

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**FUNDAMENTOS DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR  
MEDIO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE UTILIZANDO HIDRÓGENO**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR**

**FELIPE ARNOLDO ROBLES SICAL  
ASESORADO POR ING. FELIPE ARNOLDO ROBLES GONZALEZ**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**GUATEMALA, ABRIL DE 2005**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>VOCAL I</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>VOCAL II</b>	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
<b>VOCAL III</b>	Ing. Julio David Galicia Celada
<b>VOCAL IV</b>	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
<b>VOCAL V</b>	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Erwin Efraín Segura Castellanos
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Julio Cesar Solares Peñate
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **FUNDAMENTOS DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE UTILIZANDO HIDRÓGENO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 26 de agosto de 2003. **Ref. EIME 136.2003**

**Felipe Arnoldo Robles Sical**

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS**

Jehová, creador del universo, por darme vida, por ser mi guía en todo momento, por iluminar el camino para alcanzar mis metas, por darme fuerza y aliento en los momentos difíciles y por proveerme de una familia que siempre me apoya.

### **A MIS PADRES**

Felipe Arnoldo Robles Gonzáles y Lydia Estela Sical de Robles, por sus esfuerzos y su apoyo para alcanzar este momento en mi vida, por inculcar en mí los principios y valores que todo hombre sabio debe seguir, por la gran confianza que depositaron en mí. Que esto sea una pequeña recompensa por todo lo anterior y quiero decirles que los quiero mucho, que Dios los bendiga.

### **A MI HERMANITA**

Evelyn Carolina, porque siempre has sido muy especial, por todo el amor y los consejos que me has dado, por alentarme en todo momento para seguir adelante.

### **A MI ASESOR Y PADRE**

Ing. Felipe Arnoldo Robles González, por ser para mí el ejemplo a seguir, por asesorarme en la elaboración del presente trabajo; porque ha sido un ejemplo en mi formación como profesional, por todas sus aportaciones, colaboraciones y tiempo dedicado en el desarrollo de este trabajo de graduación.

**A MI VISABUELITA** Clara Luz Camey de Gonzalez (Q.E.P.D.), por sus sabios consejos y amor que mantengo presente en cada momento de mi vida.

**A MIS ABUELITOS** Fausto Arnoldo Robles y Virginia de Robles, por el amor, los consejos y el apoyo que me han brindado en todo momento de mi vida.  
Felipe de Jesús Sical (Q.E.P.D) y María Joaquina de Sical, por el amor y consejos que me han dado.

**A MI TIOS (AS)** Con mucho cariño, a Debora, Joel, Samuel, Yoly, Loida, Juanita, Paty y Julio.

**A MIS PRIMOS** Maria José, Astrid, Maria Inés, Christopher, Pablo, Andrés, Mónica, Maria Andrea, Sergio, Josué, Cristian, Joseline, Jennifer, Samy, Steve, Alondra, Joelis y Sofy.

**A MIS AMIGOS** A todos mis amigos y compañeros de la universidad, que de alguna u otra forma me ayudaron para salir adelante y por todo el cariño que me han brindado.

**A MIS CENTROS DE ENSEÑANZA** Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Colegio Nacional Americano

## **AGRADECIMIENTOS**

- A DIOS** Por darme la vida, por darme sabiduría y mostrarme el camino correcto de la vida.
- A MIS CATEDRÁTICOS** Por las enseñanzas que me impartieron.
- A ING.  
FELIPE ROBLES** Por las enseñanzas impartidas, por asesorarme en la elaboración de mi Tesis, por el tiempo dedicado en el desarrollo de este trabajo de graduación, por el apoyo brindado en toda mi formación profesional y por ser mi ejemplo a seguir.
- A ING.  
GUSTAVO OROZCO** Por las enseñanzas impartidas, por su apoyo como catedrático, por haber formado parte del Jurado Examinador en el Examen General Privado, por el tiempo dedicado en el desarrollo de este trabajo de graduación, por su amistad y por ser un buen amigo.
- A ING.  
FRANCISCO GONZÁLEZ** Por las enseñanzas impartidas, por su apoyo como catedrático, por su amistad y por ser un buen amigo.

**A ING.**

**EDWIN RODAS**

Por su apoyo, por sus consejos, por su amistad y por ser un buen amigo.

**A ING.**

**CARLOS MAZARIEGOS**

Por su apoyo, por sus consejos, por su amistad y por ser un buen amigo.

**A ING.**

**WALDEMAR NUFIO**

Por su apoyo, por sus sabios consejos, por guiarme en mi formación como profesional, por su amistad y por ser un buen amigo.

**A ING.**

**ERWIN SEGURA**

Por su apoyo, por sus consejos, por su amistad, por haber formado parte del Jurado Examinador en el Examen General Privado y por ser un buen amigo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	X
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXIV
1. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO.....	1
1.1. Estructura atómica.....	1
1.1.1. Composición de otros combustibles.....	2
1.2. Propiedades físicas.....	4
1.2.1. Estado.....	4
1.2.2. Olor, color y sabor.....	6
1.2.3. Toxicidad.....	6
1.2.3.1. Asfixia.....	6
1.2.3.2. Otros gases que acompañan al hidrógeno.....	7
1.2.3.2.1. Monóxido de carbono.....	7
1.2.4. Densidad y medidas relacionadas.....	8
1.2.4.1. Densidad.....	8
1.2.4.2. Volumen específico.....	9
1.2.4.3. Gravedad específica.....	10
1.2.4.4. Relación de expansión.....	11
1.2.4.5. Contenido de hidrógeno.....	12
1.2.5. Fugas.....	12
1.3. Propiedades químicas.....	13

1.3.1. Reactividad.....	13
1.3.1.1. Químicos derivados de las reacciones de combustible.....	15
1.3.2. Energía.....	16
1.3.2.1. Contenido de energía.....	16
1.3.2.2. Densidad de energía.....	17
1.3.3. Inflamabilidad.....	19
1.3.3.1. Punto de encendido.....	19
1.3.3.2. Rango de inflamación.....	21
1.3.3.3. Temperatura de autoencendido.....	22
1.3.3.4. Energía de ignición.....	23
1.3.3.5. Velocidad de quemado.....	23
1.3.3.6. Características de las llamas.....	24
1.4. Leyes de los gases.....	25
1.4.1. Presión.....	26
1.4.2. Volumen.....	26
1.4.3. Ley de Boyle, presión contra volumen.....	26
1.4.4. Ley de Charles, temperatura contra volumen.....	27
1.4.5. Ley ideal de los gases, presión, temperatura y volumen.....	28
1.5. Parámetros clave de ingeniería y su medida.....	30
1.5.1. Presión.....	30
1.5.1.1. Unidades de presión.....	31
1.5.2. Temperatura.....	31
1.5.2.1. Unidades de temperatura.....	32
1.5.3. Volumen y capacidad.....	32
1.5.4. Masa y peso.....	32
1.5.5. Flujo de masa.....	33
2. USO DEL HIDRÓGENO.....	35
2.1. Fabricación del hidrógeno.....	35
2.1.1. Electrólisis.....	37

2.1.2. Reformar.....	42
2.1.3. Descomposición termoquímica del agua.....	44
2.1.4. Foto conversión.....	46
2.1.5. Proceso fotobiológico.....	46
2.1.6. Producción de biomasa.....	46
2.1.7. Conversión termoquímica.....	47
2.1.8. Digestión anaeróbica.....	48
2.1.9. Procesos industriales.....	48
2.2. Almacenamiento de hidrógeno.....	49
2.2.1. Gas a alta presión.....	51
2.2.2. Líquido.....	52
2.2.3. Metales hídridos.....	55
2.2.4. Otros métodos de almacenamiento.....	56
2.2.4.1. Absorción de carbono.....	57
2.2.4.2. Microesferas de cristal.....	57
2.2.4.3. Oxidación del hierro.....	57
2.3. Transporte del hidrógeno.....	58
2.3.1. Tubería.....	58
2.3.1.1. Tuberías de gas.....	58
2.3.1.2. Tuberías de hidrógeno líquido.....	59
2.3.2. Transporte móvil.....	59
2.3.2.1. Transporte de gas de hidrógeno.....	60
2.3.2.2. Transporte de hidrógeno líquido.....	60
3. HIDRÓGENO USADO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	61
3.1. Motores de hidrógeno.....	61
3.2. Propiedades de combustión del hidrógeno.....	62
3.2.1. Ancho rango de inflamabilidad.....	62
3.2.2. Poca energía para encendido.....	63
3.2.3. Pequeñas distancias de extinción.....	63

3.2.4. Altas temperaturas de auto encendido.....	64
3.2.5. Alta velocidad de llama a relación estequiométrica.....	64
3.2.6. Alta difusión.....	65
3.2.7. Baja densidad.....	65
3.3. Relación aire/combustible.....	65
3.4. Problemas de pre-encendido y sus soluciones.....	67
3.4.1. Sistemas de alimentación de combustible.....	68
3.4.1.1. Inyección central.....	68
3.4.1.2. Sistema con puerto de inyección.....	69
3.4.1.3. Sistema de inyección directa.....	69
3.4.2. Dilución térmica.....	70
3.4.3. Diseño del motor.....	70
3.5. Sistemas de encendido.....	71
3.5.1. Ventilación del carter del cigüeñal.....	72
3.6. Eficiencia térmica.....	73
3.6.1. Emisiones.....	74
3.7. Potencia de salida.....	75
3.8. Mezclas de gas de hidrógeno.....	76
4. TECNOLOGÍA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	79
4.1. Uso de la tecnología de la celda de combustible.....	79
4.1.1. Historia.....	79
4.1.2. Ventajas de la celda de combustible.....	80
4.1.3. Desventajas de la celda de combustible.....	85
4.1.4. Aplicaciones.....	87
4.1.4.1. Plantas de generación de energía eléctrica estacionarias.....	88
4.1.4.2. Submarinos.....	88
4.1.4.3. Autobuses.....	89
4.1.4.4. Automóviles.....	89
4.1.4.5. Sistemas de potencia portátiles.....	90

4.2. Principio de funcionamiento.....	90
4.2.1. Celdas galvánicas.....	92
4.2.2. Las celdas de combustible.....	96
4.2.2.1. Comparación entre las celdas de combustible y las baterías.....	98
4.2.2.2. Comparación entre las celdas de combustible y los motores de combustión interna.....	99
4.3. Tipos de celdas de combustible.....	100
4.3.1. Celdas de combustible de carbonato fundido.....	103
4.3.1.1. Ventajas y desventajas.....	103
4.3.1.2. Reacción.....	105
4.3.2. Celdas de combustible de óxido sólido.....	106
4.3.2.1. Ventajas y desventajas.....	107
4.3.2.2. Reacción.....	109
4.3.3. Otras celdas de combustible.....	111
4.3.3.1. Celdas de combustible alcalinas.....	111
4.3.3.1.1. Ventajas y desventajas.....	112
4.3.3.1.2. La reacción.....	113
4.3.3.2. Celdas de combustible de ácido fosfórico.....	115
4.3.3.2.1. Ventajas y desventajas.....	116
4.3.3.2.2. La reacción.....	117
4.3.3.3. Celdas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM).....	118
4.3.3.3.1. Ventajas y desventajas.....	120
4.3.3.3.2. La reacción.....	121
4.3.3.4. Celdas de combustible PEM usando directamente metanol.....	122
4.4. Construcción de una apilación conectando en serie varias celdas de combustible con membrana de intercambio de protones PEM.....	123

4.4.1. Ensamblaje de electrodos y membrana (MEA Membrane Electrode Assembly).....	125
4.4.2. Electrodos.....	125
4.4.3. Electrolito.....	126
4.4.4. Placas de flujo de campo.....	127
4.4.5. Humedecedores.....	129
4.5. Desempeño de la celda de combustible PEM.....	131
4.5.1. Eficiencia.....	131
4.5.1.1. La eficiencia de la aplicación de celdas de combustible...	131
4.5.1.2. Eficiencia del sistema con celdas de combustible.....	135
4.5.2. Características de polarización.....	138
4.5.2.1. Polarización de activación.....	140
4.5.2.2. Polarización Óhmica.....	140
4.5.2.3. Polarización de concentración.....	141
4.5.3. Características de Potencia Eléctrica.....	141
4.5.4. Efectos de la temperatura y de la presión.....	142
4.5.4.1. Presión.....	143
4.5.4.2. Temperatura.....	145
4.5.4.3. Efectos estequiométricos.....	147
4.5.5. Efectos de la humedad.....	148
5. SISTEMAS DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	151
5.1. Descripción de los sistemas.....	151
5.1.1. Sistema de aire.....	152
5.1.2. Sistema de almacenamiento de combustible.....	154
5.1.2.1. Circuito de llenado de combustible.....	156
5.1.2.2. Cilindros de almacenamiento de hidrógeno.....	156
5.1.2.3. Circuito de alta presión.....	157
5.1.2.4. El circuito de impulso de presión .....	157
5.1.3. Sistema de reparto de combustible.....	158

5.1.3.1.	Circuito de reparto de combustible.....	159
5.1.3.2.	Circuito de depuración.....	160
5.1.4.	Sistema de humidificación.....	161
5.1.4.1.	Humidificación.....	161
5.1.5.	Sistema de enfriamiento.....	163
5.1.5.1.	Circuito principal de refrigerante.....	165
5.1.5.2.	Circuito de desvío para filtrado.....	165
5.1.6.	Sistema de lubricación.....	167
5.1.7.	Sistema hidráulico.....	168
5.1.7.1.	Circuito de ventiladores del radiador.....	170
5.1.7.2.	Circuito de dirección.....	170
5.1.8.	Sistema eléctrico.....	171
5.1.9.	Sistema de control.....	173
5.1.9.1.	Control del motor.....	173
5.1.9.2.	Control del vehículo.....	174
5.1.9.3.	Adquisición de datos.....	175
5.1.10.	Sistema de detección de fugas.....	175
5.1.10.1.	Sensores de fugas.....	175
5.1.10.2.	Indicadores de fuga y caja de unión.....	176
5.1.11.	Sistema de supresión de incendios.....	177
6.	SEGURIDAD DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	179
6.1.	Hidrógeno.....	179
6.1.1.	Fugas de hidrógeno.....	179
6.1.1.1.	Detección de fugas de hidrógeno.....	181
6.1.1.2.	Como detener las fugas de hidrógeno.....	183
6.1.2.	Incendio por hidrógeno.....	184
6.1.2.1.	Detección de incendios por hidrógeno.....	184
6.1.2.2.	Como extinguir un incendio con hidrógeno.....	185
6.1.3.	Peligro con las temperaturas bajas.....	185

6.2. Altas temperaturas.....	186
6.3. Presión alta.....	187
6.4. Choque eléctrico.....	188
6.5. Monitor de falla a tierra.....	189
6.6. Físicos.....	190
7. CÓMO TRABAJA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	191
8. PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADA EN CELDA DE COMBUSTIBLE.....	197
8.1. Componentes de una planta de generación de energía eléctrica basada en celdas de combustible.....	197
8.1.1. Apilación de celdas de combustible.....	197
8.1.2. Electrolito.....	198
8.1.3. Electrodo.....	198
8.1.4. Catalizador.....	198
8.1.5. Colectores de corriente.....	199
8.1.6. Ensamblaje membrana electrodo (MEA).....	199
8.1.7. Placas separadoras o placas bipolares.....	199
8.1.8. Tubos de unión (colectores).....	199
8.1.9. Intercambiadores de calor.....	201
8.1.9.1. Hay varios tipos de intercambiadores de calor.....	201
8.2. Procesamiento típico del combustible.....	201
8.2.1. Reformador.....	201
8.2.2. Reformación con vapor.....	202
8.2.3. Oxidación parcial.....	202
8.2.4. Autotérmico.....	202
8.3. Conversión de potencia y electrónica.....	202
8.3.1. Cualidades de los dispositivos electrónicos que se utilizan en las plantas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible.....	203

8.4. Requerimientos de los dispositivos electrónicos utilizados en las plantas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible.....	203
8.5. Componentes auxiliares y de soporte.....	204
8.5.1. Filtros.....	204
8.5.2. Empaques y sellos.....	205
8.5.3. Válvulas.....	206
8.5.4. Boquillas de rociado.....	208
9. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	209
9.1. Generación de energía eléctrica con plantas estacionarias.....	210
9.2. Generación de energía eléctrica distribuida.....	212
9.3. Aplicaciones de las celdas de combustible en.....	214
9.3.1. Transporte móvil.....	214
9.3.2. Energía portátil.....	216
CONCLUSIONES.....	217
RECOMENDACIONES.....	221
BIBLIOGRAFÍA.....	223

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Relación de expansión del hidrógeno de líquido a gaseoso	11
2	Resultado de un estudio hecho calculando el dióxido de carbono emitido en 1000 km de viaje en vehículo	37
3	Una celda típica para la electrólisis	39
4	Proceso de transformaciones de energía basado en combustibles fósiles	42
5	Transformaciones de energía comparativas	83
6	Cómo funciona una celda galvánica	94
7	Celdas de combustible	97
8	Celdas de combustible alcalinas	112
9	Celdas de combustible de ácido fosfórico	115
10	Celda de combustible PEM	119
11	Curva típica de polarización de una celda de combustible PEM	138
12	Curva de potencia típica de una celda de combustible PEM	141
13	Curvas de variación de la polarización	143
14	Efecto de la temperatura en el voltaje de la celda de combustible	146
15	Efectos estequiométricos en las celdas de combustible	148
16	Diagrama de flujo de un sistema de aire	154
17	Diagrama de flujo de un sistema de almacenamiento de combustible	155
18	Diagrama de flujo del sistema de reparto de combustible	159
19	Diagrama de flujo del sistema de humidificación	162
20	Diagrama de flujo del sistema de enfriamiento	164

21	Diagrama de flujo del sistema de lubricación	168
22	Diagrama de flujo del sistema hidráulico	169
23	Diagrama de flujo del sistema eléctrico para aplicaciones en vehículos	172
24	Diagrama de flujo del sistema de control	174
25	Diagrama de flujo del sistema de detección de fugas	176

## **TABLAS**

I	Densidades de vapor y líquidas de sustancias comparables	9
II	Valores caloríficos de combustibles comparables	16
III	Densidades de energía de combustibles comparables	18
IV	Puntos de encendido de combustibles comparables	20
V	Temperatura de autoencendido de combustibles comparables	22
VI	Volumen de almacenamiento y peso de varios combustibles con 1,044,500 kJ de energía almacenado	50



## GLOSARIO

Aparato	Cualquier dispositivo que utiliza energía para producir luz, calor, potencia mecánica, refrigeración o aire acondicionado.
Aparato para Cogeneración	Es un aparato auto contenido que utiliza combustible para generar energía eléctrica y energía térmica.
Asfixia	Cese de la respiración por defecto de oxigenación de la sangre, causada por la presencia de gases tóxicos en el ambiente o por la obstrucción mecánica y accidental de las vías respiratorias.
Catalizador	Son las sustancias que actúan sobre la velocidad de reacción sin cambiarla químicamente. Permite el rápido apareamiento del hidrógeno atómico en pares en la superficie del electrodo para incrementar la proporción de producción de hidrógeno. Sin el catalizador, el hidrógeno atómico se formaría sobre el electrodo y bloquearía el flujo de corriente.
Celda de Combustible	Es un dispositivo de conversión de energía que convierte la energía química del combustible directamente en electricidad sin ningún proceso

térmico o mecánico intermedio.

Área activa. Es la superficie de una celda individual que esta disponible para la reacción química. El área activa es generalmente menor que el área total de la celda que acomoda los mecanismos de refrigeración, distribución y de sellado.

Componentes. Son las subestructuras dentro de la celda que sostienen la reacción, proveen la estructura física, reciben y distribuyen los reactantes, remueven productos, disipan calor y desempeñan otras funciones necesarias para la operación de la celda.

Refrigerante. Es una sustancia líquida o gaseosa provista dentro o alrededor de la celda para remover el calor producido por la operación de la celda y para mantener la temperatura optima de la celda.

Vida útil. Es el tiempo que una celda puede ser utilizada produciendo una cantidad de potencia útil.

Densidad de potencia. Es la cantidad de potencia producida por unidad de medida.

## Cogeneración

Es la producción simultánea en el lugar de energía eléctrica y calor producida por la misma fuente de potencia.

Combustión	Es la oxidación rápida del combustible acompañada por una producción de calor o de calor y luz.
Deflagración	Es una combustión explosiva, gradual y menos violenta que la detonación.
Electrón	Se abrevia e-, es una partícula que posee una carga unitaria relativa que es negativa y una masa de $9.109 \times 10^{-28}$ g.
Electrólisis	Es el proceso de extraer el hidrógeno del agua. La principal característica de la electrólisis es que puede ser totalmente no contaminante y utiliza recursos renovables, pero esto requiere una gran cantidad de energía eléctrica.
Electrolito	Es un compuesto fundido o su disolución acuosa que es conductor de una corriente eléctrica. Es una sustancia que conduce iones.
Electrolizador	Es una serie de celdas cada una con un electrodo positivo y negativo.
Energía de ignición	Es la cantidad de energía externa que debe ser aplicada para encender una mezcla de combustible.
Estequiometría	Estudio y medida de las proporciones de peso o de volumen en que reaccionan y se combinan los elementos químicos para formar un compuesto.

Factor de disponibilidad	Es la relación (%) de horas de operación de una fuente de potencia (el número de horas que una fuente de potencia opera y produce potencia) dividido entre el número de horas del período considerado.
Generación distribuida	Es cualquier tecnología de generación de energía eléctrica en pequeña escala, que provee de potencia eléctrica en o cerca del sitio de consumo.
Hidrido	Compuesto binario de hidrógeno con un elemento.
Ion	Es un átomo o un grupo de átomos que han adquirido una carga eléctrica a través de la pérdida o la ganancia de uno o más electrones.
Isótopos	Son átomos del mismo elemento que poseen pesos distintos. Son átomos que tienen diferentes masas atómicas o números de masa, pero el mismo número atómico.
LFL	El LFL de un gas es la concentración de gas más baja que podrá sostener una llama autopropagada cuando se mezcla con aire y enciende. Abajo del LFL, no hay presente combustible suficiente para sostener una combustión, la mezcla de combustible y aire es muy pobre.
Mezcla estequiométrica	Una mezcla estequiométrica ocurre cuando las

moléculas de oxígeno e hidrógeno están presentes en la relación exacta necesaria para completar la relación de combustión.

Mol	Es la unidad que emplean los químicos para expresar números de átomos, iones o moléculas. Es la cantidad de sustancia que contiene el mismo número de partículas elementales (átomos, moléculas, iones o unidades de iones) que contienen 12 g de carbono 12.
Neutrón	Se abrevia n, es una partícula neutra que no tiene carga y cuya masa es de $1.6748 \times 10^{-24}$ g.
Ortohidrógeno	Son moléculas de hidrógeno en las que ambos protones tienen el mismo giro o spin.
Oxidación	Es una reacción en la que una sustancia se combina con el oxígeno.
Parahidrógeno	Son moléculas de hidrógeno en las cuales ambos protones tienen diferente giro o spin.
Potencia Auxiliar	Es potencia que proviene de una fuente independiente, que funciona cuando se necesita alimentar cargas según los criterios de desempeño establecidos para el funcionamiento de la planta de generación de energía eléctrica y la fuente de

potencia primaria.

Protón	Se abrevia p, es una partícula que tiene una carga unitaria relativa que es positiva y una masa de $1.6726 \times 10^{-24}$ g.
Punto de encendido	El punto de encendido está definido como la temperatura a la cual el combustible produce vapor suficiente para formar una mezcla con el aire, encendible, en su superficie.
Reacción química	Una reacción química ocurre cuando las moléculas de combustible forman enlaces con el oxígeno (del aire) y así al final, la molécula que reacciona está a un nivel de energía más bajo que la molécula inicial sin reaccionar. Como la molécula reacciona, el cambio de estado de la energía química está acompañado de una correspondiente liberación de energía que nosotros podríamos aprovechar para realizar trabajo útil. Todos los átomos presentes al inicio de la reacción están presentes también al final de la reacción, aunque están reorganizados en moléculas diferentes.
Reformación	Es el proceso de extraer el hidrógeno de los combustibles fósiles. Es el proceso químico que hace reaccionar el contenido de hidrógeno de los combustibles en presencia del vapor, oxígeno o ambos en un flujo de gas rico en hidrógeno. La

		mezcla de gas rica en hidrógeno resultante es llamada reformado.
Reformación interna Directa		Es la producción de un producto deseado (hidrógeno) dentro de la celda de combustible derivado de un combustible hidrocarburo (metanol, gasolina, etc.) que alimenta la celda de combustible.
Spin		Cada protón en un par molecular de hidrógeno tiene un campo asociado al que puede ser visualizado y descrito matemáticamente como un giro o spin.
Temperatura autoencendido	de	Es la temperatura mínima requerida para iniciar una combustión autoencendida con una mezcla de combustible en ausencia de una fuente de ignición o encendido.
Temperatura de ignición		Para que se lleve a cabo la combustión se necesita una temperatura mínima llamada temperatura de ignición.
Temperaturas criogénicas		Son temperaturas muy bajas, debajo de $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los líquidos a estas temperaturas se conocen como líquidos criogénicos.
UFL		El UFL de un gas es la concentración de un gas más alta que podrá sostener una llama autopropagada cuando se mezcla con aire y enciende. Sobre el UFL, no hay presente oxígeno suficiente para sostener una combustión, la mezcla de combustible

y aire es muy rica.

Unidad térmica  
británica

La unidad térmica británica (BTU) es 1/180 del calor requerido para elevar la temperatura de una libra de agua de 32 °F a 212 °F a presión atmosférica constante. Es aproximadamente igual a a cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de una libra de agua 1 °F.

Valor calorífico

El valor calorífico alto y bajo representa una cantidad de energía en joules por unidad de masa de combustible en kilogramos.

## RESUMEN

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico, la energía química del combustible se convierte directamente en energía eléctrica con gran eficiencia.

Las celdas de combustible van más allá de la ruta común de la producción tradicional de electricidad en las plantas modernas de generación de energía eléctrica, la cual consiste en obtener calor a base del combustible, convertir este calor en energía mecánica y finalmente transformar esta energía mecánica en energía eléctrica.

