnología. Lo anterior se realiza mediante costos compartidos que permiten alcanzar un precio competitivo de USD \$1000/kW, siempre que la celda sea comprada a un productor estadounidense.

En seguida analizaremos los costos fijos anuales de una unidad generadora de celda de combustible de 200 kW producida por ONSI Corporation con las condiciones actuales de dicha tecnología, utilizando el precio pronosticado para gas natural que es de USD \$4 / MBtu². Durante todo el análisis de costos nos apegaremos a las referencias del año 2000, las cuales fueron obtenidas de distintas fuentes que se citarán en su momento.

También se realizará simultáneamente una comparación con otras tecnologías de generación. Dentro de éstas se encuentran: ciclo combinado, turbinas de gas y eólica.

5.1.2 Costo anual de inversión y costo fijo anual

El costo fijo anual de algún tipo de unidad generadora, es la suma del costo anual de inversión más los costos fijos anuales de operación por kilowatt instalado. El costo anual de inversión por kilowatt instalado se obtiene³ multiplicando la inversión bruta por kilowatt por el factor de anualidad.

$$A = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

donde:

A = costo anual de inversión por kW instalado

P = inversión bruta por kW instalado

i = tasa de descuento

n = vida útil de la unidad generadora en años

Así

$$CFA = A + CFO$$

donde:

CFA = costo fijo anual ⁴

CFO = costo fijo anual de operación

En el caso de la celda de combustible los datos que se utilizaron se obtuvieron de la siguiente forma:

➤ La inversión bruta en pesos P se tomó a partir del dato de USD \$3000 / kW

$$P = 3000 \frac{\text{dólares}}{\text{kW}} \cdot \left(\frac{9.3 \text{ pesos}}{\text{dólar}} \right) = 27900 \frac{\text{pesos}}{\text{kW}}$$

➤ El tiempo de vida útil n es de 20 años. ⁵

➤ En el caso de las celdas de combustible basamos el costo fijo anual de operación en los costos de mantenimiento, que se calcularon como el 1.5%⁶ del costo de instalación de la celda de combustible (USD \$3000).

➤ La tasa de descuento i se supuso igual al 10%.

Tipo de unidad generadora	P Inversión bruta pesos/kW	n Vida útil en años	Costo fijo anual de operación pesos /kW	Tipo de combustible	Precio unitario del combustible pesos/m ³	Factor de planta
Ciclo Combinado 1x280MW ⁷	5,028.84	30	218.24	Gas natural	1.25	0.8
Turbo gas 1x42.3MW ⁷	6,406.18	30	174.05	Gas natural	1.25	0.125
Eólica 1x0.6MW ⁸	9,584.25	20	110.58	—————	—————	0.4
Celda de combustible de ácido fosfónico 1x0.2MW	27,900.00	20	418.50	Gas natural	1.25	0.8

Tabla 19. Datos generales para el cálculo del costo fijo anual

Cálculo del costo anual de inversión					
Tipo de unidad generadora	P Inversión bruta pesos/kW	n vida útil años	i Tasa de descuento	Factor de anualidad	A Costo anual de inversión pesos/kW
Ciclo Combinado 1x280MW	5,028.84	30	10%	0.1061	533.46
Turbo gas 1x42.3MW	6,406.18	30	10%	0.1061	679.56
Eólica 1x0.6MW	9,584.25	20	10%	0.1175	1,125.76
Celda de combustible de ácido fosfónico 1x0.2MW	27,900.00	20	10%	0.1175	3,277.12

Tabla 20. Valores del factor de anualidad y costo anual de inversión

A partir de las tablas anteriores se obtuvieron los siguientes costos anuales por kW instalado en pesos:

Cálculo del costo fijo anual			
Tipo de unidad generadora	CFO Costo fijo anual de operación pesos/kW	A Costo anual de inversión pesos/kW	CFA Costo fijo anual pesos/kW
Ciclo Combinado 1x280MW	218.24	533.46	751.70
Turbo gas 1x42.3M	174.05	679.56	853.61
Eólica 1x0.6MW	110.58	1,125.76	1,236.34
Celda de combustible de ácido fosfórico 1x0.2MW	418.50	3,277.12	3,695.62

Tabla 21. Costo fijo anual

5.1.3 Costo variable de operación por kWh y costo variable anual por kW en función del factor de planta

Los costos variables de operación CV están dados⁹ por el costo del combustible utilizado, el cual depende del precio unitario del combustible, el consumo específico de combustible de la unidad generadora considerada y el poder calorífico del combustible. Se desprecia el término de CV que depende del factor de planta (mantenimiento, etc.).

$$CV = \frac{PU \cdot CE}{PC}$$

donde:

CV = costo variable de operación por kWh generado

PU = precio unitario del combustible

PC = poder calorífico del combustible

CE = consumo específico de combustible de la unidad

El precio unitario del combustible se obtuvo siguiendo el esquema de USD \$4 / MBtu al tipo de cambio de 9.3 pesos por dólar. Para obtener el precio del combustible en pesos/m³, se realizaron las siguientes conversiones:

- Convertimos los dólares a pesos

$$PU = 4 \frac{\text{dólares}}{\text{MBtu}} \times \left(\frac{9.3 \text{ pesos}}{1 \text{ dólar}} \right) = 37.2 \frac{\text{pesos}}{\text{MBtu}}$$

- A continuación calculamos el PU en pesos / kcal

$$PU = 37.2 \frac{\text{pesos}}{\text{MBtu}} \times \left(\frac{1 \text{ MBtu}}{251995.761111 \text{ kcal}} \right) = 1.4762 \times 10^{-4} \frac{\text{pesos}}{\text{kcal}}$$

- Finalmente utilizamos el poder calorífico del gas natural para convertir el PU a pesos / m³

$$PU = 1.4762 \times 10^{-4} \frac{\text{pesos}}{\text{kcal}} \times \left(8462.83 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right) = 1.2493 \frac{\text{pesos}}{\text{m}^3}$$

El Consumo Específico del combustible de la celda de combustible se obtuvo de la siguiente forma:

- Sabemos que 1 kWh = 3.6 × 10⁶ J. Por otro lado 1 cal = 0.2389 J, entonces

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} \left(\frac{2.389 \times 10^{-4} \text{ kcal}}{\text{J}} \right) = 860 \text{ kcal}$$

Finalmente se obtuvo el CE dividiendo el número de kcal que corresponden a 1 kWh entre la eficiencia de la celda (0.4). Se consideró el valor de 0.4 según la bibliografía.

$$CE = \frac{1}{0.4} \times 860 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}} = 2150 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}$$

Cálculo del costo variable de operación por kW					
Tipo de unidad generadora	Tipo de combustible	PU Precio unitario del combustible pesos/m ³	PC Poder calorífico del combustible ¹⁰ kcal/m ³	CE consumo específico de la unidad kcal/kWh	CV Costo variable de operación pesos/kWh
Ciclo Combinado 1x280MW ⁷	Gas natural	1.25	8462.83	1749.15	0.26
Turbo gas 1x42.3MW ⁷	Gas natural	1.25	8462.83	2448.86	0.36
Edíca 1x0.6MW ⁸	_____	_____	_____	_____	_____
Celda de combustible de ácido fosfórico 1x0.2MW	Gas natural	1.25	8462.83	2150.15	0.32

Tabla 22. Costo variable de operación

Los costos variables anuales de operación dependen del número de horas que la unidad trabaje al año y están dados por la siguiente expresión ¹¹

$$CVA = C \cdot (8760 \cdot fp)$$

donde:

CVA = costo variable anual de operación por kW instalado

f p = factor de planta

El factor de planta puede definirse como el número de horas al año que la unidad generadora está en servicio en relación con el número total de horas en un año.

