



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE INGENIERÍA

Aplicación de Celdas de Combustible para el  
Suministro de Energía Eléctrica a Estaciones  
Sensoras de Campo del Sistema de Alerta Sísmica

### T E S I S

Para obtener el título de  
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

PRESENTA:

JORGE ALBERTO VENTURA MITZI

DIRECTOR DE TESIS

Dr. César Ángeles-Camacho

Ciudad Universitaria, México D.F. Agosto 2011.





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.

## RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se habla de la importancia de mantener operando de forma correcta el Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, con un buen sistema de alimentación energético. Se hace una descripción del Sistema de Alerta, haciendo especial énfasis en las fuentes de alimentación eléctrica para una estación sensora de campo. La importancia del Sistema de Alerta Sísmica requiere de tecnologías que puedan proporcionar de una manera confiable, eficiente y segura el suministro energético de las estaciones sensoras. En este momento se utilizan fuentes energéticas que no han cubierto satisfactoriamente con la demanda requerida por las estaciones de campo.

Actualmente el Sistema ha presentado fallas derivadas de deficiencias del suministro eléctrico; por lo que la necesidad de encontrar, estudiar y validar una opción viable para eliminar estas es la motivación principal del proyecto de investigación desarrollado. En el trabajo se describen las formas actuales con las que se cubre la demanda energética, y un estudio de posibles fuentes de alimentación diferentes que brinden un suministro inteligente y redundante. El trabajo se centra en la utilización de las celdas de combustible, como una fuente viable para cubrir de mejor manera la demanda energética de las estaciones de campo.

Las celdas de combustible han mostrado ser sistemas confiables, además de presentar poco o casi nulo mantenimiento, alta eficiencia y poca contaminación al medio ambiente.

Para validar la aplicación de las celdas de combustible, se realizaron una serie de simulaciones considerando el consumo energético estimado en un periodo de operación normal y otro de alerta o falla. Las simulaciones se realizan adecuando un modelo de la celda PEMFC previamente publicado y desarrollado en una plataforma de Matlab/Simulink®. Los resultados obtenidos muestran que la celda de combustible es una fuente viable para cubrir de manera confiable, eficiente y segura la demanda energética de las estaciones sensoras de campo, asegurando la operación constante del sistema de alerta sísmica.

## **ABSTRACT**

In this thesis the importance of properly operating the Seismic Alert System of Oaxaca, with a good energy supply system is addressed. It makes a description of the alert system, with particular emphasis on electric power for a sensor station. Because of the importance of Seismic Alert Systems these require technologies that can provide a reliable, efficient and safe energy supply of sensor stations. Now days, SAS uses energy sources that have not satisfactorily fulfilled the demand required by the field stations.

Currently the system has failed resulting from power failures, so the need to find, analyze and validate a viable option to eliminate these faults, is the main motivation of the research project developed. The thesis describes the current forms with which energy demand is covered, and a study of possible sources of different power supplies that provide intelligent and redundant. The work focuses on the use of fuel cells (FC) as a viable source to meet better the energy demand of the field stations. Fuel cells have proven reliable systems, as well as presenting little or no maintenance, high efficiency and low pollution to the environment.

To validate the application of fuel cells, there were a series of simulations considering the estimated energy consumption over a period of normal operation and a warning or failure. Simulations were carried out adapting a model of the cell PEMFC previously published and developed on a platform of Matlab / Simulink<sup>®</sup>.

The results show that the fuel cell is a viable source to meet a reliable, efficient and safe energy demand of field stations, ensuring continued operation of the Seismic Alert System of Oaxaca.

## DEDICATORIAS

### **A mis padres**

Por sus invaluable apoyo para convertirme en la persona que ahora soy. Y por brindarme la mejor herencia que un hijo puede recibir, una carrera profesional. Pero sobre todo por su infinito amor y paciencia a lo largo de toda mi vida. Esto es un reconocimiento a su inalcanzable lucha en la vida, por muy complicadas que aparenten ser las cosas siempre se resuelven. Gracias por ser mis padres.

### **A mi hermano**

Por tu sincero y apasionado apoyo en esos largos días y noches de estudio, que me ayudaron mucho en los primeros semestres de la carrera.

### **A Paola Susi**

Por tu gran apoyo y paciencia en los días más complicados, siempre supiste la manera de motivarme para seguir adelante y no claudicar por más difícil que pareciera, tú tienes mucho crédito en esto, más del que pueda darte en estas líneas.

## AGRADECIMIENTOS

### **A la UNAM**

Por ser mi alma máter y por darme una formación universitaria con altos valores éticos y morales, que me hace tener conciencia de las cosas, que me ayudaron a formar un pensamiento crítico y libre que pueda contribuir a mejorar nuestra actual sociedad.

### **A la Facultad de Ingeniería**

Por brindarme los mejores conocimientos para ser un buen ingeniero, que trabaje en bien de mi país y de mi sociedad. Siempre con el puño y el corazón en alto, con la sangre azul y la piel dorada.

### **Al Dr. César Ángeles Camacho**

Por enseñarme que las cosas son sencillas si se tiene orden, disciplina y constancia en lo que se hace, y por guiarme de la mejor manera en este trabajo de tesis.

### **Al CIRES A.C.**

Por ser parte de mi formación profesional, personal y humana, y por poder participar en este proceso de expansión del CIRES que es tan importante y relevante para mí.

### **Al Ing. Juan Manuel Espinoza Aranda**

Por su respaldo y confianza en mí para participar y desarrollarme profesionalmente, y por permitirme ser parte de ese magnífico grupo de personas que conforman al CIRES.

### **Al Ing. Roberto Islas Vázquez**

Por su incalculable apoyo en un momento difícil en mi vida, por sus sinceros consejos que han significado grandes lecciones de vida, por su paciencia y confianza a lo largo de este proceso de aprendizaje.

### **Al Contador Oscar Huerta**

Por su gran interés, motivación y empatía en este proceso de titulación, por su amistad y confianza.

### **A mis compañeros de la Coordinación de Comunicaciones**

ILOR, ARL, GLA, VDS, DZH, MAGG, JJCG, JDC, NDO, FAC, GM, ILG. Por sus grandes consejos y enseñanzas, pero sobre todo por su amistad.

## Tabla de Contenido

Tema	Página
Resumen	ii
Abstract	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Índice	vi
Índice de Figuras.	xi
Índice de Tablas.	xiii
Glosario de Acrónimos y Variables.	xiv
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 Introducción.	1
1.2 Generalidades.	2
1.3 Clases de Sismos.	2
1.3.1 Sismicidad de México	3
1.3.2 Las Ondas Sísmicas.	4
1.3.3 Tipos de Ondas.	4
1.3.4 Riesgo Sísmico en México.	5
1.4 Motivación.	6
1.5 Hipótesis.	6

---

1.6 Objetivos.	7
----------------	---

1.7 Contenido.	7
----------------	---

## CAPÍTULO II

### REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA EN ESTACIONES SENSORAS DE CAMPO

2.1 Introducción.	10
-------------------	----

2.2 La Estación Sensora de Campo.	11
-----------------------------------	----

2.2.1 El Equipo de Radiocomunicaciones.	13
---	----

2.2.2 El Equipo de Medición y Procesamiento.	14
--	----

2.2.3 Pruebas de la Tarjeta de Adquisición de Datos.	14
--	----

2.3 Operación de la Estación Sensora de Campo.	16
--	----

2.4 La Estación Repetidora.	20
-----------------------------	----

2.4.1 Elementos de la Estación Repetidora.	20
--	----

2.5 Requerimientos Energeticos de la Estación Sensora de Campo.	22
---	----

2.6 Soluciones Actuales.	23
--------------------------	----

## CAPÍTULO III

### TECNOLOGIAS DISPONIBLES PARA EL SUMINISTRO DE ENERGIA EN LA ESTACIÓN SENSORA DE CAMPO

3.1 Introducción.	25
-------------------	----

3.2 Sistemas Fotovoltaicos.	27
-----------------------------	----

3.2.1 Descripción del Sistema Fotovoltaico.	28
---	----

3.2.2 Funcionamiento del Sistema Fotovoltaico.	29
--	----

3.2.3 Energía Solar.	29
----------------------	----

3.3 Baterías.	31
---------------	----



---

3.3.1 Baterías de Plomo.	31
3.3.2 Baterías Selladas, Gelificadas.	32
3.3.3 Baterías Solares.	32
3.3.4 Electrolito Absorbido.	33
3.3.5 Niquel-Cadmio.	33
3.4 Problemas Típicos con las Baterías Recargables.	33
3.5 Red Eléctrica.	36
3.6 Celdas de Combustible.	37
3.6.1 Antecedentes.	37
3.6.2 Descripción.	38
3.7 Otros.	39
3.8 Discusión.	40

#### CAPÍTULO IV

#### CELDA DE COMBUSTIBLE PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA EN LA ESTACIÓN SENSORA DE CAMPO.

4.1 Introducción	44
4.2 Principios de Operación de la Celda de Combustible.	44
4.3 Tipos de Celdas de Combustible.	45
a) PAFC: Celda de Combustible de Ácido Fosfórico.	46
b) PEMFC: Celda de Combustible de Intercambio Protónico.	46
c) MCFC: Celda de Combustible de Carbonato Fundido.	46
d) SOFC: Celda de Combustible de Oxido Sólido.	46
e) Tipo Alcalinas.	47
f) Otras Celdas de Combustible.	47
4.4 Ventajas de las Celdas Tipo PEM.	47
4.4.1 Los Principales Beneficios.	47
4.5 Principio de Operación de las PEM.	48

---

4.5.1 Principales Componentes de las PEM.	49
4.6 Aplicaciones.	50
4.6.1 Celdas de Combustible en Vehículos.	50
4.6.2 Uso Doméstico e Industrial.	52
4.7 Aplicaciones al SASO	53
4.8 Dimensionamiento de las Celdas de Combustible.	53
4.8.1 Valores de Tensión.	53
4.8.2 Parametro de Diseño.	54
4.9 Rendimiento de las Celdas de Combustible.	54
4.10 El Hidrógeno como Aportador Enégetico.	56
4.10.1 Obtención del Hidrógeno.	56
4.10.2 Métodos de Optención y Almacenamiento.	57
4.11 Producción de Hidrógeno en nuestro País.	58
4.12 Energía de las Celdas de Combustible.	59
4.13 Potencia y Energía de las Celdas de Combustible.	62
4.14 Implementación de las Celdas de Combustible en un Sistema Aislado.	64
4.15 Discusión	67
CAPÍTULO V	
CASO DE ESTUDIO DE LA CELA DE COMBUSTIBLE	
5.1 Introducción.	70
5.2 Definición del Caso de Estudio.	70
5.2.1 Modelo de la PEMFC	72
5.3 Caso 1: Comportamiento típico de la ESDECA.	74
5.4 Caso 2: Comportamiento Atípico en ESDECA.	76

---

5.5 Caso 3: Comportamiento típico de una ESREPE.	78
5.6 Caso 4: Comportamiento atípico de una ESREPE	81
5.7 Discusión.	82

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJO FUTURO

6.1 Conclusiones.	85
6.2 Trabajo Futuro.	86

## APÉNDICE A

EL CENTRO DE INSTRUMENTACIÓN Y REGISTRO SÍSMICO	88
---	----

## Índice de Figuras.

Figura	Título
2.1	Mapa del estado de Oaxaca que muestra la localización de las estaciones sensoras de campo.
2.2	Tren de Comunicaciones del Sistema de Alerta Sísmica
2.3	Aspecto general de una estación sensora de campo típica
2.4	Aspecto del equipo de medición y procesamiento de la estación sensora de campo.
2.5	Aspecto de los ejes de monitoreo del sensor.
2/6	Aspectos del diagrama de operación de la estación de campo.
2.7	Funcionamiento del sistema de alerta sísmica ante la ocurrencia de un sismo con magnitud mayor a 5.5 grados.
2.8	Aspectos del diagrama de operación de la estación repetidora.
2.9	Descripción de las partes que componen la estación repetidora.
2.10	Equipo de comunicaciones de la estación repetidora dentro del gabinete de protección.
3.1	Aspectos de las condiciones climatológicas en estación repetidora corral de Piedra.
3.2	Aspecto del deterioro de las baterías en campo. Derramamiento de ácido.
3.3	Aspecto que muestra el deterioro de las baterías en campo.
3.4	Aspecto de un sistema híbrido con celdas de combustible.
4.1	Aspectos de la membrana de la celda de combustible tipo PEM.
4.2	Componentes de la celda tipo PEM.
4.3	Proceso de generación y distribución del hidrógeno.
5.1	Curva de demanda de la estación sensora de campo típica.
5.2	Variación en la corriente entregada por la celda caso 1.

- 5.3 Variación del voltaje entregado por la celda caso 1.
- 5.4 Potencia entregada por la celda de combustible caso 1.
- 5.5 Curva de demanda de la estación de campo, atípico.
- 5.6 Corriente entregada por la celda de combustible caso 2.
- 5.7 Voltaje entregado por la celda caso 2.
- 5.8 Potencia entregada por la celda de combustible caso 2.
- 5.9 Curva de demanda de la estación repetidora típica.
- 5.10 Corriente entregada por la celda de combustible caso 3.
- 5.11 Voltaje entregado por la celda de combustible caso 3.
- 5.12 Potencia entregada por la celda de combustible caso 3.
- 5.13 Curva de demanda de la estación repetidora atípica.
- 5.14 Corriente entregada por la celda de combustible caso 4.
- 5.15 Voltaje entregado por la celda de combustible caso 4.
- 5.16 Potencia entregada por la celda de combustible caso 4.
- 5.17 Diagrama de bloques de la celda de combustible tipo PEM utilizada en la simulación.
- 5.18 Bloque de voltaje de salida de la celda de combustible.

## Índice de Tablas

Tabla	Título
2.1	Voltajes de Operación de la tarjeta de adquisición de datos.
2.2	Localización de las estaciones de campo del SASO.
2.3	Manual de Operación, Especificaciones Técnicas.
5.1	Demanda energética de una estación de campo típica.
5.2	Demanda energética de una estación repetidora.

## Glosario de Acrónimos y Variables.

## • Acrónimos.

ESDECA	Estación Sensora de Campo.
ESREPE	Estación Repetidora de Campo.
ESCERE	Estación Central de Registro.
SASO	Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca.
SAS	Sistema de Alerta Sísmica.
SASMEX	Sistema de Alerta Sísmica de México.
MEMS	Micro Sistemas Electromecánicos.
CIRES	Centro de Instrumentación y Registro Sísmico.
IEPCO	Instituto Estatal de Protección Civil de Oaxaca.
CA	Corriente Alterna.
CD	Corriente Directa.
FF	Celda de Combustible
Fm	Frecuencia Modulada
V	Voltaje.
R	Resistencia.
i.	Corriente.
H	Hidrógeno.
Kg	Kilogramo.
SI	Sistema Internacional de Unidades
cm <sup>2</sup>	Centímetros Cuadrados.
SCFH	Pies Cúbicos Estándar por Hora.
SCMH	Metros Cúbicos Estándar por Hora.
PEM	Membrana de Intercambio de Protones.

---

H <sup>+</sup>	Protones.
C	Coulomb.
kJ	Kilo Joules.
W	Watts.
GLP	Gas Licuado de Petróleo.
PAFC	Celda de Combustible de Ácido Fosfórico.
MCFC	Celda de Combustible de Carbonato Fundido.
°F	Grados Faraday.
SOFC	Celda de Combustible de Óxido Sólido.
NASA	Agencia Espacial Norteamericana.
Tx	Transmisor.
hp	Caballos de fuerza.
Rx	Receptor.
NiCd	Niquel-Cadmio.
CPH	Celda de Combinación Calor y Energía.

- Variables y Unidades.

O <sub>2</sub>	Oxígeno.
H <sub>2</sub> O	Agua.
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono.
mW	Mega Watts.
kW	Kilo Watts.
A	Amper.
kA	Kilo Amperes.
KVA	Kilo Volts Amperes.



°C	Temperatura en el SI
V <sub>a</sub>	Voltaje de Activación.
V <sub>r</sub>	Voltaje de Resistencia.
V <sub>c</sub>	Voltaje de Concentración.
e	Electrón.
Gf	Energía Libre de Gibbs de Formación.
ΔGf	Incremento de Energía Libre de Gibbs de Formación.
N	Número de Abogado.
F	Constante de Faraday.
E	Energía.
P	Potencia.
H	Entalpía.
ms	Milisegundo.
kHz	Kilo Hertz.
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrógeno.
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Azufre.

## Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción.

Según expertos en sismología la magnitud del próximo macrosismo en las costas de Guerrero fácilmente alcanzará una magnitud de 8.3, a menos que la energía se disipe en dos o tres sismos un poco menores, y nótese que el temblor del 19 de septiembre de 1985, tuvo 8.1 grados como magnitud, que cada 0.2 de incremento en esta escala significa la duplicación de la energía liberada y que es poco probable que el nuevo temblor ocurra ahora tan favorable como el de 1985 [1]. Seguramente las ciudades más afectadas serán Acapulco, Chilpancingo y México D.F.; es de resaltar que desde el sismo de 1985 no han ocurrido sismos de tal magnitud, algunos expertos del área pronostican que en los próximos años ocurra un macrosismo que libere gran cantidad de energía, la cual sería potencialmente devastadora para las grandes ciudades como el Distrito Federal y Área Conurbada.

Un sistema de alerta sísmica permitiría mitigar los efectos negativos causados por un sismo de la magnitud del pronosticado dada la creciente sobrepoblación que está viviendo la Ciudad de México. Dada la necesidad de contar con la infraestructura de un sistema de tal magnitud que permitiera evaluar y avisar en caso de riesgo por un temblor, surge el proyecto del Sistema de Alerta Sísmica (SAS) [2], con la utilización de instrumentación sísmica netamente desarrollada en México, lo cual resulta de vital importancia, pues ya que comprar este tipo de sensores en el mercado extranjero es sumamente caro y con la actual situación económica del País sería difícil poder disfrutar de un sistema como el que se tiene.

El SAS detecta un sismo durante los primeros segundos de su desarrollo mediante un conjunto de estaciones sensoras de campo autónomas. Generalmente, la detección de un sismo fuerte, es señalada consecutivamente por lo menos de dos estaciones. Inmediatamente después de que se confirma que es un sismo relevante, se envían señales de alerta sísmica, las cuales llegan a la población hasta con 60 segundos de anticipación, por medio de comunicaciones convencionales.

Así con el propósito de difundir y apoyar las tareas de investigación científica realizadas por ingenieros mexicanos, se crea el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A.C. (CIRES), con el auspicio del gobierno del Distrito Federal.

Para advertir y mitigar el efecto que causan los grandes sismos que ocurren eventualmente en la costa del estado de Guerrero, con el auspicio de la Secretaría de Obras del GDF, desde diciembre de 1989 el CIRES desarrolla el Sistema de Alerta Sísmica (SAS), de la Ciudad de México.

Además en el estado de Oaxaca, después de los sismos de 1999, que afectaron a esa entidad, el CIRES trabaja en la instrumentación del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca (SASO) con el apoyo del gobierno de este Estado. El CIRES es miembro del Consejo de Protección Civil del Distrito Federal y está inscrito en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del CONACyT [3].

## 1.2 Generalidades.

### Origen de los sismos

Se denomina sismo o terremoto a las sacudidas o movimientos bruscos del terreno producido en la corteza terrestre como consecuencia de la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra o la tectónica de placas. Esta energía se transmite a la superficie en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones. El punto que origina el terremoto se llama foco o hipocentro<sup>1</sup>; este punto se puede situar a un máximo de unos 700 km hacia el interior terrestre. El epicentro<sup>1</sup> es el punto de la superficie terrestre más próximo al foco del sismo.

## 1.3 Clases de Sismos [4]

- a) Volcánicos: directamente relacionados con las erupciones volcánicas. Son de poca intensidad y dejan de percibirse a cierta distancia del volcán. Sólo en las explosiones de caldera, como las de Santorini o Krakatoa alcanzan grandes intensidades [1].
- b) Tectónicos: originados por ajustes en la litosfera. El hipocentro suele encontrarse localizado a 10 ó 25 kilómetros de profundidad, aunque algunos casos se llegan a detectar profundidades de hasta 70 kilómetros y también pueden ser más superficiales. Se producen por el rebote elástico que acompaña a un desplazamiento de falla.
- c) Batisismos: su origen no está del todo claro, caracterizándose porque el hipocentro se encuentra localizado a enormes profundidades (300 a 700 kilómetros), fuera ya de los límites de la litosfera. Se pueden deber a transiciones críticas de fase en las que materiales que subducen se transforman bruscamente, al alcanzarse cierto valor de presión, en otros más compactos.

---

<sup>1</sup> Hipocentro: Es el punto en la profundidad de la Tierra desde donde se libera la energía de un sismo.  
Epicentro: Es el punto de la superficie de la Tierra directamente sobre el hipocentro.

---

Los sismos de origen tectónico son la principal causa de movimientos telúricos en nuestro territorio. Estos liberan aproximadamente un 3% de la energía sísmica mundial, ocurriendo en promedio un sismo de magnitud mayor a 7 grados Richter cada dos años y medio.

### 1.3.1 Sismicidad de México

De este modo los sismos de origen tectónicos son generados por el desplazamiento relativo entre las diferentes placas, el cual no es uniforme sino a través de acomodamientos periódicos, dando lugar a los sismos. De acuerdo con las investigaciones realizadas principalmente durante este siglo, la masa de la tierra está constituida o estratificada por tres capas principales y concéntricas: la corteza terrestre, el manto y el núcleo. La primera constituye la parte más superficial del planeta y su espesor es relativamente delgado con relación al radio de la tierra. Podría compararse al cascarón de un huevo, siendo una capa sumamente compacta y dura. Esta capa, que abarca tanto los continentes como el fondo de los océanos, no está formada de una sola pieza, sino por varias placas independientes entre sí, conocidas como placas tectónicas. Bajo la corteza se encuentra lo que se conoce como el manto, constituido principalmente por material rocoso en estado de semiflujo.

En estas zonas donde el espesor de la litosfera es menor, en general en el fondo de los océanos, fluye hacia arriba y a través de las discontinuidades entre las placas, el magma que se encuentra a presión y en estado líquido baja a la litosfera. De esta manera, el nuevo material que sale del interior del planeta desplaza lentamente al material de la placa que anteriormente ocupaba este espacio, teniéndose forzosamente que destruir, por otro lado una parte de la placa que ha salido por la superficie ha creado un movimiento. Esto ocasiona que una placa se desplace sobre otra, o bien, que una placa se meta debajo de otra; a este último caso se le conoce como subducción [5].

El territorio mexicano (incluyendo sus aéreas marítimas) se encuentra sobre cinco placas tectónicas, la norteamericana, del Pacífico, de Cocos, del Caribe y la placa de Rivera. Sobre esta última existe una polémica abierta entre los especialistas en considerarla como placa o como falla geológica, sin embargo, juega un papel central en la evolución dinámica del Pacífico.

La placa de Cocos, que se extiende desde la costa de Colima hasta Centro América, en el Océano Pacífico, y hacia el sur hasta la isla de Cocos muy cerca del ecuador, se mete debajo de la placa continental (o subduce a la placa continental). Dicha placa se desplaza con una velocidad promedio de 6 a 7 centímetros por año, el cual no se realiza de manera continua, sino mediante movimientos periódicos o brinco, dando origen a los fuertes temblores donde se libera la enorme energía acumulada durante años entre las placas.

La placa de Cocos no es la única responsable de los sismos que afectan al territorio mexicano; al norte la falla de San Andrés es generada por el desplazamiento lateral entre la placa del Pacífico y la Norteamericana. En la costa de Jalisco la placa de Rivera, que

también presenta un fenómeno de subducción con la placa continental, es causa importante de sismos en esa región del país. Por otro lado, el sureste de Chiapas, junto con Guatemala, Honduras y Nicaragua, comenzaron a separarse de las actuales costas del sur de México hace unos 300 millones de años y continúan su movimiento hacia el Caribe. Sin embargo, para la capital de la República Mexicana los sismos de mayor riesgo son los generados por la placa de Cocos en las costas de Michoacán, Guerrero y Oaxaca.

### 1.3.2 Las ondas sísmicas

#### Definición

Las ondas sísmicas (u ondas elásticas) son la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que generan pequeños movimientos en un medio. Las ondas sísmicas pueden ser generadas por movimientos telúricos naturales, los más grandes de los cuales pueden causar daños en zonas donde hay asentamientos urbanos. Existe toda una rama de la sismología que se encarga del estudio de este tipo de fenómenos físicos. Las ondas sísmicas pueden ser generadas también artificialmente (en general por explosiones). La sísmica es la rama de la sismología que estudia estas ondas artificiales para por ejemplo la exploración del petróleo.

### 1.3.3 Tipos de ondas

#### a) Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo viajan a través del interior de la Tierra. Siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra. Este efecto es similar al de refracción de ondas de luz. Las ondas de cuerpo transmiten los temblores preliminares de un terremoto pero poseen poco poder destructivo. Las ondas de cuerpo son divididas en dos grupos: ondas primarias (P) y secundarias (S).

#### 1. Ondas P

Las ondas P son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. Velocidades típicas son 330m/s en el aire, 1450m/s en el agua y cerca de 5000m/s en el granito.

#### 2. Ondas S

Las ondas S son ondas transversales o de corte, lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es

alrededor de 58% la de una onda P para cualquier material sólido. Usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la P y se siente más fuerte que ésta. Por ejemplo en el núcleo externo, que es un medio líquido, no permite el paso de las ondas S. Las ondas S hacen vibrar una partícula en sentido perpendicular a la trayectoria de las ondas, produciendo esfuerzos de corte en el medio sólido en que se propaga.

b) Ondas superficiales

Las ondas superficiales son análogas a las ondas de agua y viajan sobre la superficie de la Tierra. Se desplazan a menor velocidad que las ondas de cuerpo. Debido a su baja frecuencia provocan resonancia en edificios con mayor facilidad que las ondas de cuerpo y son por ende las ondas sísmicas más destructivas. Existen dos tipos de ondas superficiales: ondas Rayleigh y ondas Love. [4]

El algoritmo diseñado en el CIRES, evalúa el comportamiento de las ondas P y S, por ser estas últimas las que causan más daño a las construcciones, de este modo se tiene un algoritmo diseñado en base al archivo histórico de sismos ocurridos en distintas regiones del estado, donde se adecua el tipo de algoritmo, este puede ser de foco somero o foco profundo.

### 1.3.4 Riesgo Sísmico en México

Buena parte de la República Mexicana es intensamente sísmica. En ella se encuentran grandes ciudades de gran importancia como las de México, Guadalajara, Monterrey, el puerto de Acapulco y multitud de poblaciones menores. Por el incremento en la población y en las inversiones, serán cada vez más devastadores los movimientos sísmicos a menos que tomemos providencias para impedirlo. [6]

Hasta el momento, no es posible pronosticar con seguridad cuando y donde se producirá un sismo. No hay reglas que puedan eliminar todos los peligros de un movimiento sísmico, si bien es cierto que las pérdidas sólo pueden reducirse de forma importante mediante códigos de edificación adecuados, disposición de zonificaciones y enérgicos programas comunales destinados a intensificar la preparación en caso de desastre.

El Distrito Federal es una de las ciudades más grandes del mundo, donde el principal problema ha sido la concentración humana desmesurada y el comportamiento inestable del suelo en caso de sismos. Para ello se ha tenido que normar su crecimiento, proteger los inmuebles donde se desenvuelven sus habitantes y encargar a la ética y honestidad de ciertos profesionales, que vigilen y hagan cumplir las leyes y reglamentos que la rigen, creando una figura que se responsabilice de las construcciones.

Al cumplirse el vigésimo quinto aniversario de los terremotos de 1985, la Ciudad de México tiene la posibilidad de usar una señal de alerta sísmica si ocurre un terremoto fuerte en la costa del Guerrero. El Sistema de Alerta Sísmica (SAS) está en operación desde agosto de 1991 [7]. Y el pasado 5 de mayo de 2011 generó una señal de alerta pública que alertó oportunamente a la población de la Ciudad de México y Área Conurbada, con 55 segundos de anticipación, es por esto que se está trabajando en la actualización y expansión de la red de Alerta Sísmica Mexicana SASMEX.

#### 1.4 Motivación

La República Mexicana al encontrarse dentro de una zona altamente sísmica requiere contar imperantemente con un sistema de pronta detección de movimientos sísmicos; un sistema de tales características ayudará a mitigar los efectos negativos producidos por esta actividad sísmica en las grandes ciudades de la República Mexicana.

La motivación del presente trabajo radica en promover una fuente energética alternativa confiable y segura para las estaciones sensoras del Sistema de Alerta Sísmica. El esfuerzo de este trabajo está inspirado en el ánimo y entusiasmo de todos los que colaboramos día a día con el perfeccionamiento del sistema y que siempre está enfocado en el progreso de la ingeniería mexicana. Además de que el Sistema de Alerta Sísmica siga cumpliendo su función dentro de la sociedad de México y que sea un ejemplo para otros países, como en el caso de Chile, donde el haber contado con un Sistema similar al que tenemos en nuestro país, habría permitido advertir con un tiempo de anticipación a la población y posiblemente las pérdidas humanas se hubieran reducido significativamente. Por eso es primordial mantener en operación, expansión y actualización un Sistema de estas características.

Otra motivación es poder colaborar en la modernización y expansión del Sistema que cuenta con reconocimiento internacional, y que promueve la participación de nuevos profesionistas tomando parte activa en el proceso de mejora del Centro. La mejor motivación es saber que el trabajo desarrollado involucra a más de una sola institución, y al reconocimiento de la población civil cuando se acude a monitorear o dar mantenimiento a los equipos receptores, esto sin lugar a dudas alienta a seguir trabajando con mayor motivación y esmero.

Así, en el presente trabajo de tesis se promueve una nueva forma de suplir las demandas energéticas proporcionando además seguridad y confianza en la población civil.

#### 1.5 Hipótesis.

Ante la inminente amenaza de los movimientos sísmicos es inamisible no contar con un Sistema de Alerta Sísmica que de aviso oportuno para los efectos de prevención. Para garantizar un funcionamiento adecuado y eficaz es necesario desarrollar un sistema de alimentación, capaz de poder adecuarse a las necesidades y demandas energéticas que el

Sistema demande durante su expansión y/o actualización, pero sobre todo su operación día a día. Por otro lado las celdas de combustible han mostrado ser una fuente de energía, que garantiza continuidad del flujo eléctrico, manteniendo la seguridad y confiabilidad en la carga suministrada. Así mismo, esta tecnología ayudará a tener un sistema que dependa en menor medida de mantenimientos preventivos y correctivos, convirtiéndolo en un sistema libre de fallas energéticas. La topología del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, demanda especial dedicación a las estaciones repetidoras, que se encuentran ubicadas en zonas de difícil acceso, donde las condiciones climatológicas han impactado negativamente en el sistema de alimentación actual. La celda de combustible no sufrirá efectos por dichas condiciones climatológicas y puedan ofrecer una vida útil mucho mayor en comparación con el sistema energético que se utiliza actualmente.