Ya que la generación de energía eléctrica con celdas de combustible es obtenida directamente de la reacción química, la eficiencia que alcanza una celda de combustible puede ser muy elevada, además al no tener partes en movimiento son muy silenciosas.

Debido a que las celdas de combustible no usan la combustión como mecanismo de generación de energía, son prácticamente no contaminantes. El futuro de la generación de energía eléctrica es inimaginable, sin ellas. Entonces las celdas de combustible son consideradas como el candidato principal para producción de energía eléctrica ecológica, por ser limpias, silenciosas y eficientes. Aún cuando su arribo al escenario popular es relativamente reciente, las celdas de combustible han iniciado a ser comercializadas y utilizadas en aplicaciones estacionarias, tales como edificios, plantas de generación de energía eléctrica, en aplicaciones móviles como en transporte terrestre, y en aplicaciones portátiles.

Con las celdas de combustible se produce directamente electricidad con una alta eficiencia mediante el uso de químicos, que generalmente son hidrógeno y oxígeno sin existir combustión, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible y el oxígeno como oxidante. También pueden ser utilizados otros tipos de combustibles que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diesel, entre otros.

Las celdas de combustible funcionan bajo el principio de intercambio de carga electroquímica entre una placa positiva y una negativa. Cuando se utiliza hidrógeno como combustible se produce electrolisis inversa, dando agua y calor como subproductos sin producir contaminantes y convirtiendo directamente energía química en eléctrica.

La celda de combustible está compuesta por un ánodo, un cátodo y un electrolito. Sin embargo, siendo la oxidación del hidrógeno igual para todos los tipos de celdas de combustible, por su variedad de combustible, los materiales usados en las celdas de combustible son muy variados. Los diferentes tipos de celdas de combustible se caracterizan generalmente por el material de su electrolito y del combustible utilizado.

# OBJETIVOS

- **General**

Efectuar un estudio de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrógeno.

- **Específicos**

1. Estudiar las ventajas y desventajas de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrógeno respecto de los métodos convencionales.
2. Determinar los principios mediante los cuales trabajan las celdas de combustible.
3. Comparar las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de celdas de combustible.
4. Analizar la construcción de las celdas de combustible PEM.
5. Estudiar los componentes y la funcionalidad de cada sistema de celdas de combustible.
6. Investigar acerca de los tipos de celdas de combustible.
7. Comprender el porqué de la utilización del hidrógeno en las celdas de combustible
8. Comprender las propiedades químicas y físicas de los elementos presentes en las celdas de combustible.

## INTRODUCCIÓN

Las celdas de combustible que utilizan hidrógeno convierten energía química en energía eléctrica. Los motores y las turbinas con un generador pueden hacer esto, pero las celdas de combustible son más eficientes y no crean contaminación, pues en el proceso de conversión electroquímico para producir electricidad, los únicos productos derivados de las celdas de combustible son agua y calor, y ambos se pueden utilizar nuevamente o darles aplicación; además el futuro, sin las fuentes de energía es inimaginable. Se utilizarán en automóviles, casas y donde sea requerida la energía en forma de electricidad.

Las celdas de combustible podrían ser el sueño de las compañías generadoras de electricidad, son eficientes, no hay combustión, virtualmente son fuentes de energía sin contaminación, capaces de estar situadas en zonas urbanas en el centro de la ciudad o en regiones remotas; operan casi silenciosamente y tienen pocas partes móviles.

Las celdas de combustible son más una realidad que un sueño.

Además, el hidrógeno es el elemento más simple y el más abundante que existe en el universo.

# 1. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

## 1.1. Estructura atómica

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, forma un 75% de la masa de toda la materia visible en las estrellas y las galaxias.

El hidrógeno es el más simple de todos los elementos. Se puede visualizar un átomo de hidrógeno como un núcleo central denso, con un solo electrón en su órbita, muy parecido a un solo planeta en órbita alrededor del sol. Los científicos prefieren describir al electrón como ocupando una probable nube que rodea al núcleo, en forma esférica.

En la mayoría de los átomos de hidrógeno, el núcleo consiste en un solo protón, aun y cuando existe una forma rara denominada isótopo de hidrógeno que contiene un protón y un neutrón en el núcleo. Esta forma de hidrógeno es llamada deuterium o hidrógeno pesado. Existen también otros isótopos de hidrógeno, tales como tritium que tiene dos neutrones y un protón, pero estos isótopos son inestables y decaen radiactivamente.

La mayor parte de la masa del átomo de hidrógeno está concentrada en su núcleo. De hecho, el protón tiene más de 1800 veces más masa que el electrón. El neutrón tiene casi la misma masa que el protón. De cualquier modo, el radio de la órbita del electrón, la cual define el tamaño del átomo, es aproximadamente 100,000 veces más grande que el radio del núcleo. Claramente, el átomo de hidrógeno consiste principalmente de espacio vacío.

Los átomos de todos los demás elementos consisten principalmente de espacio libre, son más pesados y tienen más electrones.

Un protón tiene una carga eléctrica positiva y un electrón tiene una carga eléctrica negativa. Los neutrones no tienen carga eléctrica.

Juntas, la carga del protón con la carga del electrón en cada átomo de hidrógeno se cancelan mutuamente, así los átomos individuales del hidrógeno son eléctricamente neutros.

Químicamente, el arreglo atómico de un único electrón orbitando un núcleo es altamente reactivo. Por esta razón, los átomos de hidrógeno se combinan naturalmente en pares moleculares ( $H_2$  en lugar de H). Cada protón en un par molecular de hidrógeno tiene un campo asociado a él, que puede ser visualizado y descrito matemáticamente como una rotación o spin. Las moléculas en las cuales ambos protones tienen la misma rotación son conocidas como ortohidrógeno. Las moléculas en las cuales los protones tienen diferente rotación son conocidas como parahidrógeno.

Más del 75% del hidrógeno normal a temperatura ambiente es ortohidrógeno. Esta diferencia se vuelve importante a temperaturas muy bajas donde el ortohidrógeno empieza a ser inestable y cambia a un arreglo más estable parahidrógeno, liberando calor en el proceso. Este calor puede complicar el proceso de baja temperatura del hidrógeno, particularmente cuando pasa a estado líquido.

#### 1.1.1. Composición de otros combustibles

Es natural que comparemos al hidrógeno con otros tipos de combustibles hidrocarburos con los cuales estamos más familiarizados. Todos los

combustibles hidrocarburos son combinaciones moleculares de átomos de carbono e hidrógeno. Hay miles de tipos de compuestos hidrocarburos, cada uno con una combinación específica de átomos de carbono e hidrógeno con una geometría única.

El más simple de todos los hidrocarburos es el metano, que es el principal componente del gas natural. El metano tiene la fórmula química  $\text{CH}_4$ . Otros hidrocarburos comunes son el etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). Estos son considerados hidrocarburos ligeros porque contienen menos de cinco átomos de carbono por molécula y por tanto tienen menos peso molecular (un átomo de carbono tiene casi 12 veces el peso de un átomo de hidrógeno).

La gasolina está compuesta de una mezcla de varios hidrocarburos diferentes, pero un constituyente importante es el heptano ( $\text{C}_7\text{H}_{16}$ ). La gasolina, diesel, kerosene, compuestos que hay en el asfalto, aceites pesados y ceras, son considerados hidrocarburos pesados por contener varios átomos de carbono por molécula, y por ello tienen un peso molecular alto.

Los hidrocarburos más ligeros son gases a presión y temperatura atmosférica. Los hidrocarburos más pesados, con 5 a 18 átomos de carbono por compuesto, son líquidos en condiciones ambientales y van incrementando su viscosidad con el peso molecular.

Otros combustibles químicos incluyen a los alcoholes cuyas moléculas combinan un átomo de oxígeno y uno de hidrógeno (OH) con uno o más grupos de hidrocarburos. Combustibles alcoholes comunes son metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ). Estos podrían ser mezclados con hidrocarburos para usarlos en motores de combustión interna.

## 1.2. Propiedades físicas

### 1.2.1. Estado

Todas las sustancias existen en la tierra como un gas, un líquido o un sólido. La mayoría de sustancias cambiarán de uno de estos estados a otro dependiendo de la temperatura y presión de su ambiente. En general, se puede cambiar un gas en un líquido reduciendo su temperatura, y un líquido a un sólido reduciendo la temperatura aún más. En cierto grado, un incremento de presión causará que una sustancia pase a estado líquido y se solidifique a una temperatura más alta que la requerida en otras condiciones.

El cambio de líquido a gas se conoce como ebullición y el cambio de líquido a sólido como congelamiento. En consecuencia, cada sustancia tiene una temperatura de ebullición y una temperatura de congelamiento característica (a una presión dada). Los cambios opuestos, de gas a líquido y de sólido a líquido, son conocidos como condensación y fundición respectivamente. La temperatura de condensación es la misma temperatura de ebullición y la temperatura de fundición es la misma temperatura de congelación. El proceso de condensación es también conocido como licuefacción y el proceso de congelación es también conocido como solidificación.

Las temperaturas de ebullición y de congelación son más significativas comparándolas con el cero absoluto. El cero absoluto es (0 °R; 0 K; - 459.69 °F; - 273.15 °C) es la temperatura más baja en el universo a la cual todos los movimientos moleculares se detienen.

El hidrógeno tiene el segundo punto de ebullición y fundición más bajo de todas las sustancias; el primero es el helio. El hidrógeno es un líquido debajo del punto de ebullición de 20 K (-423 °F; - 253 °C) y un sólido debajo de su punto de fundición de 14 K (- 434 °F; - 259 °C) y presión atmosférica.

Obviamente, estas temperaturas son sumamente bajas. Temperaturas debajo de -100 °F (200 K; -73 °C) son colectivamente conocidas como temperaturas criogénicas, los líquidos a estas temperaturas se conocen como líquidos criogénicos.

El punto de ebullición de un líquido es un parámetro crítico ya que define la temperatura a que se debe enfriar para ser satisfactoriamente almacenado y usado como un líquido. Los combustibles líquidos ocupan menos espacio a la hora de ser almacenados que los combustibles gaseosos y son generalmente más fáciles de transportar y manejar. Por esta razón, los combustibles que son líquidos en condiciones ambientales (como la gasolina, el diesel, el metanol y el etanol) son particularmente convenientes. Recíprocamente, los combustibles gaseosos en condiciones ambientales (como el hidrógeno y el gas natural) son menos convenientes y deben ser almacenados como un gas a presión o como un líquido criogénico.

El punto de ebullición de una sustancia pura aumenta con la aplicación de presión, hasta un punto. El propano, con un punto de ebullición de - 44 °F (- 42 °C), se puede guardar como un líquido bajo una presión moderada, aunque es un gas a presión atmosférica. A temperatura de 70 °F (21 °C), una presión mínima 7.7 bar es requerida para pasarlo a estado líquido. Desafortunadamente, el punto de ebullición del hidrógeno solo puede ser aumentado a un máximo de - 400 °F (- 240 °C) a través de la aplicación de aproximadamente 13 bar, más allá, cualquier presión adicional no tiene ningún efecto beneficioso.

El hidrógeno como combustible para vehículos puede ser almacenado ya sea como gas a alta presión o como líquido criogénico.

#### 1.2.2. Olor, color y sabor

El hidrógeno puro es incoloro, inodoro y sin sabor. Un chorro de hidrógeno debido a una fuga es casi invisible a la luz del día.

#### 1.2.3. Toxicidad

El hidrógeno no es tóxico, pero puede actuar como un simple asfixiante por desplazar el oxígeno del aire.

##### 1.2.3.1. Asfixia

Niveles del oxígeno por debajo 19.5% son biológicamente dañinos para los humanos.

Los efectos de la ausencia del oxígeno podrían causar respiraciones rápidas, disminución de la agilidad mental, disminución en la coordinación muscular, falta de juicio, disminución de todas las sensaciones, inestabilidad emocional y fatiga. A medida que va progresando, la asfixia puede causar vértigo, náusea, vómitos, desmayos y pérdida de la conciencia, hasta llegar a convulsiones, estado de coma y la muerte. En concentraciones por debajo de 12%, puede ocurrir inmediatamente la pérdida de la conciencia sin ningún síntoma de advertencia anterior.

En áreas encerradas, fugas pequeñas podrían causar poco daño, mientras que fugas grandes pueden ser un serio problema porque el hidrógeno

se esparce rápidamente para llenar el volumen del lugar. El riesgo de asfixia en áreas libres es casi despreciable debido a la alta difusión del hidrógeno.

La inhalación del hidrógeno puede dar por resultado una mezcla inflamable dentro del cuerpo. La inhalación de hidrógeno puede llevar a la pérdida de la conciencia y a la asfixia.

### **1.2.3.2. Otros gases que acompañan al hidrógeno**

Los gases que acompañan al hidrógeno cuando se deriva de reformar combustibles fósiles, son el nitrógeno, el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y otras pequeñas cantidades de otros gases; pueden también causar riesgo de asfixia al desplazar el oxígeno de algún lugar. Además, el monóxido de carbono es un gas venenoso que puede causar daños severos de salud.

#### **1.2.3.2.1 Monóxido de carbono**

La afinidad de la hemoglobina (en la sangre) para el monóxido de carbono es 200 a 300 veces mayor que la afinidad para el oxígeno. Como resultado, la inhalación de monóxido de carbono rápidamente restringe la cantidad de oxígeno en el torrente sanguíneo y causa la asfixia. La asfixia puede continuar por algún tiempo después que la víctima se traslada a un lugar ventilado, con aire fresco.

Dependiendo de los niveles y la duración de la exposición, los síntomas pueden incluir dolores de cabeza, vértigo, palpitaciones del corazón, debilidad, confusión y náusea, llevando a convulsiones, eventualmente la inconciencia y la muerte. Con repetidas exposiciones por mucho tiempo, el monóxido de carbono puede dañar el sistema nervioso central, e inducir el endurecimiento de las

arterias. Debido a que el monóxido de carbono es inodoro, incoloro y sin sabor, no hay ninguna advertencia de su presencia, solo de los síntomas que causa.

### **El monóxido de carbono es venenoso.**

El monóxido de carbono es inflamable sobre un muy amplio rango de concentración en el aire (12.5% a 74%). Como resultado, aun fugas pequeñas de monóxido de carbono tiene la capacidad de quemarse o explotar. Las fugas de monóxido de carbono en un ambiente encerrado se pueden concentrar, por lo que aumenta el riesgo de combustión o de explosión. El monóxido de carbono se quema formando una llama azul característica. La temperatura de autoignición del monóxido de carbono es 609 °C (1128 °F). El monóxido de carbono tiene casi la misma densidad que el aire y por lo tanto no se difunde elevándose.

Una mezcla de monóxido de carbono y aire es potencialmente inflamable y explosiva, y puede ser encendida por una chispa o por una superficie caliente.

#### **1.2.4. Densidad y medidas relacionadas**

El hidrógeno tiene el peso atómico más bajo que cualquier sustancia y por eso tiene muy baja densidad ya sea en su estado gaseoso o en su estado líquido.

##### **1.2.4.1. Densidad**

La densidad es medida como la cantidad de masa contenida por unidad de volumen.

Los valores de densidad sólo tienen significado a una temperatura y a una presión específica debido a que ambos parámetros afectan la compactividad del arreglo molecular, especialmente en un gas. La densidad de un gas es llamada densidad de vapor, y la densidad de un líquido es llamada densidad líquida.

**Tabla I. Densidades de vapor y líquidas de sustancias comparables**

<b>Substancia</b>	<b>Densidad de vapor (a 68°F; 20°C y 1 atm)</b>	<b>Densidad líquida (a punto normal de ebullición y 1 atm)</b>
<b>Hidrógeno</b>	(0.08376 kg/m <sup>3</sup> )	(70.8 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Metano</b>	(0.65 kg/m <sup>3</sup> )	(422.8 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Gasolina</b>	(4.4 kg/m <sup>3</sup> )	(700 kg/m <sup>3</sup> )

#### 1.2.4.2. Volumen específico

**El volumen específico es el inverso que la densidad e indica la cantidad de volumen por unidad de masa.**

Así, el volumen específico del gas de hidrógeno es 11.9 m<sup>3</sup>/kg a 20 °C y una atmósfera de presión, y el volumen específico del hidrógeno líquido es 0.014 m<sup>3</sup>/kg a -253 °C y 1 atmósfera de presión.

#### 1.2.4.3. Gravedad específica

Una manera común de expresar densidad relativa es como la gravedad específica. La gravedad específica es la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad de la sustancia base o de referencia, ambas a la misma temperatura y presión.

Para los gases, el aire (con una densidad de  $1.203 \text{ kg/m}^3$ ) es usado como la sustancia de referencia y por eso tiene una gravedad específica de 1.0 con respecto a él mismo. La densidad de otros vapores se expresa entonces como un número mayor o menor que 1.0 en relación con su densidad relativa con respecto al aire. Los gases con una gravedad específica mayor que 1.0 son más pesados que el aire; aquellos con una gravedad específica menor que 1.0 son menos pesados que el aire.

El hidrógeno gaseoso, con una densidad de  $0.08376 \text{ kg/m}^3$ , tiene una gravedad específica de 0.0696 y esto es aproximadamente 7% de la densidad del aire.

Para los líquidos, el agua (con una densidad de  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) se usa como la sustancia de referencia, así el agua tiene una gravedad específica de 1.0 con respecto a ella misma. Como con los gases, los líquidos con una gravedad específica mayor que 1.0 son más pesados que el agua, y aquellos con una gravedad específica menor que 1.0 son menos pesados que el agua.

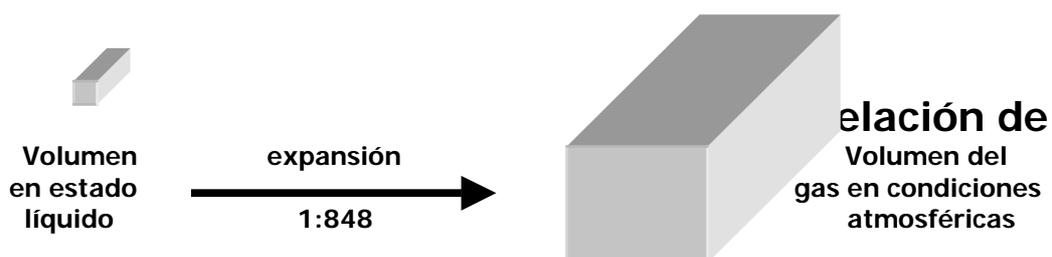
El hidrógeno líquido, con una densidad de  $70.8 \text{ kg/m}^3$ , tiene una gravedad específica de 0.0708 y así aproximadamente (y coincidentemente) 7% la densidad del agua.

#### 1.2.4.4. Relación de expansión

La diferencia en volumen entre hidrógeno líquido y gaseoso se puede apreciar fácilmente considerando su relación de expansión. La relación de expansión es la relación del volumen al cual un gas o un líquido es almacenado comparado con el volumen de un gas o un líquido a presión y temperatura ambiente.

Cuando el hidrógeno es almacenado como un líquido, se expande cuando se evapora al ser expuesto a condiciones ambientales con un correspondiente incremento de volumen. La relación de expansión del hidrógeno es de 1:848 y significa que el hidrógeno en su estado gaseoso y en condiciones ambientales ocupa 848 veces más volumen que estando en estado líquido.

**Figura 1. Relación de expansión del hidrógeno de líquido a gaseoso**



Cuando el hidrógeno es almacenado como gas a alta presión a 250 bar y temperatura ambiente, su relación de expansión a presión atmosférica es 1:240. Mientras mayor es la presión de almacenamiento mayor es la relación de

expansión, el hidrógeno gaseoso bajo cualquier condición no puede alcanzar la relación de expansión que tiene el hidrógeno líquido.

#### 1.2.4.5. Contenido de Hidrógeno

Aun como líquido, el hidrógeno no es muy denso. Irónicamente cada metro cúbico de agua contiene 111 kg de hidrógeno, mientras que un metro cúbico de hidrógeno contiene solo 71 kg de hidrógeno.

Así, el agua contiene más masa de hidrógeno por unidad de volumen, que el hidrógeno mismo, debido a la firmeza de su estructura molecular.

#### 1.2.5. Fugas

Las moléculas de hidrógeno gaseoso son más pequeñas que cualquier otro gas, y pueden difundirse a través de muchos materiales considerados herméticos a otros gases. Esta propiedad hace al hidrógeno más difícil de contener que otros gases.

Las fugas de hidrógeno se evaporan muy rápidamente debido a que el punto de ebullición del hidrógeno es sumamente bajo.

Las fugas de hidrógeno son peligrosas porque son un riesgo de incendio a la hora de mezclarse el hidrógeno con el aire. De cualquier modo, el tamaño pequeño de la molécula, incrementa la posibilidad de una fuga, también da como resultado una gran capacidad de difusión y de flotación, así el hidrógeno que se fuga se eleva y se diluye rápidamente, sobretodo en las fugas que se dan en ambientes exteriores. Esto da como resultado una región muy localizada e inflamable que puede dispersarse rápidamente.

Para pequeñas fugas de hidrógeno, los efectos de flotación y difusión en el aire son más altos por la presencia de pequeñas corrientes de aire debido a un ligero ambiente con viento disminuyendo el riesgo de inflamabilidad. En general, estas corrientes de aire sirven para dispersar las fugas de hidrógeno aun más rápidamente con una reducción más amplia de cualquier riesgo asociado a incendios.

Cuando el hidrógeno es utilizado como combustible por la propensión de tener fugas de hidrógeno se necesita un cuidado especial en el diseño del sistema de combustible para asegurar que cualquier fuga podrá dispersarse sin ningún impedimento, siendo necesario el uso de equipo especializado para la detección de fugas.

En conclusión, las fugas de hidrógeno son un riesgo potencial de incendio.

### **1.3. Propiedades químicas:**

#### **1.3.1. Reactividad**

Gran reactividad es característica de todos los combustibles químicos. Una reacción química ocurre cuando las moléculas de combustible forman enlaces con el oxígeno (del aire) y así al final, las moléculas que reaccionan están en un estado de energía más bajo que las moléculas iniciales sin reaccionar.

Conforme las moléculas reaccionan, el cambio de estado de la energía química está acompañado de una correspondiente liberación de energía que nosotros podemos aprovechar para realizar trabajo útil. Esto es verdadero tanto

para una reacción por combustión (como la que ocurre dentro de un motor de combustión interna donde la energía es liberada explosivamente como calor) o en una reacción electroquímica (como la que hay dentro de las baterías o de las celdas de combustible donde la energía es liberada como un potencial eléctrico y calor).

Esta liberación de energía química es análoga con lo que ocurre cuando fluye agua desde un nivel alto hacia un nivel bajo. El agua a un nivel alto tiene energía potencial que es liberada cuando cae a un nivel bajo. Esta energía puede represarse para realizar trabajo útil, dándole vueltas a una turbina.

Una vez en el nivel bajo, la energía es gastada y no puede hacer un trabajo más amplio a ese nivel. Para poder hacer un trabajo más amplio, esta agua debería caer a un nivel aún más bajo, o ser elevada nuevamente a un nivel alto a través de un agente externo que le inyecta energía. El ciclo natural de evaporación, condensación y precipitación que regresa el agua a un nivel alto de energía es posible por la energía solar y la energía del viento. También una bomba puede regresar el agua a un nivel alto, pero la bomba consume una correspondiente cantidad de energía.

Las reacciones químicas de este tipo a menudo requieren una pequeña cantidad de energía de activación para arrancar, pero luego la energía liberada por la reacción alimenta las reacciones futuras en efecto dominó. Así, cuando una pequeña cantidad de energía de activación en forma de chispa se le provee a una mezcla de hidrógeno y oxígeno, las moléculas reaccionan vigorosamente, liberando una cantidad sustancial de calor, con agua como producto final. Esta reacción la experimentamos como fuego o explosión, y el agua resultante se evapora y es invisible debido a que es vapor súper caliente.

Esta agua formada por la reacción de hidrógeno y oxígeno es reversible. Así, es posible convertir agua, de bajo nivel de energía, en hidrógeno y oxígeno, de alto nivel de energía, añadiéndole energía.

#### **1.3.1.1. Químicos derivados de las reacciones de combustible**

Todos los átomos presentes al inicio de la reacción están presentes también al final de la reacción, aunque están reorganizados en moléculas diferentes.

- El oxígeno reacciona con el carbono para formar monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El CO<sub>2</sub> es benigno para los seres humanos y no produce smog, pero contribuye al calentamiento global. El CO es venenoso para los humanos y limita severamente la habilidad de la sangre de transportar oxígeno a los tejidos del cuerpo.
- El oxígeno reacciona con el nitrógeno para formar óxido de nitrógeno. El óxido de nitrógeno daña el tejido pulmonar causando tos y dolor de pecho.
- **El oxígeno reacciona con el azufre para formar óxido sulfúrico. El azufre es la base de las cenizas, las cenizas grandes son visibles y pueden ser filtradas. Las cenizas pequeñas (menores que 2.5 micrones) no son visibles y se depositan en los pulmones y causan cáncer.**

**El hidrógeno es casi un combustible ideal en términos de reducción de smog. El hidrógeno no contiene carbono o azufre y por lo tanto no se crea CO, CO<sub>2</sub>, SOx y ceniza durante la combustión. El hidrógeno no es tóxico y por lo tanto el hidrógeno que no se ha utilizado para combustión**

**no es un riesgo directo para la salud. La combustión del aceite lubricante puede causar contaminación.**

El hidrógeno es un combustible ideal debido a la reducción de smog cuando se utiliza electroquímicamente en la celda de combustible, más que cuando se quema.

El hidrógeno en una celda de combustible produce cero emisiones dañinas. El óxido de nitrógeno es eliminado completamente debido a las bajas temperaturas de operación (80 °C) de las celdas. Como no hay presente aceite lubricante, no hay ninguna reacción asociada al mismo.

### 1.3.2. Energía

#### 1.3.2.1. Contenido de energía

Cada combustible puede liberar una cantidad fija de energía cuando reacciona completamente con el oxígeno para formar agua. Este contenido de energía es medido experimentalmente y es cuantificado por un valor calorífico alto (HHV) y un valor calorífico bajo (LHV) del combustible. Los valores caloríficos comparativos altos y bajos de diferentes combustibles se indican en la siguiente tabla.