Costo variable anual por kW en función del factor de planta				
Tipo unidad generadora	CV Costo variable de operación pesos/kWh	Factor de planta (fp)	8760*fp	CVA Costo variable anual pesos/kW
Ciclo Combinado 1x280MW	0.26	0.8	7008	1809.55
Turbo gas 1x42.3MW	0.36	0.125	1095	395.85
Eólica 1x0.6MW	-----	0.4	3504	-----
Celda de combustible de ácido fosfórico 1x0.2MW	0.32	0.8	7008	2224.40

Tabla 23. Costo variable anual

5.1.4 Costo anual total

El costo total anual CAT de suministrar una carga de un kilowatt durante t horas al año, usando una unidad generadora p, con costos anuales fijos CFA y costos anuales variables CVA está dado por la siguiente expresión¹²

$$CAT = CFA + CVA$$

Cálculo del costo anual total				
Tipo unidad generadora	CFA Costo fijo anual pesos/kW	CVA Costo variable anual pesos/kW	CAT Costo anual total pesos/kW	Factor de planta (fp)
Ciclo Combinado 1x280MW	751.70	1809.55	2561.25	0.8
Turbo gas 1x42.3MW	853.61	395.85	1249.46	0.125
Eólica 1x0.6MW	1236.34	-----	1236.34	0.4
Celda de combustible de ácido fosfórico 1x0.2MW	3695.62	2224.40	5920.03	0.8

Tabla 24. Costo anual total

El costo anual total obtiene un valor distinto a medida que el factor de planta cambia. Esta variación en el CAT se puede representar en forma gráfica como se muestra a continuación:

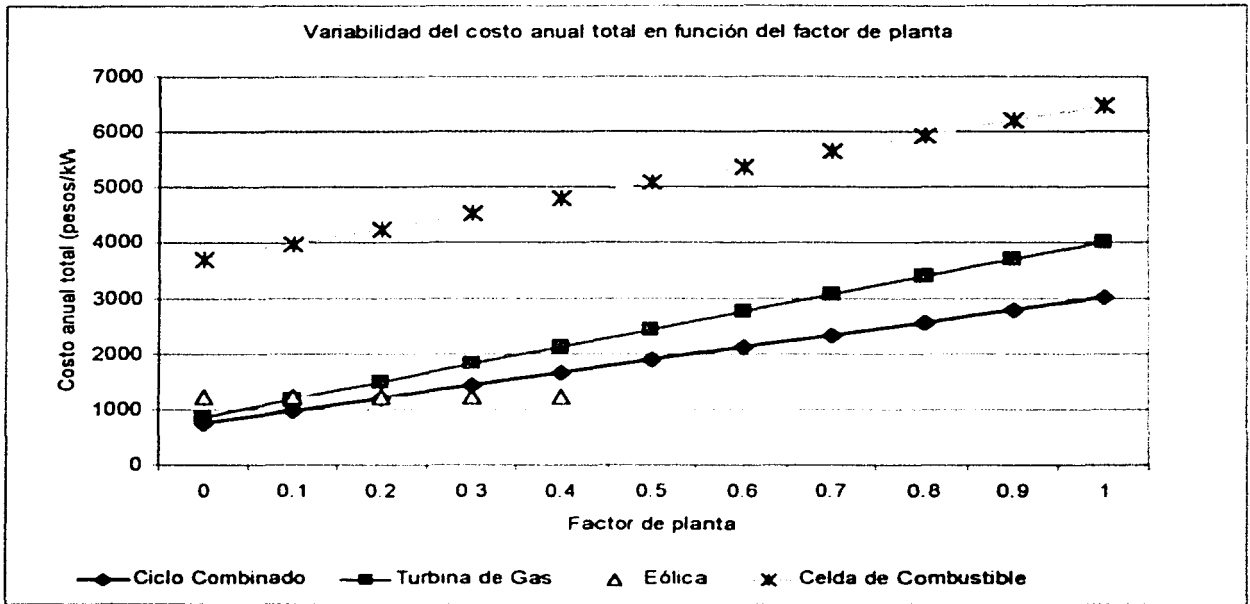


Figura 23

5.1.5 Costo del kilowatt – hora generado

Una vez que se ha calculado el costo fijo anual y el costo variable anual por kilowatt de capacidad de generación instalada de un tipo determinado de unidad generadora, el costo del kilowatt – hora generado por ese tipo de unidad se obtiene¹³ dividiendo el costo total anual por kilowatt de capacidad de generación instalada, que es la suma del costo fijo y el costo variable, por el número de kilowatt – hora generados anualmente por cada kilowatt de capacidad de generación del tipo de unidad considerado, que es función del factor de planta al que opera este tipo de unidad

$$GA = 8760 \cdot fp \cdot 1$$

$$C_E = \frac{CAT}{GA} = \frac{CFA + CVA}{GA}$$

donde:

GA = generación anual por kW instalado operando con un factor de planta fp

C_E = costo del kWh generado operando con un factor de planta fp

CAT = costo anual total por kW instalado

CFA= costo fijo anual por kW instalado

CVA = costo variable anual por kW instalado funcionando con un factor de planta fp

Cálculo del costo del kWh generado pesos/kWh		
Tipo unidad generadora	Factor de planta (fp)	Costo del kWh pesos/kWh
Ciclo Combinado 1x280MW	0.8	0.37
Turbo gas 1x42.3MW	0.125	1.14
Eólica 1x0.6MW	0.4	0.35
Celda de combustible de ácido fosfórico 1x0.2MW	0.8	0.84

Tabla 25. Costo del kWh

Puede verse que el costo del kilowatt – hora puede descomponerse en dos sumandos: la parte del costo debida al costo fijo anual por kilowatt instalado, que es independiente del factor de planta al que opera la unidad y la parte del costo debido al costo variable anual por kilowatt instalado que si es función del factor de planta¹⁴.

Es importante destacar que el costo por kilowatt – hora que ofrece la generación con celdas de combustible, a pesar del alto costo de instalación y del precio del combustible, indica que es una alternativa interesante si pueden reducirse los costos de inversión.

5.2 ESCENARIOS PROPUESTOS

Conscientes de que el mercado de las celdas de combustible cambia rápidamente nos abocamos a determinar la variable que afecta en mayor medida la competitividad de ésta tecnología.

Para llevar a cabo tal tarea se plantearon distintos escenarios bajo los cuales se obtuvieron los costos empleando el método que utilizamos en los puntos anteriores

A continuación presentaremos las tablas con los datos calculados de cada esquema propuesto.

5.2.1 Primer escenario

En este caso se plantea que el combustible cueste USD \$2 / Mbtu, manteniendo la inversión bruta en USD \$3000 / kW instalado de la unidad de celdas de combustible. Así veremos en que medida el costo del combustible repercute en el costo por kilowatt – hora generado.

Los costos del kilowatt – hora obtenidos bajo este escenario son los siguientes:

Cálculo del costo del kWh generado (pesos/kWh)		
Tipo unidad generadora	Factor de planta (fp)	Costo del kWh pesos/kWh
Ciclo Combinado 1x280MW	0.8	0.24
Turbo gas 1x42.3MW	0.125	0.96
Eólica 1x0.6MW	0.4	0.35
Celda de combustible de ácido fosfórico 1x0.2MW	0.8	0.69

Tabla 26. Costo del kilowatt – hora

La variación del CAT debida al factor de planta se ejemplifica en seguida:

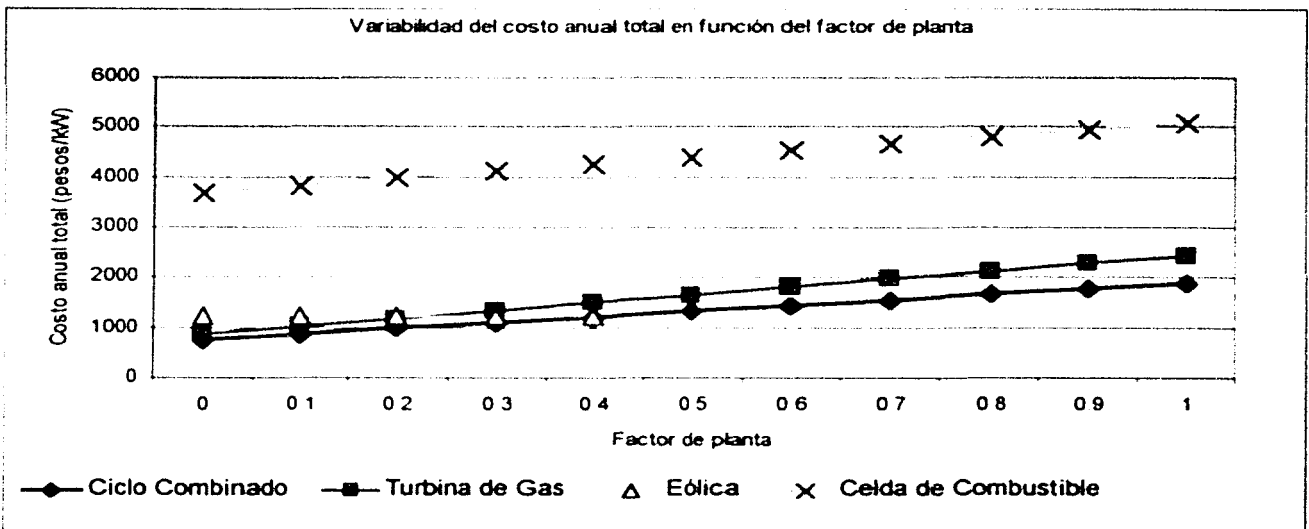


Figura 24

5.2.2 Segundo escenario

En este caso se plantea que el costo del kilowatt instalado sea de USD \$1000 /kW instalado de la unidad de celdas de combustible y que el costo del combustible sea de USD \$4 / MBtu. De esta forma obtendremos datos que permitan visualizar el impacto del costo de instalación en el costo por kilowatt – hora generado.