Por otro lado esta tecnología también ayudaría a disminuir la contaminación del medio ambiente y promover la utilización de fuentes alternas no convencionales de energía.

### 1.6 Objetivos.

El objetivo principal del presente trabajo es mejorar el suministro energético de las estaciones del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, lo cual a su vez puede ayudar a mitigar el potencial riesgo generado por un movimiento sísmico. Se plantea utilizar a las celdas de combustible como respuesta al requerimiento energético del sistema, de esta manera otro de los objetivos es el realizar pruebas y simulaciones para validar la implementación de esta tecnología, la cual ha mostrado que puede ser un sistema con mínimo mantenimiento, inteligente y redundante que opere de forma confiable. Un objetivo inherente al trabajo desarrollado es trabajar en bien de la sociedad mexicana con el objetivo de contribuir con la cultura de prevención.

Además se pretende analizar cual será el mejor tipo de celda de combustible para su aplicación en un sistema aislado, así como encontrar la mejor forma de generar o transportar el combustible que estas celdas utilicen. Otra tarea es evaluar la aplicación de las celdas de combustible en las estaciones centrales como respaldo. Igualmente se pretende estudiar y valorar el aprovechamiento de las fuentes de generación alternas que se tienen en campo para complementar el suministro energético actual.

Finalmente otro objetivo es participar en algún foro o congreso donde se pueda presentar el trabajo desarrollado en la presente tesis, y que sirva de base para trabajos futuros donde se utilicen las celdas de combustible de respaldo en sistemas aislados.

### 1.7 Contenido.

A lo largo de los cinco capítulos del presente trabajo, se describe las tecnologías de celdas de combustible, su selección y su implementación para el suministro energético de la



estación sensoras y repetidoras de campo en el Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, de la siguiente forma:

En el **Capítulo I** se presentan algunos conceptos que son útiles para una mejor comprensión de la importancia del desarrollo de proyectos como el Sistema de Alerta Sísmica. Se da la motivación, objetivos e hipótesis del presente trabajo, así como el contenido de este documento.

**Capítulo II**, dentro de este capítulo se describe lo que es el Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca y las partes que lo componen destacando la estación sensora de campo y la estación repetidora, así como, su operación, características energéticas e importancia del SASO.

En el **Capítulo III**, se definen las diferentes formas de poder brindar el suministro energético requerido por la estación sensora de campo, determinando las celdas de combustible como la opción más viable.

El **Capítulo IV** describe los diferentes tipos de celdas de combustible y su factibilidad con los requerimientos para su utilización en campo. Se justifica porque la celda tipo PEMFC es la que se adecua mejor con las características del Sistema.

En el **Capítulo V**, se realizan las simulaciones, tanto de la estación sensora de campo, como a la estación repetidora, con los requerimientos energéticos de operación en período típica y en período atípico, utilizando como fuente de alimentación una celda de combustible de hidrogeno tipo PEMFC.

Finalmente en el **Capítulo VI** se presentan las conclusiones generales y propuestas de trabajo futuro, de proyecto desarrollado.

Referencias:

- [1] “A *Diez Años del Sismo de 1985*”, Revista Ingeniería Civil, Numero 317, Colegio de Ingenieros Civiles A.C., México 1995.
- [2] Sistema De Alerta Sísmica De La Ciudad De México [http://www.cires.org.mx/sas\\_es.php](http://www.cires.org.mx/sas_es.php), Página visitada 10 de enero de 2011
- [3] “*Para aprender de los sismos de septiembre de 1985 en México*”. Informe técnico preparado por comités conjuntos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México) y el National Research Council (EUA), ene. 1986, (O. Gelman, coautor).
- [4] Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C. Página visitada 13 de marzo de 2010. <http://www.smis.org.mx/htm/sm5.htm>
- [5] Luis Esteva y Mario Ordaz. “*Riesgo Sísmico y Espectros de Diseño*”, revista Ingeniería Sísmica, Número 310, México 2001.
- [6] Carlos J. Mendoza E. “*Investigación en Ingeniería Sísmica*”, Colegio de Ingenieros Civiles A.C., México D.F. 1995.

- [7] J. M. Espinosa “*Sistema de Alerta Sísmica Para la Ciudad de México*”, Manual operativo, CIRES, A.C. México D.F. 2009.

CAPITULO 2.

REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS DE LA ESTACIÓN SENSORA DE CAMPO

2.1 Introducción.

El Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca (SASO) tiene 36 estaciones sensoras de campo; algunas de las cuales están distribuidas en la costa con una separación de entre 25 y 40 km, debido a que la profundidad de los focos sísmicos de subducción en esta región son de 35 km en promedio; y otras, espaciadas tierra adentro con base en los registros históricos de sismos mayores a 7 grados en la escala Richter, donde la profundidad de los focos sísmicos por falla normal puede estar a más de 80 km [1]. La figura 2.1 muestra la topología del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, con la localización de las 36 estaciones de campo, 11 repetidores y 1 estación central.

Figura 2.1. Mapa del estado de Oaxaca que muestra la localización de las estaciones de campo ESDECAS, estaciones repetidoras ESREPES, la estación central ESCERE del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca.



El radio y el umbral de disparo inicial de alerta sísmica de cada estación sensora de campo se calibran después de estudiar acelerogramas sísmicos representativos de las regiones sísmogénicas propuestas, se activa en el momento en que se genera un movimiento que supera el umbral de disparo y además en las estaciones de campo se tiene un tiempo de pre-evento y otro de post-evento, el cual es de 24 y 16 segundos respectivamente, que permite almacenar el registro del movimiento ocurrido.

La distribución de las estaciones de campo pretende que al menos dos estaciones puedan reconocer y avisar oportunamente sobre el inicio de un sismo fuerte. Para que se genere una señal de alerta se debe de cumplir la condición de que al menos dos estaciones confirmen el movimiento con una magnitud mayor o igual a 5.5 grados. [1]

Tabla 2.1 Localización de las estaciones repetidoras del SASO.

<b>ESREPES SASO</b>				
<b>Núm.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
R1	JICALTEPEC	-98.04140	16.38920	675
R2	LA VIRGEN	-97.21643	16.23878	1195
R3	PUERTO ANGEL	-96.50059	15.66300	299
R4	CIENEGULLA	-96.40777	16.20080	2805
R5	SAN MIGUEL TENANGO	-95.59258	16.26727	1616
R6	CORRAL DE PIEDRA	-96.65390	17.17220	3301
R7	HUMO CHICO	-96.49972	17.56811	3190
R8	YUCUDAA	-97.41803	17.58640	2770
R9	EL VENADO	-97.94810	17.35860	2940
R10	TEQUIXTEPEC	-97.69290	18.04525	1855
R11	CUAJIMOLOYAS	-96.45681	17.11340	3181

En la tabla 2.1 se muestra la localización de las 11 estaciones repetidoras del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, las localizaciones fueron obtenidas en base a las coordenadas GPS, que se registraron en las salidas a campo en estas estaciones [1]. Se destaca que la altitud de varias estaciones repetidoras están por encima de los 2000 metros de altura, incluso superan los 3000 metros de altura, lo cual debe de ser un factor de profundo análisis, pues las estaciones repetidoras concentran la información de estaciones de la costa, y además por su difícil acceso es más tardado realizar trabajos de mantenimiento, además que por la función que deben de cumplir estas estaciones tienen que encontrarse operando correctamente y sin interrupciones.

## 2.2 La Estación Sensora de Campo

La estación sensora de campo, es un sistema dedicado a monitorear continuamente el movimiento del terreno donde se asienta, discriminando los movimientos sísmicos, por medio de un modelo matemático (algoritmo de detección), del ruido local.

Cada una de las estaciones sensoras transmite sus avisos por radio, en las bandas VHF o UHF ambas de frecuencia modulada, a la estación central. Las señales de radio llegan a ésta, a través de una serie de estaciones repetidoras que también cumplen la función de una estación de campo. La siguiente figura muestra las partes que componen el sistema de alerta.

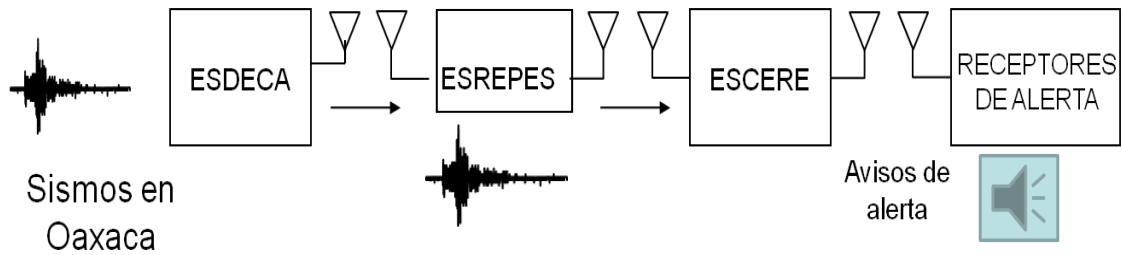


Figura 2.2 Tren de comunicaciones de sistema de alerta sísmica.

Como se observa en la figura 2.2 el sistema consta de cuatro partes fundamentales las cuales son, la estación sensora de campo, estación repetidora (ESREPE), la estación central (ESCERE) y los receptores de alerta. La función de la estación de campo es la de monitorear y censar un evento cercano a ella [2], la ubicación de cada una de ellas va en función del estudio histórico de eventos registrados, se realizan estudios de suelo y se dictamina que se ubiquen en los lugares más propicios para los fines del sistema. La estación consta de una obra civil en la que se tiene una torre del tipo anclada que puede variar desde los 30 metros hasta los 40 metros de altura.

La estación sensora se compone de dos partes primordiales, la primera es el equipo sismo detector y la segunda es el equipo de radiocomunicaciones, que para identificarlos y hacer una mejor referencia se denominarán como equipo de radio frecuencia a la parte de comunicación y equipo de medición y procesamiento a la parte del equipo sensor.

Los requerimientos eléctricos de cada una de las partes son distintos uno del otro, cada una de las partes cuenta con una batería o un arreglo de baterías en paralelo junto con un panel solar, que alimentan de forma independiente al equipo de medición y procesamiento y al equipo de radio comunicaciones. En la figura 2.3 se muestra el aspecto general de una estación sensora de campo típica.



## PARTES PRINCIPALES DE UNA ESDECA TÍPICA



Figura 2.3. Aspecto general de una ESDECA típica

### 2.2.1 El equipo de radiocomunicaciones

Consta de un radio que transmite datos en FM, montado en la torre de mayor altura y alimentado con un panel independiente de energía solar. El Módulo de Comunicaciones está interconectado con el Módulo de Medición y Procesamiento vía fibra óptica, para minimizar las posibles pérdidas en el proceso de envío de datos [2]. Este sistema está embebido en un gabinete metálico que protege al equipo de las inclemencias atmosféricas. Por otra parte en el equipo de comunicaciones se encuentra una tarjeta moduladora o transmisora, que la mayor parte del tiempo se encuentra en modo de espera (stanby), por lo que el consumo de energía es bajo, sin embargo al momento de transmitir un dato el requerimiento de energía se incrementa dado que se transmite con una potencia más alta (25 W), por lo que en el momento del envío del dato el consumo aumenta y tiende a bajar el voltaje de nuestra batería. En el momento en el que el voltaje de la batería baja a niveles menores a 12.4 Volts, se envía un mensaje de batería baja a la central y de no recuperar los niveles óptimos de operación se tiene que acudir al sitio para realizar cambio de batería.

Por trabajo de campo se ha demostrado que en un 90% de este tipo de casos, las baterías no son capaces de recobrar un nivel de voltaje óptimo que permita la correcta operación del equipo de comunicaciones.

### 2.2.2 Equipo de medición y procesamiento.

En la parte del módulo de medición y procesamiento se cuenta con una tarjeta de adquisición de datos llamada registro acelerométrico digital RAD, una tarjeta acopladora (filtro) y una triada de sensores [3]. Este módulo está embebido en una caja metálica, anclada sobre una base de concreto reforzado, para resguardar el equipo sensor de las condiciones ambientales y de posible vandalismo. En la torre menor se encuentra soportado el panel solar, que suministra energía eléctrica a este módulo.

Como es de esperarse el consumo energético en esta parte de la estación, es mayor al consumo requerido por la parte de comunicaciones. Esta parte de la estación siempre se debe de mantener en operación, pues es la parte medular para que se detecte y de aviso de enviar una transmisión de alerta. La figura 2.4 muestra las partes que componen al módulo de equipo sensor.

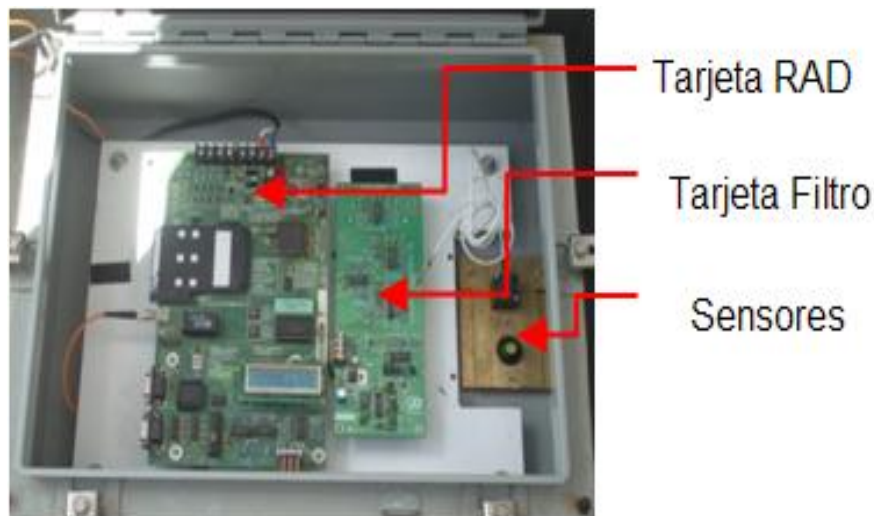


Figura 2.4. Aspecto del equipo de medición y procesamiento de la estación de campo.

### 2.2.3 Pruebas de la tarjeta de adquisición de datos RAD1216-001

- Pruebas Eléctricas:

Antes de instalar cualquier equipo en campo, se realiza una serie de pruebas que garanticen la debida operación, estas pruebas se realizan en el laboratorio tratando de semejar las condiciones que se tienen en campo. Se miden los voltajes con los cuales opera la tarjeta y se comparan con valores estándares de operación antes de ser instalas en campo para realizar una bitácora de operación de cada equipo que se tiene instalado en campo, como se observa en la tabla 2.1 los valores característicos de cada tarjeta de adquisición de datos, en

algunos casos puede existir alguna variación debido a que no todos los componentes tienen los mismos valores y hay que recordar que aunque se utilizan componentes de precisión existen valores de tolerancia permitida que puede hacer que se presenten algunas variaciones mínimas en la toma de los parámetros eléctricos de operación de cada tarjeta.

Tabla 2.2. Voltajes de Operación de la tarjeta de adquisición de datos RAD

Variable	Valor medido (S.S)	Valor medido (C.S)	Valor Estándar	Unidad	FUNCIONAMIENTO
$V_{BAT}$	12.65	12.64	$12 < V < 13$	Volts	✓
$V_{CC}$	12.32	12.29	$V_{BAT} \pm 10 \%$	Volts	✓
$V_{DD}$	4.94	4.94	$5 \pm 10 \%$	Volts	✓
$V_{DA}$	5.02	5.02	$5 \pm 10 \%$	Volts	✓
$+V_A$	7.87	7.87	$V_A > 7.0$	Volts	✓
$-V_A$	-7.22	-6.91	$V_A < -6.0$	Volts	✓
$I_{CC}$ (F.S)	89.5	N.M.	$< 100$ S.S.	mA	✓
$I_{CC}$ E.S.	82.8	N.M	$< 95$ S.S.	mA	✓
$I_{CC}$ (E.C)	94	N.M.	$< 105$ S.S.	mA	✓

Donde:

$V_{BAT}$	=	Voltaje de la batería
$V_{CC}$	=	Voltaje en la tarjeta (medido después del fusible)
$V_{DD}$	=	Voltaje Digital de operación
$V_{DA}$	=	Voltaje analógico de operación
$+V_A$	=	Voltaje Analógico positivo de operación
$-V_A$	=	Voltaje Analógico negativo de operación
$I_{CC}$	=	Corriente de operación
F.S.	=	Fuera de Servicio
E.S.	=	En Servicio
E.C.	=	En Comunicación
S.S.	=	Sin Sensores
C.S.	=	Con Sensores (Sensores Servo Controlados Terra DCA330)
N.M.	=	No Medido
✓	=	O.K.
X	=	BAD

La tabla 2.2 corresponde a las pruebas de laboratorio realizadas a una tarjeta de adquisición de datos RAD1216 antes de ser instalada en alguna estación, la cual corresponde a la nueva versión de tarjetas desarrolladas, la cual tiene un consumo menor al de su antecesora. Los parámetros eléctricos medidos corresponden a una tarjeta en buen estado y con valores eléctricos correctos. Lo que arrojan estas pruebas es el consumo en operación de la tarjeta de adquisición de datos en conjunto con el sensor, los parámetros eléctricos medidos no deben variar y prevalecer constantes. Cuando la tarjeta es instalada en campo es necesario



medir los parámetros eléctricos para garantizar el correcto funcionamiento de ésta. Por eso es importante siempre tener un voltaje de alimentación que haga operar a la tarjeta y sensor sin fallas.

### 2.3 Operación de la Estación Sensora de Campo.

Una ESDECA como se menciona anteriormente está formada por tres módulos los cuales se definen a detalle:

- a. Sensor. Que consiste en tres elementos transductores que convierten las ondas de movimiento en señales de voltaje. Por lo general son acelerómetros que están dispuestos de manera ortogonal entre sí para sensar movimientos en tres direcciones: Transversal, Longitudinal y Vertical.
- b. Medición y Procesamiento. Sistema electrónico y de cómputo que tiene las funciones de: Detección, Medición, Procesamiento y Control. Por lo general este módulo se encuentra en el mismo lugar junto al Sensor.
- c. Radiocomunicación Transmisor. Cuya función es, la transmisión de parámetros sísmicos y variables del estado físico que genera la estación.

#### A) Sensor

Es un acelerómetro de tipo triaxial el cual consiste de una masa conocida pegada a un elemento piezoeléctrico. A medida que el acelerómetro se mueve, la masa aplica fuerza al cristal generando una carga [2]. Al leer esta carga se puede determinar la aceleración. Los acelerómetros son direccionales, esto quiere decir que sólo miden en un eje. Es por ello que se requieren 3 transductores dispuestos ortogonalmente entre sí, dos de ellos horizontales y uno vertical.

Existen acelerógrafos de dos tipos, pasivos y activos. Los acelerógrafos pasivos envían la carga generada por el elemento piezoeléctrico. Ya que la señal es muy pequeña, los acelerógrafos pasivos requieren un amplificador para la señal. Los acelerógrafos activos incluyen circuitería interna para convertir la carga del acelerógrafo a una señal de voltaje, pero requieren de una fuente constante de corriente para alimentar el circuito.

Los sensores utilizados en el Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca eran del tipo capacitivos los cuales están siendo reemplazados por sensores del tipo Micro Sistemas Electromecánicos (MEMS) [4], debido a que han presentado mejores características de operación en campo, los cuales reducen considerablemente los niveles de ruido ambiental, lo que permite contar con registros que sean más fáciles de analizar y de discriminar el ruido. La siguiente imagen muestra la disposición de los canales de monitoreo de los sensores tipo Micro Sistemas Electromecánicos.

Vista de los Ejes de Monitoreo del Sensor MEMS

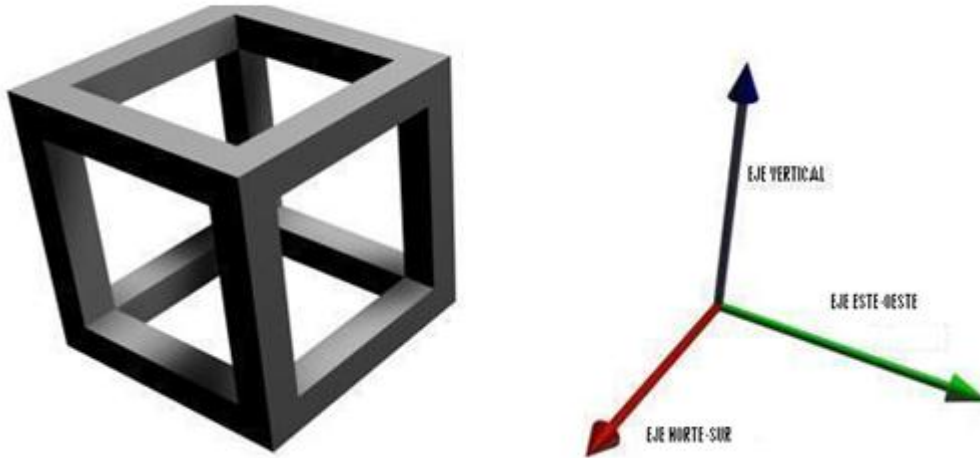


Figura 2.5. Aspecto de los ejes de monitoreo del sensor

### B) Medición y Procesamiento

Básicamente se encuentra en una tarjeta electrónica y está dividida en los siguientes bloques: Acoplamiento secuencial, Conversor Analógico-Digital, Unidad de Procesamiento y Control, Memoria, Interfaz de comunicaciones Rx/Tx. Fuente de alimentación, Display, Fibra óptica y Reloj de tiempo real. Es en este elemento donde se realizan las tareas de reconocimiento, cálculo de parámetros, inicio de envío de datos, comunicación y supervisión [4].

### C) Radiocomunicación Transmisor

Se encuentra en las torres que forman parte de la estación sensora y esta se conecta al modulo de medición y procesamiento por medio de fibra óptica. Este elemento transmite datos que fueron proporcionados por el procesador. Está dividida en los siguientes módulos: Alimentación, Fibra óptica, Modulador–Demodulador, Controlador, Interfaz de comunicaciones Rx/Tx. [2].

En la figura 2.6 se muestra el diagrama de bloques de una estación sensora de campo.

**DIAGRAMA A BLOQUES DE LA ESDECA**

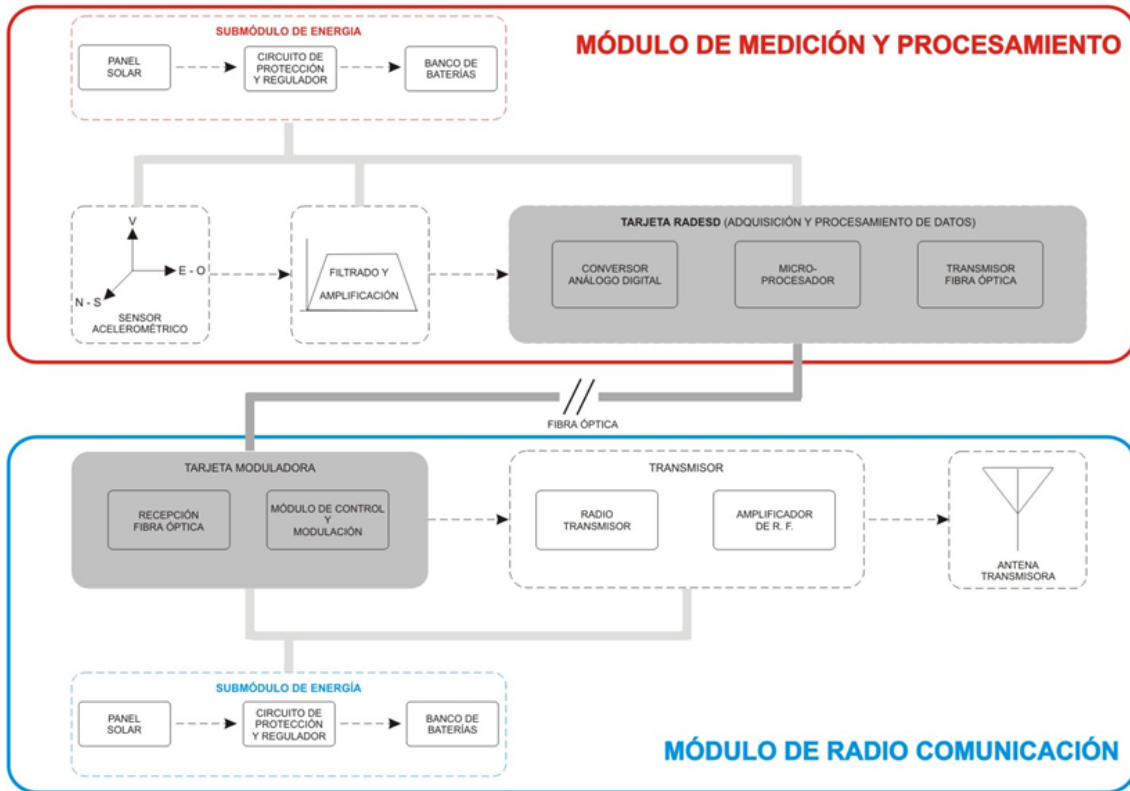


Figura 2.6. Aspectos del diagrama de operación de la estación de campo

Es importante realizar pruebas en el laboratorio de las partes electrónicas que componen a la estación, en dichas pruebas se puede caracterizar el tipo de requerimiento eléctrico, además algunas partes tanto del módulo de medición y procesamiento y de comunicaciones cuentan con elementos que por diseños del fabricante dan sus propias especificaciones eléctricas, como los radios transmisores y los sensores tipo MEMS, es por ello que al realizar el diseño de una estación de campo, se intenta lograr el mínimo consumo eléctrico para no adicionar una carga más grande.

Conocer y evaluar dichos consumos ha permitido estimar que con un sistema fotovoltaico se podría mantener alimentado el sistema, pero si se tratara de aumentar la carga en función de las nuevas tecnologías disponibles, se necesitaría un sistema adicional que pudiera hacer frente a dicha demanda. Para conocer el consumo energético de los equipos se realizan pruebas en las cuales se miden todos los parámetros eléctricos, se documentan y validan, y son puestos a pruebas en el laboratorio para después ser instalados en campo, donde realmente se requiere que sus parámetros eléctricos sean constantes y precisos.

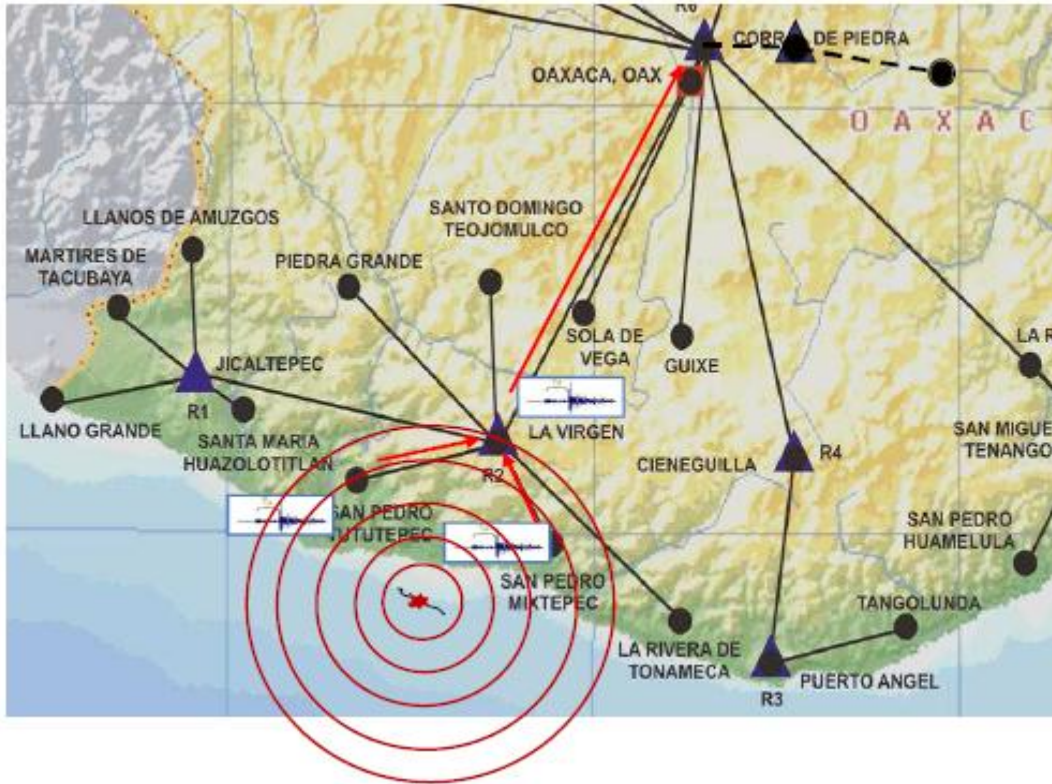


Figura 2.7. Aspecto del funcionamiento del sistema, ante la ocurrencia de un sismo con magnitud mayor a 5.5 grados.

Como se observa en la figura 2.7, la temprana detección de un movimiento sísmico es fundamental para poder alertar con un mayor tiempo a la Ciudad de Oaxaca, en el caso que se muestra en la figura si alguna estación cercana al lugar donde se genera el sismo no se encuentra operando, resta tiempo a la alerta sísmica pues hasta que las ondas avancen y otra estación detecte y confirme el sismo se enviará una señal de alerta. Hay que recordar que para que se emita una alerta se necesita que al menos dos estaciones de campo detecten dicho movimiento sísmico, en la figura se muestra que la estación San Pedro Tututepec y San Pedro Mixtepec [5], registraron dicho movimiento y enviaron la señal de alerta a la estación repetidora La Virgen, la cual envía la alerta a la central localizada en la Ciudad de Oaxaca y aquí es reenviada al aire para alertar a la población civil. El factor a considerar más importante es el tiempo con el que cual se pueda alertar por ello se requiere que todo el sistema se encuentre operando correctamente, pues para el caso de estudio que es el estado de Oaxaca los epicentros muchas veces se encuentran muy cercanos a la Ciudad y se requiere de monitoreo y constante operación de la estación para minimizar al máximo los potenciales daños que pudiera sufrir la Ciudad.

Esto es una clara muestra de porqué es tan importante que el sistema se encuentre operando correctamente y con niveles de alimentación necesarios para poder cubrir al ciento por ciento, primero el detectar el movimiento y después el enviar una señal de alerta.