**Tabla II. Valores caloríficos de combustibles comparables**

Combustible	Valor calorífico alto (HHV a 25 °C y 1 atm)	Valor calorífico bajo (LHV a 25 °C y 1 atm)
<b>Hidrógeno</b>	<b>141.86 kJ/g</b>	<b>119.93 kJ/g</b>
<b>Metano</b>	<b>55.53 kJ/g</b>	<b>50.02 kJ/g</b>
<b>Propano</b>	<b>50.36 kJ/g</b>	<b>45.6 kJ/g</b>
<b>Gasolina</b>	<b>47.5 kJ/g</b>	<b>44.5 kJ/g</b>
<b>Diesel</b>	<b>44.8 kJ/g</b>	<b>42.5 kJ/g</b>
<b>Metanol</b>	<b>19.96 kJ/g</b>	<b>18.05 kJ/g</b>

**El valor calorífico alto y bajo representan una cantidad de energía en joules por unidad de masa de combustible en kilogramos. El hidrógeno tiene la más alta relación energía peso de todos los combustibles debido a que el hidrógeno es el elemento más ligero y que no contiene átomos de carbono pesados. Esta es la razón por la cual el hidrógeno se utiliza en los programas espaciales donde el peso es crucial.**

Específicamente, la cantidad de energía liberada durante la reacción de hidrógeno, sobre una unidad base de masa, es aproximadamente 2.5 veces el calor de combustión de los combustibles hidrocarburos comunes (gasolina, diesel, metano, propano, etc.) Así, para un servicio de carga dado, la masa de hidrógeno requerida es solo una tercera parte de la masa necesaria de combustible hidrocarburo. El alto contenido de energía del hidrógeno también implica que la energía de una explosión de hidrógeno es 2.5 veces la de los combustibles hidrocarburos comunes. Así, sobre la base de una misma cantidad de masa, una explosión de hidrógeno es más destructiva. Sin embargo la duración del incendio es inversamente proporcional a la energía de combustión, y los incendios con hidrógeno se calman mucho más rápidamente que los incendios con combustibles hidrocarburos.

### 1.3.2.2. Densidad de energía

Mientras el contenido de energía denota la cantidad de energía por unidad de masa de combustible, la densidad de energía denota la cantidad de energía (Joules) por unidad de volumen de combustible ( $m^3$ ).

La densidad de energía es realmente la medida de qué tan compactados están los átomos de hidrógeno en el combustible. Los combustibles hidrocarburos que aumentan en complejidad (con más átomos de hidrógeno por molécula) tienen mayor densidad de energía. Al mismo tiempo, los hidrocarburos que aumentan en complejidad tienen más átomos de carbono por cada molécula siendo más pesados en términos absolutos.

Sobre esta base, la densidad de energía del hidrógeno es pobre (debido a su baja densidad), aunque su relación de energía peso es la mejor de todos los combustibles (porque es muy ligero).

La densidad de energía de distintos combustibles se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III. Densidad de energía de combustibles comparables

<b>Combustible</b>	<b>Densidad de energía (LHV)</b>
<b>Hidrógeno</b>	10,050 kJ/m <sup>3</sup> , gas a 1 atm y 15 °C 1,825,000 kJ/m <sup>3</sup> , gas a 200 Bar y 15 °C 4,500,000 kJ/m <sup>3</sup> , gas a 690 Bar y 15 °C 8,491,000 kJ/m <sup>3</sup> , líquido

<b>Metano</b>	32,560 kJ/m <sup>3</sup> , gas a 1 atm y 15 °C 6,860,300 kJ/m <sup>3</sup> , gas a 200 Bar y 15 °C 20,920,400 kJ/m <sup>3</sup> , líquido
<b>Propano</b>	86,670 kJ/m <sup>3</sup> , gas a 1 atm y 15 °C 23,488,800 kJ/m <sup>3</sup> , líquido
<b>Gasolina</b>	31,150,000 kJ/m <sup>3</sup> , líquido
<b>Diesel</b>	31,435,800 kJ/m <sup>3</sup> , líquido
<b>Metanol</b>	15,800,100 kJ/m <sup>3</sup> , líquido

La densidad de energía del combustible es también afectada si el combustible es almacenado como un líquido o como gas, y si es gas, a qué presión.

### 1.3.3. Inflamabilidad

Tres cosas son necesarias para que ocurra una explosión o un incendio: un combustible, oxígeno (mezclado con el combustible en cantidades apropiadas) y una fuente de ignición. El hidrógeno como un combustible inflamable se mezcla con el oxígeno siempre que al aire se le permita entrar al recipiente con hidrógeno, o cuando hay fugas de hidrógeno desde cualquier recipiente hacia el aire. Las fuentes de ignición son chispas, llamas o calor muy alto.

#### 1.3.3.1. Punto de encendido

Todos los combustibles se queman solo cuando están en su estado gaseoso o de vapor. Los combustibles como el hidrógeno y el metano son gases ya en condiciones ambientales, mientras otros combustibles como la

gasolina y el diesel que son líquidos deben ser convertidos a vapor antes de ser quemados. La característica que describe qué tan fácil estos combustibles pueden ser convertidos en vapor, es el punto de encendido.

El punto de encendido está definido como la temperatura a la cual el combustible produce vapor suficiente para formar una mezcla con el aire, encendible, en su superficie.

Si la temperatura del combustible está más baja que el punto de encendido, no podrá producir suficiente vapor para quemarse debido a que su porcentaje de evaporación es muy bajo. Siempre que el combustible esté en o sobre el punto de encendido, habrá vapor presente. El punto de encendido no es la temperatura a la cual el combustible estalla en llamas; ésta es la temperatura de autoencendido.

El punto de encendido es siempre menor que el punto de ebullición. Para combustibles que son gases en condiciones normales (como el hidrógeno, metano y propano), el punto de encendido es bastante menor que la temperatura ambiente y tiene poca relevancia debido a que el combustible ya está totalmente evaporado a temperatura ambiente. Para combustibles que son líquidos en condiciones normales (como la gasolina o el metanol), el punto de encendido actúa como el límite de temperatura bajo de encendido.

En la siguiente tabla podemos observar los puntos de encendido para distintos combustibles

Tabla IV. Puntos de encendido de combustibles comparables

<b>Combustible</b>	<b>Punto de encendido</b>
Hidrógeno	- 253 °C
<b>Metano</b>	- 188 °C
<b>Propano</b>	- 104 °C
<b>Gasolina</b>	- 43 °C aproximadamente
<b>Metanol</b>	11 °C

### 1.3.3.2. Rango de inflamación

El rango de inflamación de un gas está definido en términos de su límite de inflamación bajo (LFL) y su límite de inflamación alto (UFL). El LFL de un gas es la concentración de gas más baja que podrá sostener una llama autopropagada cuando se mezcla con aire y enciende. Abajo del LFL, no hay presente combustible suficiente para sostener una combustión, la mezcla de combustible y aire es muy pobre.

El UFL de un gas es la concentración de un gas más alta que podrá sostener una llama autopropagada cuando se mezcla con aire y enciende. Sobre el UFL, no hay presente oxígeno suficiente para sostener una combustión, la mezcla de combustible y aire es muy rica. Entre los dos límites está el rango de inflamación en el cual el gas y el aire están en proporciones adecuadas para quemarse cuando se enciende.

Una mezcla estequiometrica ocurre cuando las moléculas de oxígeno e hidrógeno están presentes en la relación exacta necesaria para completar la

relación de combustión. Si hay más hidrógeno que oxígeno disponible, entonces la mezcla es rica y por ello un poco de combustible quedará sin reaccionar, aunque se consume todo el oxígeno. Si hay menos hidrógeno que oxígeno disponible, entonces la mezcla es pobre y por ello todo el combustible será consumido pero quedará un poco de oxígeno sin reaccionar. Los sistemas de combustión interna y de celdas de combustible generalmente trabajan con mezclas pobres debido a que esta situación promueve la reacción completa de todo el combustible disponible.

Una consecuencia del UFL es que el hidrógeno almacenado (ya sea líquido o gaseoso) no es inflamable debido a la ausencia de oxígeno en los cilindros. El combustible solo se vuelve inflamable en las superficies periféricas de una fuga, donde se mezcla con aire en una proporción adecuada.

Una explosión es diferente que un incendio en que para una explosión, la combustión debe ser contenida, permitiendo el incremento de presión y temperatura a niveles suficientes para destruir violentamente el contenedor. Por esta razón, es más peligroso liberar hidrógeno en un área encerrada (como un edificio) que liberarlo directamente en un área libre.

### **1.3.3.3. Temperatura de autoencendido**

La temperatura de autoencendido es la temperatura mínima requerida para iniciar una combustión auto sostenida en una mezcla de combustible en ausencia de una fuente de ignición o encendido. En otras palabras, el combustible se calienta hasta que explota en una llama.

Cada combustible tiene una única temperatura de encendido. Para el hidrógeno la temperatura de autoencendido es relativamente alta 585 °C. Esto

hace que sea difícil encender una mezcla de hidrógeno y aire a base de calor sin utilizar alguna fuente de encendido adicional. La temperatura de autoencendido de diferentes combustibles se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla V. Temperatura de autoencendido de combustibles comparables**

<b>Combustible</b>	<b>Temperatura de autoencendido</b>
<b>Hidrógeno</b>	585 °C
<b>Metano</b>	540 °C
<b>Propano</b>	490 °C
<b>Metanol</b>	385 °C
<b>Gasolina</b>	230 a 480 °C

#### **1.3.3.4. Energía de ignición**

La energía de ignición es la cantidad de energía externa que debe ser aplicada para encender una mezcla combustible. La energía de una fuente externa debe ser más alta que la temperatura de autoencendido y ser de una duración suficiente para calentar el vapor de combustible a su temperatura de encendido. Las fuentes de encendido comunes son las chispas y las llamas.

Aunque el hidrógeno tiene una mayor temperatura de autoencendido que el metano, el propano y la gasolina, su energía de ignición es 0.02 mJ, de magnitud menor y por ello es más fácil de encender. Una chispa invisible o una descarga de electricidad estática proveniente del cuerpo humano (en condiciones secas) podrían tener la energía suficiente para causar un encendido. Sin embargo, es importante darse cuenta que la energía de encendido para todos estos combustibles es muy baja y por ello condiciones que encenderían a uno de estos combustibles generalmente encenderían a cualquiera de los otros.

El hidrógeno además, tiene la propiedad de baja electroconductividad así que el flujo o agitación del hidrógeno líquido o gaseoso puede generar cargas electrostáticas que dan como resultado chispas. Por esta razón, todo el equipo de transporte de hidrógeno debe estar solidamente aterrizado.

Mezclas inflamables de hidrógeno y aire pueden ser fácilmente encendidas.

#### **1.3.3.5. Velocidad de quemado**

La velocidad de quemado es la velocidad a la cual viaja la llama a través de la mezcla de combustible.

La velocidad de quemado es diferente a la velocidad de llama. La velocidad de quemado indica el rigor de una explosión debido a que grandes velocidades de quemado tienen una gran tendencia a soportar la transición de deflagración a detonación en túneles largos o pipas. La velocidad de llama es la suma de la velocidad de quemado y la velocidad de desplazamiento de la mezcla de gas sin quemarse.

La velocidad de quemado varía con la concentración de gas y cae en ambos finales del rango de inflamación. Debajo del LFL y encima del UFL la velocidad de quemado es cero.

La velocidad de quemado del hidrógeno de 6.65 – 3.25 m/s es aproximadamente un orden de magnitud mayor que el del metano y la gasolina (en condiciones estequiométricas). Así los incendios de hidrógeno se queman rápidamente y, como resultado, tienden a tener corto tiempo de vida.

#### **1.3.3.6. Características de las llamas**

Las llamas son de color azul pálido y son casi invisibles a la luz del día por falta de hollín. La visibilidad mejora con la presencia de humedad y de impurezas en el aire (tal como el azufre). Las llamas de hidrógeno se ven rápidamente en la oscuridad. Un incendio de hidrógeno puede ser indirectamente visible por la emanación de ondas de calor y de radiación térmica, particularmente en los incendios grandes. En muchas instancias, las llamas producidas por el hidrógeno pueden encender materiales de los alrededores que producirían humo y hollín durante la combustión.

Los incendios con hidrógeno solo pueden existir en la región de una fuga donde el hidrógeno puro se mezcla con el oxígeno en la concentración necesaria.

En muchos aspectos, los incendios con hidrógeno son más seguros que los incendios con gasolina. El gas de hidrógeno se eleva muy rápido debido a su alta flotación y difusión. Consecuentemente los incendios con hidrógeno son verticales y altamente localizados.

La gasolina forma un charco, esparciéndose lateralmente, y los vapores forman una ligera nube, y por ello los incendios con gasolina son extensos y comprenden un área muy ancha.

El hidrógeno se quema con mayor vigor que la gasolina, pero por un tiempo más corto. Charcos con hidrógeno líquido se queman muy rápido 3 a 5 cm por minuto, comparado con 0.3 a 1.2 cm por minuto del metano líquido y 0.2 a 0.9 cm por minuto de los charcos de gasolina.

El hidrógeno emite productos no tóxicos cuando se quema. Los incendios con gasolina mientras tanto generan humo tóxico.

## **1.4. Leyes de los gases**

Las leyes de los gases se refieren a cómo se comportan los gases en respuesta a cambios de presión, temperatura y volumen.

### **1.4.1. Presión**

La presión es ejercer una fuerza continua sobre o en contra de un cuerpo por otro cuerpo en contacto. La presión es expresada como una fuerza por unidad de área ( $\text{N/m}^2$ ).

Todos los gases son compresibles, esto es, pueden ser comprimidos en un volumen más pequeño aplicándoles presión.

### **1.4.1. Volumen**

Cuando estudiamos un gas dentro de un contenedor (un volumen fijo) encontramos que la presión del gas es igual en todas direcciones (ley de pascal). La presión de un gas contenido es la fuerza ejercida por sus moléculas en contra de las paredes del contenedor. La presión es determinada por el número de moléculas dentro del contenedor. Entre más moléculas, mayor será la presión debido a que más moléculas están chocando con las paredes del contenedor.

Cuando comprimimos más gas dentro de un contenedor, movemos este de baja presión y alto volumen a un gas de alta presión y bajo volumen. Como forzamos más gas dentro del contenedor, el volumen del gas se reduce, mientras la presión aumenta.

### **1.4.3. Ley de Boyle, presión contra volumen**

La relación entre presión y volumen fue demostrada por Boyle en 1662. La presión de una masa dada de gas es inversamente proporcional a su volumen a temperatura constante.

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

donde

P = presión absoluta

V = volumen

### **1.4.4. Ley de Charles, temperatura contra volumen**

Años más tarde del descubrimiento de Boyle, Charles observó que la temperatura también tenía un efecto sobre el volumen (1787).

El volumen de un gas ideal a presión constante es directamente proporcional a la temperatura absoluta.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

donde

T = temperatura absoluta

V = volumen de un gas ideal

La temperatura también está relacionada con la presión, así:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

#### 1.4.5. Ley ideal de los gases, presión, temperatura y volumen

La ley ideal de los gases combina la ley de Boyle y la ley de Charles en una sola ecuación:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Un cambio en una de las variables (presión absoluta, temperatura absoluta o volumen) debe dar como resultado un cambio en una o ambas de las variables restantes. La misma relación puede ser expresada por:

$$PV = n\bar{R}T$$

donde

P = presión absoluta

V = volumen

n = número de moles de las moléculas de gas presentes

T = temperatura absoluta

$\bar{R}$  = constante universal de los gases = 8.31434 Nm/mol K

Un mol es simplemente una colección de  $6.023 \times 10^{23}$  moléculas. Para el hidrógeno, cada mol de una molécula de hidrógeno ( $H_2$ ) tiene una masa de  $2.016 \times 10^{-3}$  Kg.

Esta relación puede ser escrita en términos de masa en lugar de moles para una sustancia específica así:

$$PV = mRT$$

donde

m = masa de las moléculas de gas presente

R = constante específica del gas. Para el hidrógeno esta constante es de 4124.18 Nm/kg K

Además, esta relación puede ser escrita en términos de densidad, sustituyendo densidad en la ecuación anterior así:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$P = \rho RT$$

Esta relación es relativa únicamente a los gases, pues no aplica a los líquidos, fue considerada precisa en el siglo XX, pero finalmente se ha encontrado que solamente es una aproximación y solo aplica a un gas ideal. Un gas ideal asume que las moléculas no ocupan espacios y que no tienen fuerzas de atracción entre ellas.

La relación de gas ideal se puede utilizar con precisión con presiones de hasta 100 bar a temperatura ambiente.

El hidrógeno comúnmente se guarda a alta presión, a presiones entre 250 a 350 bar a temperatura ambiente. Por lo que la relación de gas ideal no puede utilizarse con precisión a esas presiones.

La desviación resultante respecto de la ley de gases ideales es siempre en la forma de compresión. El gas ocupa menos espacio que el indicado por la ley de los gases ideales.

Una forma simple de corregir la ecuación es a través de agregarle un factor de compresibilidad, designado por la letra Z.

Z se deriva experimentalmente y depende de la temperatura, presión y naturaleza del gas. La ecuación ajustada es la siguiente:

$$P = Z\rho RT$$

### **1.5. Parámetros claves de ingeniería y su medida**

Los parámetros clave respecto de los gases son:

- Presión
- Temperatura
- Volumen
- Masa y peso
- Flujo de masa

Estos parámetros están medidos en unidades de ingeniería.

### **1.5.1. Presión**

La presión puede ser medida por una variedad de instrumentos, incluyendo:

- Barómetros y altímetros
- Calibradores de presión
- Transductores de presión (manómetros digitales)

Los transductores de presión tienen la ventaja de que pueden mandar señales electrónicas a un sistema de control.

#### **1.5.1.1. Unidades de presión**

La presión puede ser expresada en cualquier unidad de fuerza dividida entre área. Algunas unidades de presión comunes son:

- Libras por pulgada cuadrada (psi pounds per square inch)
- Pascales (Pa)
- Bares (Bar)
- Atmósferas (atm)

### **1.5.2. Temperatura**

Es el grado o intensidad de calor de una sustancia en relación con otras sustancias; no debe ser confundida con el calor, el cual es una forma de energía que surge del movimiento molecular. El calor es energía, mientras que la temperatura es una medida arbitraria de la relativa intensidad de calor.

La temperatura puede ser medida por una gran variedad de instrumentos, pero los más importantes son:

- Termómetros
- Transductores de temperatura (RTD'S por sus siglas en inglés resistive temperature device)
- Termocoplas

#### **1.5.2.1. Unidades de temperatura**

- Grados Fahrenheit (°F)
- Grados Celsius o Centígrados (°C)
- Grados Rankine (°R)
- Grados Kelvin (°K)

#### **1.5.3. Volumen y capacidad**

Volumen es el espacio tridimensional. Capacidad o capacidad del líquido es el volumen encerrado dentro de un recipiente.

El volumen está representado por una unidad de longitud elevada al cubo,  $m^3$  por ejemplo; Cualquier unidad de longitud puede ser elevada al cubo para convertirse en una medida de volumen.

La capacidad o medida de líquido expresa el volumen de un recipiente, como los galones por ejemplo.

#### **1.5.4. Masa y peso**

La masa y el peso no son la misma cosa. Masa es la cantidad de materia que contiene un cuerpo. Peso es una fuerza y una fuerza es igual a la masa multiplicada por la aceleración ( $F=ma$ ).

La unidad de masa es el kilogramo (kg) y la unidad del peso o fuerza es el Newton.

#### **1.5.5. Flujo de masa**

Flujo de masa es el movimiento de un gas de una zona de alta presión a una zona de baja presión. Hay resistencia al flujo similar a la resistencia al paso de electricidad en un conductor. Conforme las moléculas de gas pasan a través de una tubería, algunas pierden cierta cantidad de energía debido a la fricción existente contra los lados de la tubería. Las moléculas que están contra la tubería se mueven más lentamente comparadas con las moléculas que están en el centro.

El flujo de gas se mide usando un rotómetro o un medidor de flujo de masa.

La unidad común para el flujo volumétrico de un fluido (fluido incluye líquidos o gases) es litros por minuto.

## **2. USO DEL HIDRÓGENO**

### **2.1. Fabricación del hidrógeno**

La pregunta fundamental del uso del hidrógeno como combustible es, ¿de dónde lo vamos a obtener? A pesar de su abundancia en el universo, el hidrógeno no aparece libremente en la tierra debido a que reacciona muy rápidamente con otros elementos. Por esta razón, la mayor parte de hidrógeno se encuentra formando parte de compuestos moleculares.

Significa que para poder obtener hidrógeno hay que removerlo de estos compuestos moleculares. Respecto de la energía requerida, es fácil remover el hidrógeno de los compuestos que están en un estado de energía mayor, como en los combustibles fósiles. Este proceso libera energía, reduciendo la cantidad de energía requerida para el proceso. Se requiere de más energía al extraer el hidrógeno de los compuestos que están en un estado de energía más bajo, como en el agua, debido a que se debe agregar energía al proceso.

El proceso de extraer el hidrógeno de los combustibles fósiles es llamado reformación. Hoy en día, este es el método principal y el menos costoso de producir hidrógeno. Desafortunadamente, la reformación emite contaminación y consume combustibles no renovables.

El proceso de extraer el hidrógeno del agua es llamado electrólisis. Y la principal característica de la electrólisis es que puede ser totalmente no contaminante y utiliza recursos renovables, pero requiere de una gran cantidad de energía eléctrica. Esto tiene como consecuencia que el impacto ambiental

de adquirir hidrógeno a través de electrólisis depende mucho del impacto de la fuente de potencia.

Una forma de evaluar el impacto ambiental de la electrólisis y de la reformación de varios combustibles es comparando la cantidad total de dióxido de carbono emitido para su producción. A continuación se muestra el resultado de un estudio hecho calculando el dióxido de carbono emitido en 1000 Km de viaje en vehículo. La emisión total de dióxido de carbono incluye, la emisión de dióxido de carbono en el escape, en el procesador de combustible y en la planta de combustible que supe la energía para el procesador de combustible. El resultado se muestra en la siguiente figura.

Claramente se puede observar que la limpieza ambiental del hidrógeno está directamente relacionada con el modo de fabricación.

Otros métodos alternativos de producción de hidrógeno son: descomposición termoquímica de agua, fotoconversión, procesos fotobiológicos, producción por medio de biomasa y procesos industriales.

La mayor parte del hidrógeno fabricado en el mundo es producido a partir de los combustibles fósiles, como un producto derivado de las industrias químicas, o de un proceso de refinamiento de petróleo crudo. La producción a gran escala de hidrógeno por medio de energía renovable no es posible aún.

La producción de hidrógeno generalmente cuesta de 3 a 15 veces más que el gas natural, y de 1.5 a 9 veces más que la gasolina, dependiendo del método utilizado. Cuando es extraído de los combustibles fósiles, la producción inicial y el refinado posterior del combustible aumenta el costo total.

**Figura 2. Resultado de un estudio hecho calculando el dióxido de carbono emitido en 1000 Km de viaje en vehículo**

**248 kg CO<sub>2</sub> por 1000 km**



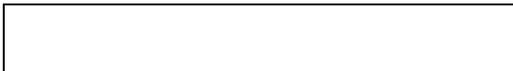
Motor de combustión interna standard utilizando gasolina

**237 kg CO<sub>2</sub> por 1000 km**



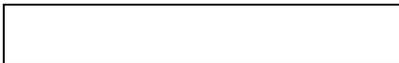
Celda de combustible para automóvil, que utiliza hidrógeno obtenido por electrólisis con electricidad generada por una planta usando gas natural

**196 kg CO<sub>2</sub> por 1000 km**



Celda de combustible para automóvil utilizando hidrógeno con reformador de gasolina a bordo.

**162 kg CO<sub>2</sub> por 1000 km**



Celda de combustible para automóvil utilizando hidrógeno con reformador de metanol a bordo

**80 kg CO<sub>2</sub> por 1000 km**



Celda de combustible para automóvil utilizando hidrógeno con reformador pequeño de gas natural

**70 kg CO<sub>2</sub> por 1000 km**



Celda de combustible para automóvil utilizando hidrógeno de un reformador grande de gas natural

### **2.1.1. Electrólisis**

En la electrólisis, se utiliza la electricidad para descomponer el agua en sus componentes elementales: hidrógeno y oxígeno. La electrólisis es el

método preferido para la producción de hidrógeno debido a que es el único proceso que no necesita de combustibles fósiles. También porque el producto tiene alta pureza y es factible para producción de hidrógeno en pequeña y gran escala. La electrólisis puede operar en un ancho rango de valores de capacidad de energía eléctrica, por ejemplo se puede obtener ventaja de la abundancia de electricidad en la noche después de la hora pico y en la madrugada.