En este caso los costos del kilowatt – hora obtenidos bajo este escenario son los siguientes:

Cálculo del costo del kWh generado pesos/kWh		
Tipo unidad generadora	Factor de planta (fp)	Costo del kWh pesos/kWh
Ciclo Combinado 1x280MW	0.8	0.37
Turbo gas 1x42.3MW	0.125	1.14
Eólica 1x0.6MW	0.4	0.35
Celda de combustible de ácido fosfórico 1x0.2MW	0.8	0.49

Tabla 27. Costo del kilowatt – hora

La variabilidad del CAT en función del fp es:

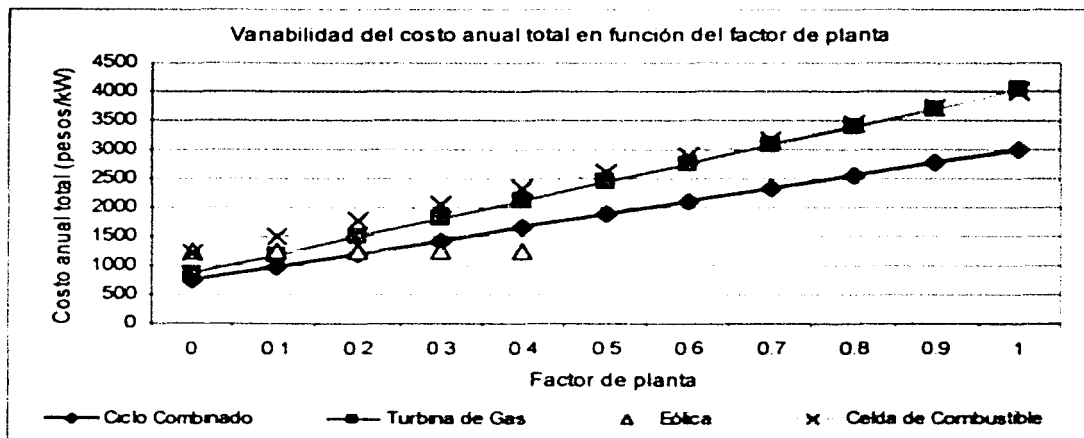


Figura 25

5.2.3 Tercer escenario

En este último caso se plantea que el costo del kilowatt instalado sea de USD \$1000 /kW instalado de la unidad de celdas de combustible y que el costo del combustible sea de USD \$2 / MBtu. De esta forma obtendremos datos que permitan visualizar el impacto del costo de instalación en el costo por kilowatt – hora generado.

Los costos del kilowatt – hora obtenidos bajo este escenario son:

Cálculo del costo del kWh generado pesos/kWh		
Tipo unidad generadora	Factor de planta (fp)	Costo del kWh pesos/kWh
Ciclo Combinado 1x280MW	0.8	0.24
Turbo gas 1x42.3MW	0.125	0.96
Eólica 1x0.6MW	0.4	0.35
Celda de combustible de ácido fosfórico 1x0.2MW	0.8	0.33

Tabla 28. Costo del kilowatt – hora

La variabilidad del CAT en función del fp se muestra en el siguiente gráfico:

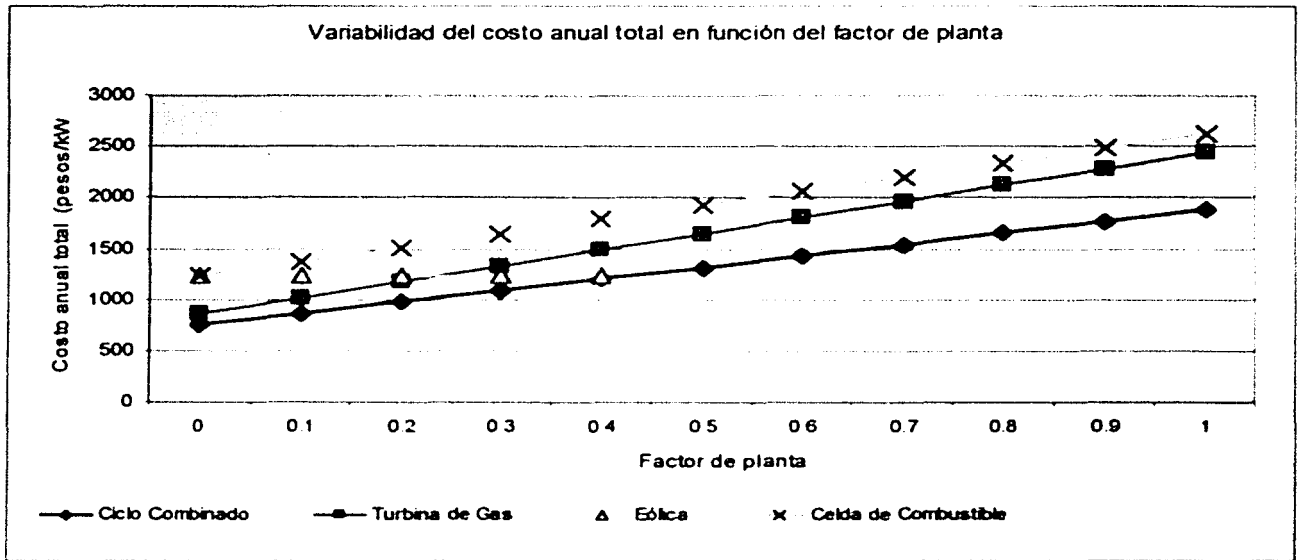


Figura 26

5.3 COMPARACIÓN ENTRE LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS

A partir de los datos anteriores se puede resaltar que las celdas de combustible en cuanto al costo por kWh se encuentran en el tercer lugar en los tres primeros escenarios planteados, mientras que en el último escenario ocupan el segundo lugar en costo, en este sólo son rebasadas por las de ciclo combinado y por un muy pequeño margen.

A medida que se mejoran las condiciones para utilizar en el sistema con celdas de combustible, en cuanto a costo del kW instalado y a costo de combustible, se vuelve una mejor opción comparado con el resto de las tecnologías. Dado que las celdas emiten muy pocos contaminantes, son compactas, eficientes e inaudibles, se pueden instalar en forma distribuida. Por lo anterior, los costos complementarios a la generación de energía eléctrica como son los de expansión de la red de transmisión y distribución, así como la actualización de las subestaciones son minimizados. Tomando en cuenta la reducción de estos costos, es posible visualizar la gran factibilidad de emplear sistemas distribuidos con celdas de combustible.

5.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS ESCENARIOS PARA CELDAS DE COMBUSTIBLE

Tras realizar los cálculos pertinentes se obtuvieron los datos que nos permiten hacer una comparación adecuada y de esa manera determinar la variable que repercute en mayor medida en los costos.

En primer lugar utilizaremos la siguiente tabla para visualizar cual de los escenarios planteados ofrece un mejor costo por kilowatt – hora:

Cálculo del costo del kWh generado pesos/kWh con celdas de combustible con un factor de planta de 0.8	
Escenario	Costo del kWh pesos / kWh
Con una inversión de USD \$3000 / kW y el combustible a USD \$4 / MBtu	0.84
Con una inversión de USD \$3000 / kW y el combustible a USD \$2 / MBtu	0.69
Con una inversión de USD \$1000 / kW y el combustible a USD \$4 / MBtu	0.49
Con una inversión de USD \$1000 / kW y el combustible a USD \$2 / MBtu	0.33

Tabla 29. Comparación de escenarios

Podemos darnos cuenta a través de esta tabla que al reducir únicamente la inversión bruta de USD \$3000 / kW a USD \$1000 / kW, el costo del kWh baja hasta un 53% de su valor original. Por otro lado, cuando se disminuye el precio del combustible de USD \$ 4 / MBtu a USD \$2 / MBtu el costo del kWh llega hasta un 85% del valor inicial. Lo anterior nos indica que la variable que afecta en mayor medida el costo del kWh es el de inversión, esto nos ofrece ciertas ventajas ya que, aunque el costo del kWh depende del precio del combustible, éste efecto no es tan grande como el del costo de inversión, así podemos tener garantías en caso de que el combustible alcance precios muy altos.