## 2.4 La Estación Repetidora

En la figura 2.8 se ilustra el diagrama de bloques de la estación repetidora, se destaca que por contar con más elementos el consumo energético se incrementa en la etapa Tx es el mismo que en la tarjeta transmisora de una estación típica, pero adicionalmente la tarjeta repetidora en la etapa Rx cuenta con más elementos, que se suman a la etapa de radiocomunicación. La función de la estación repetidora de campo (ESREPE) es la de retransmitir los mensajes provenientes de las estaciones sensoras típicas o de otra estación repetidora hacia la estación central de registro (ESCERE).

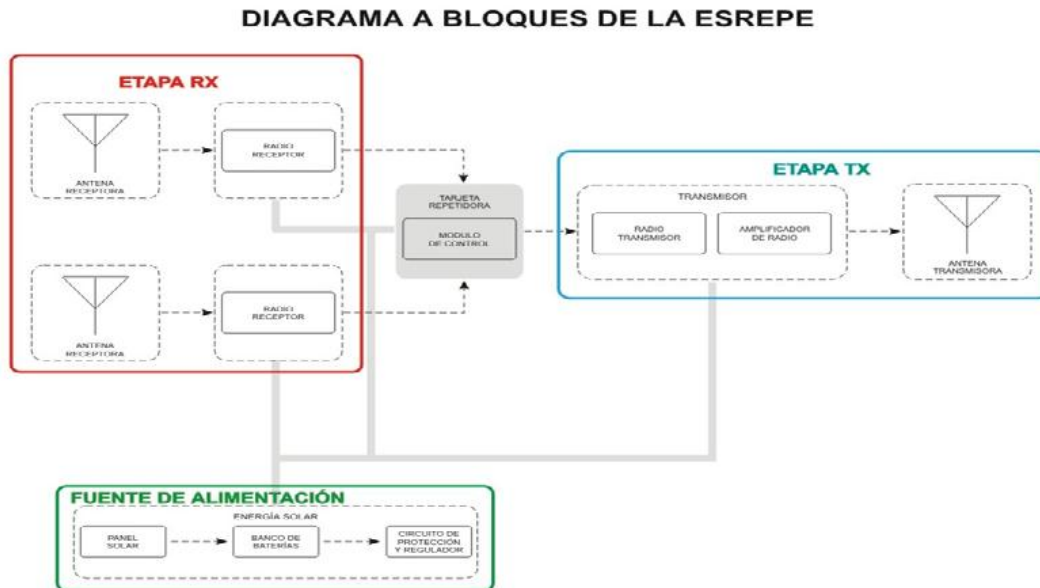


Figura 2.8. Aspectos del diagrama de operación de la estación repetidora.

### 2.4.1 Elementos de la Estación Repetidora

La estación repetidora en la etapa Tx es similar a una estación típica, pues cuenta con un transmisor, que opera si en el sitio donde esté instalada se presenta un movimiento sísmico se utiliza el transmisor de la estación repetidora para transmitir el dato y así cumple con dos funciones, cuenta con el equipo sensor para en caso de registrar un movimiento transmitir, pero además su función también es recibir información de otras estaciones de campo y otras estaciones repetidoras. Posee cuatro canales para la recepción de datos que a diferencia del transmisor de la estación típica es de sólo uno. Está dividido en los siguientes módulos: Alimentación, Demodulador, Interfaz de comunicaciones Rx/Tx, Fibra óptica, Microcontrolador Maestro, Microcontrolador, un convertidor RS-232 y un reloj de tiempo real [3].

Las imágenes que a continuación se muestran son de una estación repetidora, como se menciono sólo se agrega una tarjeta repetidora a la estación típica, que se coloca en un gabinete que protege al equipo de radiocomunicaciones, adicionalmente se coloca otro



panel solar en paralelo pues la carga a alimentar aumenta en comparación al de la estación típica, y que es independiente a la alimentación del módulo de radiocomunicaciones típico. Además una diferencia a destacar es la altura que llegan a tener este tipo de estaciones, las alturas van desde los 35 metros hasta los 60 metros de altura.



Figura 2.9 Aspecto de la torre donde instala en equipo de comunicaciones. Se observan 2 paneles solares y antenas de radiocomunicación.

### ESTACIÓN REPETIDORA DE CAMPO

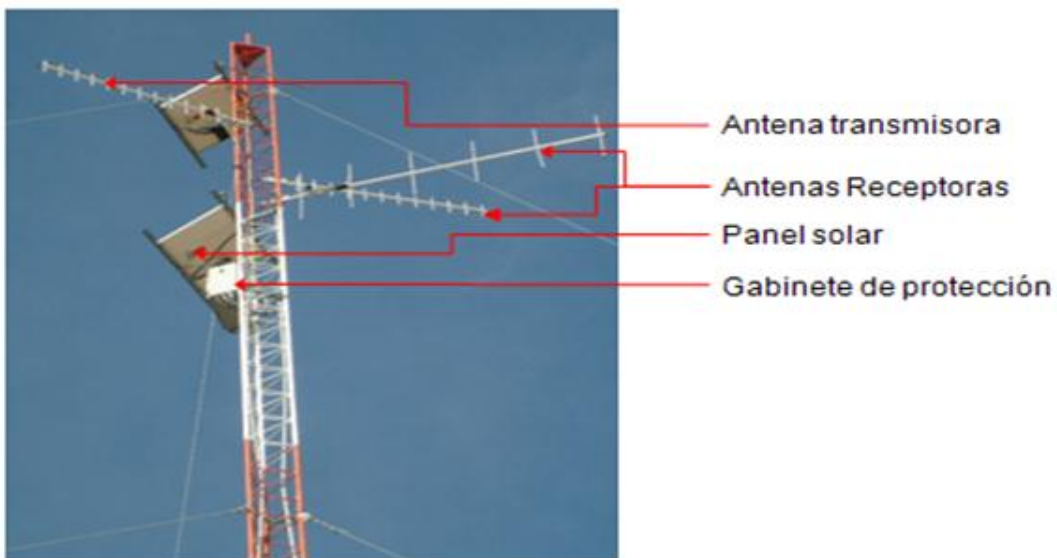


Figura 2.10 Descripción de las partes que componen la estación repetidora.

## ESTACIÓN REPETIDORA DE CAMPO

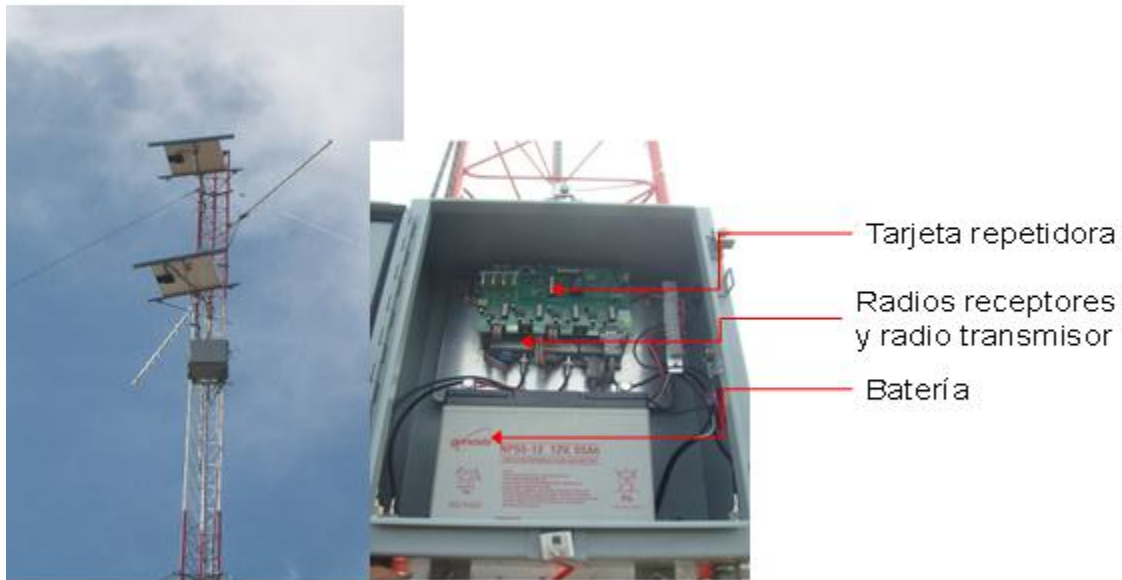


Figura 2.11 Equipo de comunicaciones de la estación repetidora dentro del gabinete de protección.

La estación repetidora al igual que las estaciones de campo típicas, deben enviar un mensaje de presencia, en el cual se envían datos característicos del equipo. O sea que los repetidores requieren un consumo mayor, pues además de enviar los datos particulares deben de reenviar la información procedente de otras estaciones de campo. Todas las estaciones de campo, repetidoras y no repetidoras están programadas para enviar 2 mensajes de presencia al día. Lo que significa que si por un repetidor pasa la información proveniente de 5 estaciones de campo, deberá de mandar 12 mensajes de presencia en un día completo. Por lo que el consumo se eleva en comparación con una estación de campo típica, esto es motivo suficiente para la implementación de un sistema alternativo que pueda ayudar a mantener alimentada la carga de manera constante.

### 2.5 Requerimientos Energéticos de la Estación Sensora de Campo.

Por las características nominales de la electrónica utilizada en el diseño de ambos módulos, el consumo energético es considerablemente bajo, estando muy por debajo del orden de 2W/hora. A partir del año 2009 se inició la actualización del diseño que hasta entonces se venía utilizando en una estación de campo, con base en los nuevos diseños y mejoras realizadas en el centro se logró reducir aún más el consumo de energía eléctrica, sin embargo eso limita en ocasiones el uso de nuevas tecnologías en el procesamiento y adquisición de datos que permitirían procesar y transmitir los datos a una velocidad más rápida. Es necesario mencionar que de acuerdo a las necesidades requeridas por las

estaciones de campo se llevó a cabo la actualización de los diseños, sin embargo no se contempló una mejora en el suministro de la energía eléctrica requerida por la estación; debido en parte a esto y en otra a las fallas comunes que ocurren en campo, se plantea la propuesta de la utilización de las celdas de combustible para suministrar el requerimiento energético en la estación de campo. De acuerdo a las pruebas realizadas en laboratorio de las tarjetas se obtuvieron los resultados que nos dan la pauta para medir el consumo energético requerido por las nuevas tarjetas. El cual se encuentra aproximadamente en la parte de comunicaciones con un consumo de 12 V y 110 mA en stand by, mientras que en operación 12 V y 130 mA, con una tolerancia de  $\pm 5\%$ .

En la parte del sensor se requiere de 12 V y 200 mA aquí cabe recordar que siempre se debe de encontrar en operación. Cuando se tiene una estación repetidora el consumo de energía es mayor, ya que adicionalmente del módulo de radiocomunicación y del equipo de medición y procesamiento, se incorpora un módulo de recepción con más elementos. Esta última parte también debe de mantenerse en operación, pues incorpora un contador interno de tiempo real, que siempre se debe de mantener en operación. Aunque se agrega este nuevo módulo el consumo energético no se eleva demasiado, pues con los nuevos diseños se requiere de una demanda energética considerablemente baja. Como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.3 Especificaciones Técnicas. Manual de operación ESREPE, CIRES A.C.

Especificaciones Técnicas			
Volta de alimentación:	5.5 Vmínimo	16V	máximo
Consumo:	Sin señal de subaudio		
	20mA mínimo	30mA típico	40mA máximo
	Con señal de subaudio		
	70mA mínimo	80mA típico	90mA máximo
Equipo:	130 mA típico	1.5A	máximo
Nivel de señal de salida de audio:		160mV	$\pm 5\%$
Nivel de salida de subaudio:		40mV	$\pm 5\%$

## 2.6 Soluciones Actuales.

En el centro se ha optado por la utilización de sistemas fotovoltaicos que puedan alimentar la carga demandada por la estación sensora de campo, sin embargo por defectos de las mismas y por el bajo rendimiento en la vida útil de las baterías, se propone la utilización de un nuevo sistema de alimentación que cubra de mejor forma con los requerimientos energéticos. En el capítulo siguiente se hace un análisis detallado de las tecnologías y formas en que se puede cubrir con el suministro de energía en una estación de campo.



Los desarrollos e innovaciones que el centro ha tenido en materia de detección y alertamiento de sismos han sido de gran trascendencia a niveles mundiales. Sin embargo una constante que no ha evolucionado es la forma en la que se suministra energía a las estaciones de campo, por lo que surge la necesidad de poder aprovechar las tecnologías actuales, poder mejorar el suministro energético en las estaciones sensoras, el cambio llevará tiempo, pero con este trabajo se pretende dar a conocer formas altamente efectivas para cumplir con dicha tarea. Un factor determinante para lograr un cambio tecnológico surge desde la necesidad de poder tener energía eléctrica confiable disponible, para aplicaciones que puedan demandar un mayor consumo en relación con la que se tiene actualmente. La utilización de nuevos y más sofisticados equipos de detección para que ayuden en la tarea de poder sensar movimientos que pudieran ser causa de potenciales desastres, es otra justificación para poder explorar formas alternas de generar y almacenar energía en sistemas aislados de forma constante y que sea una solución que cuente con nuevas tecnologías. Las soluciones actuales muestran un gran abanico de posibilidades, sin embargo por las características en los sitios y la infraestructura en las estaciones de campo se ponen en primer lugar las celdas de combustible acompañadas de energías renovables para ayudar con el mejoramiento energético del Sistema de Alerta Sísmica que en el capítulo siguiente se describen a detalle.

### Referencias

- [1] “*Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca*”, Protección Civil del Estado de Oaxaca. Oaxaca, Oaxaca 2004.
- [2] Manual de operación del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, Apéndice II, CIRES A.C. México D.F. 2004.
- [3] Manual técnico de Instalación SASMEX, Apéndice ESDECA y ESCERE, CIRES A.C. 2004.
- [4] Silicon Designs, Inc. Advanced Accelerometer Solutions. Triaxial Accelerometer Modules, Modelo 2420. Página visitada 10 de enero de 2011.  
<http://www.silicondesigns.com/>
- [5] Manual técnico del sistema RADESD-12/16. CIRES A.C. 2003. Coordinación de Diseño, CIRES A.C. 2003.
- [6] Informe trimestral del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca 2009. Coordinación de Comunicaciones, CIRES A.C.

## CAPITULO 3.

### TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA EN LA ESTACIÓN SENSORA DE CAMPO.

#### 3.1 Introducción.

El Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca, es una herramienta importante que nos permite anticipar el arribo de energía sísmica potencialmente dañina a la Ciudad de Oaxaca con unos segundos de anticipación, dependiendo de la zona donde se origine un sismo fuerte.

Debido a esta necesidad el sistema debe de encontrarse en correcta operación, y para ayudar a reducir las posibles fallas que lleguen a presentarse, en el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), se cuenta con una descripción del tipo de fallas que se han detectado en el ejercicio de trabajos de campo, las cuales son:

- A. Mala calibración de partes electrónicas
- B. Defecto de radio enlace
- C. Defecto de conservación de partes eléctricas
- D. Vandalismo
- E. Partes con defecto de calidad
- F. Fenómenos meteorológicos
- G. Envejecimiento

Las que están relacionadas directamente con el suministro de energía eléctrica en la estación sensora, son las fallas de tipo defecto de conservación, fenómenos meteorológicos, partes con defecto de calidad y envejecimiento. Siendo esta última la que se presenta con mayor frecuencia y la que provoca mayores consecuencias en el sistema de alerta debido al agotamiento de las baterías; es de vital importancia mantener siempre en buen estado la fuente de alimentación de energía eléctrica, ya que de esta depende la operación de la estación de campo.

Para tratar de mitigar este tipo de fallas se ha optado por instalar paneles solares, que aporten un respaldo a las baterías, con lo que se tiene un sistema fotovoltaico para cada una de las estaciones sensoras, como se describió en el capítulo pasado. En algunos casos se cuenta con dos paneles en paralelo para aumentar la corriente y así poder garantizar la alimentación de la carga por un periodo de tiempo mayor.

Sin embargo este tipo de sistemas no han resultado del todo favorable, en muchos de los casos no ha podido contribuir a cargar las baterías de forma adecuada cuando la batería

presenta bajo voltaje, pues en muchos de los sitios donde se encuentran las estaciones sensoras las condiciones climatológicas y meteorológicas no son las más favorables para este tipo de sistemas fotovoltaicos. Además de que cuando se involucran los paneles solares, se suman otros tipos de fallas, entre las que se destacan fallas por vandalismo; se ha detectado que en algunas estaciones sensoras han tratado de robarse los paneles solares de formas en las que afectan la integridad de la torre y del equipo de comunicaciones, debido a que se intentan derribar con rocas y palos. Aunado a este tipo de fallas también se llega a presentar la falla de tipo fenómeno meteorológico, pues se han presentados ráfagas de viento que han derribado paneles solares, heladas que han ocasionado incluso el derribamiento de la torre y días muy nublados ó con lluvia, esto último es muy frecuente en las estaciones donde se tienen alturas por encima de los 2500 metros sobre el nivel del mar.

Por las condiciones orográficas del estado de Oaxaca las estaciones repetidores se encuentran en los sitios más altos para poder garantizar el radio enlace con las estaciones de campo típicas, y es en estos sitios donde las condiciones ambientales son más extremas, pues se presentan ráfagas de viento que han derribado paneles solares de tamaño considerable, e incluso han derribado o dejado inoperable algunas torres.

Del análisis de los trabajos que se han realizado en campo ha surgido la necesidad de tener que buscar un sistema que suministre la energía eléctrica de forma constante e ininterrumpida, que se vea lo menos posible afectado por los fenómenos naturales que prevalecen en las zonas donde se desean instalar. Así mismo a partir de este análisis histórico de fallas en campo debido al suministro de energía eléctrica, se concluyó que esta falla es de carácter crítico cuando se presenta en una estación de tipo repetidor; por lo que se determinó que se debe de dar prioridad a las estaciones de tipo repetidor, pues además de ser primordiales en el funcionamiento del sistema, son estas estaciones las que presentan mayor vulnerabilidad debido a su localización a sufrir alguna de las fallas antes mencionadas.

La idea es contar con un sistema de suministro de energía eléctrica que sea más confiable y que dependa de menos vigilancia, incluso del tipo inteligente que nos permita controlar y evitar mantenimientos correctivos que son los más críticos y menos deseados, pues no es posible omitir ningún tipo de falla en el suministro eléctrico.

Con esa necesidad se evalúan a continuación algunas de las formas de poder responder a los requerimientos indispensables para el funcionamiento del sistema. Incluyendo una descripción de las formas actuales con las que se suministra la energía eléctrica en algunas estaciones sensoras de campo.

## 3.2 Sistemas Fotovoltaicos.

### Introducción a los Sistemas Fotovoltaicos.

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839 y las primeras celdas solares de selenio fueron desarrolladas en 1880. Sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se desarrollaron las celdas de silicio monocristalino que actualmente dominan la industria fotovoltaica. Las primeras celdas de este tipo tenían una eficiencia de conversión de solo 1%; ya para 1954 se había logrado incrementar la eficiencia al 6% en condiciones normales de operación, mientras en el laboratorio se lograron eficiencias cercanas a 15%. Las primeras aplicaciones prácticas se hicieron en satélites artificiales.

Aun cuando fueron desarrolladas en el contexto de los programas espaciales, ya para finales de la década de los setentas las celdas fotovoltaicas comenzaban a ser utilizadas en aplicaciones terrestres como en el suministro de pequeñas instalaciones (varios Watts de potencia) en sistemas de telecomunicación, televisión rural, y otras.

En la actualidad las instalaciones con capacidades de uno a diez kW están siendo más comunes alrededor del mundo para aplicaciones agroindustriales como el bombeo de agua, refrigeración, preservación de productos perecederos, o desalación de agua. En 1982 se construyó la primera planta fotovoltaica de potencia, con una capacidad de 1MW, en el estado de California en los Estados Unidos. Esta planta genera suficiente electricidad para satisfacer las necesidades de 300 a 400 casas-habitación en su zona de servicio. Tiempo, después en el mismo estado, se instaló otra planta fotovoltaica de potencia con una capacidad de 6.5 MW, que produce cerca de 14 millones de kWh al año, energía eléctrica suficiente para abastecer las necesidades de más de 2,300 casas típicas en el área.

Las celdas solares fotovoltaicas son dispositivos que convierten la luz solar directamente en electricidad, sin necesidad de equipos mecánicos. Las celdas solares están hechas de delgadas capas de material semiconductor, usualmente silicio, están unidas a contactos de metal para completar el circuito eléctrico, y encapsuladas en vidrio o plástico.

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

Por otra parte las celdas de película delgada, entre ellas el silicio amorfo, han alcanzado cierto grado de popularidad debido a su bajo costo, sin embargo su baja durabilidad, debido a la degradación, las sitúa por debajo de las celdas cristalinas.

La conversión directa de la parte visible del espectro solar es, quizá, la vía más ordenada y estética de todas las que existen para el aprovechamiento de la energía solar. Desafortunadamente esta tecnología no se ha desarrollado por completo en México. Si bien los módulos fotovoltaicos son relativamente simples, su fabricación requiere de tecnología sofisticada que solamente está disponible en algunos países como Estados Unidos, Alemania, Japón y España entre otros.

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

El Centro de Investigación en Energía y el Instituto de Física, ambas de la UNAM, han desarrollado cierta actividad, principalmente en la tecnología de películas delgadas, probando diferentes técnicas de deposición y analizando varios compuestos. A la fecha no han logrado obtener prototipos, motivo por el que se puede aseverar que el desarrollo fotovoltaico en México es realmente incipiente.

### 3.2.1 Descripción del Sistema Fotovoltaico.

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar directamente en energía eléctrica, acondicionando esta última a los requerimientos de una aplicación determinada. Consta principalmente de los siguientes elementos:

- 1) Arreglos de módulos de celdas solares.
- 2) Estructura y cimientos del arreglo.
- 3) Reguladores de voltaje y otros controles típicamente un controlador de carga de batería, un inversor de corriente cd/ca o un rectificador ca/cd.
- 4) Baterías de almacenamiento eléctrico y recinto para ellas.
- 5) Instrumentos.
- 6) Cables e interruptores.
- 7) Red eléctrica circundante.
- 8) Cercado de seguridad.

Un sistema fotovoltaico no siempre consta de la totalidad de los elementos arriba mencionados. Puede prescindir de uno o más de éstos, dependiendo del tipo y tamaño de las cargas a alimentar, el tiempo, hora y la naturaleza de los recursos energéticos disponibles en el lugar de instalación.

### 3.2.2 Funcionamiento del Sistema Fotovoltaico.

En un sistema típico, el proceso de funcionamiento es el siguiente: la luz solar incide sobre la superficie del arreglo fotovoltaico, donde es transformada en energía eléctrica de corriente directa por las celdas solares; esta energía es recogida y conducida hasta un controlador de carga, el cual tiene la función de enviar toda o parte de esta energía hasta el banco de baterías, en donde es almacenada, cuidando que no se excedan los límites de sobrecarga y sobredescarga; en algunos diseños, parte de esta energía es enviada directamente a las cargas.

La energía almacenada es utilizada para abastecer las cargas durante la noche o en días de baja insolación, o cuando el arreglo fotovoltaico es incapaz de satisfacer la demanda por sí solo. Si las cargas a alimentar son de corriente directa, esto puede hacerse directamente desde el arreglo fotovoltaico o desde la batería; si, en cambio, las cargas son de corriente alterna, la energía proveniente del arreglo y de las baterías, limitada por el controlador, es enviada a un inversor de corriente, el cual la convierte a corriente alterna. [1].

### 3.2.3 Energía Solar.

En 1975 el Instituto de Ingeniería de la UNAM generó la primera versión de los mapas de irradiación global diaria promedio mensual para México, utilizando datos de insolación de 54 estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Posteriormente, mediante la ampliación de la base de datos proporcionada por el SMN, se publicó la actualización de dichos mapas de irradiación. El modelo aplicado por el Dr. R. Almanza [2], investigador del Instituto de Ingeniería, tiene desviaciones menores del 10 por ciento y fue desarrollado en la India, situación que hizo más confiable su aplicación en México, ya que tanto la latitud, como los climas en ambos países son semejantes. Actualmente este modelo es el más consultado en México para estimar las cantidades totales de radiación diarias sobre superficies horizontales. [3]

Esta información puede permitir elaborar un mejor diagnóstico de los lugares donde sea viable implementar un sistema fotovoltaico.

Además en base al trabajo de campo se tienen referencias que pueden indicar el lugar de las zonas en las que no es funcional contar con un sistema fotovoltaico, pues las condiciones climatológicas no son las óptimas para obtener el mejor rendimiento de un sistema como el fotovoltaico. De estas observaciones surge la necesidad de poder contar con un suministro de energía alternativo al que se tiene actualmente, además de que se pueda contar con un



sistema que logre brindar mayor confiabilidad y autonomía al sistema, que permita reducir el número de fallas por un bajo nivel de voltaje y garantice la correcta operación del sistema de alerta sísmica.

La figura 3.1 muestra las condiciones climatológicas típicas en la época de invierno a verano, en la región de la montaña, donde se encuentra la estación repetidora Corral de Piedra, que en la tabla 2.2 del capítulo 2, se observa que es la estación repetidora con mayor altura de todo el sistema, con una altura de 3301 metros sobre el nivel del mar. En este repetidor se concentran los datos enviados de 5 estaciones entre ellas se encuentran también estaciones repetidoras, por lo cual la correcta operación de esta estación es indispensable para el sistema de alerta sísmica de Oaxaca. Como se puede observar en la imagen las celdas solares no siempre pueden captar la energía solar debido a las malas condiciones atmosféricas, las cuales en estos sitios de grandes alturas puede alcanzar hasta 5 días continuos nublados, y en estos largos periodos la eficiencia de las celdas solares disminuye considerablemente.



Fig. 3.1. Aspectos de las condiciones climatológicas en estación repetidora Corral de Piedra

Es muy común encontrar este tipo de condiciones climatológicas en varias regiones altas donde se encuentran las estaciones repetidoras como se muestra en la figura 3.1.

Como se menciona anteriormente en el sistema fotovoltaico se cuenta con un banco de baterías, que de acuerdo a las especificaciones de marca y tipo de batería, para cada una de ella se presentan diferencias que son notables en su relación de tiempo de vida útil, es por ello que ahora se hace un análisis de las baterías y tipos que se utilizan en un sistema fotovoltaico, además de las que se utilizan en el CIRES.

### 3.3 Baterías.

La diferencia entre el termino pila y baterías, es que la pila hace alusión a los generadores eléctricos no recargables, mientras que la batería se aplica generalmente a los que si se pueden recargar. En el CIRES se han utilizados diferentes marcas de baterías y de diferentes capacidades, se manejan principalmente tres tipos de baterías que son:

1. Baterías de 7 Ah a 12 Volts.
2. Baterías de 25 Ah a 12 Volts.
3. Baterías de 55 Ah a 12 Volts.

La diferencia de capacidades va en función del tipo de carga que se desea alimentar, por ejemplo en una estación sensora de campo típica, se tiene una batería de 55 Amperes para alimentar el equipo sensor y un arreglo en paralelo de dos baterías de 25 Amperes para el equipo de comunicaciones.

Aunque en algunas ocasiones la marca pudiera llegar a variar, el tipo y capacidad de la batería no, y a continuación se describe los diferentes tipos de baterías disponibles en el mercado.

#### 3.3.1 Baterías de plomo - ácido de electrolito líquido.

Las baterías de plomo - ácido se aplican ampliamente en los sistemas de generación fotovoltaicos. Dentro de la categoría plomo - ácido, las de plomo - antimonio, plomo - selenio y plomo - calcio son las más comunes. La unidad de construcción básica de una batería es la celda de 2 Volts.

Dentro de la celda, la tensión real de la batería depende de su estado de carga, si está cargando, descargando o en circuito abierto. En general, la tensión de una celda varía entre 1,75 Volts y 2,5 Volts, siendo el promedio alrededor de 2 Volts, tensión que se suele llamar nominal de la celda.

Cuando las celdas de 2 Volts se conectan en serie (positivo a negativo) las tensiones de las celdas se suman, obteniéndose de esta manera, baterías de 4, 6, 12 Volts, etc. Si las baterías están conectadas en paralelo (positivo a positivo y negativo a negativo) las tensiones no cambian, pero se sumaran sus capacidades de corriente. Solo se deben conectar en paralelo baterías de igual tensión y capacidad.



Se puede hacer una clasificación de las baterías en base a su capacidad de almacenamiento de energía (medido en Ah a la tensión nominal) y a su ciclo de vida (número de veces en que la batería puede ser descargada y cargada a fondo antes de que se agote su vida útil).

La capacidad de almacenaje de energía de una batería depende de la velocidad de descarga. La capacidad nominal que la caracteriza corresponde a un tiempo de descarga de 10 horas. Cuanto mayor es el tiempo de descarga, mayor es la cantidad de energía que la batería entrega. Un tiempo de descarga típico en sistemas fotovoltaicos es 100 hs. Por ejemplo, una batería que posee una capacidad de 80 Ah en 10 hs (capacidad nominal) tendrá 100 Ah de capacidad en 100 hs.

Dentro de las baterías de plomo-ácido, las denominadas estacionarias de bajo contenido de antimonio son una buena opción para operar en sistemas fotovoltaicos. Ellas poseen unos 2500 ciclos de vida cuando la profundidad de descarga es de un 20 % (es decir que la batería estará con un 80 % de su carga) y unos 1200 ciclos cuando la profundidad de descarga es del 50 % (batería con 50 % de su carga).

Las baterías estacionarias poseen además, una baja auto-descarga (3 % mensual aproximadamente contra un 20 % de una batería de plomo-ácido convencional) y un reducido mantenimiento.

Dentro de estas características se encuadran también las baterías de plomo-calcio y plomo-selenio, que poseen una baja resistencia interna, valores despreciables de gasificación y una baja auto descarga.

### 3.3.2 Baterías Selladas: Gelificadas.

Estas baterías incorporan un electrolito del tipo gel con consistencia que puede variar desde un estado muy denso al de consistencia similar a una jalea. No se derraman, pueden montarse en casi cualquier posición y no admiten descargas profundas.

### 3.3.3 Baterías Solares.

Las baterías utilizadas en los sistemas fotovoltaicos se denominan baterías solares. Como estas baterías también admiten un alto porcentaje de descarga, suelen llamarse asimismo baterías de ciclo profundo. Los voltajes nominales más comunes son 6 y 12 V. sin embargo también se ofrecen baterías de 25 y 48 V para sistemas con cargas de alto consumo [3].

### 3.3.4 Electrolito absorbido.

El electrolito se encuentra absorbido en una fibra de vidrio microporoso o en un entramado de fibra polimérica. Al igual que las anteriores no se derraman, admiten cualquier posición y admiten descargas moderadas.