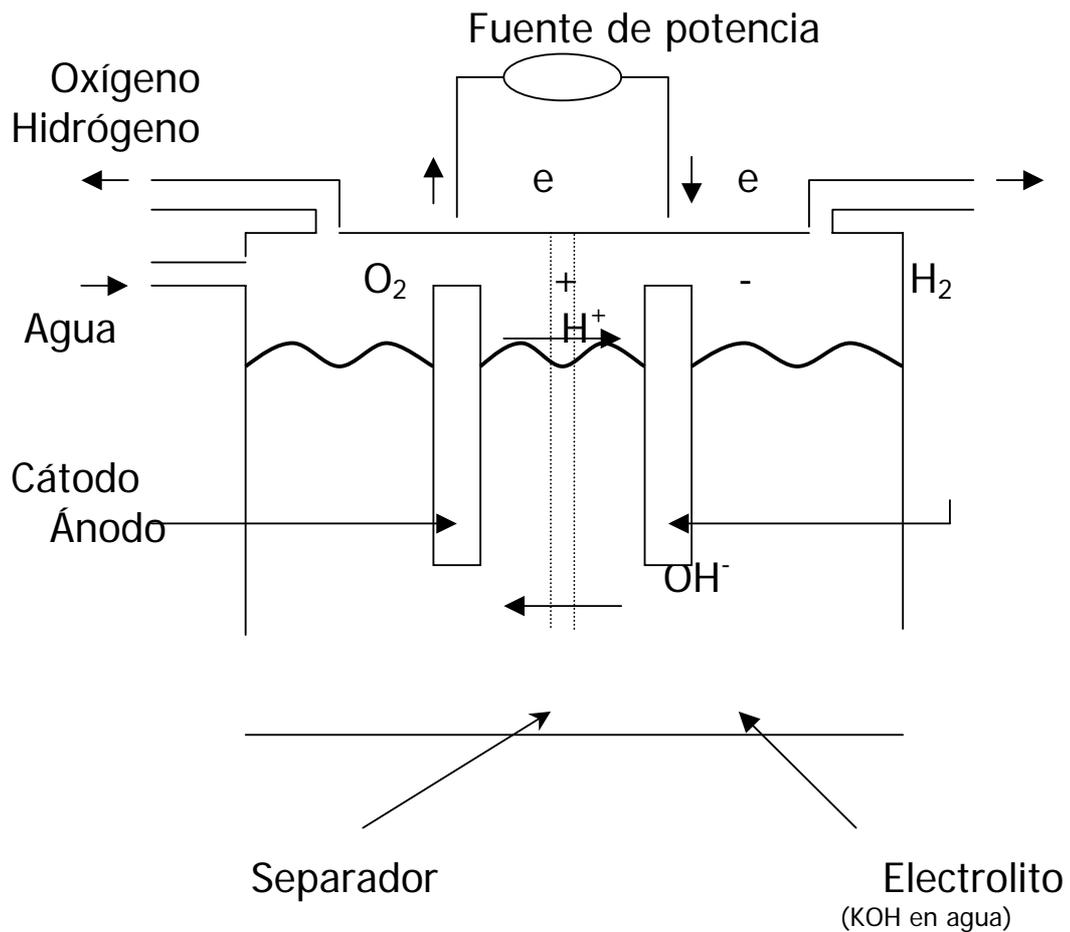
El corazón de la electrólisis es el electrolizador. Un electrolizador es una serie de celdas cada una con un electrodo positivo y negativo. Los electrodos están inmersos en agua que se ha hecho eléctricamente conductiva, por la adición de iones de hidrógeno, generalmente en forma de hidróxido de potasio alcalino (KOH).

El ánodo generalmente es fabricado de níquel y cobre con una capa de óxidos metálicos como el manganeso, tungsteno y rutenio. El metal del ánodo permite el rápido apareamiento de átomos de oxígeno en pares de oxígeno en la superficie del electrodo.

El cátodo generalmente es fabricado de níquel, recubierto con pequeñas cantidades de platino como catalizador. El catalizador permite el rápido apareamiento de átomos de hidrógeno en pares de hidrógeno en la superficie del electrodo y así se incrementa la proporción de producción de hidrógeno. Sin el catalizador, los átomos de hidrógeno podrían depositarse sobre el electrodo y bloquearían el flujo de corriente.

Se utiliza un separador de gas o diafragma para que el oxígeno y el hidrógeno no se mezclen aun cuando permite el paso libre de iones. Generalmente es fabricado de material a base de asbestos.

Figura 3. Una celda típica para la electrólisis



Las reacciones en el cátodo son:

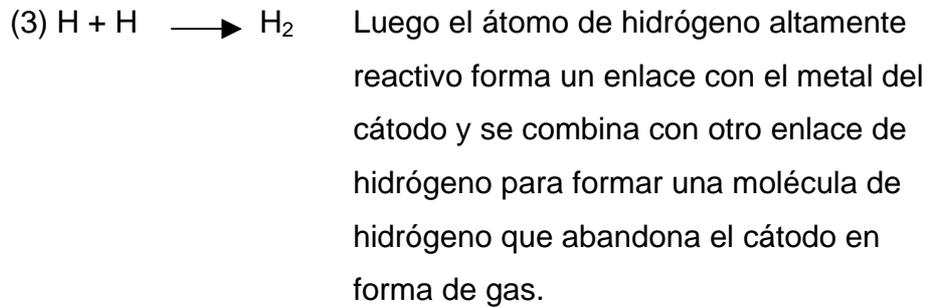


Un ion de potasio cargado positivamente es reducido.

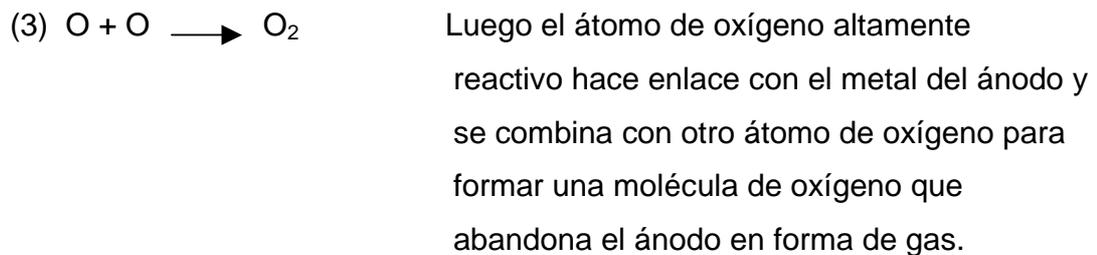
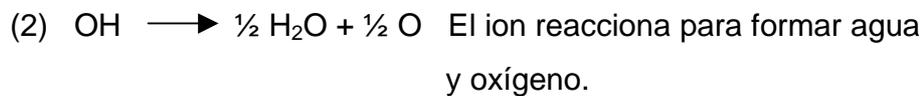
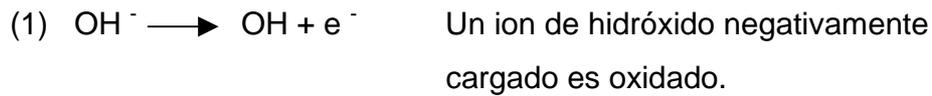


El ion reacciona con el agua para formar un átomo de

hidrógeno y un ion hidróxido.



Las reacciones en el ánodo son:



La proporción de hidrógeno generada está relacionada con la densidad de corriente (la cantidad de corriente dividida entre el área del electrodo). En general, cuanto más alta es la densidad de corriente más alta es la fuente de voltaje y más alto es el costo de potencia por unidad de hidrógeno. De cualquier modo, los voltajes altos disminuyen el tamaño del electrolizador y esto tiene como consecuencia un menor costo de capital.

Una celda de combustible invierte el proceso de electrólisis. En la electrólisis se suministra energía eléctrica al agua de baja energía para liberar dos gases de alta energía. Una celda de combustible permite que los gases reaccionen y se combinen para formar agua, liberando energía eléctrica. Ambos procesos liberan calor, lo cual representa una pérdida de energía.

Para la electrólisis, la cantidad de energía eléctrica requerida puede ser ajustable de acuerdo a la necesidad de adición de calor a la reacción. La cantidad mínima de voltaje requerido para descomponer el agua es 1.23 V a 25 °C. Con este voltaje, la reacción requiere de energía en forma de calor del exterior para actuar. Con 1.47 V (con la misma temperatura) no se requiere de una fuente externa de calor. Con voltajes mayores (y la misma temperatura) el calor es liberado a los alrededores durante la descomposición del agua.

Trabajar el electrolizador con voltajes menores y agregando calor tiene sus ventajas, porque la energía calorífica es generalmente más barata que la energía eléctrica, y puede ser recirculada dentro del proceso. Además la eficiencia de la electrólisis aumenta con los incrementos de temperatura.

Para ser verdaderamente limpia, la potencia eléctrica almacenada durante la electrólisis debe derivar de un método sin contaminación, recursos renovables.

El costo de quemar combustibles fósiles para generar electricidad para electrólisis es de 3 a 5 veces más que reformar el hidrógeno directamente con el combustible fósil.

Las eficiencias aproximadas de una planta de generación de potencia térmica moderna son:

Nuclear: 30-33%

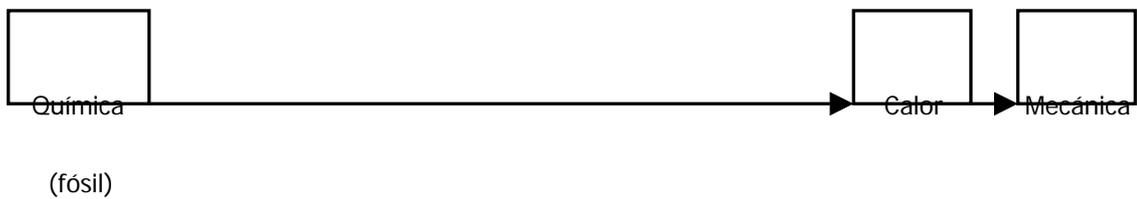
Gas natural: 30-40%

Carbón: 33-38%

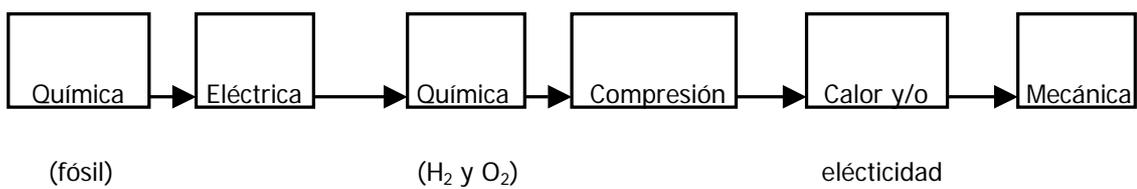
Aceite: 34-40%

**Figura 4. Proceso de transformaciones de energía basado en combustibles fósiles**

**Uso directo**



**Electrólisis**



Las fuentes de energía renovable no contaminantes incluyen a las hidroeléctricas, la energía solar y la energía del viento.

### **2.1.2. Reformar**

Reformar es el proceso químico que hace reaccionar el contenido de hidrógeno de los combustibles en presencia del vapor, oxígeno o ambos dando como resultado un flujo de gas rico en hidrógeno. Cuando se le aplica el proceso de reformar a los combustibles sólidos se le llama gasificación. La mezcla de gas rica en hidrógeno resultante es llamada reformado. El equipo utilizado para producir reformado es conocido como reformador o procesador de combustible.

La composición específica del reformado depende de la fuente de combustible y del proceso utilizado, pero siempre contiene otros compuestos como nitrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y algo del combustible de la fuente que no reaccionó. Cuando se extrae el hidrógeno del reformado, la mezcla de gas que queda es llamada refinado.

En esencia, la reformación de un combustible fósil consiste en los siguientes pasos:

1. Purificación del abastecimiento (incluyendo la remoción del azufre)
2. Reformación del vapor u oxidación del abastecimiento para formar hidrógeno y óxido de carbono.

3. Purificación primaria, conversión del monóxido de carbono en dióxido de carbono.
4. Purificación secundaria, reducción adicional del monóxido de carbono.

Las ventajas de la reformación de los combustibles fósiles son:

- Que utilizan la infraestructura de los combustibles existentes.
- Reducen la necesidad de transportar y almacenar hidrógeno.
- No necesitan de una gran cantidad de energía de entrada como en la electrólisis.
- Es más barato que otros métodos de producción de hidrógeno.

Las desventajas de la reformación son:

- Que puede tomar tiempos relativamente largos de calentamiento.
- Es difícil de aplicar en los motores de los vehículos debido a la irregular demanda de potencia (respuesta transitoria).
- Es complejo, grande y costoso.
- Introduce pérdidas adicionales al proceso de conversión de energía.
- Utiliza combustibles fósiles no renovables.
- Generan contaminación.

La contaminación generada por los reformadores toma tres formas:

- Emisión de dióxido de carbono
- Reacciones incompletas, dejando monóxido de carbono y algo del combustible fuente en el reformado.

- Producción de contaminación a través de la combustión, como el óxido nitroso.

La reformación de combustibles fósiles solo tiene sentido si se necesita el hidrógeno directamente. Para los motores de combustión interna, es siempre más eficiente utilizar el combustible fósil directamente sin pasar primero a través del reformador.

En teoría, cualquier combustible hidrocarburo o alcohol puede servir como fuente de alimentación para el proceso de reformación. Naturalmente, los combustibles con infraestructura de distribución existente son los más comúnmente utilizados.

### **2.1.3 Descomposición termoquímica del agua**

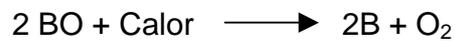
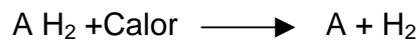
En la descomposición termoquímica del agua, solo se utiliza calor para descomponer el agua. Este proceso es similar a la electrólisis, con la diferencia que toda la energía es agregada como calor en lugar de electricidad. La eficiencia máxima teórica para este proceso es de 50%.

El agua se descompone directamente a muy altas temperaturas (2500 °C) la cual es muy alta para ser práctica. Para disminuir esta temperatura se utilizan reactivos químicos para descomponer el agua por medio de reacciones químicas con varias etapas en el siguiente orden:

1. Producción de oxígeno
2. Producción de hidrógeno

### 3. Regeneración de materiales

Esta reacción toma la forma genérica de:



Esta es esencialmente una reacción oxidación reducción donde A y B son compuestos químicos que comúnmente incluyen hierro y oxígeno. Este proceso puede llevarse a cabo a 700 °C.

En adición, como en cualquier otro proceso químico, la recuperación de calor, la transferencia de masa y los materiales involucrados afectan el diseño total del sistema.

La descomposición termoquímica del agua, como la electrólisis, es solo renovable y ambientalmente limpia tanto como lo sea la fuente de energía. Si las pérdidas por calor de otros procesos son utilizadas para la descomposición termoquímica, se aumenta la eficiencia de todo el sistema. Si el calor es obtenido por combustión de combustibles fósiles, el hidrógeno resultante habrá generado más contaminación que la que se podría haber obtenido al utilizar la fuente de combustible fósil directamente.

#### **2.1.4. Foto conversión**

La foto conversión es un proceso de electrólisis mediante el cual la electricidad necesaria para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno es generada utilizando energía solar directamente.

Como cualquier proceso de generación de potencia eléctrica por medio de energía solar, la foto conversión puede trabajar solo en áreas con exposición prolongada y concentrada de luz solar. Además, este tipo de sistema tiene una eficiencia máxima que oscila entre un 8 y 12%.

#### **2.1.5. Proceso fotobiológico**

La energía lumínica puede también producir hidrógeno a través del proceso fotobiológico, utilizando sistemas biológicos como el alga cianobacteria o alga azul-verde, el alga fotosintética y el alga eucariótica o alga verde. En principio estas algas contienen enzimas metabolizadoras de hidrógeno que transforman compuestos en un ambiente anaeróbico y liberan gas hidrógeno en el proceso. Estas algas usan compuestos como el agua, suero, almidón, desechos del refinado de azúcar, sobrantes de las destilerías, como donantes de electrones. Desafortunadamente la eficiencia de este proceso es muy baja, generalmente menor del 1%.

#### **2.1.6. Producción de biomasa**

El hidrógeno puede ser producido por descomposición de biomasa. La biomasa comprende todas las maneras en que los materiales de las plantas y animales pueden ser convertidos en energía. La biomasa es de naturaleza orgánica y puede derivarse de una variedad de fuentes incluyendo residuos, desperdicios y cultivos. Los residuos son los materiales orgánicos dejados después de una cosecha de cultivos o de árboles. Los desperdicios incluyen los de plantas procesadoras de alimentos, aguas negras y desperdicios municipales sólidos. Los cultivos son aquellos que pueden hacerse crecer especialmente los que tienen un alto contenido de energía tales como soya, los árboles y plantas leñosas entre otros.

El atractivo de producir hidrógeno por medio de biomasa es la abundancia obvia de materiales desperdiciados y su potencial para suministrar grandes cantidades de hidrógeno. Esta forma de producir hidrógeno tiene inconvenientes como requerir de grandes cantidades de terreno y abundante agua, así como, la dificultad asociada con el manejo de los desechos sólidos, adicionalmente la tecnología asociada no esta bien desarrollada, dando como resultado de que actualmente es la forma más cara de obtener hidrógeno.

#### **2.1.7. Conversión termoquímica**

La conversión termoquímica es un proceso multietapas que incluye un preproceso de almacenado y alimentación de biomasa, gasificación, limpieza de gas, reformado de vapor, reacción de cambio y separación del hidrógeno.

La gasificación es el corazón del proceso de la conversión termoquímica. La gasificación ocurre a través de la descomposición térmica de la materia orgánica con la ayuda de un gas auxiliar como el aire, el oxígeno, o el hidrógeno para producir productos gaseosos primarios.

Generalmente la biomasa reacciona con vapor y aire (oxígeno), a la temperatura determinada por las características de la biomasa, para producir rápidamente una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, agua y metano con otras impurezas.

El contenido de hidrógeno está determinado por la presión y la temperatura del proceso y constituye cerca del 20% de la mezcla de gas.

#### **2.1.8. Digestión anaeróbica**

La digestión anaeróbica (o la fermentación del metano) es un proceso multietapas en el cual los desperdicios de un tipo de organismos son el alimento para otro tipo de organismos. Este proceso tiene lugar en un ambiente anaeróbico, generalmente en un digerible, en presencia de una población de bacterias anaeróbicas.

Los procesos digestivos anaeróbicos usan casi tanta energía como la que producen, o algunas veces más, dependiendo del diseño del digestivo y las condiciones de trabajo.

#### **2.1.9. Procesos industriales**

El hidrógeno es producido como un producto derivado de algunos procesos industriales convencionales. El hidrógeno es:

- Un producto derivado de la producción de clorina y polivinilclorina
- Un producto derivado de la industria del hidróxido de sodio.
- Producido entre otros gases ligeros en las refinerías de petróleo crudo.
- Emitido en procesos químicos de deshidrogenación.
- Producido como un derivado de carbón, extraído en los gases de los hornos en que se quema carbón.

Generalmente, estas fuentes de productos derivados tienen insuficiente capacidad y son muy costosos para suministrar grandes cantidades de hidrógeno.

## **2.2. Almacenamiento del hidrógeno**

Si el primer gran desafío con el hidrógeno es como obtenerlo, el segundo gran desafío es como hacer para almacenarlo. El hidrógeno tiene la densidad de gas más baja y el segundo punto de ebullición más bajo de todas las sustancias conocidas, por lo que es un reto el almacenarlo ya sea como líquido o como gas. Como gas, requiere de grandes volúmenes de almacenamiento y presiones altas para almacenarlo. Para almacenarlo como líquido, este requiere de un sistema de almacenamiento criogénico.

La baja densidad del hidrógeno ya sea como líquido o como gas, también da como resultado una muy baja densidad de energía. Por otra parte,

un volumen de hidrógeno dado contiene menos energía que el mismo volumen de otro tipo de combustible. Esto también incrementa el tamaño relativo del tanque de almacenamiento en vehículos, debido a que el volumen del hidrógeno requerido es mayor que el de otros combustibles para enfrentarse a los mismos requerimientos de desplazamiento. La cantidad de hidrógeno necesario para trabajar en celdas de combustible se compensa un poco por el hecho de que es utilizado más eficientemente que cuando se quema en los motores de combustión interna, y así menos combustible es requerido para alcanzar el mismo resultado.

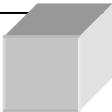
A pesar de la baja densidad de energía volumétrica, el hidrógeno tiene la mayor relación energía-peso que cualquier combustible. Desafortunadamente, esta ventaja del peso es generalmente opacada por el alto peso de los tanques de almacenamiento de hidrógeno y su equipo asociado. Así, la mayoría de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno son considerados más voluminosos y pesados que los utilizados para gasolina y diesel.

Para todos los propósitos prácticos el hidrógeno puede ser almacenado ya sea como gas a alta presión, líquido en contenedores criogénicos y gas químicamente unido a ciertos metales (hidruros).

En la siguiente tabla se puede comparar el volumen de almacenamiento y el peso de varios combustibles, cada uno con 1,044,500 KJ de energía almacenada.

**Tabla VI. Volumen de almacenamiento y peso de varios combustibles con 1,044,500 kJ de energía almacenado**

Volumen	Peso
Bateria 	 En total 1360 Kg
Gasolina (30 L) 	 22 kg Combustible 27 Kg Combustible y contenedor
Metanol (62 L) 	 49 Kg Combustible 57 Kg Combustible y contenedor
Hidrógeno Metal hidrido (340 L) 	8.2 Kg Combustible  772 Kg Combustible y contenedor
	

<p>Gas de Hidrógeno A 250 Bar (479 L)</p> 	<p>8.2 Kg Combustible 285 Kg Combustible y contenedor</p>
<p>Gas de hidrógeno a 350 Bar (368 L)</p> 	 <p>8.2 Kg Combustible 205 Combustible y contenedor</p>
<p>Hidrógeno Líquido</p> 	 <p>8.2 Kg Combustible</p> <div data-bbox="1152 1794 1410 1953" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Peso del combustible en negro ↓</p> </div>

(115 L)	<p data-bbox="708 394 1082 421">73 Kg Combustible y contenedor</p>  <p data-bbox="1102 703 1394 808">Peso del combustible y del contenedor en blanco</p>
---------	---

### 2.2.1. Gas a alta presión

Los sistemas de almacenamiento de gas a alta presión son los más comunes y son los métodos más desarrollados para el almacenamiento de hidrógeno. La mayoría de los vehículos que trabajan con celdas de combustible utilizan esta forma de almacenamiento de hidrógeno.

El hidrógeno a alta presión es almacenado en cilindros, similares a aquellos que se utilizan para almacenar gas natural comprimido. La mayoría de los cilindros tienen forma cilíndrica con sus tapaderas en forma semiesférica,

aunque los diseños nuevos utilizan cilindros múltiples distorsionando su forma cilíndrica para aumentar el volumen utilizable.

Los puertos en el centro de cada semiesfera permiten que el gas fluya hacia adentro o hacia fuera del cilindro, con un sistema de mando al final que controla el flujo de gas. El sistema de mando actúa primariamente como enchufe, aunque incluye un puerto de alivio de presión y puede tener transductores de temperatura y presión para medir las condiciones del gas dentro del cilindro. El otro sistema de mando en el otro extremo es un portal con un mecanismo sofisticado que incluye una válvula solenoide, una válvula de exceso de flujo, una válvula manual de aislamiento, una válvula cheque y un puerto con un dispositivo de alivio de presión.

La válvula solenoide está normalmente cerrada y aísla el cilindro cuando no se necesita. La válvula de exceso de flujo se cierra siempre que el flujo de gas que está saliendo del cilindro sea muy grande. La válvula manual de aislamiento permite al contenido del cilindro estar aislado o ser gobernado manualmente en el caso de que la válvula solenoide falle. La válvula cheque permite cargar combustible mientras la válvula solenoide esta cerrada. El dispositivo de alivio de presión en cualquiera de las dos semiesferas del cilindro descarga el contenido del cilindro cuando esta expuesto al fuego.

Los cilindros de gas a alta presión deben estar hechos de un material que funcione como cerco y que sea grueso, que sea fuerte y debe ser muy durable.

### **2.2.2. Líquido**

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido superan muchos de los problemas de peso y tamaño asociados con los sistemas de almacenamiento de gas a alta presión, aunque a temperaturas criogénicas.

El hidrógeno líquido puede ser almacenado justo debajo de su punto normal de ebullición a  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  acerca de la presión ambiente en un tanque de doble pared y súper aislado. Los tanques de hidrógeno líquido no necesitan ser tan fuertes como los cilindro de gas a alta presión, aunque tienen que ser lo adecuadamente robustos para las aplicaciones automotrices.

El hidrógeno no puede ser almacenado en forma líquida indefinidamente. Todos los tanques, no importando que tan bueno sea el aislante, permiten algo de transferencia de calor del ambiente que los rodea. La proporción de fuga de calor depende del diseño y del tamaño del tanque. El calor causa que un poco del hidrógeno se evapore y que la presión del tanque aumente. Tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido estacionarios son frecuentemente de forma esférica debido a que ofrece la menor área para un volumen dado y así presenta el área de transferencia de calor más pequeña.

Los tanques tienen una capacidad máxima de sobrepresión de aproximadamente 5 bar, si el hidrógeno no es consumido tan rápidamente como se evapora, la presión alcanza el punto de escape a través de la válvula auxiliar de alivio de presión. Este hidrógeno que se logra escapar no solo es una pérdida directa de combustible útil, sino que también corre el riesgo de incendio, si el escape ocurre en un área cerrada.

El hidrógeno puede retirarse del tanque ya sea como líquido o como gas. Cuando se utiliza en un motor de combustión interna, el hidrógeno líquido puede inyectarse directamente en los cilindros. Cuando se utiliza en un motor de celda de combustible, el hidrógeno puede retirarse en forma gaseosa a suficiente presión, para alimentar la reacción de generación de potencia eléctrica.

Aunque los sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido eliminan el peligro asociado con las altas presiones, estos introducen peligros asociados con las bajas temperaturas. Existe riesgo de quemaduras severas asociadas con el hidrógeno líquido, sus vapores y sus superficies de contacto. El acero al carbono al ser expuesto a temperaturas debajo de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ya sea directa o indirectamente, se vuelve quebradizo y es susceptible de quebrarse.

El hidrógeno líquido es considerablemente más denso que el hidrógeno gaseoso, pero es aún mucho más voluminoso que la gasolina sobre una base equivalente de energía. Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido pueden ser cuatro a diez veces más grandes y pesados que un tanque de gasolina equivalente.

Pasar el hidrógeno a su estado líquido es un proceso energéticamente muy intenso debido a las extremas bajas temperaturas que intervienen. El paso a estado líquido involucra varios pasos, incluyendo:

1. Compresión del gas de hidrógeno utilizando compresores reciprocantes; pre-enfriado del gas comprimido a temperaturas de nitrógeno líquido  $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
2. Expansión a través de turbinas.

### 3. Conversión catalística para su forma estable de parahidrógeno.

En total, la energía requerida para el proceso de licuefacción es el equivalente al 40% del LHV del hidrógeno. Una vez en su estado líquido, el hidrógeno es relativamente fácil de transportar y de usar. Claramente, para maximizar la energía invertida durante el paso a estado líquido, es prudente almacenar y usar el hidrógeno como líquido donde sea posible.

#### **2.2.3. Metales hídridos**

Los sistemas de almacenamiento de metales hídridos están basados en el principio de que algunos metales fácilmente absorben el hidrógeno gaseoso bajo condiciones de alta presión y de temperatura moderada para formar metales hídridos. Estos metales hídridos liberan el gas de hidrógeno cuando se calientan a baja presión y relativamente alta temperatura. En esencia, el metal absorbe y libera el hidrógeno como una esponja.