Ahora bien, si consideramos que actualmente existe un programa, Climate Change Fuel Cells Program, que permite que las personas interesadas en esta tecnología puedan acceder a ella con una inversión bruta de USD \$1000 / kW resulta bastante atractivo generar electricidad con celdas de combustible.

Además, al observar el último escenario en la tabla vemos que los efectos de un costo de inversión y de combustible baratos bajan los costos del kWh hasta un 38% del valor original. Lo cual representa beneficios económicos mayores.

Finalmente se presenta un gráfico que muestra la forma en que los costos anuales totales varían en función del fp en cada uno de los diferentes esquemas:

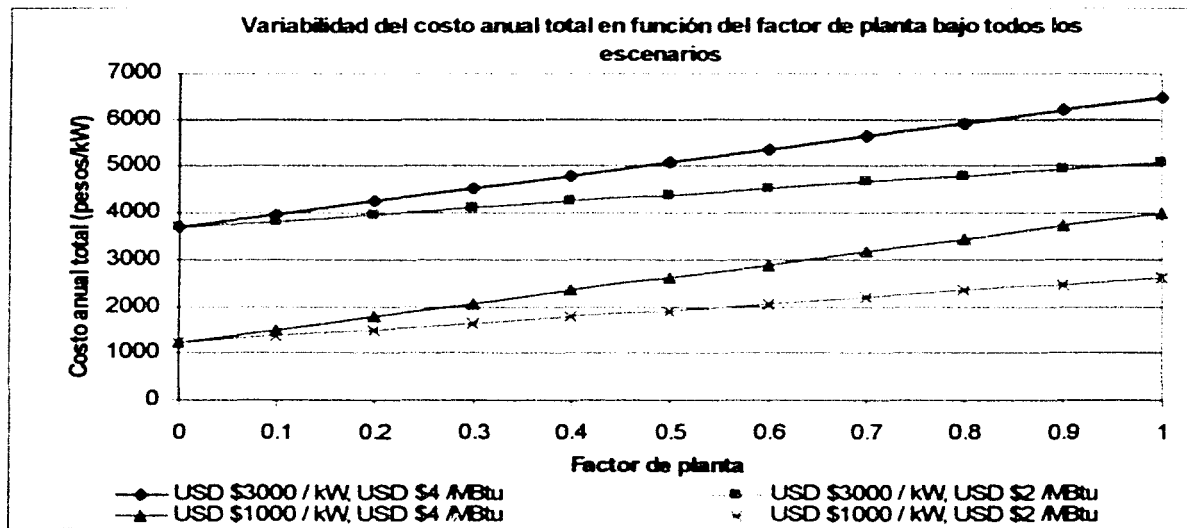


Figura 27

Es sencillo percatarse que al igual que en el costo por kWh, los costos totales muestran una mayor disminución cuando los costos de inversión son de USD \$1000 / kW

instalado. Cuando a lo anterior se adiciona el efecto del combustible barato, los costos totales se mitigan sensiblemente.

5.5 RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Por último se obtendrá el número de años necesarios para recuperar la inversión. Para llevar a cabo este punto realizaremos se planteará un ejemplo en donde se plantea una unidad habitacional con 730 departamentos cada uno de los cuales tiene un consumo de 320 kWh bimestrales.

- A partir de las Tarifa 1 que mantiene CFE para el cobro de la energía eléctrica, se calculará lo que pagarían todos los departamentos en un año a Comisión Federal de Electricidad por 1401600 kWh.

Tarifa 1 para servicio doméstico de CFE (Noviembre del 2001)	
Consumo básico	\$0.463 por los primeros 75 kWh
Consumo intermedio	\$0.548 por los siguientes 125 kWh
Consumo excedente	\$1.601 por cada kWh adicional a los anteriores

Tabla 30. Tarifa 1 para servicio doméstico¹⁵

La tarifa 1 se aplica a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, cualquiera que sea la carga conectada individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda. Estos servicios sólo se suministrarán en baja tensión y no se les aplica ninguna otra tarifa.

Posteriormente se calculó el costo que representa tal consumo bimestral por cada casa. Después se multiplicó el costo del consumo de cada departamento por el número de departamentos de la unidad. Finalmente se multiplicó por seis el costo bimestral total de toda la unidad para obtener el costo del consumo anual total de toda la unidad.

Costo de electricidad anual empleando la Tarifa 1		
Cantidad de electricidad anual utilizada por la unidad habitacional	1401600	kWh
Cantida de departamentos que conforman la unidad	730	
Cantidad de electricidad empleada en cada casa bimestralmente	320	kWh
Costo por los primeros 75kwh del bimestre	\$34.73	
Costo por los siguientes 125kwh del bimestre	\$68.50	
Consumo restante	120	kWh
Costo del consumo restante	\$192.12	
Costo del consumo total por departamento	\$295.35	
Costo del consumo total bimestral de electricidad en la unidad habitacional	\$215,601.85	
Costo del consumo total anual de electricidad en la unidad habitacional	\$1,293,611.10	

Tabla 31. Costo de la energía al comprarla a CFE

- Ahora se verá cuánto costaría generar 1401600 kWh con celdas de combustible bajo los diferentes escenarios que se plantearon, asumiendo un fp de 0.8, ya que se incluye factores de diversidad de carga como el alumbrado público.

Costo de generar 1,401,600 kWh con celdas de combustible		
Escenario	Costo del kWh pesos / kWh	Costo de generar 1401600 kWh
Con una inversión de USD \$3000 / kW y el combustible a USD \$4 / MBtu	0.84	\$1,184,005.16
Con una inversión de USD \$3000 / kW y el combustible a USD \$2 / MBtu	0.69	\$961,564.93
Con una inversión de USD \$1000 / kW y el combustible a USD \$4 / MBtu	0.49	\$691,255.36
Con una inversión de USD \$1000 / kW y el combustible a USD 2 / MBtu	0.33	\$468,815.13

Tabla 32. Costo de la energía con celdas de combustible

- Por lo tanto los ingresos generados con celdas de combustible se calculan restando lo que se le pagaría a CFE menos los costos al generar con celdas de combustible.

Ingresos		
Costo de la energía al comprarla a CFE	Costo al generar con celdas de combustible	Ingresos
\$1,293,611.10	\$1,184,005.16	\$109,605.94
\$1,293,611.10	\$961,564.93	\$332,046.17
\$1,293,611.10	\$691,255.36	\$602,355.74
\$1,293,611.10	\$468,815.13	\$824,795.97

Tabla 33. Ingresos

- Finalmente para saber en cuánto tiempo se recupera la inversión se emplearan los costos totales de cada escenario para un factor de planta de 0.8.

Tiempo de recuperación					
Escenarios	Costos anuales totales pesos / kW	Costos anuales totales pesos	Costos totales en 20 años de vida útil pesos	Ingresos pesos/kW	Años necesarios para recuperar la inversión
Con una inversión de USD \$3000 / kW y el combustible a USD \$4 / MBtu	\$5,920 03	\$1,184,005 16	\$23,680,103 24	\$109,605 94	216
Con una inversión de USD \$3000 / kW y el combustible a USD \$2 / MBtu	\$4,807 82	\$961,564 93	\$19,231,298 65	\$332,046 17	58
Con una inversión de USD \$1000 / kW y el combustible a USD \$4 / MBtu	\$3,456 28	\$691,255 36	\$13,825,107 16	\$602,355 74	23
Con una inversión de USD \$1000 / kW y el combustible a USD 2 / MBtu	\$2,344 08	\$468,815 13	\$9,376,302 57	\$824,795 97	11

Tabla 34. Años en que se recupera la inversión

Como se aprecia en la tabla la recuperación de la inversión es mucho más rápida en el caso de que el costo sea de USD \$1000 / kW, de 23 a 11 años dependiendo del costo del combustible. Mientras que en el caso de que el costo de inversión se plantee de USD \$3000 / kW la recuperación de la inversión es a muy largo plazo. Esto debido a que la inversión se recupera hasta los 216 a 58 años de acuerdo al costo del combustible. Por lo tanto, es evidente la necesidad de disminuir el costo de kW instalado para que las celdas de combustible sean competitivas.

En seguida, se muestra el gráfico que permite visualizar la recuperación en el último escenario.