Tanto estas baterías como las Gelificadas no requieren mantenimiento en forma de agregado de agua, no desarrollan gases evitando el riesgo de explosión, pero ambas requieren descargas poco profundas durante su vida de servicio.

### 3.3.5 Níquel – Cadmio.

Las principales características son:

- 1) El electrolito es alcalino
- 2) Admiten descargas profundas de hasta el 90% de la capacidad nominal
- 3) Bajo coeficiente de autodescarga
- 4) Alto rendimiento ante variaciones extremas de temperatura
- 5) La tensión nominal por elemento es de 1,2 Volts
- 6) Alto rendimiento de absorción de carga (mayor al 80 %)
- 7) Muy alto costo comparadas con las baterías ácidas
- 8) Al igual que las baterías de plomo - ácido, estas se pueden conseguir en las dos versiones, estándar y selladas, utilizando la mas conveniente según la necesidad de mantenimiento admisible para la aplicación prevista. Dado su alto costo, no se justifica su utilización en aplicaciones rurales. [4]

## 3.4 Problemas típicos con las baterías recargables.

### a) Bajas temperaturas y congelamiento del electrolito:

La temperatura que alcanza el electrolito está determinada por la temperatura ambiente, ya que después de una hora la temperatura del electrolito alcanza un valor muy cercano al ambiental. Si bien la corriente que circula por la batería crea una leve disipación de calor debido a la resistencia interna, este valor es sumamente bajo como para superar la acción de una temperatura ambiente muy por debajo de los 25° C, que es le valor de temperatura ideal de trabajo para una batería de cualquier tipo.

Al bajar la temperatura del electrolito la actividad química disminuye, y consecuentemente el número de cargas libres se reduce. En términos eléctricos esta menor actividad química se manifiesta en un aumento de la resistencia interna de la batería. Este aumento disminuye el voltaje de salida y consecuentemente la corriente en la carga.

Cuando la temperatura alcanza valores por debajo de los 0° C, el estado de carga de la batería determinaría la posibilidad de congelamiento del electrolito.

Al congelarse el electrolito se expande, la fuerza de expansión distorsiona las placas, y hasta puede llegar a quebrar la caja. En ambos casos el daño es permanente y la batería debe ser descartada y reemplazada.

b) Altas temperaturas:

Cuando la temperatura ambiente se eleva, la acción química se acelera, disminuyendo el valor de la resistencia interna. Lo que genera que aumenta la actividad química, que se traduce en una reducción de la vida útil de la batería; ya que se acelera el desgaste de la superficie activa de los electrodos.

c) Sulfatación:

Este es el mayor problema cuando se usan baterías del plomo-ácido con electrolito líquido. Se observa que la descarga de la batería forma un depósito de sulfato de plomo en ambas placas. Si el balance energético no puede ser alcanzado para la mayoría de los días en que el sistema permanece activo, el depósito de sulfato de plomo comienza a crecer en espesor. La corriente de carga que circula por las terminales no consigue desprenderlo totalmente, reduciendo la superficie activa de las placas, lo que acorta rápidamente la vida útil de la batería. [5] Las causas más habituales de la sulfatación en una batería son:

1. Dejar descargada a la batería por mucho tiempo.
2. Sobrecargas demasiado frecuentes.

Este fenómeno toma lugar en baterías que permanecen en depósito por largo tiempo, sin ser recargadas. En ocasiones las baterías que se compran para ser llevadas a campo se encuentran con voltajes bajos, siendo esta una falla que afecta directamente en el redimiendo de la batería. Además la posibilidad de sulfatación de las placas se incrementa si el sistema fotovoltaico está instalado en un lugar donde los periodos nublados son de larga duración, como se mencionó anteriormente algunas estaciones sensoras se localizan en lugares no favorables que presentan nubosidad y bajas temperaturas por largos periodos.

El proceso de sulfatación se acelera cuando la temperatura del electrolito se eleva, este es otro factor que intervine en algunas estaciones sensoras, principalmente las que se localizan cercanas a la costa, donde se registran temperaturas por encima de los 30 C la mayor parte del año.

Las baterías que se han venido utilizando en el CIRES son del tipo acidas de plomo selladas, que en las últimas valoraciones se ha observado que han contribuido al mejoramiento del rendimiento energético, sin embargo no han mejorado sustancialmente el conflicto de fallas por falta de suministro eléctrico. Las figuras 3.2 y 3.3 muestran el

deterioro de las baterías en campo, por efectos causados por la temperatura que alcanza la batería al operar en las estaciones de campo.

Algunas de las desventajas más notables son:

- a. Sólo permiten un número limitado de ciclos completos de descarga. Así que no son ideales para sistemas donde se tengan descargas profundas, constantes y por largos periodos de tiempo.
- b. Dañan el medio ambiente, el plomo es altamente toxico y dañino, si se filtra puede contaminar mantos acuíferos, ríos y arroyos.
- c. En bajas temperaturas el funcionamiento de la batería se ve severamente afectado.
- d. Si el tiempo de descarga es largo se producen lecturas de una capacidad de batería más alta que sus valores nominales.



Figura 3.2 Aspectos generales del deterioro de las baterías. Derramamiento del acido



Figura 3.3 Aspecto que muestra el deterioro de las baterías en campo.

En algunos casos como se muestra en la figura 3.2 se han encontrado baterías que han explotado y el ácido escurre por la batería, lo cual provoca corrosión en las terminales de alimentación y la exposición directa de este ácido contenido en las baterías afecta la piel y ojos del personal que acude a reemplazar las baterías. Además hay que considerar la contaminación del subsuelo pues el ácido escurre y se filtra por debajo del gabinete llegando a la tierra cercana a la estación, lo que provoca una gran cantidad de contaminación.

En el centro se colabora para mantener un ambiente limpio y por tal razón las baterías que son desechadas se reciclan.

### 3.5 Red Eléctrica.

Otra alternativa para brindar el ministro de energía eléctrica es mediante la interconexión a la red eléctrica local, actualmente en el sistema del estado de Oaxaca no se tiene ninguna estación de campo alimenta con esta opción. Principalmente por razones relacionadas con la calidad de la energía que se tiene en los lugares donde se localizan las estaciones sensoras, en muchos de ellos el servicio es irregular lo que genera muchas interrupciones.



Además por experiencias del trabajo de campo con las estaciones que se encuentran en el estado de Guerrero, y que son alimentadas con la red eléctrica, se ha notado que la energía suministrada no es constante, pues presenta muchas fluctuaciones de voltaje. Lo que repercute directamente sobre el equipo sensor, ya que este es sensible ante fluctuaciones de voltaje, que pueden derivar en un desajuste de los parámetros eléctricos de éste, y que haga que dictamine mal el envío de mensaje de sismo.

En base a la experiencia recibida en trabajos anteriores de instalación y mantenimiento de las estaciones, e incluso con sondeos de la gente que vive en las comunidades cercanas a las estaciones de campo, se ha comentado que los servicios eléctricos en general son muy deficientes, cuando se presenta una falla han tardado en dar atención incluso meses para reparar la falla; ya que en muchos lugares el acceso es complicado y esto es otro factor que retarda aún más el corregir oportunamente una falla.

Por lo tanto no se puede garantizar que el sistema opere correctamente de forma ininterrumpida e incluso los costos de mantenimiento serían más elevados que los actuales.

### 3.6 Celdas de Combustible.

La utilización de las celdas de combustibles como fuente de alimentación en los sistemas de telecomunicaciones ha resultado muy eficiente y funcional. Por lo que en este trabajo se refiere, se planteará la propuesta de la implementación de las celdas de combustible para el suministro de las estaciones. Es una tecnología que utiliza el hidrógeno como combustible y que representa una forma de energía limpia y amigable con el ambiente, que cubre con los requerimientos energéticos y que brinda confiabilidad en el suministro de energía eléctrica. Asimismo las celdas de combustible que utilizan el hidrógeno como combustible, brindan una buena autonomía que podría disminuir sustancialmente el número de mantenimientos preventivos a causa de fallas por batería baja o por fallas derivadas de ésta.

#### 3.6.1 Antecedentes.

Aunque el principio de funcionamiento de las celdas de hidrógeno o de combustible (C.C.) fue descubierto en el año de 1839, por William Grove, jurista y físico aficionado británico, no fue hasta principios de los años de 1960 en que fue aplicada en las misiones espaciales de la Nasa, Apolo y Géminis, para suministrar energía eléctrica y agua potable y la industria las reconoció como una opción técnica, pero en ese momento enfrentaban aún barreras tecnológicas y altos costos de producción.

En años más recientes, alrededor de 60 empresas en todo el mundo, de las cuales siete de éstas se encuentran dentro de las 10 más grandes del mundo en cuanto a ganancias se refiere, trabajan en su investigación, desarrollo y determinación de sus potenciales

aplicaciones, con el objeto de hacerlas más confiables, durables y reducir su costo. Se considera que esta tecnología revolucionará el mundo como en su momento lo hizo el motor de combustión interna, teniendo impactos positivos tanto económicos como en el medio ambiente.

### 3.6.2 Descripción.

Las celdas de combustible son equipos que a través de las reacciones electroquímicas, la reducción del oxígeno y la oxidación de un combustible (regularmente hidrógeno), transforman la energía química de estos elementos, en eléctrica y calorífica.

Una celda de combustible genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión de una manera directa y por lo tanto eficientemente. Estas celdas no se agotan como lo haría una batería en tanto se les alimente el combustible hidrógeno y el oxidante. Así generarán energía eléctrica y calor mientras se les provea de combustible, siendo los únicos subproductos generados agua 100% pura y ya que esta reacción es exotérmica producirán también calor. La manera en que las celdas de combustible operan es mediante una celda electroquímica que consiste en dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un electrólito.

El combustible al fluir en la celda a través del electrodo negativo, y mediante un catalizador de platino que propicia la separación del hidrógeno en iones, siendo estos transportados a través de un electrolito, los que alcanzan el electrodo positivo, al combinarse con el oxígeno generan agua. Los electrones que no cruzan a través del electrolito fluyen por un circuito eléctrico externo con lo que se genera un voltaje, que al conectar una carga produce una corriente eléctrica.

El mayor beneficio del uso de hidrógeno como combustible se alcanza cuando éste se emplea en dispositivos de generación de energía eléctrica llamados Celdas de Combustible. El oxígeno, que puede provenir del aire, pasa sobre el cátodo ó electrodo positivo, mientras que un combustible como el gas hidrógeno lo hace sobre el ánodo. Cuando el hidrógeno es ionizado en el ánodo, el gas se oxida y pierde un electrón, al ocurrir esto el electrón toma un camino fuera de la celda de combustible significando una corriente eléctrica. Al final ambos elementos hidrógeno y oxígeno se vuelven a reunir para formar agua [6].

La energía aprovechable de esta reacción está dada por la diferencia de potencial ó voltaje entre ambos electrodos. Por otra parte, la corriente generada depende de la eficiencia de la celda y del área aprovechada para la reacción. Estos dos factores son de suma importancia tecnológica ya que de ellos dependerá la eficiencia y por lo tanto, la potencia utilizable de estas fuentes generadoras de electricidad. Así, para generar cantidades útiles de energía eléctrica las celdas de combustible pueden ser configuradas a partir de varias celdas unitarias conectadas en serie, además de variar el área de sus electrodos y obtener así el voltaje, la corriente y por lo tanto la potencia, apropiados para la aplicación final.

Existen varios tipos de celdas de combustible pero de manera general se pueden dividir en aquellas de baja temperatura y celdas de alta temperatura. Las primeras aunque son menos eficientes presentan ventajas sobre las segundas debido a una menor complejidad de sus sistemas, una mayor velocidad de respuesta y la posibilidad de ser más compactas.

Las celdas de baja temperatura son las que más desarrollo han sufrido e incluyen las celdas de electrolito polimérico (PEFC ó PEMFC), las de ácido fosfórico (PAFC) y las alcalinas (AFC), requieren el uso de hidrógeno generalmente de alta pureza y pueden ser obtenidas (aunque de manera limitada) con compañías que las desarrollan.

Las de alta temperatura son altamente eficientes y presentan ventajas como la capacidad de generación de mediana y alta potencia, así como la de poder utilizar combustibles antes de su transformación en hidrógeno. Un ejemplo de ello es el uso de gas natural en celdas de alta temperatura en donde internamente el metano se transforma en hidrógeno y posteriormente en electricidad. A pesar de las ventajas de las celdas de combustible de alta temperatura como las de óxido sólido (SOFC) y las de carbonatos fundidos (MCFC), éstas celdas aún no alcanzan un grado de comercialización.

### 3.7 Otros: Microgeneradores Eólicos.

Otra alternativa al suministro de energía eléctrica puede ser la instalación de un sistema de microgeneradores eólicos, que hoy en día se están convirtiendo en una alternativa real al suministro de energía, pues son capaces de generar energía de forma limpia y sustentable.

Estas aplicaciones están comenzando a ser utilizadas en los últimos años debido en gran medida al cambio climático y los problemas que de este se derivan. Este tipo de micro eólicas ya son una realidad en la Comunidad Europea, mientras que en México apenas se comienza a experimentar con estas nuevas tecnologías.

Las posibles aplicaciones son muchas y variadas desde:

1. Sistemas de bombeo y drenaje, para las áreas de cultivo.
2. Necesidades de alumbrado público como en carreteras, viaductos, túneles, faros semáforos, estacionamientos, etc.
3. Alimentación de zonas aisladas desde el punto de vista energético, ya que no resulta económicamente rentable llevar hasta allí la red eléctrica; como puede ser una isla, bahía, o espacios naturales protegidos.
4. En Telecomunicaciones.



En lo que se refiere al área de las comunicaciones ya se tienen aplicaciones muy relacionadas con la alimentación de sistemas de telecomunicaciones, como por ejemplo en repetidores, antenas de telefonía móvil instaladas lejos de la red eléctrica. [7]

Es aquí donde en base a las condiciones físicas del lugar donde se localizan algunas estaciones sensoras, sea muy viable contar con un sistema de micro eólica, que pueda responder a las necesidades del suministro eléctrico requerido. Además de que en combinación con el sistema fotovoltaico que actualmente se tiene, puede brindar un mejor respaldo y así tener un mejor complemento al suministro de energía eléctrica.

Actualmente se están llevando a cabo muchos desarrollos de parques eólicos en el estado de Oaxaca, esto derivado de su buen nivel de viento la mayor parte del año y de sus condiciones climatológicas y orográficas.

Con base en las condiciones ambientales existentes en el lugar donde se encuentre una estación sensora, se puede tener un mejor dictamen de que sistema conviene implementar, para garantizar el suministro de energía eléctrica requerida por una estación sensora, así se lograra optimizar más los recursos existentes y se aprovecharían otros recursos que pueden mitigar las fallas derivadas del suministro de energía eléctrica, en comparación de cuando sólo se cuenta con un sistema de alimentación eléctrico, que no siempre es el más adecuado para cada tipo de estación.

### 3.8 Discusión

En resumen existen muchos factores a considerar, desde el lugar donde se localiza la estación de campo hasta la función que esta realiza, pues como se mencionó anteriormente la parte de más vigilancia del sistema son las estaciones repetidoras ya que en ellas se concentra la información de las estaciones típicas. Además de que el estado de Oaxaca cuenta con una gran diversidad geográfica, que permitirá identificar de forma atinada y correcta lo que se requiere en cada zona del estado.

El sistema de alerta sísmica de Oaxaca cuenta con estaciones sensoras en todo el estado, lo que hace que existan diferencias entre las estaciones que se localizan cercanas a la costa, de las que se encuentran tierra adentro como en el caso de la parte norte del estado. Así mismo las condiciones que se tienen en la capital de estado, son diferentes a las que se tienen en la frontera con el estado de Guerrero. Con en el análisis de las condiciones que se tienen en campo, se da pauta a la utilización de sistemas generación eléctrica alternativos o complementarios al que se utiliza actualmente.

Aunque existen otras alternativas energéticas, sólo se evaluaron aquellas que se adecuaran mejor al tipo de carga que se desea alimentar, a las condiciones físicas de los lugares donde se propone su instalación y a la infraestructura actual de las estaciones de campo.

Es por esto que con base en los análisis del trabajo de campo y de acuerdo a las características de cada sistema para el suministro de energía eléctrica en la estación sensora, se propone la utilización de las celdas de combustible de hidrógeno, como sistema alternativo para el suministro de energía eléctrica. El escenario donde se puede aprovechar la utilización de las celdas de combustible es desde las estaciones repetidoras hasta la estación central. En el capítulo siguiente se detallan los tipos y características de las celdas de hidrógeno que existen.

Una posibilidad para trabajos futuros es la utilización de un sistema redundante, que permita, no sólo disponer de la energía del sol, además se puede aprovechar la energía del viento a través de los micro generadores eólicos, que sumado a las celdas de combustible darían forma a una forma tecnológicamente adecuada para el suministro de las estaciones sensoras de campo. La utilización de este tipo de sistema en sitios remotos, donde los paneles solares siguen siendo la fuente principal de energía, aunado a un banco de baterías que se hace cargo del suministro durante la noche.

Las celdas de combustible pueden ser utilizadas en el caso de un largo periodo en el que el sol no brille, y se necesite contar con una mayor capacidad de suministrar energía de la que puedan aportar las baterías de respaldo. Antes de que las baterías estén totalmente descargadas se envía un mensaje de alerta, que avisa al personal correspondiente, para recargar el depósito de hidrógeno, dichos mantenimientos se hacen cuando sea absolutamente necesario o programados por consumo.

Realizando un análisis parte por parte, la energía del viento es ahora más importante que nunca. Es una fuente de grandes cantidades de energía, que cada día se incrementa más su aprovechamiento. Con los avances recientes la energía eólica es competitiva económicamente contra las fuentes fósiles, especialmente en aéreas donde la electricidad es muy cara o no se cuenta con una conexión cercana al sistema eléctrico.

La energía contenida en el viento varía con respecto a la velocidad de éste, una desventaja del viento como fuente de energía, es la inherente variabilidad que sufre. La energía eólica puede ser producida sólo cuando la velocidad del viento se encuentra dentro del rango de operación de las turbinas de los aerogeneradores, por lo que la solución tradicional para este problema, en sistemas rurales o remotos, es la implementación de micro-eólicas acompañadas de otras fuentes de generación.

Una alternativa es complementar la energía eólica con celdas de combustible de hidrógeno, adicionalmente las celdas continuarán operando con eficiencia dentro de la demanda y las condiciones de la carga. Con una eficiencia mayor a la que puede ofrecer unas baterías. El hidrógeno puro es limpio y no contaminante, pero debe considerarse que la fuente de hidrógeno pueda ser recargada dentro de la misma fuente de energía. El hidrógeno es potencialmente regenerable si se utiliza un electrolizador, que puede ser una fuente de

energía como la eólica o la solar. Además el hidrógeno generado a partir de la electrolisis es mucho más puro que el hidrógeno derivado de reformación de hidrocarburos [7].

Las celdas de combustible por si mismas pueden ser una fuente de energía limpia. Esto puede ser posible cuando se integra la generación del hidrógeno, en el mismo sitio por medio del electrolizador y cuando la energía solar y eólica excedan la demanda de la carga, se producirá el hidrógeno que será almacenado en un tanque contenedor, listo para su utilización, cuando la velocidad del viento no sea necesaria o en la noche cuando no puedan ser aprovechada la energía solar.

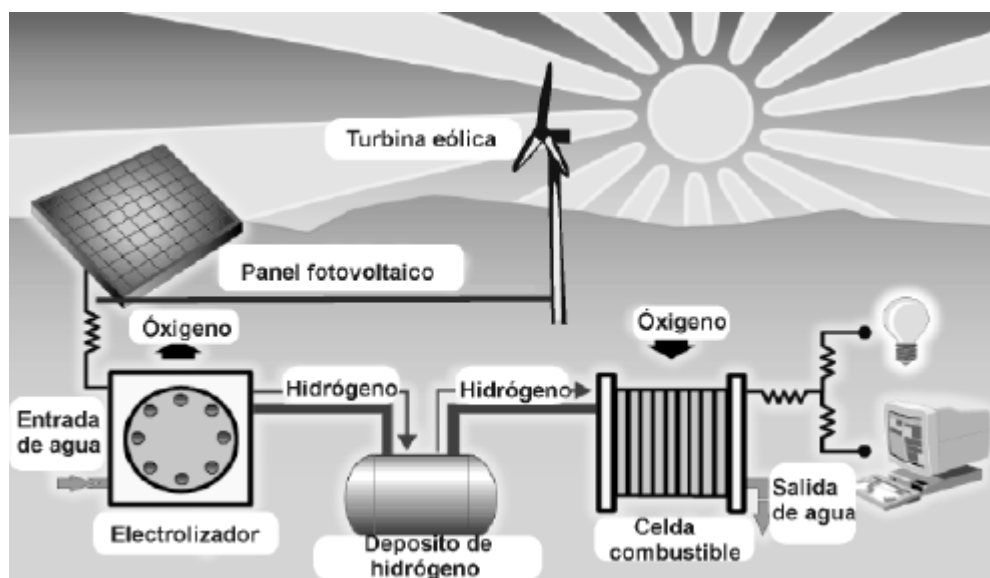


Figura 3.4 Aspecto de un sistema híbrido con celdas de combustible [4].

Cuando se tenga plenamente afianzada la utilización de un sistema redundante como el mostrado en la figura 3.4. Donde se aprovecharían al máximo las fuentes de generaciones renovables y no contaminantes. El sistema se convertiría prácticamente en un sistema ideal, pues sería un ciclo de trabajo cerrado, donde los residuos de la celda agua y calor, pueden ser provechados o reutilizados para los fines que mejor convenga. Pues en definitiva contar con un sistema donde se pueda generar el hidrógeno localmente se presume como la mejor alternativa, pues se convertiría en un proyecto muy ambicioso, desde el momento en que deja de acudir a los lugares para recargar los tanques de combustible se logra una independencia total del sistema. Además es una solución altamente tecnológica que se pone a la vanguardia con los sistemas inteligentes ya utilizados en otros lugares del mundo, donde las condiciones de aprovechamiento de los recursos energéticos renovables tienen gran impacto a nivel social y económico. En el margen de las condiciones y características ambientales de muchas regiones en el estado de Oaxaca, es muy viable poder implementar un sistema de este tipo para contribuir con el desarrollo y modernización energética en sistemas aislados como el que demanda el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano.

## Referencias

- [1] “*Sistemas Fotovoltaicos*”, SAECSA Energía Solar. México. Pagina visitada 13 de enero de 2011. <http://saecsaenergiasolar.com/fotovoltaico/introduccion/>
- [2] Rafael Almanza Salgado, “*Ingeniería de la Energía Solar*”, México 1994.
- [3] “*El Paso Solar*”, Energy Associaton EPSEA, Capitulo 5 Baterías Recargables. España 2005.
- [4] Comisión Nacional Para el Uso Eficiente de la Energía CONUEE. Pagina visitada 5 de octubre de 2010.  
[http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA\\_2080\\_hidrógeno?page=3](http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_2080_hidrógeno?page=3)
- [5] “La Batería” Energía Solar Fotovoltaica, Curso de Energía Solar Fotovoltaica, Capitulo 9. Pagina visitada 5 de febrero 2011.  
[http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/la-bateria\\_29.html](http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/la-bateria_29.html)
- [6] “*Instalaciones Micro-Eólicas*” Confederación de Consumidores y Usuarios CECU, España. Pagina visitada 13 de agosto 2010.  
<http://www.cecuc.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/1%20eolica.htm>
- [7] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong. “*Fuel Cells, Modeling, Control, and Applications*”, Capítulo 8, CRC Press 2010.

## CAPÍTULO 4.

### CELDAS DE COMBUSTIBLE PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA EN ESTACIONES SENSORAS DE CAMPO.

#### 4.1 Introducción.

Como se analizó en el capítulo anterior las celdas de combustible que utilizan hidrógeno como combustible, y se establece que estas representan una alternativa muy viable para el suministro de energía eléctrica. Actualmente se consiguen de manera comercial y tienen bastantes aplicaciones en muchos rubros de la industria.

Para aplicaciones que están directamente relacionadas con las radiocomunicaciones, han dado resultados muy atractivos que han permitido dejar los sistemas convencionales que se utilizan como respaldo y para generación de energía en sistemas aislados. En México ya se está haciendo uso de esta tecnología principalmente por parte de compañías de telefonía celular y de televisión. Se propone la utilización de las celdas de combustible, para mejorar y garantizar la operación del sistema de alerta sísmica, pues las comunicaciones que se manejan al igual que el monitoreo del suelo tienen que ser ininterrumpidos sin importar hora, fecha y época del año.

#### 4.2 Principios de operación de celdas de combustible.

Una celda de combustible también llamada célula o pila de combustible es un dispositivo de energía similar a una batería, pero se diferencia de esta última en que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los elementos consumidos; es decir produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que se puede tener en una batería convencional. Además los electrodos en una batería reaccionan y cambian según cómo esté su nivel de carga; en cambio en una celda de combustible los electrodos se comportan relativamente estables.

Los reactivos típicos utilizados en una celda de combustible son hidrógeno en el lado del ánodo y oxígeno en el lado del cátodo. Por otra parte las baterías convencionales consumen reactivos sólidos y una vez que se han agotado, deben ser eliminadas o recargadas con electricidad. Generalmente los reactivos fluyen hacia adentro y los productos de la reacción fluyen hacia fuera. La operación a largo plazo virtualmente continua es factible mientras se mantengan estos flujos.

Las celdas de combustible se desarrollaron para aplicaciones militares principalmente, y espaciales en los Estados Unidos desde la década de los 60. Las naves Géminis y Apolo utilizaron dicha tecnología y en la actualidad son utilizadas en el “*Space Shuttle*” para generar agua. Los primeros desarrollos de celdas de combustible datan del siglo XIX, varios son los científicos que desarrollan diferentes propuestas destacando W. R. Grove, F. W. Ostwald, W.W. Jacques. E. Baurt, F.T. Bacon, entre otros [1].

La figura 4.1 muestra los elementos que entran a la celda de combustible y como resultado a la salida se obtiene una corriente directa y los residuos producidos durante el proceso que son vapor caliente y agua.

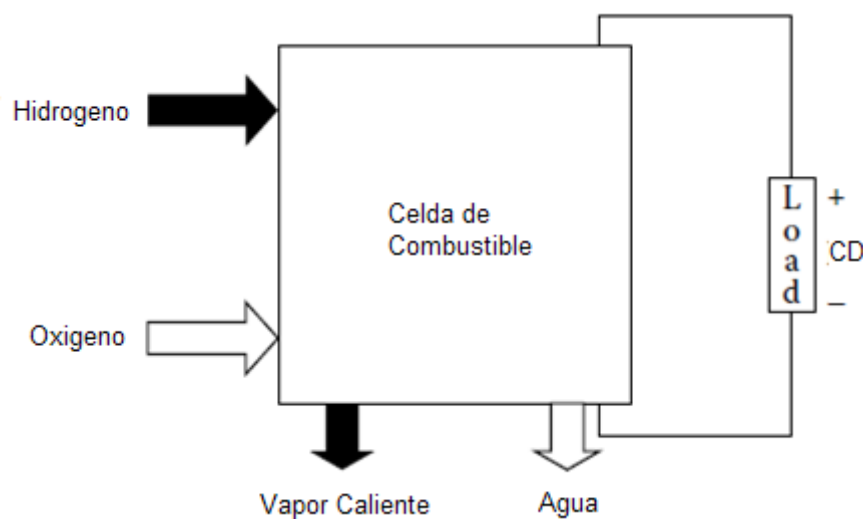


Figura 5.1 Diagrama de una Celda de combustible con sus entradas y salidas [1].

En principio, una celda de combustible opera como una batería, combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente, sin realizar un proceso de combustión, evitando la generación de emisiones nocivas como, elementos particulados y óxidos de nitrógeno y azufre (NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>) los cuales contribuyen a la formación de la denominada lluvia ácida.

### 4.3 Tipos de celdas de combustible.

Actualmente existen diversos tipos de celdas de combustible:

Entre las cuales destacan:

- a) PAFC: celda de combustible de Acido Fosfórico
- b) PEMFC: celda de combustible de Membrana de Intercambio Protónico
- c) MCFC: celda de combustible de Carbonato Fundido
- d) SOFC: celda de combustible de Oxido Sólido
- e) Tipo Alcalinas

f) Otras

Dichas tecnologías se encuentran con diferente grado de desarrollo pre-comercial; utilizan diversos combustibles, como gas natural, hidrógeno, Gas LP, etc., diferentes electrolitos entre otras diferencias. Cada una de estas tecnologías tiende a ser más apropiada para ciertas aplicaciones en específico.

a) PAFC: celda de combustible de Acido Fosfórico

Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y que además ya se encuentra en uso con aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria.

Las Celdas de Combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia, y cerca del 85%, si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración comparado con el 30% de la máquina más eficiente de combustión interna [2]. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 400°F. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras.

b) PEMFC: celda de combustible de Membrana de Intercambio Protónico

Tipo Polímero Sólido ó Membrana de Intercambio Protónico (PEM). Estas celdas operan a relativamente bajas temperaturas (unos 200°F), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas como el reemplazamiento de baterías recargables en vídeo cámaras.

c) MCFC: celda de combustible de Carbonato Fundido

Tipo Carbonato Fundido. Estas celdas prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 1,200 °F. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California Estados Unidos.

d) SOFC: celda de combustible de Oxido Sólido

Tipo Óxido Sólido (SOFCs). Otra Celda de Combustible altamente prometedor, la Celda de Combustible de Óxido Sólido, podría ser usada en aplicaciones grandes, de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de



estas en vehículos. Una prueba de 100kW está siendo terminada en Europa mientras que dos pequeñas unidades de 25kW se encuentran ya en línea en Japón. Un sistema de Óxido Sólido normalmente utiliza un material duro cerámico, en lugar de un electrólito líquido permitiendo que la temperatura de operación alcance los 1,800 °F. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%. Un tipo de Celda de Combustible de Óxido Sólido utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido.

e) Tipo Alcalinas

Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrólito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales, pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación.

f) Otras celdas de Combustible.

Nuevos miembros de la familia de Celdas de Combustible, tales como las de Metanol Directo, pueden surgir como resultados de trabajos que se han venido llevando a cabo en laboratorios privados y gubernamentales.

#### 4.4 Ventajas de las Celdas de Combustible tipo PEMFC.

Las PEMFC son aptas para aplicaciones residenciales, comerciales, de transporte y pequeña industria. Especialmente donde además de utilizar la energía eléctrica producida, se pueden aprovechar el calor producido durante su funcionamiento. Estas aplicaciones donde se combina el uso de energía eléctrica y agua caliente, las denominadas CHP por sus siglas en inglés se refieren a la generación de múltiples formas de energía en un sistema en este caso, calor y potencia [2].