La ventaja de los sistemas de almacenamiento de metales hídridos gira alrededor del hecho de que el hidrógeno se vuelve parte de la estructura química del metal mismo y por ello no necesita altas presiones ni temperaturas criogénicas para trabajar. Debido a que el hidrógeno es liberado del hídrido para utilizarse a bajas presiones (y debe ser liberado antes de que se pueda quemar rápidamente), los hídridos son intrínsecamente el método más seguro para almacenar hidrógeno.

Hay muchos tipos de metales hídridos específicos, pero están principalmente basados en aleaciones de metales de magnesio, níquel, hierro y

titanio. En general, los metales hídridos pueden ser divididos en aquellos que liberan el hidrógeno con baja o alta temperatura.

Los hídridos de alta temperatura pueden ser menos costosos y pueden retener más hidrógeno que los de baja temperatura, pero requieren de cantidades significativas de calor para liberar el hidrógeno. Los hídridos de baja temperatura pueden obtener suficiente calor de un motor, pero los de alta temperatura requieren de una fuente externa de calor.

La baja temperatura para la liberación de hidrógeno asociada a algunos hídridos puede ser un problema debido a que se libera gas muy fácilmente a las condiciones ambientales. Para superar esto, los hídridos de baja temperatura necesitan ser presurizados, incrementando la complejidad del proceso.

La desventaja principal de los sistemas de almacenamiento de metales hídridos no es tanto la temperatura y la presión necesaria para liberar el hidrógeno; sino la baja densidad de masa energética. Aun los mejores metales hídridos contienen solamente el 8% de hidrógeno por peso y por ello tienden a ser muy pesados y costosos. Los sistemas de almacenamiento de metales hídridos pueden ser 30 veces más pesados y diez veces más grandes que un tanque de gasolina con el mismo contenido energético.

Otra desventaja de los sistemas de almacenamiento de metales hídridos es que deben cargarse solo con hidrógeno puro o se contaminan con la correspondiente pérdida de capacidad. La pérdida de capacidad de almacenamiento por contaminación puede hasta cierto grado ser reactivada con calor.

#### **2.2.4. Otros métodos de almacenamiento**

Una variedad de otros métodos de almacenamiento de hidrógeno han sido investigados recientemente, pero no son comercialmente viables. Entre estos están la absorción de carbono, las microesferas de cristal y las técnicas de oxidación del hierro.

##### **2.2.4.1. Absorción de carbono**

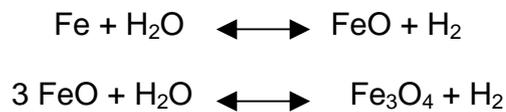
La absorción de carbono es una técnica similar a la utilizada con los metales hidrúridos donde el hidrógeno está químicamente sujeto a la superficie de los gránulos de carbono altamente porosos. El carbono se absorbe a temperaturas entre  $-185$  y  $-85$  °C y presiones entre 21 a 48 bar. La cantidad de absorción de carbono aumenta con la disminución de la temperatura. Un exceso de calor de 150 °C hace que se libere hidrógeno.

##### **2.2.4.2. Microesferas de cristal**

El sistema de almacenamiento de microesferas de cristal utiliza bolas de cristal huecas y pequeñas dentro de las cuales el hidrógeno es forzado bajo una presión muy alta. Cuando ya está almacenado, las bolas pueden ser almacenadas en condiciones ambientales sin pérdidas de hidrógeno. Un calor moderado hace que el hidrógeno sea liberado nuevamente. Se están haciendo experimentos para aumentar la proporción de liberación de hidrógeno triturando las esferas.

### 2.2.4.3. Oxidación del hierro

La oxidación del hierro es un proceso por medio del cual el hidrógeno es formado cuando el hierro esponjoso reacciona con vapor de la siguiente forma:



Óxido es el producto derivado de este proceso. Una vez el hierro está completamente oxidado, debe ser cambiado y luego debe ser convertido nuevamente en hierro esponjoso utilizando procesos industriales, para ser utilizado en un nuevo tanque.

Aunque el hierro es barato, es pesado, y por ello el proceso es solo 4.5% efectivo por peso. Además, se necesita un catalizador (el cual es costoso) para mantener la reacción a una temperatura práctica de 80 a 200 °C.

### 2.3. Transporte del hidrógeno

El transporte de hidrógeno está directamente relacionado con el almacenamiento de hidrógeno. En general, las formas compactas de almacenamiento de hidrógeno son las más económicas para transportarlo y las formas esparcidas son las más costosas.

### **2.3.1. Tuberías**

Las tuberías pueden transportar hidrógeno líquido o hidrógeno gaseoso.

#### **2.3.1.1 Tuberías de gas**

El hidrógeno gaseoso puede ser transportado por tuberías en forma similar que el gas natural.

Por ser el hidrógeno menos denso que el gas natural, se transporta una menor cantidad de masa, en una tubería de un tamaño dado y una presión de operación dada. Además la densidad de energía del hidrógeno es solo una tercera parte que la del gas natural sobre una base volumétrica, de aquí que tres veces más cantidad de hidrógeno gaseoso, debe ser bombeada a través de una tubería para transmitir una cantidad equivalente de energía.

Para compensar estas propiedades, las tuberías de hidrógeno necesitan ser diseñadas para trabajar a altas presiones para ser prácticas. Todas las bombas y demás equipos deben ser compatibles con el hidrógeno. Además, las tuberías de hidrógeno deben ser resistentes al ambiente con hidrógeno para prevenir las grietas.

Existen tuberías de gas de hidrógeno operando en algunas partes del mundo. En los Estados Unidos hay 725 km de tubería. Varias tuberías de hidrógeno existen en Canada. En Europa, hay 210 km de tubería dentro de Alemania y entre Bélgica y Francia hay 400 km, entre algunos otros.

### **2.3.1.2. Tuberías de hidrógeno líquido**

El hidrógeno puede ser transportado en tuberías como un líquido, pero las tuberías de hidrógeno líquido se han llevado a cabo solo para pequeñas distancias. Estas tuberías necesitan un aislamiento total para poder mantener las temperaturas criogénicas y prevenir la formación de flujo en dos fases (líquido / gaseoso). Si se expone al aire, la temperatura baja podría causar que el aire se vuelva líquido y que el oxígeno se concentre en la superficie de la tubería, aumentando el riesgo de un incendio.

### **2.3.2. Transporte móvil**

El transporte móvil incluye transporte por camiones cisterna, trenes y barcas.

El hidrógeno es almacenado en tanques apropiados para su almacenamiento y transporte.

#### **2.3.2.1. Transporte de gas de hidrógeno**

El gas de hidrógeno a alta presión puede ser transportado en cilindros a una presión entre 150 a 400 bar.

Existen trailers especialmente diseñados para transportar un número grande de tubos de acero muy fuertes unidos entre si a través de un colector en

común. Este diseño es bueno para proveer pequeñas cantidades de hidrógeno, pero es ineficiente en términos de transporte de energía. El peso de los cilindros requeridos es tal que solo 2 a 4% del peso es gas.

### **2.3.2.2. Transporte de hidrógeno líquido**

El hidrógeno puede ser transportado en camiones, trenes y barcos como líquido criogénico en tanques de doble pared súper aislados al vacío. El transporte de hidrógeno líquido es más eficiente que como gas a alta presión particularmente cuando se necesitan cantidades grandes de hidrógeno. Pero por otro lado, el costo del mantenimiento para el transporte de hidrógeno líquido es mucho más alto.

Como punto de referencia, 150 lb de hidrógeno líquido ocupa un volumen de 1000 L y requiere de un contenedor para transportarlo de un peso entre 440 y 660 lb. El mismo peso de hidrógeno, transportado como un gas o como un hidruro requiere de un contenedor de 2 a 5 toneladas. La opción de hidrógeno líquido es obviamente más eficiente.

Los trailers standard para transportar hidrógeno líquido son de 40 pies y de 80 pies. El contenedor más grande usado para transporte alcanza los 200,000 m<sup>3</sup>.

## **3. HIDRÓGENO UTILIZADO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

### **3.1. Motores de hidrógeno**

En general, tener un motor de combustión interna que trabaje con hidrógeno no es difícil. Sin embargo, tener un motor de combustión interna que trabaje bien, es más que un reto. El primer esfuerzo de desarrollar un motor de hidrógeno fue hecho en 1820 por W. Cecil, el motor trabajaba bajo el principio de vacío, en el cual la presión atmosférica empuja un pistón contra el vacío para producir potencia. El vacío es creado quemando una mezcla de aire con hidrógeno, permitiendo a este expandirse y luego enfriarse. Aunque el motor trabajaba satisfactoriamente, nunca fue práctico.

Sesenta años después N. A. Otto (inventor del ciclo Otto) durante su trabajo con motores de combustión interna entre los años 1860 y 1870, reportó el uso de un productor sintético de gas para combustible, el cual probablemente tenía un contenido de hidrógeno arriba del 50%.

El hidrógeno ha sido usado desde entonces extensamente en los programas espaciales debido a que tiene la mejor relación de energía peso que cualquier combustible. El hidrógeno líquido es el combustible elegido para los motores de los cohetes, y ha sido utilizado en muchas misiones espaciales incluyendo las misiones espaciales Apollo a la Luna, Skylab, las misiones Vikingo a Marte y la misión Voyager a Saturno.

En los años recientes, la preocupación por un aire más limpio, junto con una regulación estricta de la contaminación del aire y el deseo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles han vuelto a retomar el interés en el hidrógeno como combustible para vehículos.

### **3.2. Propiedades de combustión del hidrógeno**

Las propiedades del hidrógeno fueron detalladas en el capítulo 1. Las propiedades del hidrógeno que contribuyen a su uso como combustible son:

- Ancho rango de inflamabilidad
- Poca energía para encendido
- Pequeñas distancias de apagado
- Alta temperatura de auto encendido
- Alta velocidad de llama a relación estequiométrica
- Alta difusión
- Muy baja densidad

#### **3.2.1. Ancho rango de inflamabilidad**

El hidrógeno tiene un rango ancho de inflamabilidad en comparación con todos los otros combustibles. Como resultado, el hidrógeno puede ser quemado en un motor de combustión interna sobre un ancho rango de mezclas de combustible y aire. Una ventaja significativa de esto es que el hidrógeno puede trabajar con una mezcla pobre. Una mezcla pobre es aquella en la cual la cantidad de combustible es menor que la cantidad ideal teórica, estequiométrica o química, necesaria para la combustión con una cantidad de aire dada. Esto explica porque es bastante fácil obtener un motor que arranque con hidrógeno.

Generalmente, la economía de combustible es mayor y la reacción de combustión es más completa cuando se trabaja una aplicación con una mezcla pobre de combustible. Adicionalmente, la temperatura final de combustión es generalmente menor, reduciendo la cantidad de contaminación, con gases tales como óxido de nitrógeno, emitido en los gases de escape.

### **3.2.2. Poca energía para encendido**

El hidrógeno requiere muy poca energía para encendido. La cantidad de energía necesaria para encender el hidrógeno es menor en magnitud que la requerida para gasolina. Esto permite que las máquinas que trabajan con hidrógeno enciendan con mezclas pobres y asegura su rápido encendido.

Desafortunadamente, la poca energía para encendido significa que los gases calientes y los puntos calientes en el cilindro pueden servir como fuente de encendido, creando problemas de encendidos anticipados y de encendido anterior. Prevenir lo anterior es uno de los desafíos asociados con operar una máquina con hidrógeno. El ancho rango de inflamabilidad del hidrógeno quiere decir que casi cualquier mezcla puede ser encendida por un punto caliente.

### **3.2.3. Pequeñas distancias de extinción**

El hidrógeno tiene una distancia pequeña de extinción, más pequeña que la de la gasolina. Esto tiene como consecuencia que las llamas de hidrógeno viajen más cerca de las paredes del cilindro que otros combustibles antes de extinguirse. Así, es más difícil apagar una llama de hidrógeno que una llama de gasolina. Una distancia de extinción más pequeña puede aumentar la tendencia a fuego anterior debido a que la llama producida por la mezcla de hidrógeno con aire pasa más fácilmente por la válvula de admisión casi cerrada.

### 3.2.4. Alta temperatura de auto encendido

El hidrógeno tiene una temperatura de auto encendido relativamente alta. Esta es importante cuando la mezcla de hidrógeno-aire es comprimida. De hecho, la temperatura de auto encendido es un factor importante para determinar la relación de compresión que un motor puede usar, debido a que la elevación de temperatura durante la compresión está relacionada con la relación de compresión. El incremento de la temperatura está dado por la ecuación:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

Donde:

$V_1 / V_2$	=	Relación de compresión
$T_1$	=	Temperatura inicial absoluta
$T_2$	=	Temperatura final absoluta
$\gamma$	=	Relación de calores específicos

### 3.2.5. Alta velocidad de llama a relación estequiométrica

El hidrógeno tiene alta velocidad de llama a relaciones estequiométricas. Bajo estas condiciones, la velocidad de la llama es más rápida que la de la gasolina. Esto significa que los motores que trabajan con hidrógeno pueden acercarse más al ciclo ideal de la termodinámica.

### 3.2.6. Alta difusión

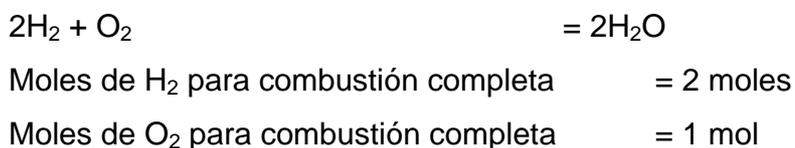
El hidrógeno tiene muy alta difusión. Esta habilidad de dispersarse en el aire es considerablemente mayor que la gasolina y es una ventaja debido principalmente a las siguientes dos razones. Primero, facilita la formación de una mezcla uniforme de combustible y aire. Segundo, si hay una fuga de hidrógeno, se dispersa rápidamente. Así, las condiciones de riesgo pueden ser evitadas o minimizadas.

### 3.2.7. Baja densidad

El hidrógeno tiene una densidad muy baja. Cuando se usa el hidrógeno en los motores de combustión interna, la densidad muy baja ocasiona dos problemas. Primero, un volumen muy grande de hidrógeno es necesario para una determinada aplicación. Segundo, la densidad de energía de la mezcla de aire e hidrógeno es baja por lo que la potencia de salida es reducida.

## 3.3. Relación aire/combustible

La combustión teórica o estequiométrica del hidrógeno y el oxígeno está dada por:



Debido a que el aire es usado como oxidante en lugar del oxígeno, el nitrógeno en el aire necesita ser incluido en los cálculos:

$$\begin{aligned}
 \text{Moles de N}_2 \text{ en el aire} &= \text{Moles de O}_2 * (79\% \text{ N}_2 \text{ en el aire} / 21\% \text{ O}_2 \text{ en el aire}) \\
 &= 1 \text{ mol de O}_2 * (79\% \text{ N}_2 \text{ en el aire} / 21\% \text{ O}_2 \text{ en el aire}) \\
 &= 3.762 \text{ moles de N}_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Número de moles de aire} &= \text{Moles de O}_2 + \text{moles de N}_2 \\
 &= 1 + 3.762 \\
 &= 4.762 \text{ moles de aire}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Peso de O}_2 &= 1 \text{ mol de O}_2 * 32 \text{ g/mol} \\
 &= 32\text{g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Peso de N}_2 &= 3.762 \text{ moles de N}_2 * 28\text{g/mol} \\
 &= 105.33\text{g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Peso de aire} &= \text{Peso de O}_2 + \text{Peso de N}_2 \\
 &= 32\text{g} + 105.33\text{g} \\
 &= 137.33\text{g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Peso de H}_2 &= 2 \text{ moles de H}_2 * 2\text{g/mol} \\
 &= 4\text{g}
 \end{aligned}$$

La relación estequiométrica aire/combustible (A/C) para el hidrógeno y el aire es:

$$\begin{aligned}
 \text{A/C basado en la masa} &= \text{masa de aire/masa de combustible} \\
 &= 137.33\text{g}/4\text{g} \\
 &= 34.33 : 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{A/C basada en el volumen} &= \text{volumen (moles) de aire/volumen (moles) de combustible} \\
 &= 4.762/2 \\
 &= 2.4 : 1
 \end{aligned}$$

El porcentaje de la cámara de combustión ocupado por hidrógeno para una mezcla estequiométrica:

$$\begin{aligned}
\% \text{ H}_2 &= \text{volumen (moles) de H}_2 / \text{volumen total} \\
&= \text{volumen H}_2 / (\text{volumen de aire} + \text{volumen de H}_2) \\
&= 2 / (4.762+2) \\
&= 29.6\%
\end{aligned}$$

Como se muestra en los cálculos anteriores, la relación estequiométrica o química correcta A/C para la combustión completa de hidrógeno en el aire es 34:1 por masa. Esto significa que para una combustión completa, se necesitan 34 libras de aire por cada libra de hidrógeno. Esto es mucho más alto que la relación A/C de 14.7:1 requerida para la gasolina.

### **3.4. Problemas de pre-encendido y sus soluciones**

El primer problema que se encuentra en el desarrollo de los motores de hidrógeno es el encendido prematuro. El problema del encendido prematuro es mucho mayor en los motores de hidrógeno que en otros motores de combustión interna, debido a la baja energía de encendido del hidrógeno, el ancho rango de inflamabilidad y la pequeña distancia de extinción.

El encendido prematuro ocurre cuando la mezcla de combustible en la cámara de combustión se enciende antes del encendido por medio de la bujía, y da como resultado un motor ineficiente.

Un gran número de estudios se han hecho para determinar la causa del pre-encendido en los motores de hidrógeno. Algunos de los resultados sugieren que el pre-encendido es causado por los puntos calientes en la cámara de combustión, tales como, los puntos calientes en la bujía de encendido o en la válvula de escape. Otras investigaciones han mostrado que el encendido anterior puede darse cuando hay traslape entre la apertura de la válvula de admisión y el cierre de la válvula de escape.

Se piensa también que la descomposición química, producida por el calor, del aceite suspendido en la cámara de combustión o en las rendijas justo arriba del anillo superior del pistón pueden contribuir al pre-encendido.

### **3.4.1. Sistemas de alimentación de combustible**

Puede ser efectivo para reducir o eliminar el pre-encendido, adaptar o rediseñar el sistema de alimentación de combustible.

Los sistemas de alimentación de hidrógeno pueden descomponerse en tres tipos principales: inyección central o carburada, puerto de inyección e inyección directa.

#### **3.4.1.1. Inyección central**

Este es el sistema más simple de alimentación de combustible para motores de hidrógeno; se hace por medio de un carburador o sistema de inyección central. Este sistema tiene ventajas para el motor de hidrógeno. Primero, la inyección central no necesita de una fuente de presión de hidrógeno tan alta como en los otros métodos. Segundo, la inyección central o con carburador es utilizada en los motores de gasolina, haciendo más fácil de convertir un motor de gasolina común en un motor de hidrógeno o de gasolina-hidrógeno.

La desventaja de la inyección central es que es más susceptible a la combustión irregular debido al pre-encendido y al fuego anterior fuera del cilindro.

### **3.4.1.2. Sistemas con puerto de inyección**

El sistema de alimentación de combustible de puerto de inyección inyecta combustible directamente dentro del colector de admisión en cada puerto de admisión, en lugar de alimentar el combustible en un punto central. Generalmente, el hidrógeno es inyectado en el colector después de empezar el ciclo de admisión del pistón.

El sistema de inyección de volumen constante (CVI por sus siglas en inglés) utiliza un eje de levas mecánico para sincronizar la inyección de hidrógeno en cada cilindro.

El sistema de inyección de combustible electrónico (EFI por sus siglas en inglés) regula la cantidad de hidrógeno a inyectar en cada cilindro. Este sistema utiliza un inyector electrónico de combustible individual (válvula solenoide) para cada cilindro.

### **3.4.1.3. Sistema de inyección directa**

Los motores de hidrógeno más sofisticados utilizan inyección directa en la cámara de combustión durante el ciclo de compresión. En la inyección directa, la válvula de admisión está cerrada cuando se inyecta el combustible, evitando completamente el encendido prematuro durante el ciclo de admisión. En consecuencia, en el motor no hay encendido en el colector de admisión.

La potencia de salida de un motor de hidrógeno de inyección directa es 20% mayor que en un motor de gasolina y 42% mayor que en el motor de hidrógeno con carburador.

### **3.4.2. Dilución térmica**

Las condiciones de pre-encendido pueden reducirse usando técnicas de dilución térmica como la de recirculación de gases de escape o inyección de agua.

Como el nombre lo indica, en un sistema de recirculación una porción de los gases de escape se regresa al colector de admisión. La introducción de gases de escape ayuda a reducir la temperatura de los puntos calientes, reduciendo la posibilidad de pre-encendido.

Adicionalmente, recircular los gases de escape reduce la temperatura pico de combustión que reduce la emisión de  $\text{NO}_x$ . Típicamente, una recirculación de gases de escape de 25 a 30% es efectiva para eliminar el encendido del combustible antes de la cámara de combustión, pero por otro lado, la potencia de salida del motor se reduce cuando se trabaja con recirculación de gases de escape.

Otra técnica para la dilución térmica de la mezcla de combustible es la inyección de agua. Un problema con este tipo de sistema es que el agua no se puede mezclar con el aceite, y por lo tanto se debe ser cuidadoso para asegurar que los empaques no tengan fuga.

### **3.4.3. Diseño del motor**

La forma más efectiva de controlar el pre-encendido es rediseñando el motor para el uso de hidrógeno, específicamente la cámara de combustión y el sistema de enfriamiento.

Debido a que la no combustión de los hidrocarburos no es una preocupación para los motores de hidrógeno, se usa una gran relación diámetro carrera del pistón en este motor. Para acomodarse a las velocidades del ancho rango de llama, se necesitan dos bujías. El sistema de refrigeración debe ser diseñado para proveer un flujo uniforme para todos los lugares que necesitan enfriamiento.

Medidas adicionales para disminuir la probabilidad de pre-encendido son el uso de dos válvulas pequeñas de escape en lugar de una sola grande, así como el desarrollo de un sistema efectivo de extinción de gases de escape, que consiste en desplazar efectivamente los gases de escape de la cámara de combustión con aire fresco.

### **3.5. Sistemas de encendido**

Debido al bajo límite de energía de encendido del hidrógeno, encender el hidrógeno es muy fácil y se pueden utilizar sistemas de encendido de gasolina. Con una relación de aire/combustible muy pobre (130:1 a 180:1) la velocidad de la llama es considerablemente reducida y se prefiere el uso de sistemas de encendido con doble bujía.

Las bujías para el motor de hidrógeno deben ser del tipo frío y no tener punta de platino. Una bujía de tipo frío es aquella que transfiere calor desde la punta de la bujía hacia la culata más rápidamente que una bujía de tipo caliente. Esto significa que se reducen las posibilidades de que la punta de la bujía encienda el aire/combustible, y provoque el pre-encendido. Las bujías tipo caliente son diseñadas para mantener una cierta cantidad de calor que hace que los sedimentos de carbono no se acumulen. Debido a que el hidrógeno no contiene carbono, una bujía tipo caliente no cumple esa útil función.

Las bujías no deben tener punta de platino ya que el platino es un catalizador, y provoca que el hidrógeno se oxide con el aire.

### **3.5.1. Ventilación del carter del cigüeñal**

La ventilación del carter del cigüeñal es aun más importante para los motores de hidrógeno que para los motores de gasolina.

Como en los motores de gasolina, el combustible que no se quema se puede filtrar por los anillos del pistón y entrar al carter del cigüeñal.

Debido a que el hidrógeno tiene una energía de ignición baja, cualquier combustible que no se queme y entre al carter del cigüeñal tiene una gran posibilidad de encenderse. Debe evitarse la acumulación de hidrógeno en el carter del cigüeñal por medio de la ventilación.

Un encendido dentro del carter del cigüeñal puede hacer un ruido notable o dar como resultado que se produzca fuego en el motor. Cuando el hidrógeno se enciende dentro del carter del cigüeñal, ocurre un aumento de presión repentino. Para aliviar esta presión, una válvula de alivio de presión debe de ser instalada en el carter del cigüeñal.

Los gases de escape se pueden filtrar por los anillos de los pistones dentro del carter del cigüeñal. Debido a que el gas de escape del hidrógeno es vapor de agua, el agua se acumula condensándose en el carter del cigüeñal cuando se tiene la ventilación inapropiada. La mezcla de agua y aceite en el carter del cigüeñal reduce la capacidad de lubricación del aceite, dando lugar a un mayor desgaste del motor.

### 3.6. Eficiencia térmica

La eficiencia termodinámica teórica de un motor de ciclo Otto está basada en la relación de compresión del motor y la relación de calores específicos del combustible como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}}$$

Donde:

$V_1/V_2$  = la relación de compresión

$\gamma$  = relación de calores específicos

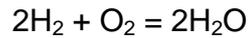
$\eta_{th}$  = Eficiencia termodinámica teórica

Cuanto mayor sea la relación de compresión y/o la relación de calores específicos, mayor será la eficiencia termodinámica del motor. La relación de compresión límite de un motor está basada en la resistencia del combustible al golpe. Una mezcla pobre de hidrógeno es menos susceptible al golpe que la gasolina convencional y por ello puede tolerar mayores relaciones de compresión.

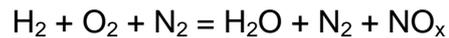
La relación de calores específicos está relacionada con la estructura molecular del combustible. Cuanto menos compleja sea la estructura molecular, mayor será la relación de calores específicos. El hidrógeno tiene una estructura molecular más simple que la gasolina ( $\gamma = 1.4$ ) y por ello su relación de calores específicos es mayor que la gasolina convencional ( $\gamma = 1.1$ ).

### 3.6.1. Emisiones

La combustión del hidrógeno con el oxígeno genera agua como único producto:



La combustión del hidrógeno con el aire puede también producir óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ):



Los óxidos de nitrógeno son creados debido a las altas temperaturas generadas dentro de la cámara de combustión durante la combustión. Estas temperaturas altas causan que un poco del nitrógeno en el aire se combine con el oxígeno en el aire. La cantidad de  $\text{NO}_x$  formado depende de:

- La relación aire/combustible
- La relación de compresión del motor
- La velocidad del motor
- El tiempo de encendido
- Si se utiliza dilución térmica

Además de óxido de nitrógeno, puede haber rastros de monóxido de carbono y dióxido de carbono en los gases de escape, debido a la filtración de aceite en la cámara de combustión.