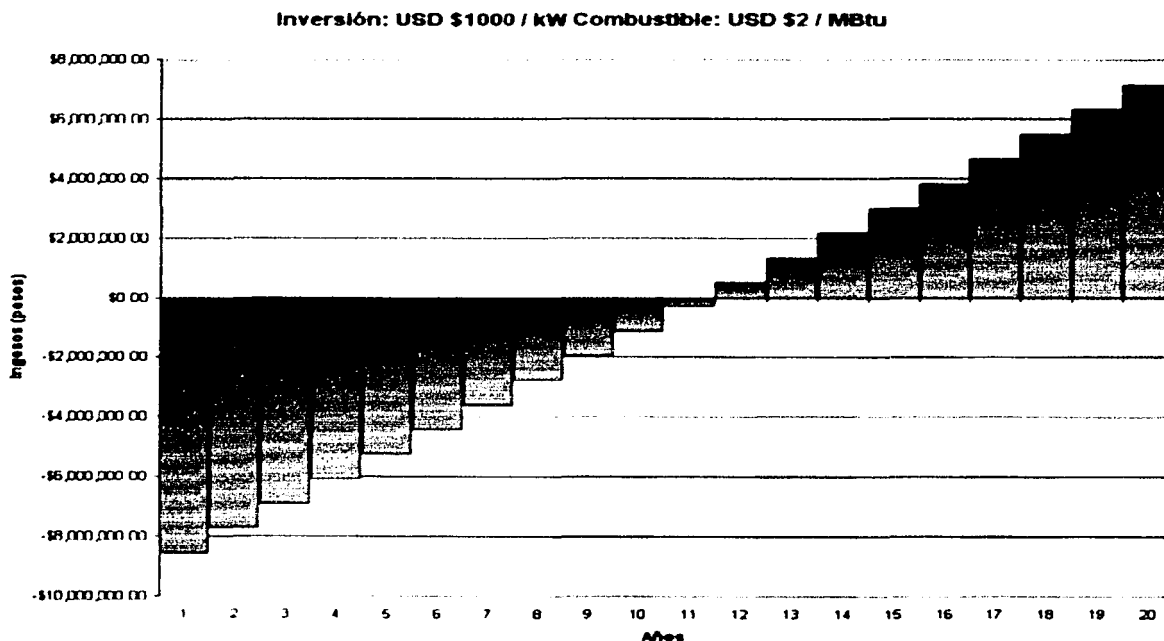


Figura 28. Recuperación de la inversión con una inversión de USD \$1000 / kW y con el combustible a USD \$2 / MBtu

El análisis realizado se llevó a cabo con las tarifas residenciales, las cuales permiten tener una recuperación aceptable de la inversión en el caso en el que el costo del kW instalado sea de 1000 dólares y el combustible tenga un precio de USD \$2 / MBtu. Ahora bien, si consideramos una tarifa que no esté subsidiada y en la que además se

internalicen los costos de impacto ambiental, se vislumbra una recuperación de la inversión aun más rápida.

Además debe tenerse en cuenta que al utilizar celdas de combustible se ahorra en la expansión del sistema de distribución y transmisión, la cual es indispensable cuando se instalan plantas generadoras bajo un esquema convencional de generación.

5.6 OBSERVACIONES FINALES

Por medio del análisis de costos observamos que la introducción de las celdas de combustibles con las condiciones actuales, es decir, USD \$3000 / kW y USD \$4 / MBtu, no es competitiva frente a otras tecnologías.

Al realizar el análisis de los escenarios modificamos dos variables para conocer el impacto en la viabilidad del uso de las celdas de combustible para generación eléctrica. Estas variables fueron el costo del combustible y el costo por kilowatt instalado.

Se pudo observar que el costo por kilowatt instalado resulta un factor decisivo para que la tecnología sea competitiva. Esto es un reflejo de que las celdas de combustible se encuentran en una etapa de prueba y que su comercialización se ha visto limitada debido a los altos costos de fabricación. En este sentido es necesario considerar que en la medida en que la fabricación de esta tecnología sea a mayor escala los costos por kilowatt instalado disminuirán y entonces podrá ser rentable.

Otro factor que fue considerado fue el precio del combustible, que en el caso de la celda de combustible con las tecnologías actuales es el gas natural. En este análisis observamos que no es determinante la variación del costo del gas en comparación con el costo de inversión. Lo anterior es posible determinarlo al visualizar el impacto de ambas variables en las rectas características de las celdas de combustible

En el caso de contar con un esquema de USD \$1000 / kW de costo de inversión, las celdas de combustible aparecen atractivas y aún con el esperado costo de combustible más elevado, resulta interesante. Por otro lado, se debe recalcar que al emplear las celdas de combustible en generación distribuida, los costos por expansión del sistema de transmisión y distribución disminuyen considerablemente.

Por lo anterior, el costo por kilowatt - hora generado con las condiciones actuales no resulta competitivo. A pesar de ello, existen empresas que comienzan a comercializar las celdas de combustible, con lo que se puede esperar que esta situación cambie rápidamente.

¹ Cano U., *"Estudio de viabilidad para la producción de celdas de combustible"*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2000, México.

² http://www.gas.pemex.com/seccion_frame.asp?noticia_id=1213&seccion_id=437

³ Viqueira L. J., "*Redes Eléctricas vol. 3*", Facultad de Ingeniería, por publicar.

⁴ *Idem*

⁵ Srinivasan S., Mosdale R., et. al., "*Fuel Cells: Reaching the Era of Clean and Efficient Power Generation in the Twenty – First Century*", Annual Review of Energy Environment, 1999, EUA.

⁶ Comunicación verbal Ing. Jacinto Viqueira Landa

⁷ Ver anexo 2, Tabla COPAR de Generación 1.2, 1.3, 4.4, 5.1

⁸ Velázquez V. V., "*Aprovechamiento de la energía eólica en México*", Facultad de Ingeniería, 2001, México (La Venta, Oaxaca).

⁹ Viqueira L. J. , Op. cit. por publicar Op. cit.

¹⁰ Ver anexo 2, Tabla COPAR de Generación 4.3

¹¹ Viqueira L. J. , Op. cit. por publicar

¹² *Idem*

¹³ *Idem*

¹⁴ Viqueira L. J., "*Redes Eléctricas vol. 3*", Facultad de Ingeniería, por publicar.

¹⁵ http://www.cfe.gob.mx/www2/Tarifas_Tarifa1_Mensual.asp?Publicacion=45&Anio=2001&mes=11

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describió el proceso de conversión de energía a través de una celda de combustible, así como las principales variantes de esta tecnología. Al observar sus características encontramos que dependiendo del tipo de tecnología pueden ser utilizadas para diversos propósitos.

El propósito que nos interesa es la generación eléctrica estacionaria bajo un esquema de generación distribuida. En este caso, las tecnologías más convenientes son las SOFC, MCFC y PAFC.

Las *ventajas* que tienen las celdas de combustible se indican a continuación:

La eficiencia de las celdas es muy alta. Si se prescinde del calor producido, la eficiencia de una celda de combustible puede variar entre el 35 y el 65%. Si se aprovecha el calor producido, la eficiencia puede alcanzar el 80%.

Los sistemas con celdas de combustible pueden ser instalados modularmente de forma escalonada, es decir, satisfacen la demanda a medida que ésta crece. Lo anterior reduce los riesgos financieros del propietario de la red.

Las dimensiones del módulo facilitan su instalación ya que no se requieren grandes espacios para ubicarlas.

Los subproductos son agua y calor aprovechable; el primero puede ser empleado para usos domésticos mientras que el calor se puede utilizar en sistemas de calefacción y enfriamiento de alguna instalación.

El módulo de la celda de combustible no tiene partes móviles por lo que requiere poco mantenimiento. El tiempo necesario para realizarlo no excede dos días por año.

Las celdas de combustible con respaldo de la red eléctrica tienen en conjunto más de 99.9999% de confiabilidad, lo que equivale a 30 segundos de interrupciones al año. Esta característica es apreciada por aquellos usuarios que no pueden prescindir de la energía eléctrica.

La regulación de voltaje ($\pm 1\%$), frecuencia (precisión de 1 minuto por año), secuencia de fase (± 3 grados eléctricos) y armónicas (menor a 3%) de la salida eléctrica de las celdas cumplen con las normas técnicas más estrictas sobre estos puntos.

En cuanto al impacto ambiental, las emisiones contaminantes en general son insignificantes y sus índices están por debajo de las normas más estrictas. Además son prácticamente silenciosas. Lo anterior permite que las celdas de combustibles se sitúen cerca del punto de consumo.

La generación distribuida beneficia al sistema en aquellos puntos en que sea débil. Además da una solución rápida al aumento de demanda y permite retrasar la ampliación de instalaciones de transmisión y distribución. Por otro lado, la generación distribuida no requiere de derecho de vía facilitando así la planeación del sistema eléctrico.