Actualmente están teniendo muchas aplicaciones en las comunicaciones pues por las características presentadas por este tipo de celda, son aptas para cubrir las necesidades energéticas por ejemplo de una estación de repetición celular o de televisión.

##### 4.4.1 Beneficios de las PEMFC:

1. Independencia: el usuario o consumidor dispondrá de “*back up*” (emergencia en caso de falla de la red) ó podrá generar su propia energía eléctrica de acuerdo a sus propios requerimientos.
2. Confiabilidad: al no existir partes móviles se reducen los mantenimientos y causas de fallas.

3. Aprovechamiento de calor: es posible incrementar la eficiencia energética utilizando sistemas de cogeneración.
4. Preservación del Medio Ambiente: prácticamente no se produce material nocivo, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno ni óxidos de azufre. Utilizando hidrógeno el dióxido de carbono generado es aproximadamente la mitad del producido, a igual potencia, por un equipo que funcione a carbón o un combustible derivado de petróleo. Al no poseer partes móviles estos sistemas son silenciosos y requieren bajo mantenimiento.

#### 4.5 Principio de Operación de las PEMFC.

Una celda de combustible PEM, consiste en dos electrodos: el ánodo electrodo combustible, y el cátodo electrodo oxidante, separados por un electrolito (la membrana). Cuando el hidrógeno ingresa al sistema, las propiedades catalíticas de la superficie de la membrana liberan electrones y protones de las moléculas de hidrógeno. La membrana tiene la propiedad de ser permeable a los protones, por lo que la atraviesan y forman agua al reaccionar con el oxígeno del aire (lado catódico); los electrones que no pueden atravesar la membrana, dan lugar a una corriente continua CD. Este proceso además de producir corriente eléctrica genera agua caliente y calor.

La parte medular de este tipo de celda está constituido por el conjunto membrana-electrodo (CME). Éste está constituido por dos capas difusoras de gas con dos láminas bipolares en cada lado. Las propiedades catalizadoras de este conjunto produce la división de las moléculas de hidrógeno y oxígeno, se basan en las propiedades de metales preciosos, como el platino, depositados en ella. La figura 4.2 muestra el interior de una celda de combustible.

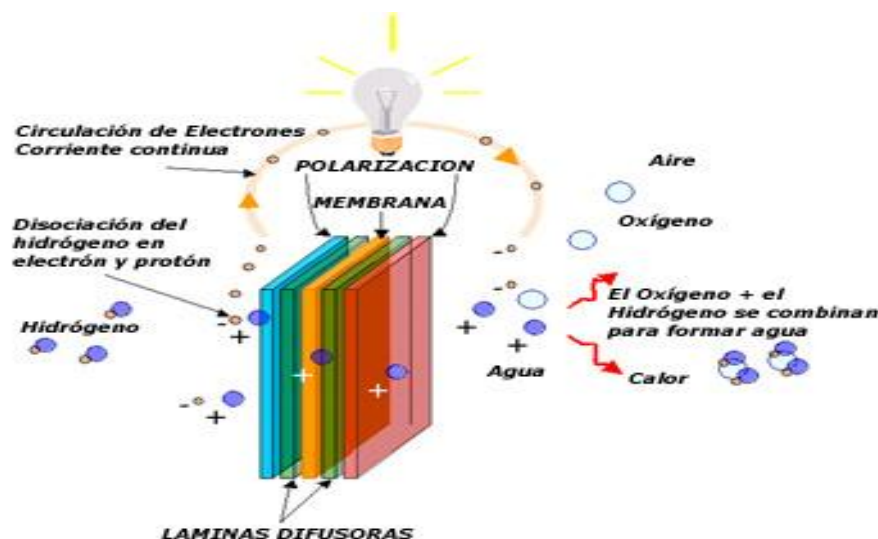


Figura 4.2 Aspectos de la membrana de la Celda de Combustible tipo PEM.

Para generar las cantidades necesarias utilizables de corriente se coloca un arreglo sucesivo de CME, conformando el denominado “*stack*”, banco de baterías. Mediante esta configuración se alcanza la potencia (tensión y corriente eléctrica) requerida.

#### 4.5.1 Principales componentes de la PEMFC.

Comúnmente este tipo de celdas esta conformada por los siguientes elementos:

- Reformador
- Banco de baterías
- Acondicionador de energía
- Sistema de control

La figura 4.3 muestra las partes que conforman las celdas tipo PEMFC.

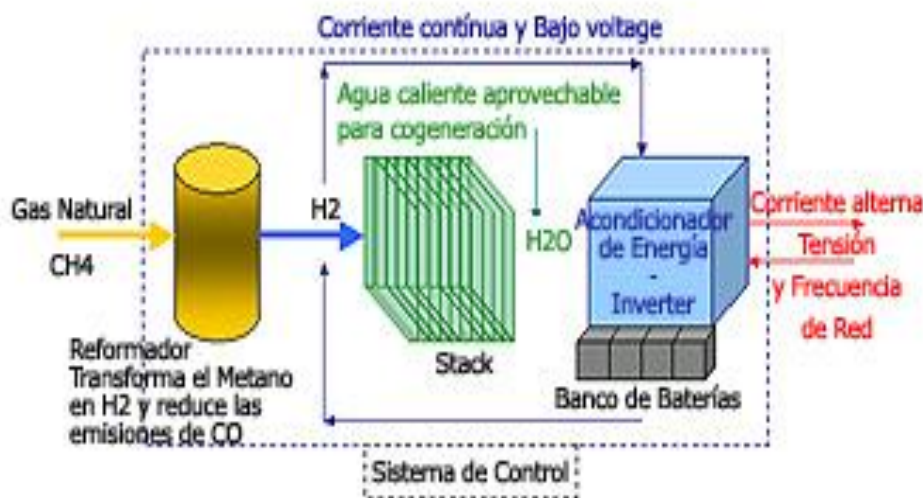


Figura 4.3 Componentes de la Ceda tipo PEM para el caso que utiliza gas natural.

En el reformador ingresa el combustible (gas natural) y produce un gas altamente rico en hidrógeno denominado “reformado”, mediante una transformación química.

El contenido de monóxido de carbono que se posee en el reformado se reduce a niveles aceptables (menores a 50 partes por millon), mediante una unidad acondicionadora.

Posteriormente el hidrógeno ingresa al sistema (“*stack*”) iniciándose el proceso de generación de corriente continua.

Esta corriente continua circula por el acondicionador de energía, denominado inversor, el cual transforma la corriente continua en corriente alterna, a valores de tensión y de frecuencia requeridos para nuestras aplicaciones.

Este acondicionador incluye también un conjunto de baterías, que permiten estabilizar el suministro de energía, ante variaciones instantáneas de la carga.

#### 4.6 Aplicaciones.

Las celdas de combustible tipo PEMFC, pueden ser utilizadas en todo tipo de sistemas e instalaciones estacionarias, transportables o móviles (portátiles), que requieran energía eléctrica para su funcionamiento. Y en el presente trabajo se propone su utilización en un sistema aislado, como es el caso del Sistema de Alerta Sísmica para que cubra con el requerimiento energético de las estaciones y así garantice su correcto funcionamiento.

En un corto plazo veremos aplicaciones de micro celdas de combustible accionadas por metanol u otros combustibles, en teléfonos celulares, relojes, laptops, bicicletas motorizadas, etc., pasando por las tecnologías para uso residencial, comercial e industrial y en un futuro aplicadas en centrales de generación de energía eléctrica.

##### 4.6.1 Celdas de combustible en vehículos.

Los automóviles movidos mediante celdas de combustibles se encuentran en una etapa de desarrollo temprana comparados con los automóviles eléctricos movidos con baterías, pero se consideran como una alternativa muy atractiva. Los primeros ofrecen las ventajas de un automóvil eléctrico provisto de baterías, pero pueden ser reabastecidos de combustible muy rápidamente y su autonomía es mayor que los que utilizan baterías.

Además, los automóviles con celdas de combustible producirían menos emisiones de gases que producen efecto invernadero. Informes de Daimler-Benz y General Motors concluyen que pueden resolverse los problemas técnicos fundamentales asociados al uso de celdas de combustible y que este tipo de motores podrían construirse casi por el mismo precio que los de combustión interna.

Mercedes-Benz lanzo su primer coche basado en tecnología de celdas de combustible, se lanzó en California, Estados Unidos, a partir del mes de diciembre de 2010. Se planeó un esquema en el que el coche es ofrecido en arrendamiento, el nombre del vehículo es F-Cell, no se tiene el costo exacto del vehículo pero se calcula que esta entre los US\$600 y US\$800 por mes [3]. La empresa afirma que la celda ofrece una eficiencia de 64 Km por Kg de hidrógeno. El tanque del F-Cell lleva 3,7 kilogramos de hidrógeno en tanques presurizados a 10.000 ISP, así como un motor eléctrico de 134 hp.

Como ventajas del uso de celdas de combustible en vehículos se pueden citar: un sistema de transporte más limpio, motores más eficientes que los convencionales de combustión interna y posibilidad de recorrer más distancia sin repostar.

Para la industria automotriz es un caso de análisis el tipo de combustible a utilizar en el automóvil y su almacenamiento. Se están considerando principalmente tres combustibles: hidrógeno, metanol y gasolina.

Actualmente no se considera un combustible único como en el caso de los motores de combustión interna sino que dependerá de la región geográfica. Las emisiones van a depender del tipo de combustible y del sistema de reformado que se utilice. Si se utiliza hidrógeno directamente como combustible, por ser el sistema que menor contaminación produce, se requerirá de un almacenamiento de este producto a bordo de los vehículos. Es la opción más factible por los expertos en este momento, y donde se han de hacer los mayores esfuerzos en investigación y desarrollo.

Uno de los problemas del almacenamiento del hidrógeno, es que ocupa un espacio significativo. Para resolver este problema podemos almacenar el gas a alta presión; por otro lado si se considera el uso del hidrógeno de forma directa, éste podría ser almacenado en las estaciones de servicio o construir estas fábricas de electrólisis para producir el hidrógeno y así poder abastecerse directamente de la planta generadora.

Otra alternativa es descomponiendo sustancias para obtener el hidrógeno, y en este caso no es necesario llevar éste en los vehículos, de forma que este sistema de propulsión se hace más seguro. El uso de otros combustibles requiere pequeñas plantas de reformado en el vehículo que conlleva espacio y peso.

Las compañías que fabrican celdas de combustible junto con las compañías petroleras están tratando de desarrollar formas de descomponer sustancias como el metanol, para obtener el hidrógeno necesario para hacer funcionar los automóviles. Los vehículos que utilizan metanol en vez de hidrógeno puro, no se pueden considerar de emisión cero debido a que liberan pequeñas cantidades de CO y CO<sub>2</sub>. Existe una gran oposición a la utilización de hidrógeno por cuestiones de seguridad. De cualquier forma podría cubrir el intervalo hasta que se construyera una red de distribución de hidrógeno.

Si se obtiene el hidrógeno en el propio vehículo a partir de gasolina la transición sería mucho más suave, ya que únicamente sería necesario hacer algunos cambios en la infraestructura actual, y no habría que montar una infraestructura de metano, que quedaría obsoleta en algunos años. La gasolina no podría ser la misma que se utiliza actualmente ya que ésta tiene algunos aditivos que habría que eliminar.

Una de las complicaciones principales del reformado de la gasolina, es que se trata de un proceso complicado ya que ha de hacerse a temperaturas de entre 850°-1000°C. Además se debe considerar, que el utilizar reformadores, en los coches también significa que la eficiencia de estos elementos baja de un 90% a un 80 ú 85%.

Otra alternativa es la utilización de materiales que absorban hidrógeno, en su estructura cristalina (Metal Hydrides) o incorporarlo químicamente (ChemicalHydrides), para tener el combustible cuando se necesite. También se estudia el uso de nanoestructuras de carbono. Uno de los problemas a resolver en los sistemas de celdas de combustible en los vehículos, es la necesidad de tener un radiador mucho más grande, que uno convencional para un motor de combustión interna. Esto se debe a que más de un 80% del calor generado, debe ser liberado a través del radiador (un 33% en el caso de un motor de combustión interna). Sobre el precio, en este momento una celda de combustible tipo PEM cuesta unos US\$ 500, por kW lo que significa que un motor para automoción costará unos US\$25,000, esto es unas 7 veces el costo de un motor convencional de combustión interna (US\$ 3,500).

#### 4.6.2 Uso doméstico e industrial.

Para uso doméstico las celdas de combustible pueden utilizarse no solo para producir electricidad sino también para calefacción, dado que únicamente entre un 40 y un 45% del combustible se convierte en electricidad y el resto se convierte en calor.

Compañías como la Hydrogen Burner Technology of Long Beach, CA, [4] están trabajando en celdas de combustible a partir de gas natural, fuel-oil, o gasolina para producir electricidad. Las unidades actuales producen de 2 a 10 kW y generan el suficiente calor para calefacción y agua caliente. Estas unidades no contienen partes móviles y no requieren mantenimiento. Tienen una eficiencia global del 90%.

Estos sistemas de celdas de combustible como se menciona en la página electrónica de la empresa, se tengan disponibles comercialmente con un costo entre US\$3,600 y US\$7200. El costo de combustible es de unos US\$ 7 por kW usando gas natural (dependiendo de la región donde se compre).

En la industria, la New York Power Authority (NYPA) está utilizando una celda de combustible para proveer de energía la Comisaría de Policía de esa ciudad. Utiliza gas natural como combustible. El sistema se utiliza para generar electricidad y calor y también carga los coches patrulla eléctricos.

Actualmente también se está trabajando en el desarrollo de celdas de combustible suficientemente pequeñas para utilizarlas en teléfonos móviles y computadoras portátiles. Estas nuevas celdas tendrán una capacidad de energía unas 50 veces mayor que las actuales baterías de NiCd. Esto significa que un teléfono móvil podría permanecer en Standby hasta 40 días o en conversación más de 200 horas. Para la recarga de estas unidades bastaría con inyectar metanol dentro de la celda [2]. La vida útil de las baterías sería de 4 años.

Otro campo donde se están probando las celdas de combustible es en el terreno militar. El Departamento de Defensa Americano las está utilizando para proveer de calor y energía a algunas de sus bases. Por otro lado las celdas de combustible son interesantes para su uso

en vehículos militares debido a que son silenciosas, flexibles, y operan a bajas temperaturas. También están siendo desarrolladas para submarinos, barcos, y otros usos militares.

#### 4.7 Aplicación al SASO

El uso de la energía solar para nuestras necesidades eléctricas cotidianas en las estaciones sensoras de campo, tiene distintas ventajas entre otras, se evita el consumo de recursos naturales y la degradación del medio ambiente. Sin embargo existe una desventaja en la energía solar, el sol no brilla constantemente. Por lo tanto se requiere de un método que permita almacenar la energía solar para utilizarla cuando no haya sol. El hidrógeno provee un método seguro, eficiente y sano para hacerlo.

El ciclo del hidrógeno funciona así: La electricidad producida por los paneles solares opera un equipo de electrolisis que divide el agua  $H_2O$ , en sus componentes elementales, hidrógeno  $H_2$  y oxígeno  $O_2$ . El oxígeno se libera al aire y el hidrógeno se bombea a los tanques, donde es almacenado [5].

En la noche cuando el sol no proporciona energía solar, el hidrógeno se combina nuevamente con el oxígeno del aire en una celda de combustible, una planta de energía electroquímica que convierte en electricidad la energía química contenida en el hidrógeno. El único subproducto que resulta de este proceso es agua pura.

La electricidad producida por las celdas de combustible se puede utilizar para las mismas necesidades que se cubren con el sistema fotovoltaico e incluso se puede utilizar para la operación de otros elementos que se deseen utilizar en la ESDECA. El hidrógeno solar nos permite utilizar la energía solar las 24 horas del día, y nos provee de un recurso energético abundante, sano para el medio ambiente, eficiente y producido localmente, sin la necesidad de transportar el hidrógeno desde una planta de generación, hasta el sitio donde se encuentra la estación de campo.

Esta es una posibilidad muy factible de poder proveer el hidrógeno y que complementarían el sistema de suministro energético actual.

#### 4.8 Dimensionamiento de las Celdas de Combustible.

##### 4.8.1 Valores de tensión.

La tensión de la celda depende de la corriente de carga. La tensión en circuito abierto es de aproximadamente 1.2 Volts; para crear suficiente tensión las celdas son agrupadas, combinándolas en serie y en paralelo, en lo que en inglés se denomina “*Fuel CellStack*”



(Pila de Celda de Combustible). El número de celdas usadas varía según el diseño y el requerimiento que se demande.

#### 4.8.2 Parámetros de diseño.

- a) Gestión del agua en las PEMFC. En este tipo de celdas de combustible, la membrana debe hidratarse requiriendo evaporar el agua exactamente en la misma medida en que ésta es producida. Si el agua se evapora demasiado rápido, la membrana se seca, la resistencia a través de ella aumenta, y se agrietará, creando un corto circuito de gas donde el hidrógeno y el oxígeno se combinan directamente, generando calor que daña la celda de combustible. Si el agua se evapora demasiado lento, los electrodos se inundarán, evitando que los reactivos puedan alcanzar el catalizador y se interrumpirá la reacción. Unos de los objetivos más importantes en la investigación sobre celdas de combustible es la adecuada gestión del agua.
- b) Temperatura. Se debe mantener la misma temperatura en toda la celda para evitar la destrucción de la celda por fatiga térmica.
- c) Control del flujo. Al igual que en una máquina de motor de combustión, hay que mantener una relación constante entre el reactivo y el oxígeno para que la celda funcione correctamente.
- d) Durabilidad y otros requerimientos. Para ciertos tipos de celdas, los usos estacionarios requieren normalmente más de 40 000 horas operativas fiables a una temperatura de  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que las celdas de combustible para automoción requieren al menos 5000 horas (el equivalente a unos 200 000 kilómetros) bajo temperaturas extremas. Las aplicaciones para automoción deben además permitir el arranque en frío hasta de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y poseer una alta potencia por unidad de volumen (típicamente 2.5 kW por litro).

#### 4.9 Rendimiento de las celdas de combustible.

El rendimiento de las celdas de combustible, a diferencia de los motores de combustión interna y externa, no se ve limitado por el ciclo de Carnot, ya que no sigue un ciclo termodinámico. Por lo tanto, su rendimiento es muy alto en comparación con éstos, al convertir energía química en eléctrica directamente [6]. El Ciclo de Carnot es el sistema más eficiente para la conversión de la energía.

El rendimiento de una celda de combustible  $n$ , bajo condiciones estándares está limitado por el cociente entre la variación de la energía libre (estándar) de Gibbs  $\Delta G^{\circ}$ , y la variación de la entalpía estándar de la reacción química completa  $\Delta H^{\circ}$ . El rendimiento real es igual o normalmente inferior a ese valor.

$$n = \frac{\Delta G^{\circ}}{\Delta H^{\circ}} \quad (4.1)$$

Donde:

$n$  Es el rendimiento de la celda de combustible.

$\Delta G^\circ$  Es el incremento de la energía libre de Gibbs.

$\Delta H^\circ$  Es el incremento en la entalpía.

Una celda de combustible convierte normalmente la energía química de combustible en electricidad con un rendimiento aproximadamente del 50%. El rendimiento sin embargo depende en gran medida de la corriente que circula a través de la celda de combustible; cuanto mayor es la corriente, menor es el rendimiento. Para una celda de hidrógeno, el rendimiento (energía real/energía teórica), es igual a la tensión de la celda dividida por 1.23 Volts, a una temperatura de 25 °C. Esta tensión depende del combustible usado, de la calidad y de la temperatura de la celda. Una celda que funcione a 0.6 Volts, tendrá un rendimiento cercano al 50% lo que significa que el 50% de la energía contenida en el hidrógeno es convertida en energía eléctrica.

Una celda de combustible y un electrolizador devuelven menos del 50% de energía de entrada (esto es conocido como eficacia del proceso reversible), mientras que una batería de plomo y ácido mucho más barata pueden devolver cerca del 90 por ciento.

Hay que considerar también las pérdidas debidas a la producción, al transporte y almacenaje. Los vehículos con celda de combustible que funcionan con hidrógeno comprimido tienen una eficiencia del 22% si el hidrógeno se almacena como gas a alta presión, y del 17% si se almacena como hidrógeno líquido.

Las celdas de combustible no pueden almacenar energía como una batería, sino que en algunos casos, como centrales eléctricas independientes basadas en fuentes discontinuas de generación (solares, eólica, mareomotriz), se combinan con electrolizadores y sistemas de almacenaje para formar un conjunto para almacenar esta energía. El rendimiento del proceso reversible (de electricidad al hidrógeno y de nuevo a electricidad) de tales plantas se encuentra entre 30 y 40 %.

En usos combinados de calor y de energía (cogeneración), para las aplicaciones donde también se requiere energía calorífica, se acepta un rendimiento más bajo de la conversión de combustible a electricidad (típicamente 15-20%), porque la mayoría de la energía no convertida en electricidad se utiliza como calor. Se pierde algo de calor con los gases que salen de la celda como ocurre en caldera convencional, por lo que con esta producción combinada de energía térmica y de energía eléctrica la eficiencia sigue siendo más baja del 100%, normalmente alrededor del 80%. En términos de energía sin embargo, el proceso es ineficaz y se obtendrían mejores resultados energéticos maximizando la electricidad generada y después usando la electricidad para hacer funcionar un sistema de calefacción.

#### 4.10 El Hidrógeno Como Portador Energético.

El hidrógeno es el elemento más ligero de la naturaleza y el más abundante en el universo. Es un gas difícil de licuar. En nuestro planeta se encuentra en la materia orgánica, agua, petróleo, carbón o gas natural, pero no en forma libre, por lo que para producirlo se requiere invertir una gran cantidad de energía [7]. Al unirse el hidrógeno con el oxígeno se forma agua y se desprende energía, usualmente en forma de calor (proceso similar a la combustión de gas natural o petróleo). Utilizando un catalizador que contiene molibdeno y que al entrar en contacto con el agua, separa de manera sencilla y barata, tras varias reacciones encadenadas, el hidrógeno y el oxígeno.

Esta es una forma segura de obtener hidrógeno y generar una energía sin contaminantes; dentro de sus características se encuentra que como catalizador no requiere de otras fuentes de energía, de esta manera la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno logra una fuente de energía limpia, no contaminante y barata relativamente. A diferencia de otras energías alternativas como la eólica o la solar, este proceso de obtención de hidrógeno se puede realizar en cualquier circunstancia medioambiental, por adversa que esta sea, mientras que para almacenar energía eólica o solar es necesario la presencia del sol o de viento.

Una de las ventajas claras de utilizar el hidrógeno como fuente de energía; es que como el hidrógeno es uno de los elementos que forman el agua, sería una fuente de energía inagotable, de modo que no provocaría crisis económicas como las del petróleo, y además sería una energía no contaminante. El hidrógeno es un portador de energía como la electricidad, y puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes de energía tales como: el gas natural, el carbón, la biomasa, el agua, etc., así como de aguas negras, de los residuos sólidos, llantas y desechos del petróleo [7].

La molécula de hidrógeno es la más ligera, la más pequeña y esta entre las moléculas más simples, además es relativamente estable. El hidrógeno tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible, y en caso de accidente se dispersaría rápidamente. También permite la combustión a altas relaciones de compresión y altas eficiencias en máquinas de combustión interna. Cuando se le combina con el oxígeno en celdas de combustible electroquímicas, el hidrógeno puede producir electricidad directamente, rebasando los límites de eficiencia del ciclo de Carnot [6], obtenidos actualmente en plantas generadoras de potencia.

##### 4.10.1 Obtención del hidrógeno.

Existen diversas formas de obtener el hidrógeno, algunas implican mayor energía para transformarlo y enriquecerlo al hidrógeno a continuación se describen estas formas.

#### 4.10.2 Métodos de Obtención y Almacenamiento.

- a) Reformado con vapor. Con este procedimiento el hidrógeno se obtiene a partir de hidrocarburos, fundamentalmente del gas natural. El principal componente del gas natural es metano  $\text{CH}_4$  y la reacción consiste en separar el carbono del hidrógeno. El proceso tiene lugar en dos etapas: En la fase inicial, el gas natural se convierte en hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. La segunda etapa consiste en producir hidrógeno adicional y dióxido de carbono a partir del monóxido de carbono producido durante la primera etapa. El monóxido de carbono es tratado con una corriente de vapor a alta temperatura produciéndose hidrógeno y dióxido de carbono. El hidrógeno producido se almacena en tanques. El proceso tiene una eficiencia de entre el 70% y el 90% [7].
- b) Oxidación parcial de combustibles fósiles con efecto de  $\text{O}_2$ . Se obtiene una mezcla de hidrógeno que posteriormente se purificará. Las cantidades de oxígeno y vapor de agua son controladas para que la gasificación continúe sin necesidad de aporte de energía.
- c) Electrolisis del agua. El paso de la corriente eléctrica a través del agua, produce una disociación entre el hidrógeno y el oxígeno, componentes de la molécula del agua  $\text{H}_2\text{O}$ . El hidrógeno se recoge en el cátodo (polo cargado negativamente) y el oxígeno en el ánodo. El proceso es mucho más caro que el reformado con vapor, pero produce hidrógeno de gran pureza.
- d) Foelectrolisis. Básicamente, este proceso aprovecha la radiación solar para generar la corriente eléctrica capaz de producir la disociación del agua y en definitiva la producción de hidrógeno.
- e) Gasificación de biomasa: Se trata de someter a la biomasa a un proceso de combustión incompleta entre 700 y 1200°C. El producto resultante es un gas combustible compuesto fundamentalmente por hidrógeno, metano y monóxido de carbono.
- f) Pirolisis: Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500°C. Se obtiene carbón vegetal y gas mezcla de monóxido de carbono y dióxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos ligeros.
- g) Producción fotobiológica. Por ejemplo, la cianobacterias y las algas verdes pueden producir hidrógeno, utilizando únicamente luz solar, agua e hidrogenasa como una enzima.

Nota: además utilizando la biomasa como fuente de hidrógeno éste se puede producir por gasificación de la biomasa y también por pirolisis.

La producción de hidrógeno a partir de energías renovables permitirá desarrollar un sistema de energía sustentable y reducir la dependencia actual respecto de los combustibles fósiles [8].

El hidrógeno se almacena a alta presión y requiere de depósitos pesados y voluminosos. El hidrógeno se almacena en estado líquido en recipientes criogénicos; requiere alcanzar temperaturas muy bajas ( $2,2^{\circ}\text{K}$ ). Diversos metales de transición y sus aleaciones pueden ser utilizadas para almacenar hidrógeno en forma de hidrocarburos metálicos. El principal inconveniente es el elevado peso del sistema de almacenamiento, como consecuencia de los bajos niveles de retención de hidrógeno que se consiguen. Se está estudiando la utilización de nanoestructuras de carbono con una elevada superficie específica como medio de almacenamiento. Sería una forma muy segura y sencilla de almacenar hidrógeno sin usar altas presiones [9].

La figura 4.4 muestra los posibles ciclos de obtención del hidrógeno siempre y cuando se disponga de alguna de las diferentes formas de obtener el hidrógeno, se ilustra el ciclo completo hasta que el hidrógeno llega al consumidor final.

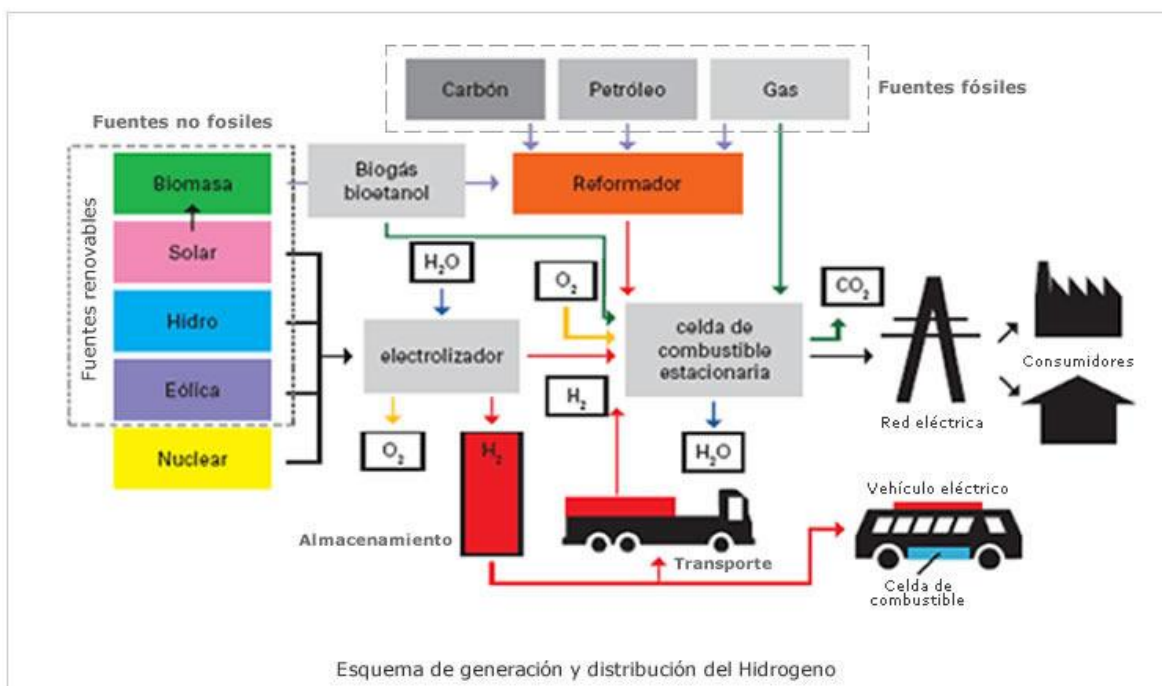


Figura 3. Proceso de generación y distribución del hidrógeno.

#### 4.11 Producción del hidrógeno en nuestro País.

En México se cuentan instaladas 36 plantas para la generación del hidrógeno, se cuenta con una capacidad instalada de 46, 797 toneladas por año. De estas plantas, 25 de ellas operan con gas natural, en tal caso la producción por planta, estándar promedio es de 20,000 toneladas. Seis plantas operan con propano al 97%, en este caso la producción estándar promedio es de 15,000 SCFH (400 SCMH). Por ultimo 5 operan por vía de electrólisis, su producción estándar promedio es de 1,866 SCFH, (50 SCMH) [5].

Las plantas que generan hidrógeno vía reformación catalítica de hidrocarburos, entregan un hidrógeno, producto, típicamente al 14,7 Kg/cm<sup>2</sup> y a 28 °C, en estado gaseoso. La pureza típica de diseño es de 99,99% en volumen. Las impurezas son básicamente CO, CO<sub>2</sub>, y H<sub>2</sub>O.