Dependiendo de las condiciones del motor (quema de aceite) y de la estrategia de operación (una relación rica contra una pobre de

aire/combustible), un motor de hidrógeno puede producir desde una emisión casi cero (tan bajo como unas pocas partes por millón) hasta una alta concentración de  $\text{NO}_x$  y una emisión significativa de monóxido de carbono.

### **3.7. Potencia de salida**

La potencia máxima teórica de salida del motor de hidrógeno depende de la relación aire/combustible y del método utilizado para la inyección de combustible.

Como se mencionó, la relación estequiométrica de aire/combustible para el hidrógeno es 34:1. Con esta relación de aire/combustible, el hidrógeno se desplazará en el 29% del volumen de la cámara de combustible dejando solo un 71% para el aire. Como resultado, el contenido energético de la mezcla será menor que el que tuviera si la mezcla fuera gasolina (debido a que la gasolina es líquida, ésta solo ocupa un volumen pequeño de la cámara de combustible, y así permite que entre más aire).

Debido a que tanto el método carburado, como el de puerto de inyección mezclan el combustible y el aire antes de entrar a la cámara de combustión, este sistema limita la potencia máxima teórica obtenible a aproximadamente 85% de aquella de los motores de gasolina. Para sistemas de inyección directa, los cuales mezclan el combustible con el aire después de que la válvula de entrada se cierra (y así la cámara de combustión tiene un 100% de aire), la salida máxima del motor puede ser aproximadamente 15% mayor que aquella para los motores de gasolina.

Así, dependiendo de cómo se ingresa el combustible a la cámara de combustión, la máxima potencia de salida para el motor de hidrógeno puede ser

entre 15% mayor o 15% menor que el de gasolina si se utiliza la relación estequiométrica aire/combustible. Sin embargo, a la relación de aire/combustible estequiométrica, la temperatura de combustión es muy alta y como resultado se forma una gran cantidad de óxido nitroso ( $\text{NO}_x$ ), el cual es un contaminante crítico. Debido a que una de las razones de utilizar hidrógeno es su baja emisión de gases de escape, los motores de hidrógeno no están normalmente diseñados para trabajar con relación de aire/combustible estequiométrica.

Generalmente, los motores de hidrógeno están diseñados para usar cerca de dos veces más aire que el requerido teóricamente para una combustión completa. Con esta relación de aire/combustible, la formación de óxido nitroso ( $\text{NO}_x$ ) es disminuida a casi cero. Desafortunadamente, esto también reduce la potencia de salida acerca de la mitad de un motor de gasolina de tamaño similar. Para compensar las pérdidas de potencia, los motores de hidrógeno son generalmente más grandes que los motores de gasolina y están equipados con turbocargadores o supercargadores.

### **3.8. Mezclas de gas de hidrógeno**

El hidrógeno puede ser utilizado ventajosamente en motores de combustión interna como un aditivo del combustible hidrocarburo.

El hidrógeno es más comúnmente mezclado para este propósito con el gas natural a alta presión debido a que ambos combustibles pueden ser almacenados en el mismo tanque. Si el hidrógeno es mezclado con otros combustibles, generalmente tiene que almacenarse separado y debe ser mezclado en estado gaseoso inmediatamente antes de la ignición. En general,

es impráctico usar hidrógeno en conjunto con otros combustibles que también requieren de un sistema de almacenamiento voluminoso, como el propano.

El hidrógeno gaseoso no puede ser almacenado en el mismo recipiente con combustible líquido. La baja densidad del hidrógeno causará que se mantenga sobre el líquido y no se mezclen. Además, los combustibles líquidos son almacenados a presiones relativamente bajas y así muy poco hidrógeno puede ser agregado al recipiente.

El hidrógeno líquido no puede ser almacenado en el mismo recipiente con otros combustibles. La baja temperatura del punto de ebullición del hidrógeno líquido congelaría a cualquier otro combustible.

El hidrógeno puede ser usado junto con otros combustibles líquidos compactos como la gasolina, el alcohol y el diesel cada uno almacenado por separado. Existen vehículos que trabajan con este tipo de sistema usando un combustible o el otro, pero no los dos al mismo tiempo. Una ventaja de esta estrategia es que el vehículo puede continuar trabajando si el hidrógeno no está disponible.

El hidrógeno no puede ser directamente utilizado en un motor diesel (encendido por compresión) debido a que la temperatura de autoignición del hidrógeno es muy alta (esto también es válido para el gas natural). Así, los motores diesel deben ser equipados con bujías o utilizar una pequeña cantidad del combustible diesel para la ignición del gas (conocido como encendido piloto). Aunque la técnica del encendido piloto ha sido desarrollada para usos con gas natural, no se está haciendo actualmente con el hidrógeno.

Una mezcla de gas comercialmente disponible conocida como Hythane contiene 20% de hidrógeno y 80% de gas natural. Con esta relación, no se requiere de modificaciones en el motor de gas natural; estudios han mostrado que la emisión de gases contaminantes se ha reducido en más del 20%. Mezclas con más del 20% de hidrógeno con gas natural pueden reducir aun más la emisión de gases contaminantes pero se requiere de algunas modificaciones en el motor.

Trabajar un motor de combustión interna con una mezcla pobre de combustible es ventajoso en términos de emisiones de óxido de nitrógeno y de economía del combustible.

Para motores que trabajan con hidrocarburos, cuando operan con mezclas pobres de combustible producen una menor emisión de monóxido de carbono y de hidrocarburos no quemados.

El límite bajo de energía de ignición del hidrógeno y su alta velocidad de quemado hace que la mezcla hidrógeno/hidrocarburo sea fácil de encender, reduciendo el combustible no quemado y de este modo mejora las emisiones, el desempeño y la economía del combustible. Respecto de la potencia de salida, el hidrógeno aumenta la densidad de energía de la mezcla, en mezclas pobres, al incrementar la relación de hidrógeno-carbono, y de este modo mejora el torque en condiciones de aceleración.

## **4. TECNOLOGÍA DEL MOTOR CON CELDA DE COMBUSTIBLE**

### **4.1. Uso de la tecnología de la celda de combustible**

#### **4.1.1. Historia**

Los desarrollos principales de una celda de combustible operacional fueron planteados en el año 1800 por William Grove reconocido como el descubridor de esta tecnología en 1839. Durante el resto del siglo los científicos intentaron desarrollar las celdas de combustible utilizando diferentes tipos de combustibles y de electrolitos. Trabajos adicionales realizados en la primera mitad del siglo 20 sirvieron como fundamento para los sistemas eventualmente usados en los vuelos espaciales Apollo y Francis. De todas formas, no fue hasta 1959 que Francis T. Bacon demostrara exitosamente la primera celda de combustible totalmente operacional.

Las celdas de combustible PEM (proton exchange membrane) o de membrana de intercambio de protones fueron primeramente utilizadas por la NASA en 1960 como parte del programa espacial Gemini, y fueron utilizadas en siete misiones. Esas celdas de combustible, usaron oxígeno e hidrógeno puro como gases reactantes, eran producidas en pequeña escala, caras y no viables comercialmente. El interés de la NASA empujó a un desarrollo más amplio, así como la crisis de energía en 1973. Desde entonces, la investigación de las celdas de combustible, ha continuado inabatemente y las celdas de

combustible han sido usadas satisfactoriamente en una amplia variedad de aplicaciones.

#### **4.1.2. Ventajas de las celdas de combustible**

Los sistemas de celdas de combustible son generalmente comparados con los motores de combustión interna y las baterías pero los primeros ofrecen ventajas y desventajas únicas respecto de los últimos.

Las celdas de combustible ofrecen las siguientes ventajas:

1. Los sistemas con celdas de combustible operan sin contaminación cuando trabajan con hidrógeno puro, los únicos productos derivados son agua pura y calor. Cuando se trabaja con mezclas de hidrógeno ricamente reformado; algunas emisiones dañinas resultan, aunque son menores que aquellas emitidas por motores de combustión interna usando combustibles fósiles convencionales.
2. Los sistemas con celdas de combustible operan a mayor eficiencia termodinámica que las máquinas que utilizan calor. Las máquinas que utilizan calor como los motores de combustión interna y las turbinas, convierten energía química en calor por medio de la combustión y utilizan este calor para hacer trabajo útil. La eficiencia termodinámica óptima de las máquinas que utilizan calor es:

$$\text{Eficiencia}_{MAX} = 1 - T_2 / T_1$$

Donde:

$T_1$  = Temperatura absoluta del gas de entrada (en K)

$T_2$  = Temperatura absoluta del gas de salida (en K)

De la fórmula anterior, podemos observar que cuanto mayor sea la temperatura del gas caliente entrando a la máquina, y cuanto menor sea la temperatura del gas frío de salida después de la expansión, mayor será la eficiencia termodinámica. Así en teoría, la temperatura de entrada puede ser elevada a una cantidad arbitraria para lograr cualquier eficiencia deseada, mientras que la temperatura de salida no puede ser menor que la temperatura ambiente.

De cualquier modo, en las máquinas reales que utilizan calor, la temperatura está limitada por consideraciones de los materiales. Además, en los motores de combustión interna, la temperatura de entrada es la temperatura de operación del motor, que es mucho menor que la temperatura de ignición; ya que las celdas de combustible no utilizan combustión, su eficiencia no está atada a su temperatura máxima de operación. Como resultado, la eficiencia del paso de conversión de la potencia (la reacción electroquímica respecto de la reacción de combustión) puede ser significativamente mayor.

3. Además de tener una eficiencia térmica específica mayor que las máquinas que utilizan calor, las celdas de combustible tienen también mayor eficiencia trabajando a una parte de la carga y no muestran una abrupta caída de eficiencia por no estar trabajando a plena carga. Los motores que utilizan calor operan con la mayor eficiencia cuando trabajan a la velocidad de diseño y muestran un rápido descenso en eficiencia al trabajar a carga parcial.

Las celdas de combustible, al igual que las baterías, tienen mayor eficiencia trabajando a una parte de la carga, que a plena carga y con menos variación en todo el rango de operación. Las celdas de combustible son diseñadas modularmente y con eficiencia constante independientemente del tamaño del módulo.

4. Las celdas de combustible tienen buenas características de flujo de carga. Las celdas de combustible, como las baterías, son dispositivos de estado sólido que reaccionan químicamente e instantáneamente con los cambios de la carga. Los sistemas con celdas de combustible, de cualquier modo, están constituidos con equipos auxiliares con partes mecánicas y cada uno tiene su tiempo de respuesta debido a cambios en la demanda de carga.

No obstante, las celdas de combustible que operan con hidrógeno puro tienen excelente respuesta en todo su rango de operación.

5. Cuando se utilizan como generadores de energía eléctrica, las celdas de combustible requieren de menos transformaciones de energía que las máquinas que utilizan calor. Cuando se utilizan como generadores de energía mecánica, las celdas de combustible requieren de un número igual de conversiones de energía que las máquinas que utilizan calor, aunque las transformaciones específicas son diferentes.

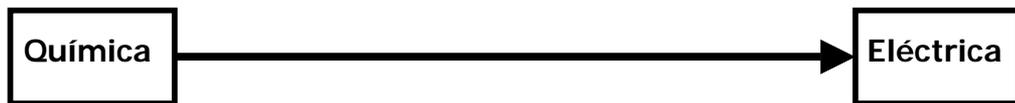
Cada transformación de energía tiene una pérdida de energía asociada, por ello cuanto menos transformaciones se tengan, mayor será la eficiencia del dispositivo. Así, las celdas de combustible son más satisfactorias para aplicaciones que requieran energía eléctrica al final del producto, en lugar de energía mecánica. En la siguiente figura se

muestran las comparaciones de transformaciones de energía entre celdas de combustible, baterías y máquinas que utilizan calor.

**Figura 5. Transformaciones de energía comparativas**

**Transformaciones de energía para salidas de energía eléctrica**

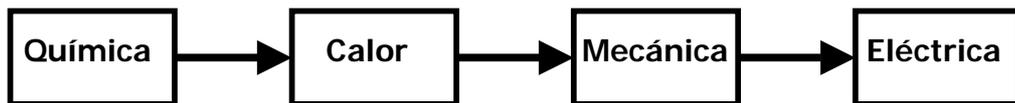
**Celdas de combustible**



**Baterías**

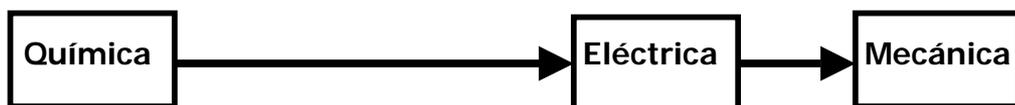


**Máquinas que utilizan calor**

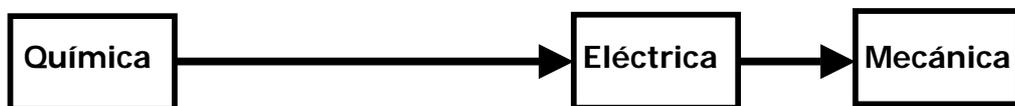


**Transformaciones de energía para salidas de energía mecánica**

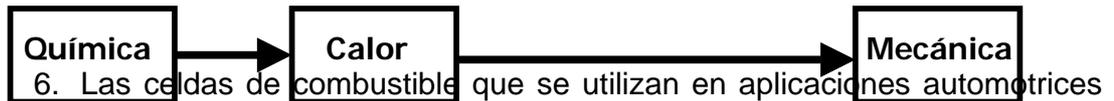
**Celdas de combustible**



**Baterías**



## Máquinas que utilizan calor



trabajan a bajas temperaturas (típicamente menos de 100 °C). Esta es una ventaja porque las celdas de combustible requieren pequeños tiempos de calentamiento, se reducen los peligros de altas temperaturas, y la eficiencia termodinámica de la reacción electroquímica es inherentemente mejor. Esta también es una desventaja porque es más difícil la expulsión de calor (especialmente en climas calurosos) por ello los sistemas de enfriamiento deben ser más grandes, y el proceso de la reacción electroquímica es más lento que a altas temperaturas.

7. Las celdas de combustible pueden ser utilizadas en aplicaciones de cogeneración. Además de potencia eléctrica, las celdas de combustible generan agua pura caliente y calor en grado medio, y ambos pueden ser potencialmente utilizados en aplicaciones domésticas e industriales. Cuando esto se hace, la eficiencia de todo el sistema combinado se incrementa.
8. Las celdas de combustible no requieren de afinación o de ponerlas a punto.
9. Las celdas de combustible no requieren recarga. En lugar de recargarse, las celdas de combustible deben abastecerse de combustible, lo cual es más rápido que recargar una batería y pueden proveer un mayor tiempo de uso, dependiendo del tamaño del tanque de almacenamiento.

### **4.1.3. Desventajas de las celdas de combustible**

Las celdas de combustible tienen las siguientes desventajas:

1. Irónicamente, el hidrógeno que es muy beneficioso ambientalmente, cuando lo utilizamos en las celdas de combustible, es también muy difícil de fabricar y de almacenar. Los actuales procesos de fabricación son caros y energéticamente intensivos, y a menudo derivan finalmente de combustibles fósiles. Todavía se tiene que desarrollar una infraestructura efectiva para fabricar y almacenar el hidrógeno.

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno gaseoso son grandes y pesados para acomodar la baja densidad de energía volumétrica del hidrógeno. Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido son más pequeños y ligeros, pero deben operar a bajas temperaturas. Alternativamente, si el hidrógeno se almacenara como un hidrocarburo o un alcohol, y se liberara en donde se necesite por medio de un reformador a bordo, se simplificaría el almacenamiento y la manipulación, pero se perderían algunos beneficios ambientales.

2. Las celdas de combustible requieren combustible relativamente puro, libre de contaminantes específicos. Estos contaminantes incluyen compuestos del azufre, compuestos del carbono y residuos de combustibles líquidos (dependiendo del tipo de celda de combustible), que podrían dejar fuera de funcionamiento el catalizador de la celda de

combustible destruyendo su habilidad de operar. En el caso de los motores de combustión interna ninguno de estos contaminantes inhabilita su operación ya que ninguno evita la combustión.

3. Las celdas de combustible utilizables en automotores típicamente requieren el uso de un catalizador de platino para promover la reacción de generación de potencia eléctrica, pero el platino es un metal muy raro y además bastante caro.
4. Las celdas de combustible no se deben congelar con agua adentro. Las celdas de combustible generan agua pura durante la reacción de generación de potencia eléctrica y la mayoría de las celdas de combustible utilizables para aplicaciones en automóviles utilizan gases reactantes húmedos. Cualquier residuo de agua dentro de la celda de combustible puede causar una dañina expansión irreversible si el agua se llega a congelar. Durante su funcionamiento, los sistemas con celdas de combustible generan suficiente calor que previene el riesgo de congelación en temperaturas ambiente normales, pero cuando se dejan de utilizar en ambientes fríos la celda de combustible se debe mantener caliente, o los residuos de agua se deben quitar antes de que la celda se congele. Esto normalmente ocasiona que el vehículo cuente con facilidades de calentamiento o el uso de un dispositivo localizado de calentamiento de aire.
5. Las celdas de combustible PEM, que utilizan membrana de intercambio de protones no deben secarse mientras se utilizan y deben mantenerse húmedas durante el almacenamiento. Las membranas se pueden dañar, si se tratan de arrancar o de operar las celdas de combustible en condiciones secas.

6. Las celdas de combustible requieren de mantenimiento complicado y de sistemas de control. Las celdas de combustible son en sí mismas dispositivos de estado sólido, pero los sistemas requeridos de apoyo utilizados para el funcionamiento de la celda de combustible no lo son. De interés particular es el requisito de aire comprimido, que necesita un compresor de alta velocidad que impone una gran carga parásita en todo el sistema. La complejidad del sistema se incrementa significativamente si las celdas de combustible operan conjuntamente con un reformador a bordo.
7. Los sistemas de celdas de combustible son pesados. Las celdas de combustible por sí solas no son excesivamente pesadas, pero la combinación del peso de las celdas de combustible, los soportes del sistema y su tanque de almacenamiento de combustible es mucho mayor que el peso de un sistema de motor de combustión interna. Y los sistemas que cuentan con un reformador son aún más pesados. Los sistemas con celdas de combustible son generalmente más ligeros que los sistemas con baterías aunque los sistemas con baterías requieren menor equipo de soporte. El peso de los sistemas tiende a disminuir con el desarrollo de la tecnología. A pesar del peso, los vehículos prototipo existentes han mostrado que los sistemas pueden hacerse lo suficientemente compactos para uso automotriz.
8. Las celdas de combustible son una tecnología que está surgiendo. Así como con cualquier tecnología nueva, las reducciones en costo y tamaño, junto con incrementos en confiabilidad y duración son las metas primarias de la ingeniería.

#### **4.1.4. Aplicaciones**

Las celdas de combustible son inherentemente modulares, construidas fácilmente con partes intercambiables y por ello se prestan a un gran número de aplicaciones, desde grandes plantas estacionarias de generación de energía eléctrica hasta pequeños paquetes de potencia eléctrica portátiles.

#### **4.1.4.1. Plantas de generación de energía eléctrica estacionarias**

Durante las últimas décadas, las aplicaciones de plantas de generación de energía eléctrica estacionarias se han venido demostrando en un gran número de proyectos piloto usando una gran variedad de tecnologías de celdas de combustible. Las plantas de generación de energía eléctrica más grandes a la fecha son las del sistema de generación de energía Ballard que tienen 250 kW y utilizan como combustible gas natural y celdas de combustible de membrana de intercambio de protones PEM, y operan actualmente en varios sitios alrededor del mundo. Aunque 250 kW es una cantidad pequeña de potencia comparada con las estaciones de generación de potencia convencionales, es una cantidad adecuada para vecindarios o lugares incomunicados o para funcionar como planta de emergencia para instalaciones críticas, como hospitales.

Además de la alta eficiencia de operación, bajas emisiones y buena respuesta transitoria de las celdas de combustible, las aplicaciones estacionarias también producen abundantes cantidades de agua caliente y calor que pueden ser utilizadas en las comunidades circundantes, aumentando la eficiencia de todo el sistema.

#### **4.1.4.2. Submarinos**

Las celdas de combustible son atractivas para aplicaciones en submarinos debido al bajo ruido producido. Las celdas de combustible son el reemplazo lógico de los bancos de baterías actualmente utilizados para suministrar la potencia en los submarinos. Así como en las plantas de generación de energía eléctrica estacionarias, el agua y el calor pueden utilizarse a bordo para propósitos domésticos.

#### **4.1.4.3. Autobuses**

Los autobuses son la aplicación más avanzada comercialmente de todas las celdas de combustible. Todos los buses en los que se están probando las celdas de combustible, usan hidrógeno puro almacenado en forma de gas a alta presión.

Los buses son el punto de comienzo lógico para introducir la tecnología de las celdas de combustible al sector de transporte por varias razones; estos ofrecen una gran plataforma para los componentes del sistema y para el almacenamiento del combustible, pues pueden ser reabastecidos de combustible en una estación central, y se les puede dar mantenimiento con personal debidamente capacitado.

#### **4.1.4.4. Automóviles**

Los automóviles representan el mercado más reciente de la industria de las celdas de combustible debido a las cantidades de automóviles existentes en todo el mundo. Los automóviles son el mayor estímulo para el desarrollo de las celdas de combustible; por ser uno de los más grandes contaminantes del aire, plantean algunos de los más grandes desafíos para la comercialización de las

celdas de combustible. Estos desafíos incluyen el tamaño relativamente pequeño, la gran infraestructura necesaria para abastecer el combustible requerido, y los hábitos de mantenimiento que se deben dar a la población. Además, las expectativas de funcionamiento y de confiabilidad son altas mientras las expectativas del precio esperado, bajas.

Muchas compañías de automóviles están comprometidas en programas de celdas de combustible, incluyendo Chrysler, Ford, General Motores, Nissan, Mazda, Subaru, Toyota, Honda y Hyundai.

Algunas de estas compañías han construido prototipos de vehículos usando celdas de combustible con o sin baterías auxiliares, y utilizando como combustible hidrógeno líquido o hidrógeno gaseoso.

La falta de una infraestructura existente de hidrógeno es un impedimento serio para el uso de las celdas de combustible en los automóviles.

Algunos fabricantes de automóviles se han comprometido a introducir las celdas de combustibles al mercado en los primeros años de este siglo.

#### **4.1.4.5. Sistemas de potencia portátiles**

Las celdas de combustibles portátiles pueden ser potencialmente utilizadas en muchas aplicaciones que comúnmente utilizan baterías. Hay unidades comercialmente disponibles que proveen arriba de 1.2 kW de potencia eléctrica.

## **4.2. Principio de funcionamiento**

Una celda de combustible es un dispositivo de conversión de energía, que convierte la energía química del combustible directamente en electricidad sin ningún proceso térmico o mecánico intermedio.

La energía es liberada en cualquier lugar donde el combustible reaccione químicamente con el oxígeno del aire. En los motores de combustión interna, la reacción ocurre en el proceso de combustión y la energía es liberada en forma de calor, y una parte es utilizado para realizar trabajo útil por medio del empuje que se le hace a un pistón. En una celda de combustible, la reacción es en forma electroquímica, y la energía liberada es una combinación de una energía eléctrica DC de bajo voltaje y calor. La energía eléctrica puede ser utilizada directamente para realizar trabajo útil mientras que el calor es desperdiciado o utilizado para otros propósitos.

En la celda galvánica (o voltaica), las reacciones electroquímicas forman la base por la que se convierte energía química en eléctrica. Cualquier celda de combustible (sin importar el tipo de combustible) es una celda galvánica. En contraste, en las celdas electrolíticas, la energía eléctrica es convertida en energía química, tal como sucede en un electrolizador o en un electroplacador. El electrolizador es un aparato obsoleto utilizado para el tratamiento de fibromas por medio de electrólisis, que es el proceso en donde una corriente eléctrica se pasa a través de una solución electrolítica u otro medio adecuado, causando una reacción química. Un electroplacador es un aparato que hace una placa, que cubre un electrodo, con una pequeña capa de metal por electrodeposición (deposita una sustancia disuelta o suspendida, en un electrodo por medio de electrólisis).

Una característica básica de las celdas de combustible es que la corriente eléctrica de la carga determina la relación de consumo de hidrógeno y oxígeno. En los sistemas de apilación de celdas de combustible actuales, una

gran variedad de cargas eléctricas pueden ser suministradas por las celdas de combustible.

#### **4.2.1. Celdas galvánicas**

En principio todas las celdas galvánicas tienen dos electrodos, un ánodo y un cátodo, además de un electrolito.

El ánodo, se hace de una sustancia que se oxida rápidamente, o sea que libera electrones. En el interior de las celdas que crean potencial, los iones negativos fluyen hacia el ánodo. Una reacción química en la que una sustancia se combina con el oxígeno se denomina oxidación.

El cátodo se hace de una sustancia que se reduce rápidamente, o sea, acepta electrones. En el interior de las celdas que crean potencial, los iones positivos fluyen hacia el cátodo. Una reacción química en la que una sustancia se libera de oxígeno se denomina reducción. De tal forma que durante la operación de una celda de combustible, se crea potencial, el cátodo en el exterior de la celda es eléctricamente positivo y el ánodo es negativo. Los electrones fluyen por el circuito externo espontáneamente de una terminal negativa a una terminal positiva. Durante la reacción opuesta denominada electrólisis, se aplica potencial, el cátodo es eléctricamente negativo y el ánodo es positivo.

Para que una reacción química ocurra, los elementos reactivos deben estar en contacto, así se podrá dar un intercambio de electrones.

Si el ánodo y el cátodo estuvieran en contacto directo, la reacción ocurriría en la superficie donde ambas se tocan. No hay trabajo útil si los electrones pasan

directamente entre electrodos, toda la energía se manifestaría en forma de calor.

Para aprovechar, en una carga exterior, la energía eléctrica disponible en la celda, los electrodos deben estar separados de tal manera que los electrones puedan fluir entre los electrodos a través de una carga externa mientras aún exista alguna forma de contacto que habilite que la reacción se siga dando. Para lograr esto, en el interior de la celda el ánodo y el cátodo están separados por un electrolito.