A pesar de todos estos beneficios se encontraron ciertas *desventajas* que se enuncian en seguida:

Se presentan conflictos en la coordinación en las protecciones de la red eléctrica al introducir la unidad generadora, lo cual origina islas en el sistema eléctrico. Dichos conflictos pueden ser solucionados con mejores sistemas de protecciones.

Dificultad al conectar una unidad generadora en un sistema de distribución con esquema radial. Una posible solución consiste en cambiar a esquemas de lazo.

Retraso en la adopción de normas que legislen adecuadamente la generación distribuida. Actualmente se puede recurrir a ciertos organismos como el IEEE, ANSI, IEC, etc., que proporcionan recomendaciones técnicas sobre el tema.

El alto costo que actualmente tienen las celdas de combustible, aproximadamente USD \$3000 / kW instalado, en las tecnologías más desarrolladas.

El mayor problema que ha impedido la utilización de las celdas de combustible es el costo. Los resultados arrojados en el análisis económico indican que el costo por kilowatt instalado tiene que disminuir a aproximadamente USD \$1000. Es importante puntualizar que dichos resultados son referentes al costo de generación. Es decir, en una expansión convencional del sistema se tendrían que sumar los costos de transmisión y distribución mientras que con generación distribuida, estos costos se reducen sustancialmente.

Sería interesante contar con un programa que incentive la generación de electricidad con tecnologías más limpias y que permita reducir los altos costos que actualmente se tienen en el mercado. En este sentido, un punto importante de una comparación económica correcta entre varias tecnologías de generación tendría que considerar la internalización de los costos de los efectos de la emisión de todos los contaminantes.

Se ha visto que cada vez es más difícil la ampliación de los sistemas de transmisión y distribución, por diversos factores como lo es la oposición de la población al establecimiento de las líneas de transmisión. Por otra parte, el costo de pequeñas plantas

generadoras no convencionales ha estado disminuyendo en forma apreciable. Aunado a estas tendencias, existen nuevas cargas que requieren de un suministro de electricidad de alta calidad que no siempre se puede obtener de la red eléctrica. Por todo ello, resultaría interesante considerar la generación distribuida con celdas de combustible como una alternativa que ayude a la expansión del sistema así como satisfacer la demanda creciente de forma limpia cuando el precio sea competitivo.

ANEXO 1

Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica

Artículo 36. - La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, considerando los criterios y lineamientos de la política energética nacional y oyendo la opinión de la Comisión Federal de Electricidad, otorgará permisos de autoabastecimiento, de cogeneración, de producción independiente, de pequeña producción o de importación o exportación de energía eléctrica, según se trate, en las condiciones señaladas para cada caso:

I. De autoabastecimiento de energía eléctrica destinada a la satisfacción de necesidades propias de personas físicas o morales, siempre que no resulte inconveniente para el país a juicio de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. Para el otorgamiento del permiso, se estará a lo siguiente:

a) Cuando sean varios los solicitantes para fines de autoabastecimiento a partir de una central eléctrica, tendrá el carácter de copropietarios de la misma o constituirán al efecto una sociedad cuyo objeto sea la generación de energía eléctrica para satisfacción del conjunto de necesidades de autoabastecimiento de los socios. La sociedad permissionaria no podrá entregar energía eléctrica a terceras personas físicas o morales que no fueren socios de la misma al aprobarse el proyecto original que incluya planes de expansión, excepto cuando se autorice la cesión de derechos o la modificación de dichos planes; y

b) Que el solicitante ponga a disposición de la Comisión Federal de Electricidad sus excedentes de producción de energía eléctrica, en los términos del Artículo 36Bis.

II. De Cogeneración, para generar energía eléctrica producida conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria, o ambos; cuando la energía térmica no aprovechada en los procesos se utilice para la producción directa o indirecta de energía eléctrica o cuando se utilicen combustibles producidos en sus procesos para la generación directa o indirecta de energía eléctrica y siempre que, en cualesquiera de los casos:

a) La electricidad generada se destine a la satisfacción de las necesidades de establecimientos asociados a la cogeneración, siempre que se incrementen las eficiencias energética y económica de todo el

proceso y que la primera sea mayor que la obtenida en plantas de generación convencionales. El permisionario puede no ser el operador de los procesos que den lugar a la cogeneración.

b) El solicitante se obligue a poner sus excedentes de producción de energía eléctrica a la disposición de la Comisión Federal de Electricidad, en los términos del artículo 36Bis.

III. De Producción Independiente para generar energía eléctrica destinada a su venta a la Comisión Federal de Electricidad, quedando esta legalmente obligada a adquirirla en los términos y condiciones económicas que se convengan. Estos permisos podrán ser otorgados cuando se satisfagan los siguientes requisitos:

a) Que los solicitantes sean personas físicas o personas morales constituidas conforme a las leyes mexicanas y con domicilio en el territorio nacional, y que cumplan con los requisitos establecidos en la legislación aplicable;

b) Que los proyectos motivo de la solicitud estén incluidos en la planeación y programas respectivos de la Comisión Federal de Electricidad o sean equivalentes. La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, conforme a lo previsto en la fracción III del Artículo 30., podrá otorgar permiso respecto de proyectos no incluidos en dicha planeación y programas, cuando la producción de energía eléctrica de tales proyectos haya sido comprometida para su exportación; y

c) Que los solicitantes se obliguen a vender su producción de energía eléctrica exclusivamente a la Comisión Federal de Electricidad, mediante convenios a largo plazo, en los términos del Artículo 36Bis o, previo permiso de la Secretaría en los términos de esta ley, a exportar total o parcialmente dicha producción.

IV. De pequeña producción de energía eléctrica, siempre que se satisfagan los siguientes requisitos

a) Que los solicitantes sean personas físicas de nacionalidad mexicana o personas morales constituidas conforme a las leyes mexicanas y con domicilio en el territorio nacional, y que cumplan con los requisitos establecidos en la legislación aplicable

b) Que los solicitantes destinen la totalidad de la energía para su venta a la Comisión Federal de Electricidad. En este caso, la capacidad total del

proyecto en una área determinada por la Secretaría, no podrá exceder de 30 MW; y

c) Alternativamente a lo indicado en el inciso b) y como una modalidad del autoabastecimiento a que se refiere la fracción I, que los solicitantes destinen el total de la producción de energía eléctrica a pequeñas comunidades rurales o áreas aisladas que carezcan de la misma y que la utilicen para su autoconsumo, siempre que los interesados constituyan cooperativas de consumo, copropiedades, asociaciones o sociedades civiles, o celebren convenios de cooperación solidaria para dicho propósito y que los proyectos, en tales casos, no excedan de 1 MW.V. De importación o exportación de energía eléctrica, conforme a lo dispuesto en las fracciones III y IV del Artículo 3o. de esta ley. En el otorgamiento de los permisos a que se refiere este Artículo, deberá observarse lo siguiente:

1) El ejercicio autorizado de las actividades a que se refiere este Artículo podrá incluir la conducción, la transformación y la entrega de la energía eléctrica de que se trate, según las particularidades de cada caso;

2) El uso temporal de la red del sistema eléctrico nacional por parte de los permisionarios, solamente podrá efectuarse previo convenio celebrado con la Comisión Federal de Electricidad, cuando ello no ponga en riesgo la prestación del servicio público ni se afecten derechos de terceros. En dichos convenios deberá estipularse la contraprestación en favor de dicha entidad y a cargo de los permisionarios.

3) La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, oyendo la opinión de la Comisión Federal de Electricidad, podrá otorgar permiso para cada una de las actividades o para ejercer varias, autorizar la transferencia de los permisos e imponer las condiciones pertinentes de acuerdo con lo previsto en esta ley, su reglamento y las Normas Oficiales Mexicanas, cuidando en todo caso el interés general y la seguridad, eficiencia y estabilidad del servicio público;

4) Los titulares de los permisos no podrán vender, revender o por cualquier acto jurídico enajenar capacidad o energía eléctrica, salvo en los casos previstos expresamente por esta ley.

5) Serán causales de revocación de los permisos correspondientes, a juicio de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, el incumplimiento de las disposiciones de esta ley, o de los términos y condiciones establecidos en los permisos respectivos.