Las plantas que generan hidrógeno, vía electrolisis, entregan un hidrógeno producto típicamente a 2 Kg/cm<sup>2</sup> y a 28 °C, en estado gaseoso. La pureza es típicamente del 99,99% en volumen, las impurezas son básicamente O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

Dentro de los Estados de nuestro País con mayor capacidad instalada para la generación de hidrógeno, tenemos a: Veracruz, Estado de México, Jalisco, Nuevo León y Coahuila.

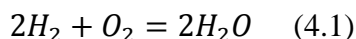
#### 4.12 Energía de las celdas de combustible.

Como se sabe, el funcionamiento de las celdas de combustible es simple. El hidrógeno quien pasa por un medio electrolítico (membrana de intercambio de protones en el caso de las celdas de combustible tipo PEM), que permiten el paso de los protones del hidrógeno, rechazando los electrones que son obligados a pasar por el circuito y carga eléctrica con la consecuente generación de corriente eléctrica.

Este esquema que parece simple se complica por las variables que se introducen respecto al combustible (hidrógeno), fuente de origen, calidad, eficiencia, almacenamiento, etc. Estas variables que afectan el funcionamiento y las características técnicas de la energía generada, se analizarán más adelante, por ahora se abordará el proceso de conversión de la energía.

La energía generada tiene características diferentes que depende de diferentes factores tales como la presión del gas, su concentración, temperatura y como, a su vez estos afectan a la tensión.

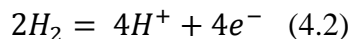
En muchos de los equipos utilizados para la generación de energía eléctrica es muy clara la idea de cómo se realiza el proceso de generación de electricidad. Un buen ejemplo es un generador de electricidad impulsado por molinos de viento, donde la energía cinética del aire mueve las hélices que producen la rotación del eje del generador. Sin embargo en las celdas de combustible, visualizar la transformación de la energía es más complicado. Las ecuaciones básicas del proceso se inician al considerar que el combustible (hidrógeno), está siendo quemado a través de una simple reacción:



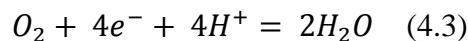
En este caso en lugar de liberar energía calorífica, se produce energía eléctrica. Para entender como la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno producen corriente eléctrica, y

entender de donde vienen los electrones, se consideran las reacciones que tienen lugar en cada electrodo por separado.

En el ánodo, el hidrógeno se ioniza, liberando los electrones (que circulan por el sistema eléctrico produciendo electricidad) y creando iones de  $H^+$  (o protones).



En el lado del cátodo, el oxígeno reacciona con elementos tomados del electrodo, e iones de  $H^+$  del electrolito, para formar el agua.



La potencia y la energía generada son fácilmente calculables, utilizando las formulas ya bien conocidas:

$$Potencia = V \times I \quad (4.4)$$

$$Energía = V \times I \times t \quad (4.5)$$

Donde:

$V$  = Voltaje

$I$  = Corriente

$t$  = Tiempo

Sin embargo, la energía que ingresa y sale del sistema en un proceso químico no es fácil de definir. A un nivel simple y básico podríamos decir que la energía en cuestión es la energía química, que contiene tanto el hidrógeno ( $H_2$ ), como el oxígeno ( $O_2$ ), así como el agua ( $H_2O$ ). El problema reside en que la definición de la energía química de estos elementos no es fácilmente definida, por lo tanto será necesario utilizar los conceptos de entalpía, función de Helmholtz y conceptos de la energía libre de Gibbs [10].

Por otra parte un concepto que ayuda mucho a comprender mejor los procesos termodinámicos es el de Energía, que es ampliamente utilizado sobre todo en las celdas de combustible, que trabajan a temperaturas altas. Sin embargo también se utilizaran conceptos más tradicionales y útiles como los del calor específico.

En los casos de las celdas de combustible, juega un papel muy importante la teoría de Energía Libre de Gibbs, que puede ser definida como la energía disponible para realizar un trabajo externo [10]. Ignorando el trabajo hecho por los cambios de presión o cambio en el volumen. En una celda de combustible el trabajo externo esta constituido por el realizado por los electrones que fluyen en el circuito externo. Cualquier trabajo realizado por el cambio de volumen entre los puntos de entrada y salida del sistema no es aprovechado por la celda de combustible.



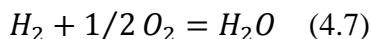
La Energía excluye todo el trabajo que es posible extraer del sistema incluyendo el producido por los cambios de volumen y de presión; mientras que la Entalpía, es la Energía Libre (de acuerdo al concepto de Gibbs), más la energía relacionada con la Entropía del sistema.

Todas estas formas de energía química si se quiere, por así decirlo, tienen una similitud con el concepto de energía potencial mecánica definida de dos maneras. La primera es que el inicial o cero que puede ser definida cuando las reacciones químicas se producen en condiciones normales de presión y temperatura. El termino de Energía Libre de Gibbs de formación ( $\hat{g}f$ ) es utilizada para esta convención. Similarmente, podemos utilizar el término de Entalpía de Formación, o solamente Entalpía. Normalmente para simplificar el valor de  $\hat{g}f$  es cero, en el punto de entrada del sistema.

La segunda similitud con el sistema de energía potencial es el cambio de estado. En el caso de las celdas de combustible, la energía libre de Gibbs ( $\hat{g}f$  producido), es igual a la contenida en la materia producida menos la energía de los elementos que ingresan en el volumen de control de la reacción, por la tanto:

$$\Delta\hat{g}f = \hat{g}f(\text{productos}) - \hat{g}f(\text{reactivos}) \quad (4.6)$$

Para nuestro caso tenemos que la reacción:



Lo que nos dice, que un mol de agua es producido con un mol de hidrógeno y medio mol de oxígeno. Aplicando el concepto de Gibbs tenemos:

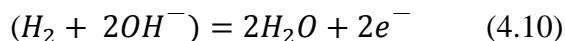
$$\Delta\hat{g}f = \hat{g}f(\text{productos}) - \hat{g}f(\text{reactivos}) \quad (4.8)$$

O sea:

$$\Delta\hat{g}f = (\hat{g}f)_{H_2O} - (\hat{g}f)_{H_2} - 1/2 (\hat{g}f)_{O_2} \quad (4.9)$$

Esta función que parece sencilla se complica ya que la Energía Libre de Gibbs, no es constante y varía con respecto de la temperatura.

Por otro lado se sabe que en el proceso básico de una celda de combustible, por cada molécula de hidrógeno pasan dos electrones por el circuito externo:



Esto quiere decir que por cada mol de hidrógeno utilizado, 2N electrones pasan por el circuito externo (N es el número de Abogadro), luego si se sabe que  $-e$  es la carga de un electrón la que fluye es:

$$-2Ne = -2 xFCouloms \quad (4.11)$$

Donde:

$F$  es la constante de Faraday o la carga de un mol de electrones.

Si decimos que  $E$  es el voltaje de la celda de combustible, el trabajo eléctrico entregado a la carga es:

Trabajo eléctrico hecho = carga x voltaje =  $-2F \times E$  (Joules)

Si el sistema es reversible (esto quiere decir que no hay pérdidas), este trabajo eléctrico realizado es igual a la Energía Libre de Gibbs [9]. Donde:

$$\Delta\hat{g}f = -2Fx E \quad (4.12)$$

Entonces:

$$E = -\Delta\hat{g}f/2F \quad (4.13)$$

Esta ecuación nos permite calcular la fuerza electromotriz o la tensión del circuito alimentado por la celda de combustible.

Como ejemplo podemos decir que una celda de combustible de hidrógeno que está operando a  $80^\circ\text{C}$  ( $273,15 + 80 = 353,15^\circ\text{K}$ ), tiene  $-226,12\text{ kJ}$ , luego la tensión que genera es, sustituyendo en ecuación 4.13:

$$E = -(226,12)/(2 \times 96485) = 1,14\text{ V}$$

Estos resultados obtenidos nos explican porque es necesario “*stacks*” con varias celdas unitarias en serie, hasta alcanzar los valores de tensión útiles, por ejemplo para  $220\text{ V}$  será necesario utilizar hasta 300 celdas.

En la realidad este voltaje es afectado por la irreversibilidad del proceso que reduce significativamente la tensión de trabajo, entre estos se encuentran las sobretensiones y efectos de polarización que se agrupan en tres clases:

- Resistencia o polarización Óhmica.
- Activación o polarización química.
- Polarización de concentración.

#### 4.13 Potencia y Energía de las Celdas de Combustible.

En el lado del ánodo, (que es la sección de alimentación de la celda de combustible), el hidrógeno reacciona, generando la energía. Sin embargo, este hecho no significa que la

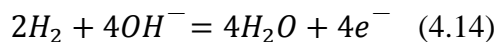
reacción se realizará en una manera ilimitada, continua y constante. Esta energía emitida en la etapa de activación se reduce en el estado de operación posterior. La reducción de la energía es debida principalmente a la saturación de las moléculas de hidrógeno en la superficie del ánodo.

Como se puede suponer este comportamiento se refleja en una reducción en el índice de rendimiento del equipo. Las posibles acciones que se deben tener en cuenta, para evitar esta reducción y mantener un mejor rendimiento en la generación de energía son:

- El uso de catalizadores.
- Elevar la temperatura de operación.
- Incrementar el área de contacto en los electrodos.

Las dos primeras se pueden aplicar fácilmente a cualquier reacción química, mediante métodos químicos y físicos. La tercera acción es esencialmente especificada a las celdas de combustible, en la etapa de diseño y esto es muy importante.

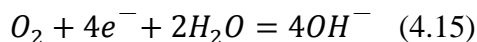
Si tomamos la reacción que se produce en el lado del ánodo (que es la que se produce por reacción del combustible hidrógeno y la sustancia electrolítica):



Como se observa en esta reacción el hidrógeno reacciona con la sustancia electrolítica formándose agua y liberando los electrones que son los que recorren el circuito eléctrico.

Además se puede observar la importancia que tiene el gas combustible (hidrógeno) tanto en los iones del  $OH^-$  del electrolito, en la emisión de la energía de activación. Por otro lado estos vienen juntos, tanto el combustible  $H_2$  y los iones del  $OH^-$  se producen en la superficie del electrodo, mientras que los electrones producidos son transferidos.

Por otro lado tenemos la reacción con participación del oxígeno (generalmente en estado gaseoso tomado en muchos casos del aire), que se produce en el cátodo mediante la cual se forman los iones  $OH^-$ :



Esta reacción es llevada a cabo en el cátodo, llamado a menudo zona de contacto de las tres fases y es muy importante en el diseño de las celdas de combustible. De esto claramente, se puede inferir que la tasa de generación de energía en la celda, será proporcional por el área de los electrodos, lo cual es muy importante; de hecho el área del electrodo es un tema tan vital de suprema vitalidad en el diseño de las celdas de combustible, que su funcionamiento se expresa a menudo en términos de la corriente por  $cm^2$ . Sin embargo, el

área directa (ancho x longitud), no es la única cuestión a tener en cuenta; como se ha mencionada anteriormente, el electrodo deberá además presentar un buen grado de porosidad, con esto se consigue que el área de contacto se incremente sustancialmente.

En la actualidad se puede lograr que los electrodos sean hechos de materiales con una micro-estructura que les de unas aéreas superficiales que incrementan centenares o aun miles el valor de “ancho x longitud”, los valores que actualmente se pueden obtener están entre los 4 a 8 m<sup>2</sup>/gr de material.

Además también es de cuidado la fabricación de materiales micro-estructurales que incorporen catalizadores que además sean capas de soportar eficazmente altas temperaturas en un ambiente corrosivo como el que se tiene en las celdas de combustible.

Como se menciono anteriormente la tensión que se obtiene es una unidad básica de la celda de combustible es sumamente baja, es por ello que estas unidades deben ser apiladas en serie, de esta manera se logra obtener en los bornes de salida, tensiones mayores que nos permiten utilizarlo en usos prácticos. La manera más fácil de hacer esta conexión, es conectando el ánodo de cada celda básica, con el cátodo de la siguiente. Esto parece simple, pero no lo es si tenemos en cuenta que es necesario proveer de gas a todos los electrodos, de manera continua y suficiente. Para esto se utilizan placas bipolares que permitirán que los ánodos de una celda estén conectados con el ánodo y con el oxígeno en el lado del cátodo. Estas placas son además acanaladas para permitir el libre paso de los gases.

Esta forma constructiva de apilamiento, permite además de lograr el abastecimiento de gas, una mejor conductividad que permita el transporte de los electrones que si bien es cierto, tienen voltajes muy reducidos son importantes para efectos de lograr potencia útil importante para los fines de generación.

También es importante hacer notar que esta configuración permite una buena conexión entre ánodo y cátodo, al mismo tiempo que se tiene el aislamiento adecuado de los gases (H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>). Para lograr esto se cuenta con diseños de las placas bipolares protectoras acanaladas que permitan disminuir el oxígeno e hidrógeno a los electrodos y sellar las celdas de la celda de combustible herméticamente. Estas placas son fabricadas en grafito o acero inoxidable.

#### 4.14 Implementación De Las Celdas De Combustible En Un Sistema Aislado

En México existen empresas particulares que ya comercializan las celdas de combustible que utilizan el hidrógeno como combustible primario en una red de telecomunicaciones en la República Mexicana. Una de estas empresas es MICROM [11], que ofrece un tipo de celda que puede satisfacer las necesidades energéticas requeridas en una ESDECA. Dentro

de las principales características de la celda que ofrece dicha empresa es asegurar el abasto continuo de electricidad en CD a cargas críticas donde se presenten problemas de suministro continuo de electricidad. Lo que repercute en pérdidas económicas y sociales. Además de que provee la solución para la generación de potencia necesaria de acuerdo a las capacidades del sistema de comunicación.

La tecnología con la que trabaja MICROM permite ofrecer en el mercado sistemas desde 1.0 kW hasta 15 kW para diferentes aplicaciones y para suministro de respaldo crítico.

Con el análisis de las pruebas realizadas a los equipos utilizados en campo que son alimentados por un sistema fotovoltaico, este tipo de celda de combustible podría cubrir con las necesidades energéticas que se requieren. Por lo que al analizar las diferentes opciones que se ofrecen en el mercado de venta de celdas de combustible, se propone la utilización de la celda de combustible como la que MICROM ofrece en el mercado. A continuación se describe la información técnica.

Celda de Hidrógeno de Condumex:

1. Sistema de respaldo de energía de cargas críticas dentro de un rango de 250 W hasta 15 kW.
2. Purificador patentado, produce 99.9% de Hidrógeno puro.
3. Membranas purificadoras de HyPurium.  
Reactor de Hidrógeno.

Las aplicaciones más comunes de este tipo de celda son:

- Respaldo de energía crítica a estaciones base de telefonía celular.
- Respaldo de energía a nodos remotos sin supervisión.
- Respaldo a aplicaciones en quirófanos, centros de cómputo, sistemas de seguridad, emergencias en contingencias ambientales (sismos, tsunamis, tornados, etc.), sistemas de respaldo móviles y de radiocomunicaciones.

Otras ventajas que ofrece este tipo de celda de combustible son:

- Monitoreo remoto y Sistema de Control y estado de la célula de combustible.
- Datos de historia y operación.
- 8 contactos secos configurables.
- Módulos ultra – Capacitores de almacenaje.
- Ethernet/IP.
- Sensores/ Alarmas de detección de Hidrógeno.
- Gabinetes (número de gabinetes según las necesidades), para almacenaje de tanques de Hidrógeno.

MICROM cuenta con el soporte del Centro de Investigaciones y Desarrollo Carso (CIDEC) y de su socio tecnológico, el cual es líder en el desarrollo de procesadores de combustible y de celdas de Hidrógeno con la tecnología PEM (Membrana de Intercambio de Protones).

Lo que hace diferente a MICROM es su tecnología para generar hidrógeno en el sitio utilizando una mezcla desarrollada por la empresa para facilitar el transporte, manejo, disponibilidad, costo y desempeño [11]. Esta revolucionada tecnología, debidamente certificada e instalada en México, se basa en la transformación de un combustible líquido simple basado en la dilución de agua con un alcohol base industrial, fácilmente biodegradable, lo cual entre muchas otras ventajas, evita el riesgo de cualquier efecto adverso al medio ambiente, eliminado el complicado manejo de tanques a presión y la peligrosidad de almacenamiento que presenta el mismo.

Esta es una de las principales características por las que se considera que este tipo de celda sería la más adecuada, pues reduce el número de mantenimientos preventivos y de traslados hasta el sitio donde se localiza la estación de campo, lo que hace que se tenga un sistema autónomo y que puede ser monitoreado a distancia en tiempo real. Esto reduce los riesgos que se pueden correr al transportar los tanques de Hidrógeno hasta el sitio donde se localiza la ESDECA, la independencia de la transportación y la facilidad de generar el combustible en el sitio, se verán reflejadas directamente en el suministro de energía eléctrica.

Por otra parte los sistemas de combustible convencionales requieren ser abastecidas con tanques de Hidrógeno, que demandan transporte e instalación especializada, así como una logística muy compleja dado el número limitado de proveedores de Hidrógeno en su estado gaseoso, lo que dificulta su abastecimiento en sitio. En contraste, al ofrecerse una solución integral capaz de generar su propio Hidrógeno a través de combustible líquido, facilita el manejo sobretodo en los lugares de difícil acceso, es mucho más compacto y no hay limitación en la cantidad de combustible requerido en el sitio.

Por todas las características que ofrece esta celda de combustible, se propone como un caso de estudio práctico donde sea el respaldo primario del suministro energético actual de la estación, la aportación energética de la celda permitirá contar con un sistema sustentable, energéticamente hablando, mientras que por la parte económica representará un ahorro a mediano y largo plazo, ya que una celda de este tipo y características, tiene una vida útil de 20 años de acuerdo al fabricante [11]. Lo que se verá reflejado en un decremento en los costos de operación y mantenimiento de la estación sensora de campo. Además con la utilización e implementación de sistemas con estas características se ayuda a la conservación de un medio ambiente más limpio y libre de dióxido de carbono.

Basado en las pruebas de laboratorio y en las mejoras que se desean realizar a una estación de campo típica, las necesidades energéticas de ésta aumentaran, por lo que con un sistema de respaldo como el propuesto utilizando la celda de combustible de hidrógeno, cubrirá las

nuevas necesidades energéticas requeridas para el buen funcionamiento ininterrumpido del sistema de alerta sísmica.

#### 4.15 Discusión.

En una celda de combustible el costo típico por kilowatt es de 3 a 5 veces más costoso que el generado por un generador micro eólico, por la razón que la celda utiliza un combustible. El establecimiento actual de la economía de las celdas de combustible va en función de una caída en las tasas de uso de combustibles fósiles, ya sea por escasos, por restricciones medioambientales, penalización, incentivos de tecnologías alternativas o simplemente por la aparición de un combustible más barato. Por otro lado y tan importante como la anterior, la economía de las celdas de combustible dependerá del desarrollo tecnológico y económico de los procesos relacionados con la producción, transporte y usos de este combustible [12].

En el mundo se está dando más oportunidad en el mercado de la energía a tecnologías alternativas que no dependan directamente de combustibles fósiles, es por ello que actualmente se está teniendo un amplio campo de aplicaciones para las celdas de combustibles, desde aplicaciones espaciales, vehículos, dispositivos portátiles, bancos de reserva, hasta generación de energía en grandes cantidades.

El 95% del hidrógeno que se utiliza hoy en el mundo proviene del gas natural [7]. Sólo un 5% se obtiene a partir de la descomposición del agua con energía eléctrica convencional. Hay que recordar que el hidrógeno es el elemento más abundante en la Tierra, que posee una baja densidad, y que como tal no es un combustible, pues requiere de energía para su generación, lo interesante en una evaluación económica es poder, analizar los factores de los cuales depende su producción y en función a ellos, poder hacer una estimación del comportamiento del hidrógeno en el mercado energético. Por ejemplo, actualmente se dio a conocer un estudio realizado con catalizadores que utilizan hierro, los cuales no degradan la eficiencia de la celda [13], y que son más baratos que los que utilizan platino el cual es un metal precioso de muy alto valor en el mercado.

Actualmente los incentivos gubernamentales para la utilización de tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica, pone en la cima de la lista al hidrógeno, entre otras cosas por sus beneficios comprobados al medio ambiente. En el presente siglo se espera que los avances tecnológicos relacionados con la obtención, separación y transportación del hidrógeno reduzcan sus costos y el hidrógeno se convierta en el primer combustible no fósil en contener alto valor energético y además transportable. Que en comparación con otras fuentes de generación alternativas, que en algunos casos también se encuentran en abundancia, pero no son transportables y que sólo permiten generar electricidad, como es el caso de la energía geotérmica, solar, eólica, etc.



Por otro lado cabe mencionar qué si se sigue utilizando el gas natural como el principal productor de hidrógeno, la producción total de éste tocará fondo para el año 2020, tal como prevén actualmente algunos geólogos, entonces será necesario utilizar las formas alternas de producir hidrógeno [13], por lo que no es seguro apostar el futuro energético únicamente a al gas natural, se requiere explorar nuevas formas de obtención de hidrógeno, que permitan reducir los costos de operación y que paulatinamente reduzcan los costos del mismo. Hay que recordar que como todas las tecnologías cuando son la punta de lanza los precios son muy elevados, pero en base a la ley de la oferta y demanda, se espera que entre el año 2010 y 2020 se realice el auge del hidrógeno como fuente energética alternativa a los hidrocarburos. En México ya es posible comprar celdas de combustible para diferentes aplicaciones, en base a las necesidades y el tipo de carga. Por lo que el aspecto económico no debiera influir en la toma de decisión y valoración, de una fuente alterna para el suministro de energía en el sistema de alerta sísmica, pues la inversión se paga con creces, desde el momento en que una celda de combustible tiene una vida útil de 20 años, en comparación con las baterías convencionales que normalmente se deben de cambiar a los 3 años, pues tal vez el alto costo se refleje en la inversión inicial, pero a mediano y largo plazo será una inversión redituable y la relación costo-beneficio, superará las expectativas energéticas deseadas. Además las ventajas son claramente visibles en la eficiencia del sistema y en la nula emisión de contaminantes.

Referencias:

- [1] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong, “*Fuel Cells Modeling, Control and Applications*”. CRC Press; United States of America, 2010.
- [2] A Cogeneration System of a Combined Heat and Power System (CHP), Thermal Equipment Cogeneration, UNEP 2006.
- [3] “*Mercedes-Benz to lease fuel-cell vehicles in California starting in December 2010*”, Fuel Cell Tecnology Update, November 2010.
- [4] Hydrogen Burner Technology Inc. Long Beach, CA. Página visitada 10 de octubre de 2010. <http://www.hbti.net>
- [5] Sociedad Mexicana de Hidrógeno. Pagina visitada 13 de noviembre de 2010. <http://www.smh.org.mx/>
- [6] Manrique José A., “*Termodinámica*”, Tercera Edición, México, Oxford 2002.
- [7] María Jaén Caparrós, “*Jornadas Tecicas de Ciencias Ambientales, Tecnologías del Hidrógeno y Pilas de Combustible*”, ARIEMA Energía y Medioambiente, España 2004.

- [8] Energías Alternativas en CICATA, Querétaro. Pagina visitada 17 de septiembre de 2010.  
<http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:dflyPvcrmP4J:www.concyteq.edu.mx/nthe1/pdfs/Energiasalternativasencicata.pdf+celdas+de+combustible+utilizadas+en+Queretaro>
- [9] Hubert A. Gasteiger, Nenad M. Markovick , “*Just a dream or Future Reality?*”. Science, 324: 48-49, 3 April 2009.
- [10] Sears F., Zemansky M., Young H., Friedman R., “*Física Universitaria*”, Onceaba Edición México, Pearson Educación 2004.
- [11] Microm Electronica. Pagina visitada 15 de agosto de 2010.  
<http://www.microm.com.mx/ES/Paginas/default.aspx>
- [12] Jeremy Rifkin, “*La economía del Hidrógeno*”, pág. 267, cap. 8. El nacimiento de la economía del hidrógeno.
- [13] Celdas de Combustible Tendencias Económicas. Pagina visita 15 de enero 2011.  
[http://web.ing.puc.cl/~power/alumno10/celdas/3\\_tendencias.html](http://web.ing.puc.cl/~power/alumno10/celdas/3_tendencias.html)

## Capítulo 5.

### CASO DE ESTUDIO DE LA CELDA DE COMBSUTIBLE

#### 5.1 Introducción.

Se plantea la simulación de una celda de combustible de hidrógeno para cubrir el requerimiento energético de una estación de campo, para así poder evaluar su comportamiento a lo largo de un tiempo definido, en este caso se realizarán pruebas independientes una de la otra en función de las necesidades energéticas demandadas por la estación sensora de campo en un estado típico de operación sin mensaje de eventos, y en un estado atípico. De igual modo se harán simulaciones para la estación repetidora de campo.

Al final se espera tener un comparativo entre la demanda energética en operación típica y en operación atípica, que pueda validar la utilización de la celda de combustible como una forma alterna y confiable de cubrir el requerimiento energético de cada una de las estaciones de campo y de las estaciones repetidoras.

Para realizar dicha simulación se tomo comó base el modelo referido en el libro “*Fuel Cells, Modeling, Control and Applications*” [1]. Lo que se hizo fue tomar como base la simulación que se presenta en [1] y ajustar esa simulación al tipo de carga que se requiere alimentar, pues lo que realmente interesa es evaluar el desempeño de la celda a lo largo del periodo de operación con sus respetivas variaciones.

En los casos de estudio lo que se pretende analizar es el comportamiento de la corriente y tensión eléctrica durante la simulación que garantice la demanda energética, de tal manera que la celda de combustible pueda ser vista como una opción para suministrar energía al Sistema de Alerta Sísmica.

#### 5.2 Definición de los casos de estudio.

El primer objetivo de la simulación es evaluar la operación de las celdas de combustible en un sistema aislado, cuya operación constante debe garantizar que el Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca opere, con el menor número de supervisión y sea prácticamente libre de mantenimiento, quizá en un trabajo futuro se pueda hacer la integración con un sistema híbrido, pero en este trabajo no es la idea presentar dicha simulación, sólo basta con conocer el comportamiento de la celda de combustible con la carga demandada por una estación de campo y una estación repetidora.

Se realizaron cuatro simulaciones, dos de ellas para una estación tipo ESDECA y dos para la tipo ESREPE. La simulación se obtuvo a partir del estudio del comportamiento en la demanda

energética requerida por la estación de campo en un periodo típico de operación, el periodo de estudio se compone de 24 horas, se dividió en dos periodos, las primeras 12 horas corresponden a una operación típica, y las siguientes 12 horas representan una operación atípica. Además para fines demostrativos de esta simulación se tomaron algunas consideraciones extras las cuales son que la temperatura y el nivel de humedad son constantes a lo largo de todo el intervalo de estudio.

El diseño de la simulación típica se basa partiendo de que las estaciones mandan un mensaje de presencia cada 12 horas, es decir presenta un comportamiento cíclico. Por otro lado en el comportamiento atípico se representa un tiempo de 12 horas en el que la estación presenta un comportamiento de mayor demanda.

Se definirá como **caso 1** al comportamiento típico de la estación de campo, en el que debe de enviar mensajes únicamente de presencia. Cabe señalar que más del 65% del tiempo de operación anual de cada estación se comporta de esta manera, se espera que no se presenten variaciones en la corriente y voltaje, sólo en el momento en que la estación envía su mensaje de presencia el cual dura 2 segundos y los voltajes retornan a su valor nominal.

En la siguiente simulación **caso 2**, se presenta el comportamiento atípico de una estación de campo. La simulación se realizará partiendo de que la estación envía un número elevado de transmisiones que puedan darse durante el ciclo de estudio, como son: mensajes de presencia, mensajes de alerta ó mensajes de aviso de alguna falla, además se simularon los valores de demanda máxima en un periodo corto de tiempo para poder determinar si la celda es capaz de poder suministrar dicha demanda energética y además mantener el voltaje ya la corriente nominales.

En el **caso 3**, se simula a una estación repetidora de campo en su estado típico, para dicha simulación se tomaron valores reales de una estación repetidora que es la que más recibe información de otras estaciones de campo lo cual implica que el consumo en esta estación sea mayor, al mismo tiempo que es imprescindible que esta estación no quede fuera de operación por falla en el suministro energético pues recibe la información de las estaciones cercanas a ella, en este caso se caracterizó el repetidor San Miguel Tenango R05 figura 2.1, donde para este caso se simulará que se reciben únicamente mensajes de presencia de las 6 estaciones de campo. Estas 6 ESDECAS dependen de que la estación repetidora opere correctamente para hacer llegar su información a la estación central.

Para el **caso 4** se simula el comportamiento de la misma estación repetidora pero en operación atípica, donde se contempla que todas las estaciones de campo que se reportan en este repetidor, envíen varios mensajes incluida la misma estación, en un periodo de 12 horas. Escenario que se puede presentar ante un eventual sismo con replicas en la zona cubierta por estas estaciones.

Los diferentes casos de estudio permitirán observar y analizar el comportamiento de la celda ante los cambios bruscos de demanda energética y en periodos cortos de tiempo.

La simulación toma en cuenta dos aspectos fundamentales del comportamiento de una estación de campo los cuales son la demanda y el tiempo de suministro de dicha demanda, por un lado se muestra la gráfica de demanda de una estación típica y por el otro la de una estación repetidora, como se ha mencionado el consumo es mayor en la estación repetidora, por lo que se espera que la celda de combustible pueda cubrir dicha demanda.

### 5.2.1 Modelo de la PEMFC.

El modelo dinámico para el control de la celda de combustible ha sido desarrollado utilizando MATLAB/Simulink [2]. Simulink es una herramienta de extensión de MATLAB, es una aplicación sumamente poderosa en el modelado y representación matemática de sistemas eléctricos. Se simuló una celda de combustible tipo PEM, donde para fines de la simulación la temperatura y niveles de agua no entran en esta simulación y se consideran constantes, para tener un sistema ideal [3]. La figura 5.1 ilustra el diagrama de bloque del sistema de una celda de combustible tipo PEM.