Un electrolito es una sustancia que conduce iones. Un ion es un átomo o un grupo de átomos que han adquirido una carga eléctrica a través de la pérdida o la ganancia de uno o más electrones. Los iones con carga eléctrica positiva han perdido uno o más electrones y son conocidos como iones positivos. Los iones con carga eléctrica negativa han ganado uno o más electrones y son conocidos como iones negativos.

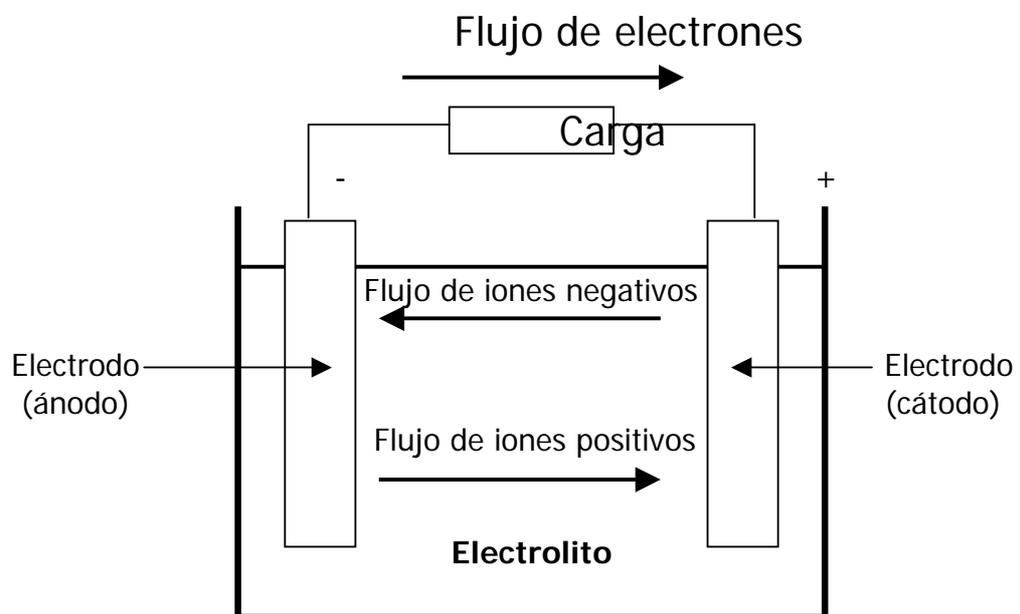
Por ejemplo, cuando la sal ( $\text{NaCl}$ ) se disuelve en agua, se disocia en el ión positivo de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y el ión negativo de cloro ( $\text{Cl}^-$ ). Cuando los iones se mueven a través del electrolito, la carga se mueve con ellos. Así, el movimiento iónico imparte una forma de conductividad en el electrolito, por lo que el agua salada es más conductiva que el agua pura.

Aunque el electrolito conduzca iones, los iones entre sí no conducen electricidad. La electricidad es el flujo de electrones libres, tal como a través de un metal. Si el electrolito fuera para conducir electricidad, además de iones, el ánodo y el cátodo estarían en cortocircuito como si estuvieran en pleno contacto. Esta es la dualidad de la conducción iónica y el aislamiento eléctrico

entre los iones que permite a los electrolitos formar la base esencial de todas las celdas galvánicas prácticas.

En la práctica, el material del electrodo negativo se disuelve en el electrolito formando iones positivos y deja en el electrodo negativo, por lo tanto, un incremento correspondiente de electrones libres. Este incremento de electrones se manifiesta como una carga negativa. Recíprocamente, el electrodo en el exterior positivo tiene tendencia en el interior de la celda a atraer a través del electrolito iones positivos que se originan por la reacción química en la que fueron creados en el electrodo negativo o de la sustancia del electrolito mismo.

**Figura 6. Como funciona una celda galvánica**



La acumulación de iones positivos en el electrodo positivo se manifiesta como una carga positiva. Así, existe un potencial eléctrico entre el electrodo positivo y el electrodo negativo. De cualquier modo, ésta es una situación de corta duración ya que la carga solo se puede incrementar hasta cierto punto y más allá de éste habrá insuficiente reacción química para generar iones adicionales. Esta carga puede ser medida como un voltaje de circuito abierto y es una propiedad del material escogido de los electrodos y en cierto grado de la temperatura de la celda.

La reacción química entre el electrodo negativo y el positivo no puede continuar y realizar trabajo útil mientras los electrones estén atrapados en el electrodo negativo. Para poder liberar electrones, el circuito eléctrico entre los dos electrodos debe estar cerrado por un camino de flujo externo. Si el camino de flujo externo incluye una carga, entonces los electrones realizan trabajo útil en su recorrido hacia el electrodo positivo.

Una vez que se encuentren conectados los electrodos a través de una carga, el exceso de electrones del electrodo negativo fluye a través de la carga hacia el electrodo positivo, completando así la reacción química. Como el electrodo negativo pierde el exceso de electrones y así su carga negativa, más iones positivos se desprenden del electrodo negativo disolviéndose en el electrolito produciendo en el electrodo negativo un exceso de electrones. Como el electrodo positivo también por el lado de la carga gana electrones y pierde su carga positiva, entonces se necesita que más iones positivos sean trasladados por la reacción química hacia el electrodo positivo.

En conclusión, los electrones fluyen del electrodo negativo hacia el positivo a través de una carga externa y luego se juntan con los iones de carga positiva que emigran del electrodo negativo a través del electrolito. Este flujo de

electrones continúa hasta que el electrodo negativo es consumido, o sea el electrolito por sí solo es incapaz de proveer más iones positivos. En otras palabras, el circuito se abre y por lo tanto no habrá un flujo de electrones. La proporción de la reacción es determinada por el tamaño de la carga.

La transformación de energía química neta que ocurre dentro de una celda galvánica es el resultado de la reacción química individual en el electrodo negativo y positivo, siempre el número de electrones ganados es el mismo número de electrones perdidos.

El electrolito es el corazón de las celdas galvánicas. Diferentes tipos de electrolitos se toman en cuenta para diferentes diseños fundamentales de baterías o de celdas de combustible. Los electrolitos pueden ser líquidos o sólidos y típicamente incluyen sales, ácidos o compuestos alcalinos. Independientemente de su composición, los electrolitos deben tener buena conducción iónica mientras sean eléctricamente no conductivos, deben ser no reactivos con los materiales de los electrodos, y deben exhibir un cambio pequeño en sus propiedades debido a las variaciones de temperatura.

#### **4.2.2. Las celdas de combustible**

En una celda de combustible, el combustible y los gases oxidantes comprenden los electrodos ánodo y cátodo respectivamente. Así, la estructura física de la celda de combustible es aquella en donde los gases son dirigidos a través de canales de flujo a ambos lados del electrolito. El electrolito es el rasgo característico que distingue los diferentes tipos de celdas de combustible; dependiendo del electrolito, así son los iones específicos que se conducen.

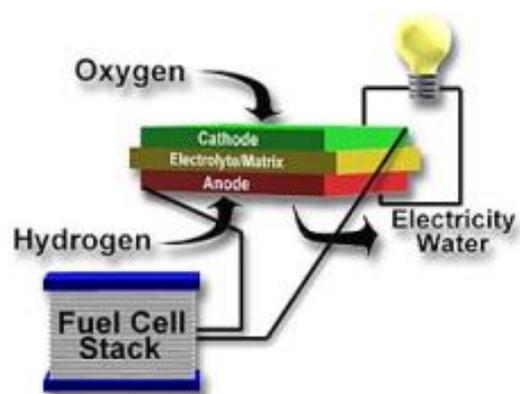
Los electrolitos pueden ser líquidos o sólidos, algunos operan a altas temperaturas, y otros a bajas temperaturas. Las celdas de combustible de baja

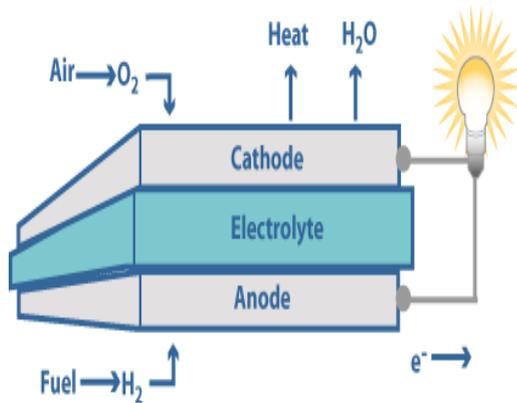
temperatura requieren de un catalizador de un metal noble, típicamente platino, para alentar a la reacción del electrodo, mientras las celdas de combustible de alta temperatura no lo necesitan.

La mayoría de las celdas de combustible ideales para aplicaciones automovilísticas usan un sólido de baja temperatura como electrolito que conduce iones de hidrógeno.

En principio, una celda de combustible puede operar usando una variedad de combustibles y oxidantes. El hidrógeno ha sido reconocido como el más efectivo de los combustibles para las celdas de combustible prácticas actualmente utilizadas, debido a que tiene la mayor reacción electroquímica comparándolo con otros combustibles como los hidrocarburos o los alcoholes. Incluso las celdas de combustible que operan directamente con otros combustibles que no son hidrógeno tienden primero a descomponer el combustible en hidrógeno y otros elementos antes de que la reacción tome lugar. El oxígeno es la elección obvia para el oxidante debido a su alta reactividad y a su abundancia en el aire.

**Figura 7. Celdas de combustible**





#### 4.2.2.1. Comparación entre las celdas de combustible y las baterías

Las celdas de combustible y las baterías son celdas galvánicas y por ello tienen muchas similitudes. Los dos consisten de un ánodo y un cátodo en contacto con un electrolito. Ambos dispositivos generan energía eléctrica por medio de la conversión de energía química usando una reacción electroquímica.

Esta reacción ocurre en los electrodos, o sea en el ánodo y en el cátodo, forzando la transferencia de electrones a través de una carga externa para completar la reacción. Las celdas individuales de ambos dispositivos, baterías y celdas de combustible, generan solo una pequeña cantidad de voltaje directo, por ello se tienen que combinar en serie para alcanzar o conseguir un voltaje y una capacidad de potencia eléctrica substancial.

Las celdas de combustible difieren de las baterías en la naturaleza de sus electrodos ánodo y cátodo. En una batería, el ánodo y el cátodo son metales; el zinc y el litio son típicamente utilizados como ánodo y óxidos metálicos como cátodo. En las celdas de combustible, los electrodos están

compuestos por gases a menudo en contacto con un catalizador de platino para promover la reacción química para la generación de potencia eléctrica. El hidrógeno o una mezcla rica en hidrógeno es típicamente usado como un electrodo y el oxígeno o el aire es utilizado como el otro electrodo.

Las celdas de combustible también difieren de las baterías por el método fundamental por medio del cual los reactantes químicos son almacenados. En una batería, los electrodos forman una parte integral de la estructura de la batería y se consumen durante su uso. Así, una batería sólo puede operar hasta que sus materiales sean completamente consumidos, después de este punto se debe reemplazar la batería o se debe recargar, dependiendo de la naturaleza de los materiales.

En una celda de combustible, los reactantes químicos son suministrados desde una fuente externa, por ello sus materiales de construcción nunca se consumen y las celdas de combustible operan mientras sean alimentados los reactantes químicos desde una fuente externa. Una celda de combustible continúa trabajando mientras sus reactantes químicos sean suministrados y los productos de la reacción sean removidos.

#### **4.2.2.2. Comparación entre las celdas de combustible y los motores de combustión interna**

Las celdas de combustible y los motores de combustión interna comparten similitudes de forma. Ambos, celdas de combustible y motores de combustión interna, utilizan combustible gaseoso que tiene que ser suministrado por un sistema de almacenamiento de combustible exterior (el motor de combustión interna utiliza combustible líquido que instantes previos a

la combustión se vuelve gaseoso o combustible gaseoso directamente). Los dos sistemas utilizan combustible rico en hidrógeno.

Las celdas de combustible utilizan hidrógeno puro o una mezcla de gas reformado. Los motores de combustión interna utilizan típicamente combustible hecho de fósiles que contiene directamente hidrógeno, aunque pueden ser configurados para operar utilizando hidrógeno puro.

Ambos sistemas utilizan aire comprimido como oxidante, en un motor de celdas de combustible el aire es comprimido por un compresor externo. En un motor de combustión interna, el aire es internamente comprimido por medio de la acción de un pistón. Ambos sistemas requieren de un sistema de enfriamiento, aunque los motores de combustión interna operan a mayores temperaturas que las celdas de combustible.

En algunos aspectos, las celdas de combustible y los motores de combustión interna son fundamentalmente diferentes. Las celdas de combustible hacen una reacción electroquímica entre el combustible y el oxidante, mientras que en los motores de combustión interna reaccionan el combustible y el oxidante quemándose. Los motores de combustión interna son aparatos mecánicos que generan energía mecánica mientras que las celdas de combustible son aparatos de estado sólido que generan energía eléctrica (aún cuando los sistemas utilizados para mantener la celda en operación no son de estado sólido).

La contaminación está relacionada con la composición del combustible y la temperatura de la reacción. Las celdas de combustible que operan con hidrógeno puro no producen emisiones dañinas, mientras que las que operan con hidrogeno-rico reformado producen algunas emisiones peligrosas

dependiendo de la naturaleza del proceso. Los motores de combustión interna que trabajan con hidrógeno puro pueden diseñarse para trabajar con casi cero emisiones peligrosas, mientras que los que trabajan con combustibles convencionales producen significativamente más contaminación.

### **4.3. Tipos de celdas de combustible**

Los tipos de celdas de combustible difieren principalmente por el tipo de electrolito que emplean. El tipo de electrolito determina la temperatura de operación, la cual varía extensamente entre los diferentes tipos.

Las celdas de combustible para altas temperaturas operan a más de 600 °C. Estas temperaturas altas permiten el reformado interno espontáneo de los combustibles hidrocarburos ligeros, como el metano, convirtiéndolo en hidrógeno y carbono en presencia de agua.

El reformado interno elimina la necesidad de un proceso separado de combustible, y puede utilizar otros combustibles en lugar del hidrógeno puro. Estas ventajas significativas conllevan un incremento de la eficiencia de todo el sistema hasta de un 15%. Durante la reacción electroquímica que continúa en la celda de combustible se da una liberación de energía durante la reacción entre el oxígeno y el hidrógeno, para formar el agua, y la reacción entre el monóxido de carbono y el oxígeno para formar dióxido de carbono.

Las celdas de combustible que trabajan a altas temperaturas también generan un alto grado de pérdidas de calor, las cuales pueden ser utilizadas en procesos de cogeneración.

Las celdas de combustible que trabajan a altas temperaturas reaccionan fácil y eficientemente sin la necesidad de un catalizador hecho de metal noble y

de precio alto, como el platino. Por el otro lado, la cantidad de energía liberada por la reacción electroquímica se degrada conforme se incrementa la temperatura de la reacción.

Las celdas de combustible para alta temperatura padecen de problemas severos de materiales. Pocos materiales pueden trabajar por largos periodos de tiempo sin una degeneración dentro de un ambiente químico a alta temperatura. Además, las operaciones a altas temperaturas no se prestan fácilmente a un gran rango de operaciones y no son convenientes en donde se requieren arranques rápidos. Como resultado, las aplicaciones de las celdas de combustible para altas temperaturas se han enfocado hacia las plantas estacionarias de generación de energía eléctrica en donde la eficiencia del reformado interno y las capacidades de cogeneración sobrepasan las desventajas de averías en los materiales y las desventajas de un arranque lento.

Las celdas de combustible que trabajan a altas temperaturas más sobresalientes son:

- Las de carbonato fundido
- Las de óxido sólido

Las celdas de combustible de baja temperatura típicamente operan debajo de 250 °C. Estas bajas temperaturas no permiten el reformado interno, y por ello requieren de una fuente externa de hidrógeno. En cambio, tienen un encendido rápido, sufren de pocos problemas de materiales y son más fáciles de manejar en aplicaciones para vehículos.

Las celdas de combustible que trabajan a bajas temperaturas más sobresalientes son:

- Las alcalinas
- Las de ácido fosfórico
- Las de membrana de intercambio de protones PEM ( o las de polímero sólido)

#### **4.3.1. Celdas de combustible de carbonato fundido**

Las celdas de combustible de carbonato fundido utilizan un electrolito que conduce iones de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) del cátodo hacia el ánodo. La conducción de iones es opuesta a muchos otros tipos de celdas de combustible, en las cuales se conducen los iones de hidrógeno del ánodo hacia el cátodo.

El electrolito está compuesto de una mezcla fundida de carbonato de litio y carbonato de potasio. Esta mezcla es retenida por fuerzas capilares dentro de una matriz cerámica de soporte de aluminato de litio. A la temperatura de trabajo de la celda de combustible, la estructura del electrolito es una masa gruesa, y proporciona un sello de gas en las orillas de la celda.

Las celdas de combustible de carbonato fundido trabajan a aproximadamente 650 °C y a una presión entre 1 a 10 bar. Cada celda genera entre 0.7 y 1.0 V de corriente directa.

##### **4.3.1.1. Ventajas y Desventajas**

Las ventajas de las celdas de combustible de carbonato fundido son:

- Soporta espontáneamente el reformado interno de combustible hidrocarburo ligero.
- Generan un alto grado de pérdidas por calor.
- Tienen una alta reacción cinética (reacciona rápidamente).
- Tienen alta eficiencia.
- No necesitan de un catalizador de metal noble.

Las desventajas son:

- Requieren del desarrollo de materiales apropiados que sean: resistentes a la corrosión, dimensionalmente estables, de alta duración y que se presten para su fabricación.

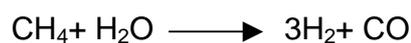
La corrosión es un problema particular y puede causar: Oxido de níquel en el cátodo que se puede llegar a disolver en el electrolito, pérdida del electrolito, deterioro de las placas separadoras y deshidratación de los electrodos. Todos estos efectos de la corrosión resultan en una declinación del desempeño, limitando la vida de la celda, y puede culminar con una falla en la celda. El uso de un catalizador de platino supera algunos de estos problemas, pero elimina la importante ventaja de costo económico.

La inestabilidad en las dimensiones puede causar la deformación del electrodo que altera el área de la superficie activa y podría causar una pérdida de contacto y una alta resistencia entre los componentes.

- Tiene una alta intolerancia al azufre. El ánodo en particular no puede tolerar más de 1 a 5 partes por millón de compuestos de azufre (principalmente H<sub>2</sub>S y COS) en el combustible gaseoso sin sufrir una pérdida significativa de desempeño.
- Tienen un electrolito líquido, el cual introduce problemas de manejo del líquido.
- Requiere de un considerable período de calentamiento.

#### 4.3.1.2. Reacción

Las celdas de combustible de carbonato fundido pueden trabajar usando hidrógeno puro o combustibles hidrocarburos ligeros. Cuando un hidrocarburo, como el metano, se introduce en el ánodo en presencia del agua, absorbe calor y sufre una reacción de reformado a vapor:



Cuando se utilizan otros combustibles hidrocarburos ligeros, el número de moléculas de hidrógeno y de monóxido de carbono pueden cambiar, pero en principio resultan los mismos productos.

Las reacciones en el ánodo son:

(1)  $3\text{H}_2 + 3\text{CO}_3^{2-} \longrightarrow 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2 + 6\text{e}^-$  Esta es la reacción de hidrógeno y ocurre independiente del combustible.

(2)  $\text{CO} + \text{CO}_3^{2-} \longrightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{e}^-$  Esta es la reacción del monóxido de carbono y ocurre solo cuando se utiliza un combustible hidrocarburo.

La reacción en el cátodo es:

(1)  $2\text{O}_2 + 4\text{CO}_2 + 8\text{e}^- \longrightarrow 4\text{CO}_3^{2-}$  Esta es la reacción del oxígeno y ocurre independientemente del combustible.

Los iones de  $\text{CO}_3^{2-}$  son atraídos a través del electrolito desde el cátodo al ánodo por la atracción química reactiva del hidrógeno y del monóxido de carbono con el oxígeno, mientras los electrones son forzados a pasar a través de un circuito externo desde el ánodo hacia el cátodo.

Combinando las reacciones del ánodo y del cátodo, las reacciones de todo el sistema son:

(1)  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  Esta es la reacción del hidrógeno y ocurre independientemente del combustible.

(2)  $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$  Este es la reacción del monóxido de carbono y ocurre sólo cuando se utiliza un combustible hidrocarburo.

Así, la celda del combustible produce agua, independientemente del combustible que utilice; si utiliza un hidrocarburo como combustible produce dióxido de carbono. Tanto el agua como el dióxido de carbono deben ser continuamente removidos para facilitar las reacciones posteriores.

#### **4.3.2. Celdas de combustible de óxido sólido**

Las celdas de combustible de óxido sólido utilizan un electrolito que conduce iones de óxido ( $O^{2-}$ ) desde el cátodo hacia el ánodo. La conducción de iones es opuesta a la mayoría de las celdas de combustible, en las cuales se conducen iones de hidrógeno desde el ánodo hacia el cátodo.

El electrolito está compuesto de un óxido sólido, generalmente zirconia (estabilizado con otro elemento óxido raro en la tierra el yttrium), tomando la forma de una cerámica.

Las celdas de combustible de óxido sólido son construidas como los chips de las computadoras por medio de una deposición sucesiva de varias capas de material. Las configuraciones comunes incluyen diseños tubulares y planos. El diseño difiere en magnitud de la disipación de pérdidas dentro de las celdas de combustible, en la manera en que se sella entre los canales de combustible y oxidante, y en la manera en que se hacen las conexiones eléctricas entre cada celda para formar un apilamiento de celdas. Los metales como el níquel y el cobalto pueden ser utilizados como los materiales de los electrodos.

Las celdas de combustible de óxido sólido trabajan aproximadamente a 1000 °C y a una presión de 1 bar. Cada celda puede generar entre 0.8 y 1.0 V de corriente directa.

#### **4.3.2.1. Ventajas y desventajas**

Las ventajas de las celdas de combustible de óxido sólido son que ellas:

- Soportan espontáneamente el reformado interno de los combustibles hidrocarburos.

Como los iones de óxido viajan a través del electrolito en lugar de los iones de hidrógeno, las celdas de combustible pueden en principio ser utilizadas para oxidar cualquier combustible gaseoso.

- Operan igualmente bien, utilizando combustibles húmedos o secos.
- Generan un alto grado de pérdidas por calor.
- Tienen una reacción cinética rápida
- Tienen eficiencia muy alta.
- Pueden trabajar con densidades de corriente mayores que las celdas de combustible de carbonato fundido.
- Tienen un electrolito sólido, evitando los problemas asociados con la manipulación de líquidos.
- Pueden ser fabricadas en una gran variedad de formas autosoportables y en un gran número de configuraciones.
- No necesitan de un metal noble que funcione como catalizador.

Las desventajas de este tipo de celdas de combustible son:

- Requieren del desarrollo de materiales ideales que tengan la conductividad requerida, que el sólido mantenga su estado a alta temperatura, que sean químicamente compatibles con otros

componentes de la celda, que sean dimensionalmente estables, que sean de alta duración y que se presten para su propia fabricación.

Pocos materiales pueden trabajar a altas temperaturas manteniendo su estado sólido durante largos períodos de tiempo. Además, el material seleccionado debe ser denso para prevenir mezclas del combustible y los gases oxidantes.

Deben tener casi las mismas características de expansión para evitar que las láminas se separen y se quiebren durante los ciclos térmicos.

- Tienen una moderada intolerancia al azufre.

Las celdas de combustible de óxido sólido son más tolerantes a los compuestos de azufre que las celdas de combustible de carbonato fundido, pero sobretodo los niveles deben estar limitados a 50 partes por millón. Este aumento en la tolerancia de azufre hace que estas celdas de combustible sean atractivas para los combustibles pesados. El exceso de azufre en el combustible disminuye el desempeño.

- No se tiene todavía un proceso de fabricación práctico.

- La tecnología no ha madurado todavía.

#### **4.3.2.2. Reacción:**

Las celdas de combustible de óxido sólido pueden trabajar utilizando hidrógeno puro o con combustibles hidrocarburos, así como lo hacen las celdas de combustible de carbonato fundido. Esto da como resultado una entrada de flujo de combustible hidrógeno comprimido con o sin monóxido de carbono.

Las reacciones en el ánodo son:

(1)  $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$  Esta es la reacción del hidrógeno y ocurre independientemente del combustible.

(2)  $\text{CO} + \text{O}^{2-} \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$  Esta es la reacción del monóxido de carbono y ocurre solo cuando se utilizan combustibles hidrocarburos.

La reacción en el cátodo es:

(1)  $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{O}^{2-}$  Esta es la reacción del oxígeno y ocurre independientemente del combustible.

Los iones  $\text{O}^{2-}$  son atraídos a través del electrolito desde el cátodo al ánodo por la atracción química reactiva del hidrógeno y del monóxido de carbono con el oxígeno, mientras los electrones son forzados a pasar a través de un circuito externo desde el ánodo hacia el cátodo. Debido a que los iones se mueven del cátodo hacia el ánodo, de modo opuesto a la mayoría de los tipos de celdas de combustible, los productos de la reacción se acumulan en el ánodo más que en el cátodo.

Combinando las reacciones del ánodo y el cátodo, las reacciones en toda la celda son:

(1)  $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$  Esta es la reacción del hidrógeno y ocurre independientemente del combustible.

(2)  $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$  Esta es la reacción del monóxido de carbono y ocurre solo cuando se utilizan combustibles hidrocarburos.

Así, la celda de combustible produce agua, independientemente del combustible, y dióxido de carbono si se utilizan combustibles hidrocarburos. Ambos productos, agua y dióxido de carbono deben ser continuamente quitados del cátodo para facilitar las reacciones posteriores.

### **4.3.3. Otras celdas de combustible**

#### **4.3.3.1. Celdas de combustibles alcalinas**

Las celdas de combustible alcalinas utilizan un electrolito que conduce iones de hydroxyl ( $\text{OH}^-$ ) desde el cátodo hasta el ánodo. Esto es lo opuesto a muchos otros tipos de celdas de combustible que conducen iones de hidrógeno desde el ánodo hacia el cátodo.