Artículo 36BIS. Para la prestación del servicio público de energía eléctrica deberá aprovecharse tanto en el corto como en el largo plazo, la producción de energía eléctrica que resulte de menor costo para la Comisión Federal de Electricidad y que ofrezca además, óptima estabilidad, calidad y seguridad del servicio público, a cuyo efecto se observara lo siguiente:

I. Con base en la planeación del Sistema Eléctrico Nacional elaborada por la Comisión Federal de Electricidad, la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal determinará las necesidades de crecimiento o de sustitución de la capacidad de generación del sistema;

II. Cuando dicha planeación requiera la construcción de nuevas instalaciones de generación de energía eléctrica, la Comisión Federal de Electricidad informará de las características de los proyectos a la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. Con base en criterios comparativos de costos, dicha Dependencia determinará si la instalación será ejecutada por la Comisión Federal de Electricidad o si se debe convocar a particulares para suministrar la energía eléctrica necesaria;

III. Para la adquisición de energía eléctrica que se destine al servicio público, deberá considerarse la que generen los particulares bajo cualesquiera de las modalidades reconocidas en el Artículo 36 de esta ley.

IV. Los términos y condiciones de los convenios por los que, en su caso, la Comisión Federal de Electricidad adquiera la energía eléctrica de los particulares, se ajustarán a lo que disponga el reglamento, considerando la firmeza de las entregas;

V. Las obras, instalaciones y demás componentes serán objeto de Normas Oficiales Mexicanas o autonzadas previamente por la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica

Artículo 72.- Los particulares podrán realizar:

I. La generación de energía eléctrica para cualquiera de los fines que a continuación se señalan :

- a) Su venta a la Comisión;
- b) Su consumo por los mismos particulares en las modalidades de autoabastecimiento, cogeneración o pequeña producción ;
- c) Su uso en emergencias derivadas de interrupciones en el servicio público de energía eléctrica, y
- d) Su exportación;

II. La importación de energía eléctrica, para uso exclusivo de los importadores de la misma.

Artículo 73.-El ejercicio de las actividades a que se refiere el artículo anterior, podrá incluir la transmisión, la transformación y la entrega de la energía eléctrica a los respectivos beneficiarios de la misma, según las particularidades de cada caso.

En los proyectos correspondientes, los interesados deberán considerar las instalaciones relativas a dichas actividades, para los fines de construcción y operación de las mismas, sin perjuicio de la posibilidad de celebrar, en su caso, convenios con la Comisión, para la prestación por ésta de servicios de transmisión de la energía eléctrica a los permisionarios.

Artículo 77.- El autoabastecimiento, la cogeneración, la producción independiente, la pequeña producción, la generación para exportación y la importación de energía eléctrica destinada al abastecimiento para usos propios, son actividades sujetas a permiso previo por parte de la Secretaría

Artículo 89.- Salvo lo dispuesto en el inciso c) de la fracción IV del artículo 36 de la Ley, no se requerirá permiso para el autoabastecimiento de energía eléctrica que no exceda de 0.5 MW, ni para el funcionamiento de plantas generadoras cuando sean destinadas exclusivamente al uso propio en emergencias derivadas de interrupciones en el servicio público de energía eléctrica.

Artículo 114.- En los casos a que se refiere el artículo anterior, se adoptarán las siguientes modalidades:

I. Podrá solicitarse el permiso por intermedio de las autoridades civiles de la circunscripción cuando estas hubieran celebrado convenio de cooperación solidaria con los interesados;

II. Al terminar las instalaciones e iniciar su operación, deberán dar a la Secretaría el aviso correspondiente; y

III. Rendirán anualmente a la Secretaría un informe general sobre la operación de las instalaciones.

Artículo 115.- La Secretaría y la Comisión orientarán a los permisionarios por cuanto a la formalización, desarrollo, operación y mantenimiento de los proyectos de generación respectivos.

ANEXO 2

Tabla COPAR de Generación 1.2
Parámetros básicos del costo de generación

Central	Potencia bruta (MW)	Eficiencia bruta ^{1./} (%)	Vida útil (años)	Factor de planta	Usos propios ^{1./} (%)
Térmica convencional	2 x 350	37.56	30	0.750	5.8
	2 x 160	36.31	30	0.650	6.2
	2 x 84	32.42	30	0.650	6.4
	2 x 37.5	30.63	30	0.650	8.3
^{2./} Turbogás Aeroderivada gas	1 x 42.3	36.12	30	0.125	2.8
^{2./} Turbogás Industrial gas	1 x 85	29.89	30	0.125	2.1
^{2./} Turbogás Industrial gas "F"	1 x 184	33.44	30	0.125	2.1
	"G"	1 x 251	35.12	30	0.125
^{2./} Turbogás Aeroderivada diesel	1 x 40.8	36.70	30	0.125	1.8
^{2./} Ciclo Combinado gas	1x1 "F"	50.65	30	0.800	2.9
	2x1 "F"	50.72	30	0.800	2.9
	1x1 "G"	50.96	30	0.800	2.9
	2x1 "G"	51.26	30	0.800	2.9
^{3./} Diesel	2 x 18.7	47.61	25	0.650	5.1
	3 x 13.5	47.35	25	0.650	5.7
	3 x 3.4	43.53	25	0.650	7.1
Carboeléctrica	2 x 350	37.24	30	0.750	7.3
C dual s/desulfurador	2 x 350	37.39	30	0.750	7.3
C dual c/desulfurador	2 x 350	37.39	30	0.750	11.4
Nuclear	1 x 1356	34.54	30	0.750	3.1
Geotermoelectrica					
Cerro Prieto	4 x 26.95	19.02	30	0.850	7.3
Los Azufres	4 x 26.95	19.02	30	0.850	7.3
Hidroeléctricas					
Aguamilpa	3 x 320		50	0.253	0.5
Agua Prieta	2 x 120		50	0.209	0.5
La Amistad	2 x 33		50	0.286	0.5
Bacurato	2 x 46		50	0.331	0.5
Caracol	3 x 200		50	0.288	0.5
Comedero	2 x 50		50	0.312	0.5
Chicoasén	5 x 300		50	0.425	0.5
Peñitas	4 x 105		50	0.520	0.5
Zimapan	2 x 146		50	0.527	0.5

1./ Ver referencia 8

2./ La potencia y eficiencia están determinadas bajo las siguientes condiciones ISO: Temperatura ambiente de 15 grados centígrados, humedad relativa = 60% y presión al nivel del mar

3./ La potencia y eficiencia están determinadas bajo condiciones ISO 3046/I-1986: Temperatura ambiente de 25 grados centígrados, humedad relativa de 30% y presión barométrica de 1.0 bar

Tabla COPAR de Generación 1.3
Costo unitario de inversión (Tasa de descuento del 10%, precios medios del 2000)

Central	Potencia bruta (MW)	Directo 1_ (\$/kW)	Índice	Directo más indirecto 2_ (\$/kW)	Índice	Actualización al inicio de operación 3_ (\$/kW)	Índice	
Térmica convencional	2 x 350	6,764.26	100	7,433.92	100	8,690.35	100	
	2 x 160	8,169.59	121	8,978.38	121	10,392.69	120	
	2 x 84	9,543.01	141	10,487.77	141	12,165.85	140	
	2 x 37.5	11,591.76	171	12,739.35	171	14,385.07	166	
Turbogás Aeroderivada gas	1 x 42.3	5,879.43	87	6,026.42	81	6,406.18	74	
Turbogás Industrial gas	1 x 85	4,458.43	66	4,569.89	61	4,857.87	56	
Turbogás Industrial gas "F"	1 x 184	3,713.53	55	3,806.37	51	4,129.41	48	
"G"	1 x 251	3,363.23	50	3,447.31	46	3,739.87	43	
Turbogás Aeroderivada diesel	1 x 40.8	6,041.66	89	6,192.70	83	6,582.94	76	
Ciclo Combinado gas 1x1 "F"	1 x 280	4,248.99	63	4,474.18	60	5,028.84	58	
	2x1 "F"	1 x 560	4,041.56	60	4,255.78	57	4,756.78	55
	1x1 "G"	1 x 368	3,955.42	58	4,165.06	56	4,681.40	54
	2x1 "G"	1 x 739	3,771.71	56	3,971.61	53	4,439.17	51
Diesel	2 x 18.7	11,575.30	171	12,188.79	164	13,418.53	154	
	3 x 13.5	12,061.05	178	12,700.28	171	13,799.30	159	
	3 x 3.4	14,352.69	212	15,113.38	203	15,976.87	184	
Carboeléctrica	2 x 350	10,000.21	148	11,250.24	151	13,471.42	155	
C. dual s/desulfurador	2 x 350	10,250.22	152	11,531.49	155	13,802.31	159	
C. dual c/desulfurador	2 x 350	11,835.30	175	13,314.72	179	15,965.44	184	
4_/ Nuclear	1 x 1356	18,237.74	270	19,204.34	258	26,571.10	306	
5_/ Geotermoelectrica								
Cerro Prieto	4 x 26.95	9,143.79	135	11,475.46	154	12,784.69	147	
Los Azufres	4 x 26.95	8,842.04	131	11,096.77	149	12,362.80	142	
Hidroeléctricas								
Aguamilpa	3 x 320	11,282.15	167	12,681.13	171	17,406.03	200	
Agua Prieta	2 x 120	13,355.42	197	15,011.49	202	20,004.79	230	
La Amistad	2 x 33	7,308.89	108	8,215.19	111	10,258.13	118	
Bacurato	2 x 46	10,427.90	154	11,720.96	158	14,635.70	168	
Caracol	3 x 200	12,097.48	179	13,597.57	183	18,761.08	216	
Comedero	2 x 50	11,119.80	164	12,498.66	168	16,134.58	186	
Chicoasén	5 x 300	12,223.08	181	13,738.74	185	18,438.58	212	
Peñas	4 x 105	15,444.63	228	17,359.77	234	23,842.85	274	
Zimapán	2 x 148	33,198.65	491	37,313.04	502	48,908.40	540	