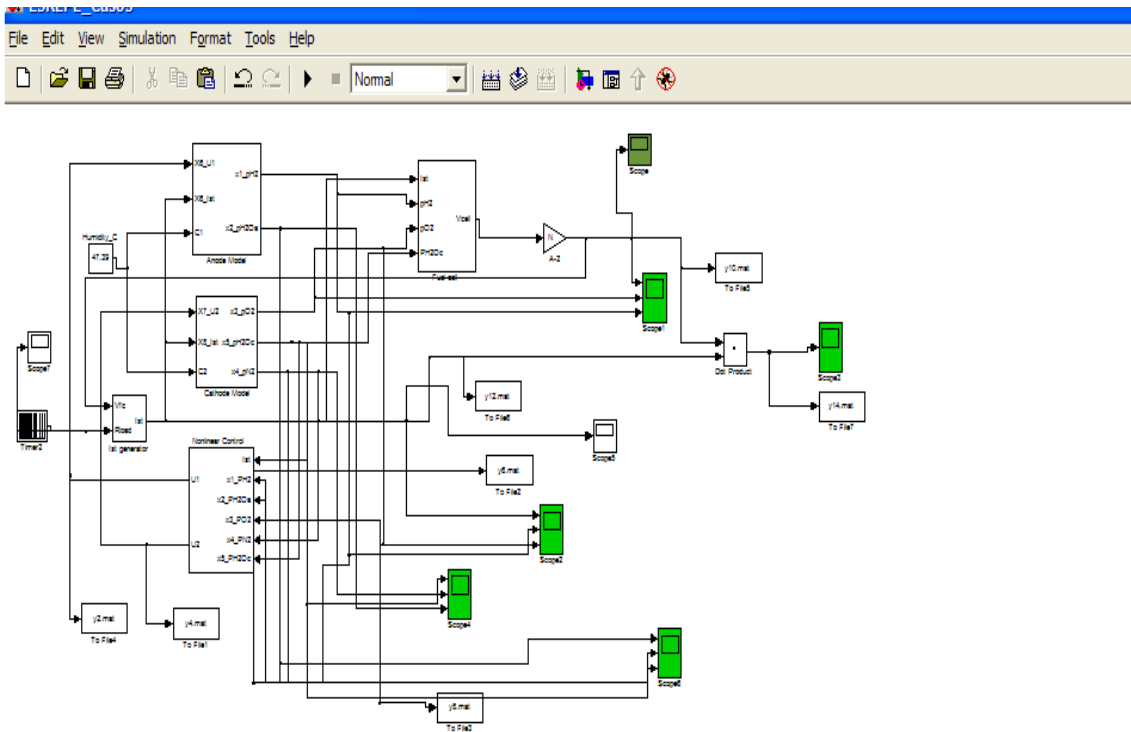


Figura 5.1 Diagrama de bloques de la celda PEMFC utilizada.

El sistema de la celda está compuesto por cuatro bloques, los cuales son modelo del ánodo, modelo del cátodo, modelo de voltaje de la celda y un bloque de control.

La salida en la celda de combustible, es el voltaje que entrega la celda  $V_{st}$  el cual es definido en función de la corriente de celda, reactancia parcial de presurización, temperatura de la celda y humedad de la membrana.

$$V_{st} = E - V_{activación} - V_{resistencia} - V_{concentración} \quad (5.1)$$

Donde:

$$E = N[V + \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O_c}}\right)] \quad (5.2)$$

Esta es la potencia termodinámica en la celda con voltaje reversible basada en la Ecuación de Nernst.

$V_{activación}$  es el voltaje que se pierde durante la reacción dentro de los bornes a causa de los electrodos.

$V_{resistencia}$  es el voltaje resistivo es causado por el protón al fluir hacia el electrolito.

$V_{concentración}$  es el voltaje que se pierde desde la reducción de gases hasta la formación de oxígeno e hidrógeno

Los valores son calculados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$V_{activación} = N \times \frac{RT}{2 \times F} \times \ln \left( \frac{I_{fc} + I_n}{I_o} \right) \quad (5.3)$$

$$V_{ohm} = N \times I_{fc} \times r \quad (5.4)$$

$$V_{concentración} = N \times m \exp(n \times I_{fc}) \quad (5.5)$$

En la simulación la formula general para obtener el voltaje es la ecuación de Nerts, dado que conviene utilizar esa ecuación porque como se mencionó el agua y la temperatura son factores que se consideran constantes a lo largo de todo del tiempo de análisis. En la figura 5.2 se observa el modulo correspondiente a la ecuación de Nerts.

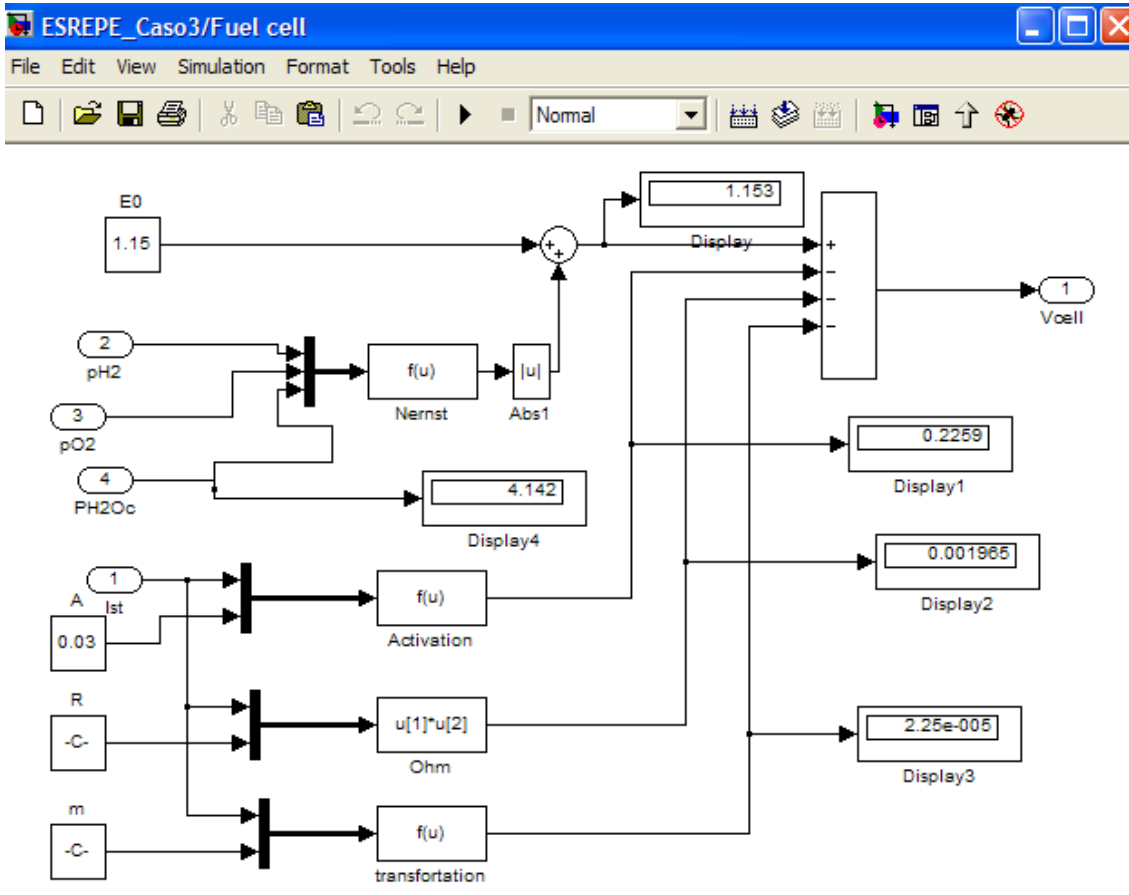


Figura 5.2 Módulo de la celda de combustible, basado en la ecuación de Nerts.

Para el cálculo de la presurización se utiliza la ley de gases ideales, el bloque del ánodo consiste en el modelo de hidrógeno y del agua. El modelo del cátodo involucra al oxígeno, agua y nitrógeno.

Con las simulaciones se pretende, representar con la mayor semejanza la operación y comportamiento de una ESDECA y una ESREPE, tomando en cuenta todos los factores posibles, dentro del intervalo de estudio se consideraran, puntos donde la demanda energética aumentará, debido a causas de la operación del sistema como pueden ser, el envío de datos de presencia, el envío de datos de detección de sismos, datos del repetidor entre otros.

La finalidad de este trabajo de simulación es conocer los parámetros eléctricos entregados a la salida de la celda. Los cuales serán discutidos y analizados para una valoración integral del sistema. Se representara en la simulación el requerimiento energético demandado por las estaciones.

### 5.3 Caso 1: Comportamiento típico de la ESDECA.

La demanda energética en una estación de campo típica en operación normal es de 1.5 W. Cuando la estación de campo envía su transmisión se presenta un incremento de la carga pasando de 1.5 a



1.8 W. La figura 5.3 muestra la gráfica de demanda energética durante un periodo de operación típica, en esta se puede observar como la ESDECA mantiene un consumo plano de potencia de 1.5 W, excepto en el minuto 59 durante el cual envía su mensaje de presencia. Tomando esta consideración se realizó la simulación. Y se obtuvieron los siguientes resultados:

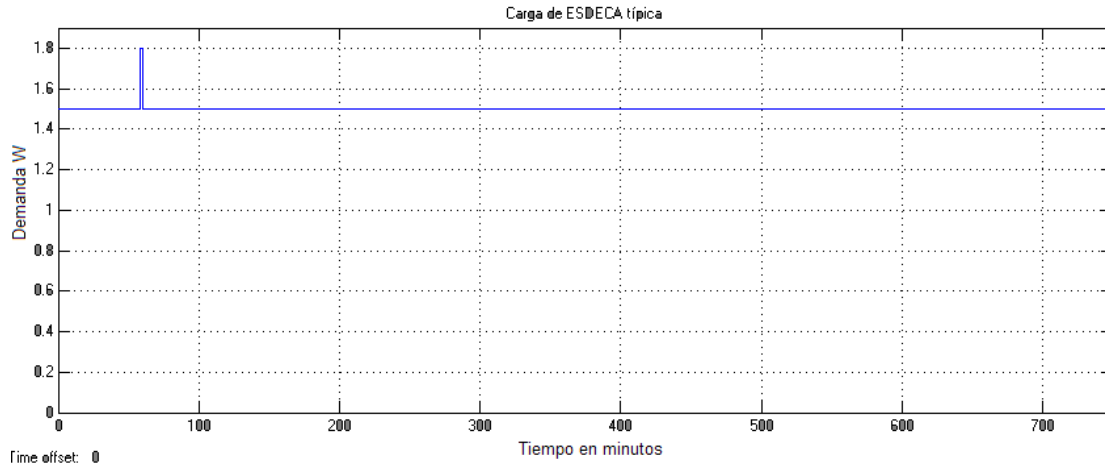


Figura 5.3 Curva de demanda de la estación sensora de campo.

La figura 5.4 muestra el comportamiento de la corriente de la celda durante el periodo de análisis en operación típica, donde se puede observar que la corriente se mantiene constante, menos en el momento que se realiza la transmisión alcanzando un valor de 6.75 A; sin embargo, se recupera una vez terminada la transmisión. Con este comportamiento de demanda de corriente en operación típica se puede observar que la celda de combustible cumple con el suministro requerido por la ESDECA.

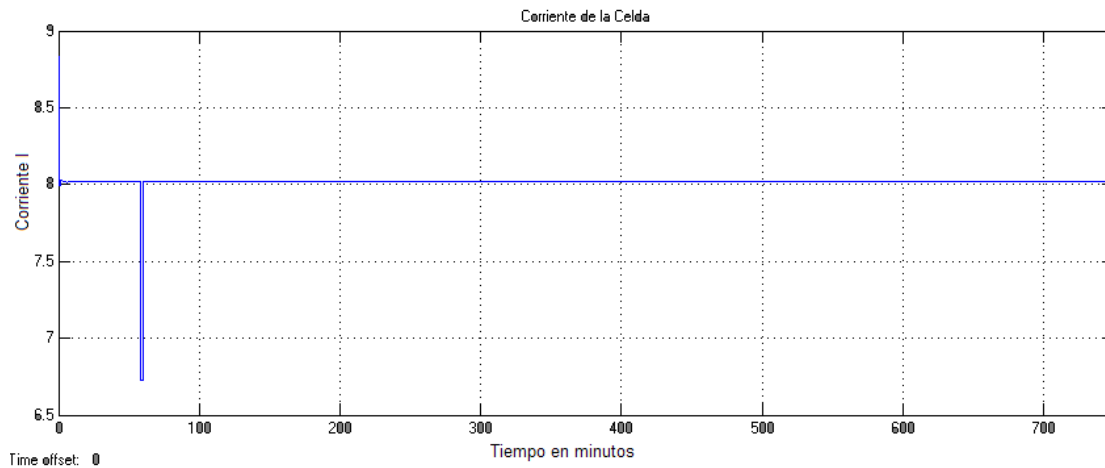


Figura 5.4 Gráfica de variación en la corriente entregada por la celda.

La figura 5.5 muestra la variación del voltaje en la celda de combustible durante el comportamiento típico de una estación sensora de campo. Se observa que únicamente se presenta una muy ligera variación de éste cuando se realiza la transmisión, y se cubre al cien por ciento con los requerimientos de voltaje de la estación de campo, pues el voltaje se mantiene constante en 12 V.

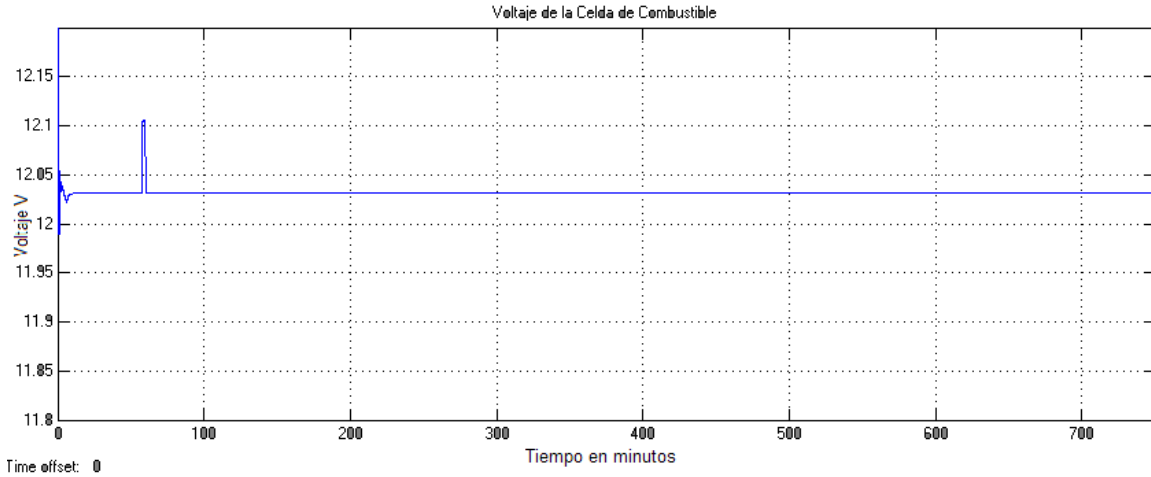


Figura 5.5 Variación del voltaje entregado por la celda.

Finalmente la figura 5.6 muestra la potencia entregada por la celda de combustible a lo largo del periodo de estudio. Como se puede observar los niveles de potencia se mantienen constantes y además en los periodos de más consumo se recupera y vuelve a su estado estable, el cual nunca se encuentra por debajo de 82.5 W, lo cual garantiza que la carga podrá ser alimentada correctamente. Como puede observarse de las gráficas anteriores la celda de combustible permite suministrar sin contratiempos, en un estado típico, pues una vez que el mensaje de presencia es enviado los parámetros regresan a sus valores nominales.

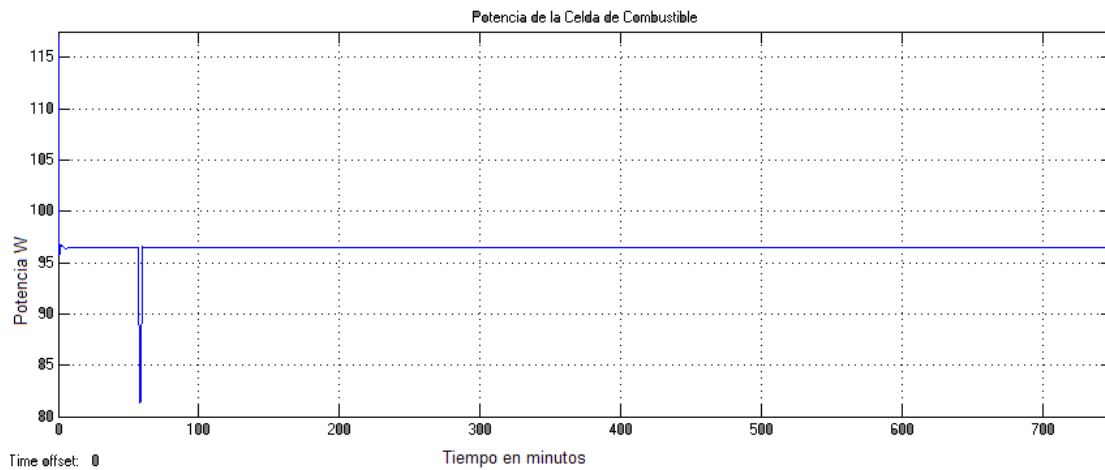


Figura 5.6 Potencia entregada por la celda de combustible. caso 1

#### 5.4 Caso 2: Comportamiento Atípico en ESDECA.

Este caso de estudio muestra el comportamiento de una estación sensora de campo con una operación atípica, la figura 5.7 muestra la gráfica de la carga para este caso. Como se mencionó previamente en este caso se simula basado en múltiples mensajes que la estación envía, estos pueden generarse por registrar un sismo o por algún tipo de falla. La simulación arrojó los siguientes resultados:

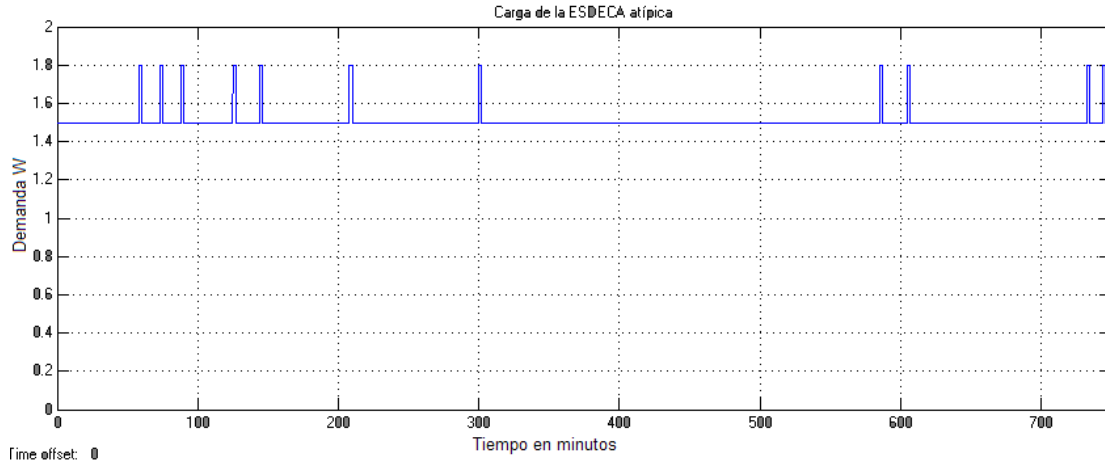


Figura 5.7 Demanda de la estación sensora de campo en operación atípica.

La figura 5.8 muestra las variaciones en la corriente de la celda ante las constantes variaciones en la demanda energética. Se observa que cada decremento en la corriente corresponde a la transmisión de un dato, y que a pesar de no presentar un comportamiento estable, la celda es capaz de soportar las variaciones energéticas en periodos cortos de tiempo, pues como se observa la corriente se recupera después de cada transmisión y que ésta nunca está por debajo de 6.75 A, lo que garantiza la operación correcta de la estación.

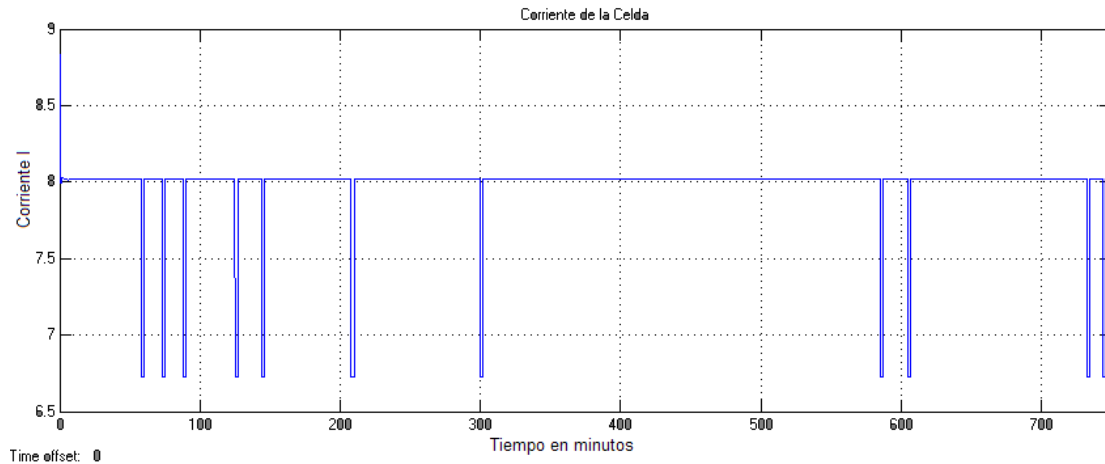


Figura 5.8 Corriente entregada por la celda de combustible caso 2.

La figura 5.9 muestra el comportamiento del voltaje entregado por la celda a lo largo de la simulación, se puede analizar que las variaciones en el voltaje son casi despreciables, pues no representan una variación mayor a 0.02 V, se observa que a pesar de estas variaciones el nivel de voltaje regresa a su valor nominal. Además, el nivel de voltaje nunca se encuentra por debajo de los 12 V, lo que garantiza la operación de la estación.

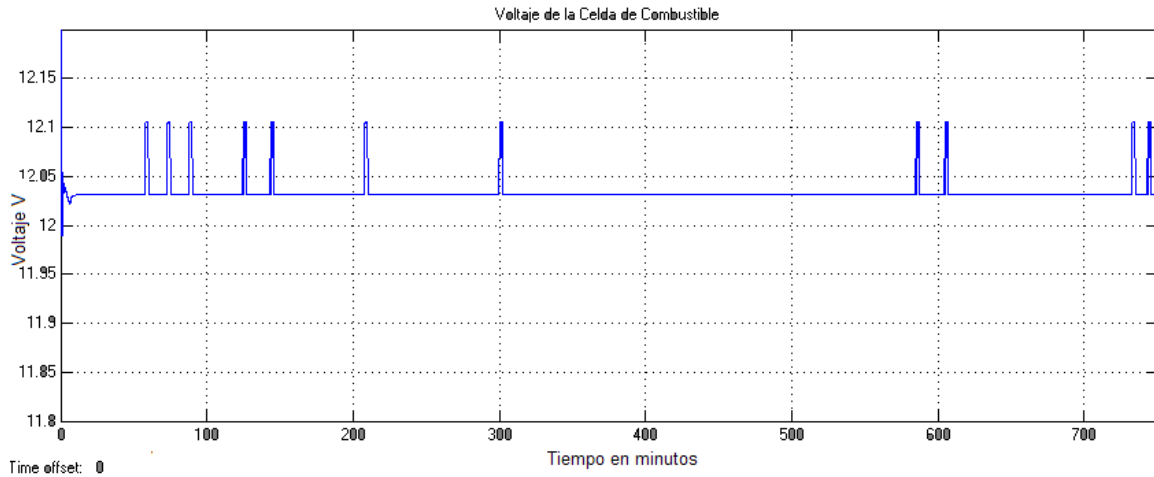


Figura 5.9 Voltaje entregado por la celda.

La figura 5.10 muestra el comportamiento de la potencia de la celda de combustible a lo largo del periodo de estudio. Se puede destacar que la potencia a pesar de sufrir variaciones cuando se presenta un incremento en el consumo energético se recupera y se mantiene constante al no bajar de 80 W.

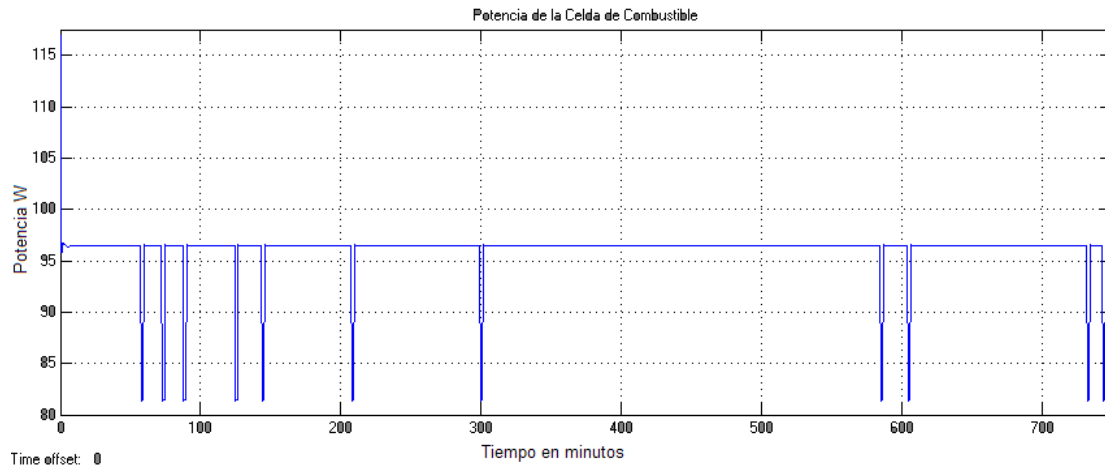


Figura 5.10 Potencia entregada por la celda de combustible caso 2.

### 5.5 Caso 3: Comportamiento típico de una ESREPE.

En este caso se plantea la simulación de una estación repetidora que recibe información de otras estaciones además de la que ella misma envía. La figura 5.11 muestra el comportamiento de las variaciones de la carga durante el periodo de la simulación, cada incremento en la carga representa el envío de información de una estación de campo, se tienen seis variaciones correspondientes a las transmisiones de mensajes de las seis estaciones que de ella dependen, y una más que corresponde a la transmisión que la estación repetidora envía.

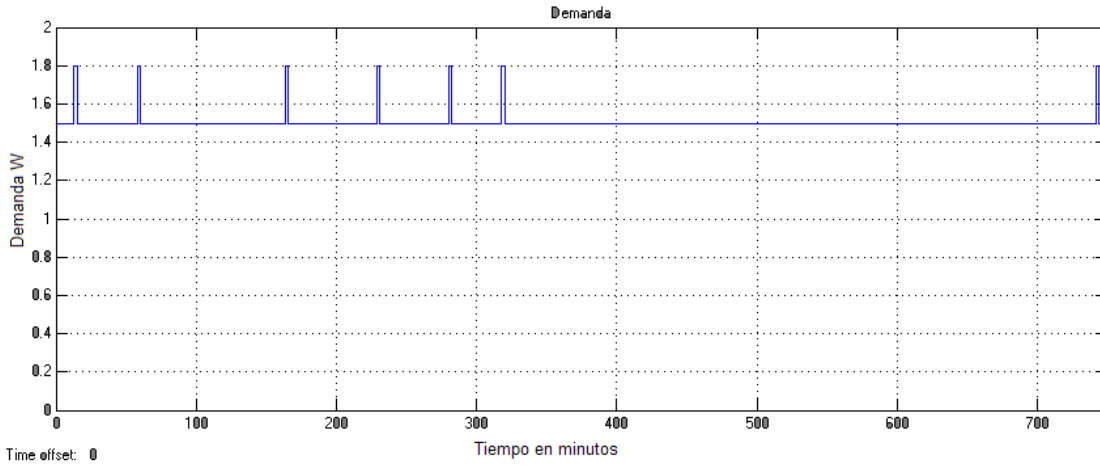


Figura 5.11 Demanda de la carga de la estación repetidora caso 3.

En el presente caso se plantea la simulación del consumo típico de una estación repetidora, se caracterizó el consumo de la estación que recibe un alto número de datos de otras estaciones de campo. Se obtuvieron los siguientes resultados:

La figura 5.12 muestra el comportamiento en la corriente de la celda ante las variaciones que presenta la carga. Se observa que esta gráfica es parecida a la que se obtuvo al simular la estación atípica, esto es porque la carga de 1.5 W cubre la carga requerida tanto por una estación de campo como para una estación repetidora, igual sucede en los periodos de transmisión ambas estaciones requieren 1.8 W en transmisión. Lo que hay que recordar es que la estación repetidora tiene una mayor demanda porque debido a que requiere mandar más mensajes, propios y de las estaciones que de ella dependen. A diferencia de la estación sensora de campo típica, la estación repetidora en su estado típico presenta un consumo mayor porque debe retransmitir los datos que a ella le llegan, se observa que la celda de combustible cubre con dicha demanda pues después de cada transmisión la corriente se recupera y se mantiene constante y nunca esta por debajo de los 6.75 A.

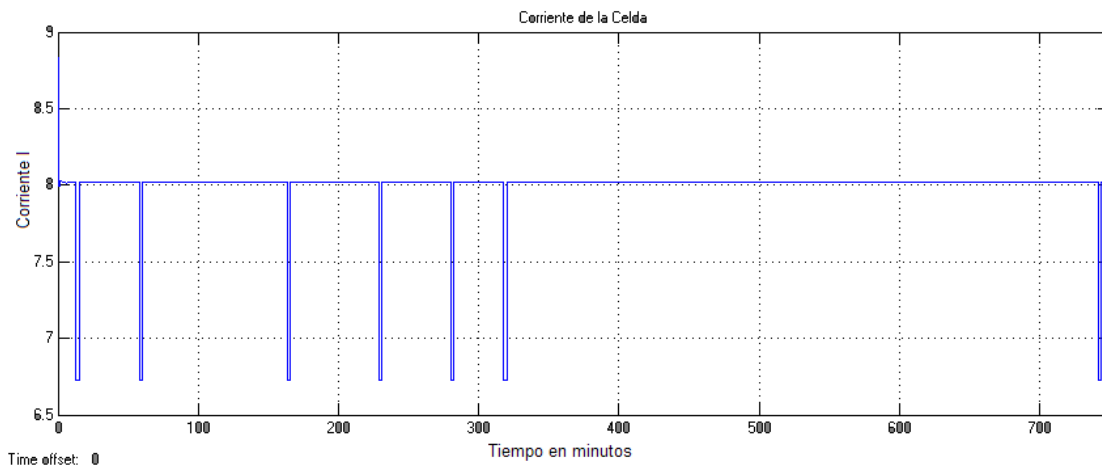


Figura 5.12 Corriente entregada por la celda de combustible caso 3.

La figura 5.13 muestra la variación en el voltaje suministrado por la celda de combustible a lo largo del periodo de estudio. Se observa que las variaciones en el voltaje durante los periodos de mayor demanda son muy pequeñas, casi despreciables, y que el voltaje se mantiene constante en 12 V.

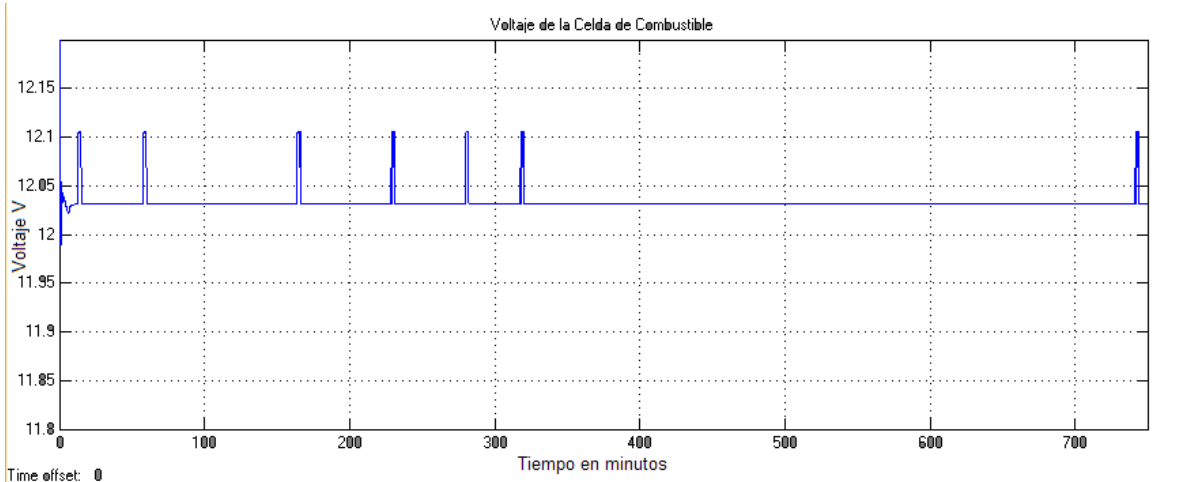


Figura 5.13 Voltaje entregado por la celda de combustible caso 3.

La figura 5.14 muestra las variaciones en los niveles de potencia entregados por la celda de combustible. Se observa que la celda de combustible, a pesar de las variaciones en la demanda energética no baja de los 80 W.

Como puede observarse de las figuras anteriores a pesar de que la ESREPE requiere una operación más demandante, la celda de combustible sigue suministrando los requerimientos energéticos sin problemas.

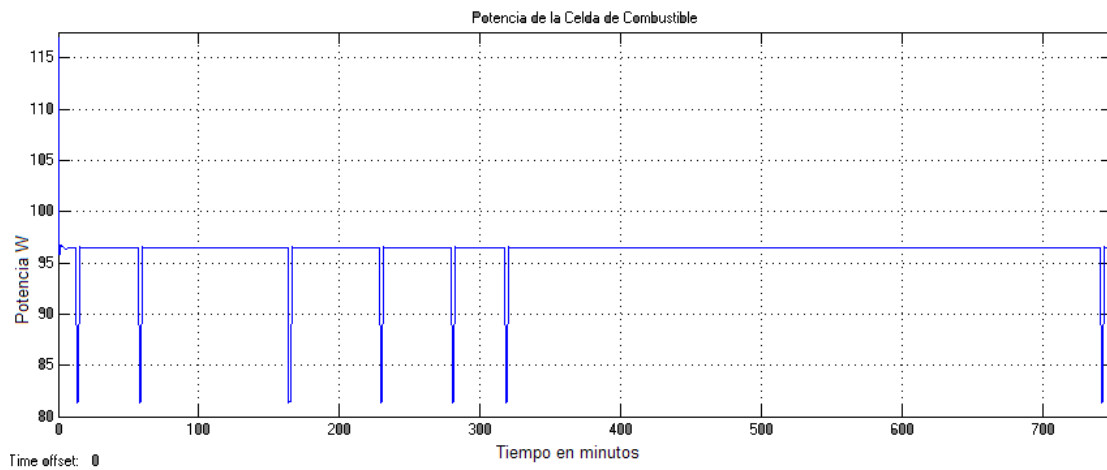


Figura 5.14 Potencia entregada por la celda de celda de combustible caso 3.

### 5.6 Caso 4: Comportamiento atípico de una ESREPE.

En este caso se representa el comportamiento de una estación repetidora con una operación atípica, como se mencionó seis estaciones envían información a esta, misma que tiene que retransmitir, lo cual implica un mayor consumo energético. La figura 5.15 muestra el comportamiento de la carga a lo largo del periodo de estudio. Para este caso se plantea que las estaciones de campo envíen datos en periodos de tiempo corto, cada incremento en la carga representa una transmisión. Se simuló pensando en que alguna estación, de las que se reportan al repetidor, presente una falla como es la de estar transmitiendo datos incorrectos, lo que genera que se tenga que estar transmitiendo varios mensajes en periodos muy cortos de tiempo, además de que se presenten varios mensajes de sismo, mensajes de presencia y mensajes de falla.

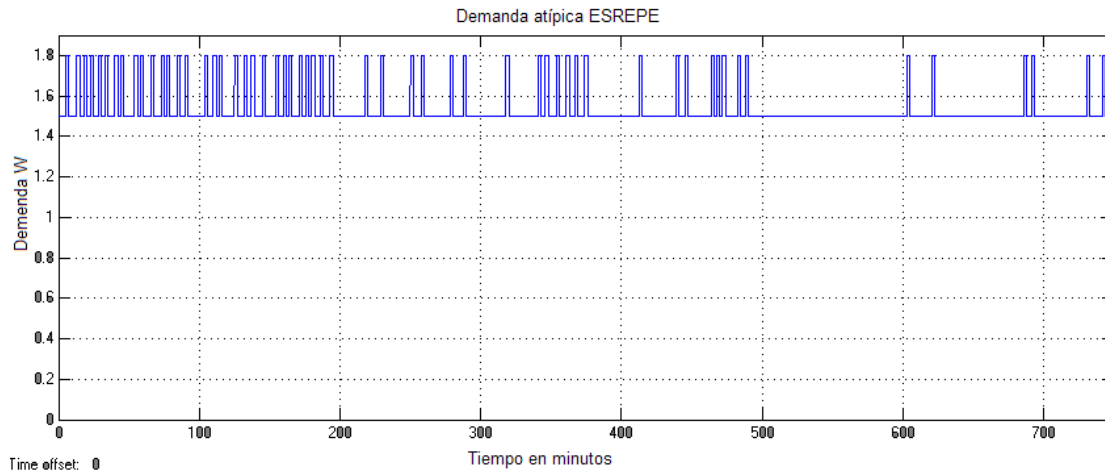


Figura 5.15 Curva de demanda de la ESREPE atípica.

La figura 5.16 muestra la corriente entregada por la celda a lo largo de la simulación, se observa que a pesar de las constantes variaciones en la carga, la corriente nunca está por debajo de 6.5 Amperes, y una vez que el mensaje se ha enviado la corriente regresa sin problemas a su valor nominal.

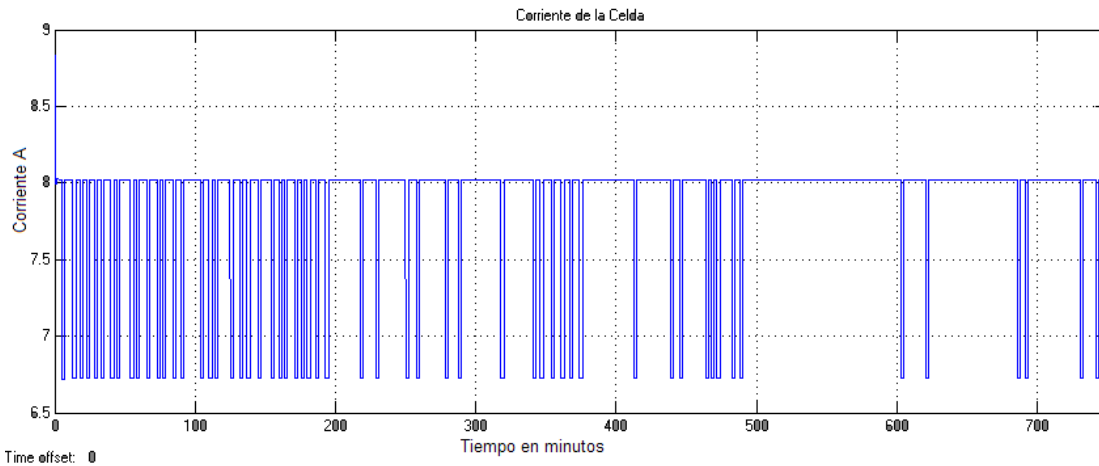


Figura. 5.16 Corriente entregada por la celda.

La figura 5.17 muestra el comportamiento del voltaje de la celda de combustible, se puede observar que el voltaje se mantiene prácticamente en los 12 Volts con variaciones despreciables cuando se



presenta la transmisión del dato, lo que asegura que la carga se mantenga operando dentro de sus parámetros normales.

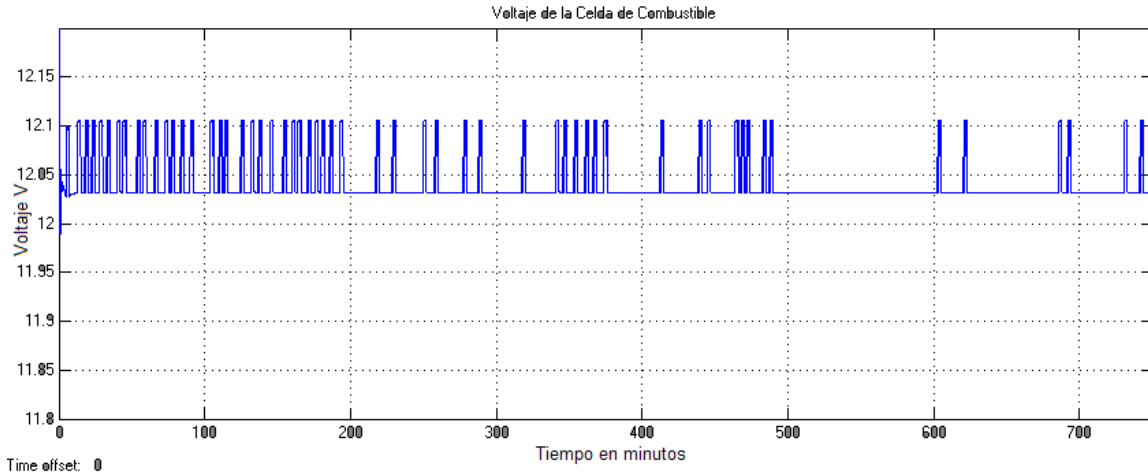


Figura 5.17 Voltaje entregado por la celda de combustible caso 4.

La figura 5.18 muestra la potencia entregada por la celda de combustible a lo largo de la simulación. La potencia entregada por la celda mientras un mensaje es enviado alcanza un valor de casi 80 W, pero regresa a su valor nominal una vez finalizado el envío independientemente del número de transmisiones enviadas.

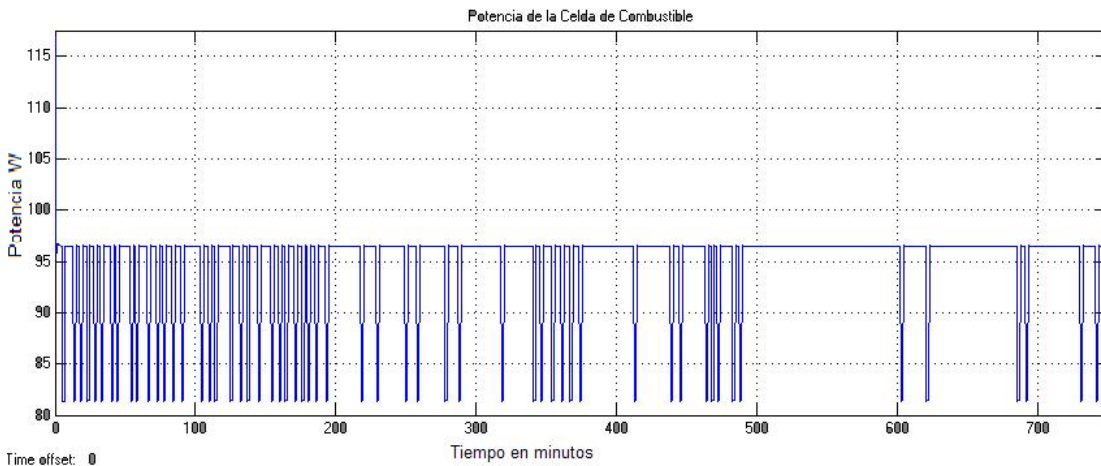


Figura 5.18 Potencia entregada por la celda de combustible caso 4.

Se puede observar que a pesar de las constantes variaciones en la carga, la celda de combustible puede soportar la demanda y mantener en operación a la estación repetidora sin mayor problema.

#### 5.4 Discusión.

La simulación se ejecuta en la versión completa de Matlab 6.5 con la librería de "PowerSystem". Como resultado de las simulaciones se obtuvieron datos que permiten evaluar de forma más concreta la operación de la celda. Los valores donde se desea analizar

la corriente de salida fueron acotados por el “*timmer*”, donde se establecen el tiempo de evaluación y el valor de la carga. La figura 5.1 muestra el “*timmer*”. Todas las simulaciones mostradas fueron en un periodo de 720 minutos, en intervalos de 1 minuto. Las perturbaciones presentadas durante los primeros 0.5 segundos de la simulación son generadas por inadecuaciones de las condiciones iniciales.

En función de estos parámetros, se acotaron tiempos de análisis, los cuales son recabados de la operación de la estación y del análisis de campo. Cada estación de campo envía dos mensajes de presencia al día, además de mensajes de alerta cuando se detecta algún movimiento. Los valores de la carga se tomaron en base a las especificaciones técnicas de la estación sensora de campo y de la estación repetidora, tomando en consideración que las transmisiones duraran 1 minuto, esto con el fin de poder analizar el comportamiento de la celda ante un panorama no típico, donde la demanda energética sea por un tiempo más largo del convencional, que es de 0.2 segundos.

Una de las principales variables a observar es que el nivel de corriente se mantenga constante a lo largo de toda la simulación. Los valores de la carga se incrementan en forma de picos partiendo de un consumo promedio de 1.5 W.

Para tener una estimación con mayor validez del comportamiento de la celda con una carga que sea más demandante se utilizaron los valores de la carga en estado atípico, con variaciones en periodos de tiempos muy cortos y recurrentes.

El resultado de estas simulaciones arrojan que la celda mantiene constante el nivel de corriente hasta que se presentan las rápidas y grandes variaciones de carga pero recupera su valor constante cuando la transmisión finaliza, esto representa que la celda de combustible por si misma podría soportar una demanda de carga por largos periodos de tiempo. En el momento en que la carga se vuelve a normalizar la corriente se mantiene constante, hay que recordar que la simulación se hizo tanto para una estación de campo como para una estación repetidora y en ambos casos la celda cumple con la función de mantener operando la estación. En el caso de la simulación para una operación atípica, donde se caracterizó una demanda que se tiene en las estaciones sensoras de campo cuando éstas presentan una falla, no se presentan problemas para alimentar la carga, pues las variaciones que sufre el voltaje de salida entregado por la celda es prácticamente despreciable, y del mismo modo no se ve afectada la corriente de salida en la celda.

La celda de combustible presenta una corriente de salida constante que puede ser variada desde 8 A hasta los 6.75 A como mínimo, y el modelo utilizado de la celda de combustible puede generar hasta 96 W.

La variación del hidrógeno se mantuvo prácticamente constante a lo largo de la simulación, mientras que la variación en el oxígeno presenta más variaciones, porque el oxígeno es más sensible a las variaciones de la carga de lo que es el hidrógeno.

Se podría utilizar el sistema de la celda de combustible con la coordinación de un sistema secundario para mantener el voltaje necesario en la carga durante los cambios que ésta demande. La integración de un sistema de celdas de combustible con un sistema secundario de energía, que dependa de variantes como un sistema fotovoltaico o un aerogenerador pueden ser necesarios.

Durante los casos de estudio se observa la variación del voltaje de salida en la celda que se mantiene prácticamente constante. Este comportamiento estable de voltaje, puede ofrecer una mejora considerable en comparación con el sistema fotovoltaico con el que se cuenta actualmente. La integración de las celdas de combustible además, permitirá establecer parámetros de diseño, en los cuales se pueda contar con un registro historio de días y meses donde se requiere un suministro de energía adicional.

La simulación arroja que el sistema de la celda puede generar 96 W de potencia, para el caso que es el correspondiente a la estación repetidora de campo en estado atípico, la celda de combustible aporta la potencia necesaria para mantener operando a la estación sin ninguna restricción. Incluso ofrece la potencia necesaria para poder ampliar el equipo actual de instrumentación y de comunicación. La actual restricción en el consumo energético en la estación de campo, ha restringido la implementación de instrumentación que ayude a medir otros parámetros diferentes a las aceleraciones sísmicas, como niveles de insolación, velocidad del viento y optimizar la operación del sistema en la parte de comunicaciones mediante dispositivos tecnológicos disponibles, como el de telefonía celular o satelital. Por lo que resulta interesante poder contar con un sistema alternativo capaz de proveer la energía necesaria para alcanzar las metas deseadas por el centro. Con el análisis de la simulación se puede destacar que se podría alimentar un banco de baterías de respaldo con la corriente que genera la celda, y así contar con un sistema secundario que podría operar en caso de ocurrir una falla en la celda o en caso de que el combustible se haya agotado, entonces se ofrecería un tiempo de respaldo suficiente para acudir al sitio y realizar el mantenimiento correspondiente.

#### Referencias:

- [1] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong, “*Fuel Cells Modeling, Control and Applications*”. CRC Press; United States of America, 2010.
- [2] MathWorks, Simulink, Pagina visitada 14 de febrero de 2011.  
<http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- [3] J. Purkrushpan and H. Peng, “*Control of Fuel Cell Power Systems: Principle, Modeling, Analysis and Feedback Design*”, Germany: Springer, 2004.

## Capítulo VI

### CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJOS FUTUROS.

#### 6.1 Conclusión General

Al finalizar el análisis de resultados obtenidos de la simulación, la única desventaja que presentan actualmente las celdas de combustible es el costo. A pesar de que se están realizando nuevas investigaciones que prometen reducir el costo de producción del hidrógeno, las tecnologías disponibles son caras, en comparación al sistema fotovoltaico que se dispone actualmente. Comparadas por ejemplo contra una batería convencional, el costo es mayor en la celda de combustible, se estudiaron diferentes alternativas de poder suministrar la energía requerida por el sistema concluyendo que las celdas de combustible tienen un campo de aprovechamiento muy grande en los sistemas de comunicaciones como respaldo principalmente en los repetidores centrales donde se concentra gran cantidad de información. De igual forma se decidió utilizar una celta tipo PEMFC porque ésta presenta buenos niveles de eficiencia y es la que se encuentra con mayores desarrollos hoy en día.

Adicionalmente, el electrolizador requerido para efectuar la producción de hidrógeno localmente, tiene un alto costo, por lo que las tecnologías relacionadas al hidrógeno aún representan una inversión considerable. Actualmente se cuenta con muchas empresas dedicadas a la innovación tecnológica del hidrógeno como fuente alternativa al petróleo, y que ya desarrollan celdas de combustible comerciales en países en desarrollo como lo es el nuestro, las celdas de combustible se encuentran por precios mucho más superiores que en otros regiones del mundo. En nuestro país ya se tienen celdas tipo PEMFC disponibles en el mercado, esa fue otra razón por la que se decidió utilizar a este tipo de celdas, la producción de hidrógeno en el país es buena, pero resulta aún complicado el poder comprar hidrógeno como se compra cualquier otro tipo de combustible.

Además de requerir un abastecimiento constante de hidrógeno que involucre las medidas de seguridad necesarias para el usuario junto con precios competitivos que promuevan la utilización de este como una alternativa energética, dadas esas condiciones lo que conviene en el caso del Sistema de Alerta Sísmica, es general su propio hidrógeno localmente y que además el sistema de alimentación este acompañado de un sistema secundario de respaldo, para compensar las posibles fallas en el suministro, se describieron formas alternas que podrían trabajar en conjunto con un sistema de celdas de combustible logrando un sistema redundante y con alta eficiencia.

Sin embargo, es importante recordar que la acción de compromiso con el mejoramiento en el suministro energético no debe estar limitada por el costo de un sistema de hidrógeno, pues es mucho más costoso no contar con un sistema de alertamiento temprano confiable y operativo al cien por ciento. Se justificó la necesidad de mantener operando correctamente

el sistema por la inminente concurrencia de un sismo derivado de las fallas geológicas que envuelven a parte del país y que pueden verse reflejadas de forma negativa en la Ciudad de México y área conurbada.

Finalmente, el factor medio ambiente, pues las celdas de combustible tienen bajas o nulas emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Algunos beneficios más es que ofrecen una alta eficiencia y confiabilidad, durabilidad, y fácil mantenimiento.

Con la utilización de un sistema de celdas de combustible se elimina el elevado costo relacionado con el cambio de baterías, se incrementa la productividad, se reduce considerablemente el mantenimiento y reparación asociado con las baterías, se beneficia al medio ambiente, rápida y fácil recarga y voltaje constante, invariablemente la inversión inicial para un sistema de celdas de combustible es considerable, sin embargo será un proyecto sustentable a mediano y largo plazo.

Lo que no hay que perder de vista es el objetivo que se desea alcanzar con la implementación de este tipo de sistemas, a saber:

1. Contar con una fuente de alimentación energética constante.
2. Que no se vea afectada por las condiciones ambientales locales.
3. Que no requiera de múltiples y costosos mantenimientos.
4. Que garantice la operación continua del Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca.
5. Que sean amigables con el ambiente.
6. Que promueva la investigación tecnológica en México.

La implementación de un sistema de celdas de combustible atiende a todas las justificaciones que se plantearon, además es una necesidad que traspasa más allá de la índole tecnológica, impacta directamente en la sociedad. El éxito del sistema se refleja directamente sobre la población civil, pues con trabajos e innovaciones como las que presenta el Sistema de Alerta Sísmica se tiene un compromiso social que no puede ser demeritado o señalado como deficiente cuando se llegue a presentar una falla relacionada con el suministro energético de sus estaciones sensoras.

## 6.2 Trabajos Futuros

En el corto o mediano plazo se propone como trabajo futuro la instalación de una celda de combustible como un proyecto piloto en una de las estaciones repetidoras del SASO. Otro trabajo futuro es evaluar otras tecnologías para el suministro con los sistemas híbridos, donde se pueda aprovechar los recursos renovables como sol y viento. Para esto será necesario realizar estudios donde se puedan medir las velocidades del viento y recabar información histórica de las regiones del Estado de Oaxaca, donde se presentan las mejores cantidades de radiación solar.

Trabajos futuros deberán realizar la simulación de sistemas híbridos integrados por un sistema fotovoltaico, micro-generadores eólicos, electrolizador y celdas de combustible. La integración de un sistema como éste requerirá el estudio del comportamiento dinámico de cada elemento, para obtener el mejor modelo de control que permita al sistema operar con la máxima eficiencia.

Otra área de interés y posible nicho de investigaciones futuras son estudiar nuevos procesos de obtención de hidrógeno, que resulten ser viables en la implementación de un sistema híbrido para el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano, el cual se podrá instalar no sólo es una estación de campo, sino que además se podrá implementar en una central de registro donde puede ser aprovechado al máximo un sistema de celdas de combustible.

Como trabajo futuro inmediato está la documentación resumida del presente trabajo y presentarla en los foros correspondientes como: conferencias, mesas redondas y espacios donde se pueda dar a conocer el presente trabajo realizado que ayude a promover nuevas formas de alimentar el suministro eléctrico en estaciones de comunicaciones que necesiten estar siempre en operación.

## El centro de instrumentación y registro Sísmico

### 1. Antecedentes.

El Centro de instrumentación y Registro sísmico A.C. creado en junio de 1986, bajo el auspicio de la Fundación Javier Barros Sierra, A.C. tiene como objetivos principales la investigación y desarrollo tecnológico de instrumentación sísmica de alta calidad.

Entre las actividades y servicios que esta institución presta a organismos gubernamentales, académicos y de investigación, así como empresas privadas, se pueden mencionar: Implantación, operación y servicio de redes acelerográficas en suelos y en estructuras, además de procesamiento de información acelerográfica recabada a través de registros históricos.

Uno de los primeros sistemas de alerta creados por el CIRES es el Sistema de Alerta Sísmica (SAS) para la Ciudad de México es un sistema público de advertencia temprana, útil para reducir el alcance negativo del desastre que pueda causar el efecto de un sismo fuerte proveniente de las costas de Guerrero. El SAS funciona desde agosto de 1991 y el 14 de septiembre de 1995 alertó con 72 segundos de anticipación a poco más de 4 millones de personas sobre la llegada del efecto del sismo M7.3 de Copala Gro.

El SAS de la Ciudad de México consiste de un subsistema Sismo-Detector formado con doce Estaciones Sensoras de Campo, implantadas a lo largo de la costa de Guerrero entre Papanoa y Punta Maldonado, capaces de evaluar parámetros sísmicos y de pronosticar la magnitud del evento en desarrollo. El SAS transmite automáticamente avisos de alerta “Preventiva” cuando pronostica que la magnitud del sismo en desarrollo será moderada, magnitud menor a 6 y alerta “Pública”, cuando pronostica que el sismo será fuerte, de magnitud mayor a seis.

Actualmente se está trabajando en instrumentar los estados de Jalisco, Veracruz y Puebla, además de interconectar con el actual sistema de Oaxaca, pues los sismos generados en estos estados son perceptibles en la Ciudad de México y sus alrededores, por lo que es necesario contar con una red de alertamiento temprano que opere de manera oportuna sin importar donde se genere el evento.

Desde su creación el Centro se ha preocupado por desarrollar diferentes sistemas de alerta, destacando:

### 2. Sistema Acelerométrico Digital para Estructuras SADE

El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A.C. desarrollo el SADE en 2003, capaz de registrar efectos de sismos fuertes en puntos seleccionados en las estructuras de los edificios. Cuando una estructura se somete a la acción de aceleraciones sísmicas, la medida



de sus efectos provee información útil para estudiar y evaluar su respuesta dinámica así, como la posible evolución de su comportamiento.

El sistema es capaz de iniciar el registro cuando las aceleraciones sísmicas superen los niveles de activación preestablecidos o cuando se capte una señal de activación externa. Opcionalmente esta activación puede ser generada por el Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México (SAS), cuando éste detecte el inicio de un sismo fuerte con epicentro en la costa de Guerrero, entre Petatlán Guerrero y Punta Maldonado Oaxaca.

El SADE dispone de una señal de referencia de tiempo exacto, generado por un receptor del sistema de posicionamiento global satelital (GPS), que se utiliza para fechar los registros obtenidos por el sistema para estudiar las fases del movimiento. El almacenamiento eventual de la información se realiza en una central de registro y control (CRC), donde los sensores envían sus datos a través de una red Ethernet.

El SADE almacena las señales medidas en los sensores, realiza los cálculos y envía los informes cuando la aceleración mediada en los sensores seleccionados rebasa un nivel de activación previamente definido. Este nivel se determina mediante la observación del comportamiento de la estructura con la excitación de los movimientos normales del suelo debido a paso de vehículos pesados y a la acción del viento sobre la estructura, este ajuste se optimiza con la respuesta del edificio ante los sismos que se van registrando. Los acelerómetros dispuestos en la estructura transmiten su información a la CRC mediante una red de datos digitales y éste a su vez, retransmite la información a través de internet, a un servidor de datos externo para respaldar la información.

Ventajas:

El SADE se puede aprovechar para:

- i. Conocer y analizar la respuesta dinámica de la estructura.
- ii. Conocer los posibles cambios en la rigidez, si las posibles fuerzas sísmicas superan la resistencia del edificio.
- iii. Recaudar el histórico de las aceleraciones durante un evento sísmico, además de obtener la distribución y nivel de energía asociada a cada frecuencia.
- iv. Calcular el cociente de espectros entre dos puntos seleccionados (función de transferencia) y comparar para cada evento sísmico la evolución del comportamiento de la estructura.
- v. Enviar automáticamente los resultados a los expertos y responsables de la seguridad estructural, para decidir sobre la conveniencia de continuar laborando en el inmueble o inicia la evacuación para inspeccionar las condiciones de integridad del edificio.

### 3. Red Acelerográfica de la Ciudad de México

En 1987 el CIRES inició el desarrollo de la Red Acelorográfica de la Ciudad de México, RACM que cuenta con 78 aparatos, 29 equipos SSA-1 Kinemetrics, instalados originalmente por la FICA más 35 equipos DCA-333 terratech y 7 sensores subterráneos. En 1997, el 100% de los equipos Terra Technology fueron renovados con el sistema de registro digital RAD-851, desarrollado en el CIRES para asegurar la función de este recurso tecnológico y dar continuidad a su servicio de medición acelerométrica.

Los acelogramas sísmicos se difunden para promover actividades de investigación sobre factores de diseño y riesgo sísmico en la Ciudad de México; mediante la publicación de boletines, presentaciones en congresos y seminarios, así como en el grupo de instituciones que contribuyen a la conservación y actualización de la Base Mexicana de sismos Fuetes y que a la fecha a editado, con el apoyo de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, los volúmenes 1 y 2 en formato electrónico.

La continuidad del servicio de la RACM hasta junio de 2009 ha permitido captar 4,098 acelogramas, medidos durante los efectos de 168 sismos. Este acervo de acelogramas acumula poco más de 124 horas de información acelerométrica.

Actualmente el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A.C. mantiene cercana colaboración con instituciones interesadas en poder medir y evaluar los sismos que puedan llegar a afectar sus comunidades. Como el caso de Japón que actualmente se encuentran trabajando en su propio sistema de alertamiento temprano en caso de terremotos.

El Centro de Instrumentación y Registro A.C. es miembro del consejo de Protección Civil del Distrito Federal y también está inscrito en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del CONACyT y es miembro de Comité Consultivo Técnico. Se tienen en puerta nuevos proyectos que permitirán que el sonido de la alerta oficial, llegue a muchos más oídos y ayude a salvar potencialmente miles de vidas.

### 4. Formación de Recursos Humanos

Con el objeto de promover la formación de recursos humanos especializados, el centro organiza seminarios, cursos, conferencias y eventos que le permitan la divulgación de conocimientos sobre la medición de fenómenos sísmicos. Al mismo tiempo realiza proyectos con relación a todo el trabajo que se desarrolla en el centro, con la participación de estudiantes de ingeniería que desempeñen su servicio social y desarrollen trabajos que les sirvan como tema de tesis profesional.