1_/ Ver referencia 2

2_/ Comprende Ingeniería y Administración

3_/ Incluye intereses durante la construcción

4_/ Incluye la inversión de la central más la carga inicial de combustible (1305.14 \$/kW costo directo)

5_/ Se refiere a la inversión en la central

Tabla COPAR de Generación 4.3
Poderes caloríficos de los combustibles

Combustible	Unidad	MJ	kWh	BTU	kcal
1/ Combustóleo nacional	l	41.68	11.58	39,520.81	9,958.36
	gal	157.79	43.83	149,602.25	37,696.42
	bbl	6,627.25	1,841.05	6,283,294.54	1,583,249.73
Combustóleo importado	l	41.71	11.59	39,545.97	9,964.70
	gal	157.89	43.86	149,697.49	37,720.42
	bbl	6,631.47	1,842.22	6,287,294.73	1,584,257.69
1/ Gas natural nacional	m ³	35.42	9.84	33,585.64	8,462.83
	ft ³	1.00	0.28	951.04	239.64
2/ Gas natural importado	m ³	38.29	10.64	36,304.98	9,148.04
	ft ³	1.08	0.30	1,028.05	259.05
1/ Diesel # 2	l	38.65	10.74	36,639.93	9,232.44
	gal	146.29	40.64	138,696.98	34,948.54
	bbl	6,144.15	1,706.85	5,825,273.07	1,467,838.56
Diesel importado	l	38.65	10.74	36,639.93	9,232.44
	gal	146.29	40.64	138,696.98	34,948.54
	bbl	6,144.15	1,706.85	5,825,273.07	1,467,838.56
1/ Carbón de MICARE	kg	19.17	5.33	18,177.96	4,580.44
	lb	8.70	2.42	8,245.47	2,077.67
2/ Carbón importado (0,7% de azufre)	kg	23.83	6.62	22,592.92	5,692.91
	lb	10.81	3.00	10,248.08	2,582.29
3/ Carbón importado (2,0% de azufre)	kg	23.83	6.62	22,592.92	5,692.91
	lb	10.81	3.00	10,248.08	2,582.29
4/ Uranio enriquecido	g	4,012.00	1,114.53	3,803,777.20	958,466.80
Vapor Cerro Prieto	ton	2,780.10	772.31	2,635,812.81	664,165.89
Vapor Los Azufres	ton	2,769.00	769.23	2,625,288.90	661,514.10

1_/ Combustibles mexicanos (ver referencia 7)

2_/ Corresponde al "Natural gas to electric utilities" en EUA.

3_/ El carbón de referencia corresponde al "All coal CIF electric utility power plant" de EUA.

4_/ Ver referencia 18

Tabla COPAR de Generación 4.4
Eficiencia de conversión

Central	Potencia bruta (MW)	Eficiencia ^{1/}		Régimen térmico neto (MJ/MWh)	Consumo específico neto (U/MWh)	Unidad	
		bruta (%)	neta (%)				
Térmica convencional	2 x 350	37.56	35.39	10,172	243.88	L	
	2 x 160	36.31	34.04	10,576	253.55	L	
	2 x 84	32.42	30.33	11,869	284.57	L	
	2 x 37.5	30.63	28.10	12,811	307.15	L	
Turbogás Aeroderivada gas	1 x 42.3	36.12	35.12	10,251	267.69	m ³	
Turbogás Industrial gas	1 x 85	29.89	29.27	12,299	321.19	m ³	
Turbogás Industrial gas "F"	1 x 184	33.44	32.73	10,999	287.24	m ³	
	"G"	1 x 251	35.12	34.31	10,493	274.01	m ³
Turbogás Aeroderivada diesel	1 x 40.8	36.70	36.04	9,989	258.47	L	
^{1/} Ciclo Combinado gas	1x1 "F"	1 x 280	50.65	49.17	7,322	191.20	m ³
	2x1 "F"	1 x 560	50.72	49.26	7,308	190.85	m ³
	1x1 "G"	1 x 368	50.96	49.47	7,277	190.04	m ³
	2x1 "G"	1 x 739	51.26	49.76	7,235	188.93	m ³
Diesel	2 x 18.7	47.61	45.19	7,966	190.99	L	
	3 x 13.5	47.35	44.64	8,065	193.34	L	
	3 x 3.4	43.53	40.46	8,898	213.32	L	
Carboeléctrica	2 x 350	37.24	34.53	10,426	543.77	kg	
C. dual s/desulfurador	2 x 350	37.39	34.67	10,384	435.74	kg	
C. dual o/desulfurador	2 x 350	37.39	33.11	10,873	456.27	kg	
Nuclear	1 x 1 356	34.54	33.46	10,759	2.68	g	
Geotermoelectrica							
Cerro Prieto	4 x 26.96	19.02	17.62	20,431	7.35	ton	
Los Azufres	4 x 26.96	19.02	17.62	20,431	7.38	ton	

1./ Ver referencia 8.

Tabla COPAR de Generación 5.1
Costos de operación y mantenimiento

Central	Potencia bruta (MW)	Fijo ^{1_} (\$/MW-año)	Variable ^{1_} (\$/MWh)	Total ^{2_} (\$/MWh)	Índice
Térmica convencional	2 x 350	132,291.98	1.25	22.62	100
	2 x 160	202,673.85	1.33	39.29	174
	2 x 84	259,779.35	1.40	50.17	222
	2 x 37.5	499,523.11	1.50	97.15	429
Turbogás Aeroderivada gas	1 x 42.3	174,057.07	0.97	164.47	727
Turbogás Industrial gas	1 x 85	86,618.99	0.97	81.73	361
Turbogás Industrial gas "F"	1 x 184	53,352.28	0.97	50.75	224
"G"	1 x 251	38,627.05	0.97	37.07	164
Turbogás Aeroderivada diesel	1 x 40.8	191,462.78	1.07	179.13	792
Ciclo Combinado gas 1x1 "F"	1 x 280	218,243.25	1.54	33.62	149
	2x1 "F"	181,342.28	1.54	28.18	125
	1x1 "G"	196,849.41	1.54	30.48	135
	2x1 "G"	163,346.67	1.54	25.55	113
Diesel	2 x 18.7	426,061.27	35.78	114.61	507
	3 x 13.5	446,382.47	39.34	122.48	541
	3 x 3.4	545,944.94	46.46	149.62	661
Carboeléctrica	2 x 350	238,539.98	1.49	40.64	180
C. dual s/desulfurador	2 x 350	244,503.48	1.49	41.62	184
C. dual c/desulfurador	2 x 350	299,576.82	12.97	64.46	285
Nuclear	1 x 1 356	412,386.32	18.92	83.71	370
^{1_} Geotermoelectrica					
Cerro Prieto	4 x 26.95	312,644.40	0.33	45.64	202
Los Azufres	4 x 26.95	297,579.40	0.33	43.46	192
Hidroeléctricas					
Aguamiipa	3 x 320	46,667.51	0.17	21.33	94
Agua Prieta	2 x 120	78,305.95	0.19	43.18	191
La Amistad	2 x 33	170,322.28	0.22	68.54	303
Bacurato	2 x 46	137,770.02	0.21	47.96	212
Caracol	3 x 200	59,416.34	0.18	23.65	105
Comedero	2 x 50	130,808.72	0.21	48.31	214
Chicoasén	5 x 300	48,210.71	0.17	13.18	58
Peñitas	4 x 105	84,367.82	0.19	18.81	83
Zimapan	2 x 146	70,303.04	0.16	15.49	66

1_ / Ver referencia 10.

2_ / Costo del MWh neto generado.

3_ / Se refiere exclusivamente a la central.