El electrolito está típicamente compuesto por una mezcla alcalina fundida tal como el hidróxido de potasio ( $\text{KOH}$ ). El electrolito puede ser móvil o inmóvil.

Las celdas de combustible con electrolito alcalino móvil utilizan un electrolito fluido que circula continuamente entre los electrodos, produciendo agua, pérdidas de calor y calentamiento del electrolito líquido, pero son removidas de la celda conforme el electrolito circula.

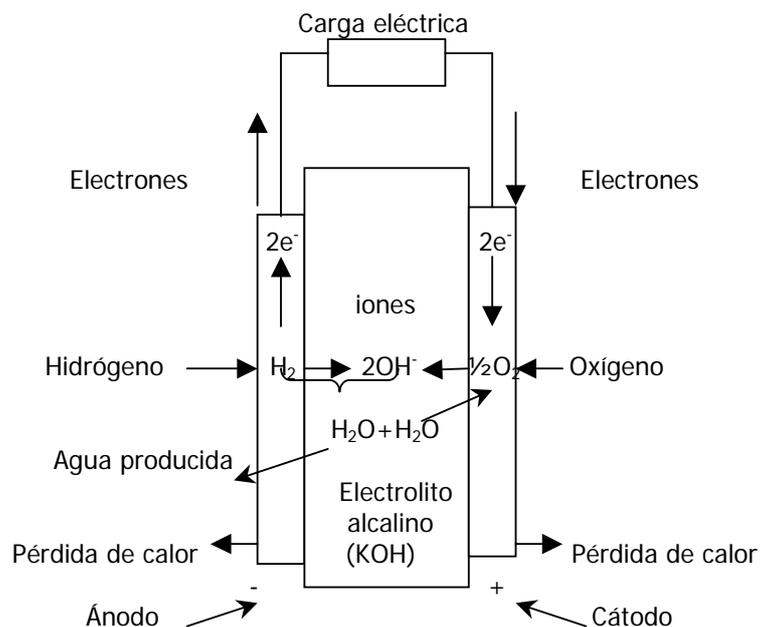
Las celdas de combustible con electrolito alcalino inmóvil utilizan un electrolito que consiste en una espesa pasta retenida por fuerzas capilares

dentro de un apoyo matricial poroso como el asbesto. La pasta por sí misma, provee un sello al gas en las orillas de la celda de combustible.

El agua producida se evapora dentro del flujo de alimentación de gas hidrógeno en el ánodo desde el cual es posteriormente condensada. Las pérdidas por calor son removidas por medio de la circulación de refrigerante.

Las celdas de combustible alcalinas trabajan entre aproximadamente 65 a 220 °C y a una presión de aproximadamente 1 bar. Cada celda individual puede generar hasta entre 1.1 y 1.2 V de corriente directa.

**Figura 8. Celdas de combustible alcalinas**



#### 4.3.3.1.1. Ventajas y desventajas

Las ventajas de las celdas de combustible alcalinas son que ellas:

- Trabajan a bajas temperaturas.
- Tienen rápidos tiempos de encendido (50% de potencia nominal a temperatura ambiente).
- Tienen una alta eficiencia.
- Necesita un catalizador de platino barato o un pequeño catalizador.
- Tienen corrosión mínima.
- Son relativamente fáciles de operar.
- Tienen un peso y volumen bajo.

Las desventajas son que ellas:

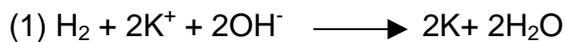
- Son extremadamente intolerantes al  $\text{CO}_2$  (aproximadamente 350 partes por millón como máximo) y un poco intolerantes al  $\text{CO}$ .  
Esta es una seria desventaja y limita tanto al tipo de oxidante como al de combustible, que pueden ser utilizados en una celda de combustible alcalina. El oxidante puede ser ya sea oxígeno puro o aire que ha sido tratado y por lo tanto no contiene dióxido de carbono. El combustible debe ser hidrógeno puro debido a la presencia de óxido de carbono en el reformado.
- Tienen un electrolito líquido, introduciendo así problemas inherentes a la manipulación de líquido.

- Requieren de un complejo manejo de agua.
- Tienen un tiempo de vida relativamente corto.

#### 4.3.3.1.2. La reacción

Las celdas de combustible alcalinas deben operar utilizando hidrógeno puro que no contenga óxido de carbono.

Las reacciones en el ánodo son:

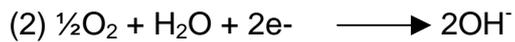


Las reacciones en el cátodo son:



Los iones de  $\text{OH}^-$  son atraídos a través del electrolito desde el cátodo al ánodo por la atracción química reactiva del hidrógeno con el oxígeno, mientras los electrones son forzados a pasar a través de un circuito externo desde el ánodo hacia el cátodo.

Al combinar las reacciones del ánodo y del cátodo, la reacción en toda la celda es:



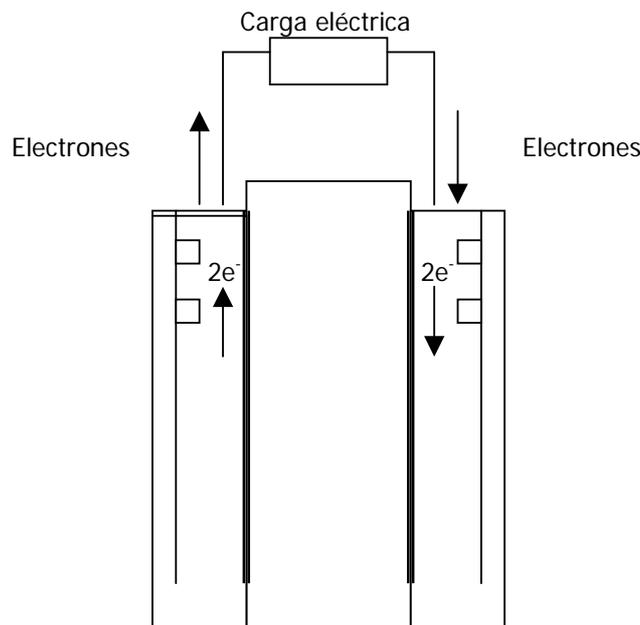
Así, la celda de combustible produce agua que se evapora dentro de la fuente del flujo de alimentación de hidrógeno (en un sistema inmóvil) o es retirada a lo largo de la celda con el electrolito (en un sistema móvil). Esta agua debe ser continuamente removida para facilitar las reacciones posteriores.

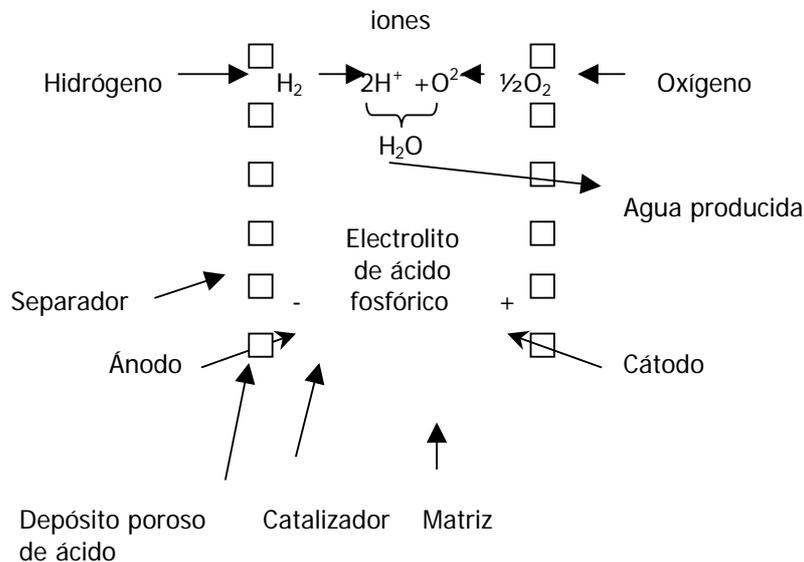
#### 4.3.3.2. Celdas de combustible de ácido fosfórico:

Las celdas de combustible de ácido fosfórico usan un electrolito que conduce iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) desde el ánodo hacia el cátodo. Como el nombre lo indica, el electrolito está compuesto de ácido fosfórico líquido dentro de una matriz hecha de carburo de silicio. (Algunas celdas de combustible ácidas usan ácido sulfúrico como electrolito).

Las celdas de combustible de ácido fosfórico trabajan aproximadamente a 150 a 205 °C y a una presión de aproximadamente 1 bar. Cada celda puede generar hasta aproximadamente 1.1 V de corriente directa

**Figura 9. Celda de combustible de ácido fosfórico**





Se está desarrollando una nueva celda de combustible de ácido que usa un electrolito de ácido sólido. Estas celdas de combustible son hechas de compuestos como el  $C_sHSO_4$  y trabajan a temperaturas hasta de  $250\text{ }^\circ\text{C}$  con voltajes de circuito abierto de  $1.11\text{ V}$  de corriente directa. Estas celdas ofrecen la ventaja de operar sin humedad, con una tolerancia moderada al monóxido de carbono y soportan el auto reformado de metanol y sufren las desventajas de degradación por azufre, alta ductibilidad a temperaturas mayores de  $125\text{ }^\circ\text{C}$ , y solubilidad en el agua. Aún no se han desarrollado técnicas prácticas de fabricación.

#### 4.3.3.2.1. Ventajas y desventajas

Las ventajas de las celdas de combustible de ácido fosfórico son que ellas:

- Son tolerantes al dióxido de carbono (hasta un 30%). Como resultado, las celdas de combustible de ácido fosfórico pueden utilizar como oxidante, aire que no ha sido tratado, y reformado como combustible.

- Trabajan a bajas temperaturas, pero a mayores temperaturas que otras celdas de combustible que trabajan a bajas temperaturas. Así, generan mayor grado de pérdidas por calor que puede ser potencialmente utilizado en aplicaciones de cogeneración.
- Tienen un electrolito con características estables, con baja volatilidad aun trabajando a altas temperaturas como 200 °C.

Las desventajas son que ellas:

- Pueden tolerar solo cerca de 2% de monóxido de carbono.
- Pueden tolerar solo cerca de 50 partes por millón de compuestos de azufre.
- Utilizan un electrolito líquido corrosivo a temperaturas moderadas, dando como resultado problemas de corrosión en los materiales.
- Tienen un electrolito líquido, introduciendo problemas de manipulación del líquido. El electrolito se evapora lentamente con el tiempo.
- Son susceptibles a que el agua producida se filtre y diluya el electrolito.
- Son grandes y pesadas.
- No pueden auto reformar los combustibles hidrocarburos.
- Tienen que calentarse antes de ser operadas o ser mantenidas continuamente a su temperatura de operación.

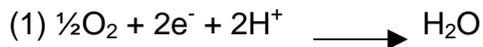
#### 4.3.3.2.2. La reacción:

En las celdas de combustible de ácido fosfórico el hidrógeno reacciona con el oxígeno.

La reacción en el ánodo es:



La reacción en el cátodo es:



Los iones de  $\text{H}^+$  son atraídos a través del electrolito desde el ánodo al cátodo por la atracción producida por la reacción química del hidrógeno hacia el oxígeno, mientras los electrones son forzados a pasar a través de un circuito externo.

Combinando las reacciones del ánodo y del cátodo, la reacción en toda la celda es así:



Así, las celdas de combustible producen agua que se acumula en el cátodo. Esta agua producida debe ser continuamente removida para facilitar las reacciones que seguirán dándose.

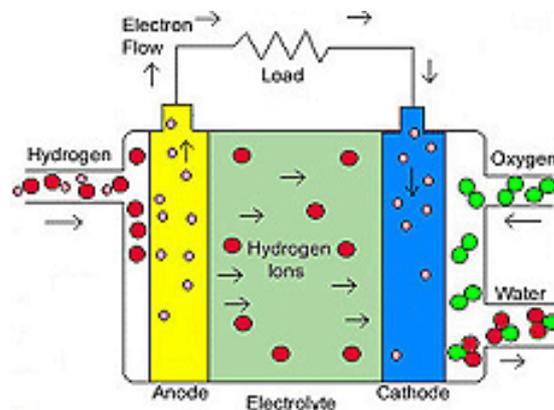
#### 4.3.3.3. Celdas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM)

Las celdas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM Proton Exchange Membrane) (o de polímero sólido) usan un electrolito que conduce iones de hidrógeno  $H^+$  desde el ánodo al cátodo. El electrolito está compuesto de una membrana de polímero sólido que consiste en una forma de teflón acidificado.

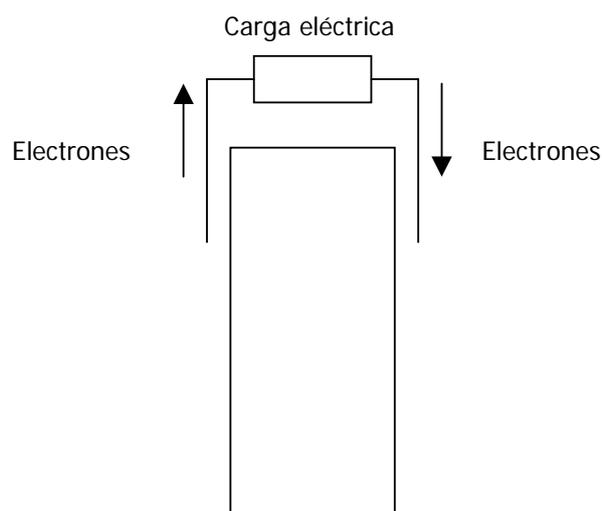
Las celdas de combustible con membrana de intercambio de protones trabajan entre 70 y 90 °C y a una presión de 1 a 2 bar. Cada celda genera hasta aproximadamente 1.1 V de corriente directa.

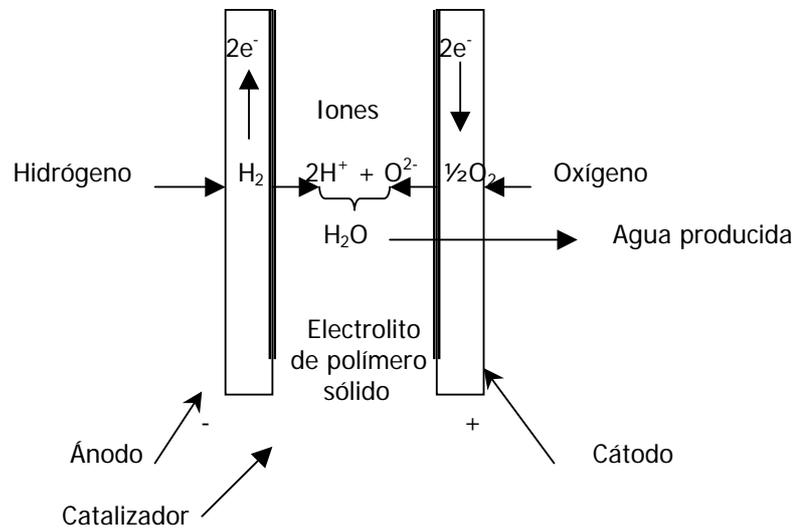
Las celdas de combustible PEM son el tipo más prometedor de celdas de combustible para usos automotrices y han sido utilizadas en la mayoría de los prototipos construidos hasta la fecha.

**Figura 10. Celda de combustible PEM**



Courtesy of Plug Power





#### 4.3.3.3.1. Ventajas y desventajas

Las ventajas de las celdas de combustible PEM son que ellas:

- Son tolerantes al dióxido de carbono. Como resultado, las celdas de combustible PEM pueden utilizar aire sin tratamiento como oxidante y reformado como combustible.
- Trabajan a bajas temperaturas. Esto simplifica los materiales, provee un arranque rápido y aumenta la seguridad.
- Usan un electrolito sólido y seco, lo que elimina la manipulación del líquido, la migración del electrolito y los problemas de reabastecimiento de líquido.
- Utilizan un electrolito no corrosivo. Como opera con agua pura se minimizan los problemas de corrosión y mejora la seguridad.
- Tienen alto voltaje, alta densidad de corriente eléctrica y alta potencia.

- Trabajan a baja presión lo cual aumenta la seguridad.
- Tienen alta tolerancia a diferentes presiones de los gases reactantes.
- Son compactas y fuertes.
- Tienen relativamente un simple diseño mecánico.
- Utilizan materiales de construcción estables.

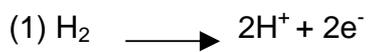
Las desventajas son que ellas:

- Pueden tolerar solo aproximadamente 50 partes por millón de monóxido de carbono.
- Pueden tolerar solo unas pocas partes por millón de los compuestos de azufre.
- Necesitan de humidificación del gas reactante.  
La humidificación es energéticamente intensa e incrementa la complejidad del sistema. El uso de agua para humedecer los gases limita la temperatura de trabajo de la celda de combustible a un valor menor que el punto de ebullición del agua y así se disminuye el potencial para aplicaciones de cogeneración.
- Usan un catalizador caro de platino.
- Usan una membrana cara con la que es difícil trabajar.

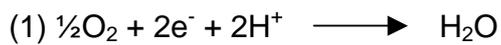
#### 4.3.3.3.2. La reacción

En las celdas de combustible PEM el hidrógeno reacciona con el oxígeno.

La reacción en el ánodo es:

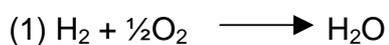


La reacción en el cátodo es:



Los iones  $\text{H}^+$  son atraídos a través del electrolito desde el ánodo a el cátodo por la atracción producida por la reacción química del hidrógeno con el oxígeno, mientras los electrones son forzados a pasar a través de un circuito externo.

Al combinar las reacciones en el ánodo y el cátodo, la reacción en toda la celda es:



La celda de combustible produce agua que se acumula en el cátodo. Esta agua debe ser continuamente removida para facilitar que las reacciones se sigan dando.

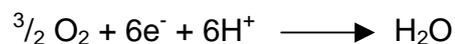
#### **4.3.3.4. Celdas de combustible PEM usando directamente metanol**

Las celdas de combustible PEM pueden también trabajar usando como combustible directamente metanol, en lugar de hidrógeno. Aunque la energía liberada durante esta reacción es menor que la liberada cuando se utiliza como combustible hidrógeno puro, el uso de metanol directamente resulta en un sistema de almacenamiento mucho más simple y evita la necesidad de producir hidrógeno.

En una celda de combustible PEM que utiliza directamente metanol, se le suministra a las celdas una mezcla líquida de metanol y agua en el ánodo, y aire en el cátodo. A una temperatura de 130 °C, un catalizador hecho de un metal noble descompone el metanol de acuerdo con la reacción representada en la siguiente ecuación:



El oxígeno del aire, ioniza y reacciona con el hidrógeno para formar agua así:



Combinando la reacción del ánodo y el cátodo, la reacción de toda la celda da como resultado agua pura y dióxido de carbono. Esta tecnología está aun en su infancia, pero es una gran promesa para el futuro.

#### **4.4. Construcción de una apilación conectando en serie varias celdas de combustible con membrana de intercambio de protones PEM**

Las celdas de combustible individualmente tienen un voltaje máximo de salida de 1 voltio de corriente directa. Voltajes y salidas de potencia eléctrica substanciales se obtienen conectando muchas celdas eléctricamente en serie para formar un apilación de celdas de combustible. Se usan diferentes diseños de apilaciones de celdas de combustible, variando las dimensiones y variando la cantidad de celdas de combustible.

Físicamente, cada celda de combustible consiste en un ensamblaje de electrodos y membrana (MEA, membrane electrode assembly), que consiste de ánodo, cátodo, electrolito y catalizador, colocado entre dos placas de flujo de campo hechas de grafito. Las placas canalizan el combustible y el aire a ambos lados opuestos de la MEA.

Se utiliza un refrigerante para regular la temperatura de la reacción de la celda de combustible. Para facilitar esto, se colocan placas refrigerantes entre cada celda de combustible. Estas placas canalizan el refrigerante, de tal forma que el refrigerante atraviesa las celdas de combustible para absorber o suministrar calor, como sea requerido. Se colocan sellos entre las placas de grafito para asegurar que los flujos de oxidante, combustible y refrigerante nunca se mezclen dentro de las celdas de combustible.

Se ponen placas eléctricas en ambos lados donde termina la serie de las placas de flujo de campo. Estas placas finales están conectadas a las terminales de las cuales es extraída la potencia eléctrica de salida, y típicamente incluyen las interfaces de conexiones de fluido y las conexiones de gas. La secuencia entera de placas es mantenida junta por medio de una serie de barras de atadura o por algún otro medio mecánico.

Los diseños de celdas de combustible prácticos están enfocados en alcanzar una potencia eléctrica de salida alta por área de membrana, ajustando el área de la membrana activa a un tamaño útil, y haciendo todo el sistema de apilación compacto de conformidad con las intenciones de aplicación. Las áreas críticas de interés son: sellos, tolerancia respecto a los patrones de las placas de flujo de campo, y el alineamiento de la celda. Como en cualquier producto comercial, el diseño resultante debe ser confiable, fabricable, económicamente viable y tener un tiempo de vida significativo.

#### **4.4.1. Ensamblaje de electrodos y membrana (MEA Membrane Electrode Assembly)**

El MEA es el corazón de la celda de combustible. Cada ensamblaje de electrodos y membrana consiste en una membrana (PEM) de electrolito de polímero sólido colocada entre dos electrodos de carbono porosos (ánodo y cátodo). Una delgada capa de catalizador de platino unida a cada lado de la membrana, entre la membrana y cada uno de los electrodos. El ensamblaje de cada electrodo, incluye a menudo un sello integral en donde hace contacto con los componentes adyacentes.

#### **4.4.2. Electrodos**

Los electrodos sirven de interfase entre los gases reactantes y el electrolito; por tal razón deben permitir la absorción de gases húmedos, proporcionando una superficie de reacción en el lugar donde hacen contacto con el electrolito, además deben conducir los electrones libres que fluyen por una carga exterior desde el ánodo al cátodo y deben estar contruidos de materiales compatibles. Papel de fibra de carbón (hidrofóbico) es utilizado típicamente para este propósito, debido a su porosidad, conductividad y no

corrosión. El material del electrodo es muy delgado para maximizar el transporte de agua y gas.

Se agrega un catalizador a la superficie de cada electrodo donde hace contacto con el electrolito para aumentar el porcentaje de la reacción. El catalizador promueve la reacción química al proveer sitios adecuados para la reacción, pero no se consume en el proceso. El platino es típicamente utilizado para este propósito debido a su alta actividad electrocatalítica, estabilidad y conductividad eléctrica. El platino es muy caro, por lo que la cantidad usada, conocida como carga catalítica, es un factor significativo en el costo de la celda de combustible. Los diseñadores de las celdas de combustible se esfuerzan para minimizar la cantidad de platino utilizado manteniendo la celda con un buen desempeño.

#### **4.4.3. Electrolito**

El electrolito de polímero sólido es la característica fundamental que distingue a una celda de combustible PEM.

El electrolito es una membrana delgada, como una pequeña capa fina de plástico, cuyo ancho es entre 50 a 175  $\mu\text{m}$ . Estas membranas están compuestas de polímeros de fluorocarbon como teflón, que tienen al lado cadenas terminadas en grupos de ácidos sulfúricos ( $-\text{SO}_3^{2-}$ ). De tal forma que las celdas de combustible PEM ultimadamente utilizan un electrolito ácido como las celdas de combustible de ácido fosfórico.

Todo electrolito de polímero sólido requiere la presencia de moléculas de agua para la conductividad de iones de hidrógeno debido a que los iones de hidrógeno se mueven junto con las moléculas de agua durante la reacción de

intercambio de iones. La relación de agua a iones de hidrógeno para una conductividad efectiva es típicamente aproximadamente de 3:1. Por esta razón, los gases que están en contacto con la membrana deben estar saturados con agua para que la celda de combustible trabaje efectivamente.

Todos los electrolitos deben cumplir con las siguientes funciones fundamentales:

- Ser un conductor de protones
- Ser un aislante de electrones
- Ser un separador de gas

Además, los fabricantes se esfuerzan por producir membranas que tengan una fuerza mecánica razonable, estabilidad dimensional, resistencia a expandirse, alta conductividad iónica, peso equivalente bajo, y que sean fáciles de fabricar.

#### **4.4.4. Placas de flujo de campo**

En uno de los extremos de la celda de combustible, el combustible de gas de hidrógeno es suministrado al electrodo como un flujo a través de canales en una placa de flujo de campo, formando un campo de combustible entre la placa de flujo de campo y el electrodo. Las placas de flujo de campo son parte del ensamblaje de electrodos y membrana.

Lo mismo sucede en el otro extremo de la celda de combustible, donde el gas oxidante, oxígeno, es suministrado a través de los canales de otra placa de flujo de campo al electrodo del otro lado del ensamblaje de electrodos y membrana formando un campo de gas oxidante entre la placa de flujo de campo y el electrodo.

Cada placa de flujo de campo, que forma el campo de flujo de combustible por un lado y oxidante por el otro, está en los lados opuestos del MEA.

Cada una de las dos placas de flujo de campo contiene un único canal de gas en forma de serpentín que maximiza el contacto del gas con el MEA. La forma específica de los canales de gas es crítica para una generación de potencia eléctrica uniforme, para un desempeño estable de la celda y un correcto manejo del agua producida. Se diseñan diferentes placas de flujo de campo para diferentes aplicaciones de celdas de combustible.

Cada celda individual de combustible tiene dos placas de flujo de campo. Una para formar el campo de combustible a un lado de la MEA en un electrodo y la otra para formar el campo de gas oxidante al otro lado de la MEA en el otro electrodo.

Cada placa debe ser eléctricamente conductora para que la corriente liberada durante la reacción electroquímica pueda fluir desde una celda a la siguiente, hasta llegar a las placas eléctricas finales de las cuales la potencia eléctrica de toda la apilación es retirada.

Las placas están hechas generalmente de grafito en las que los canales de flujo son fabricados ya sea torneados o empotrados a presión. Grafito es el material preferido debido a su excelente conductividad, baja contaminación y costo relativamente bajo.

Las placas de refrigerante, están ubicadas entre cada celda de combustible, son de un diseño y una construcción similar a las placas de flujo

de campo. Los canales de flujo de refrigerante están diseñados para un manejo efectivo del calor.

Las placas de flujo de campo y las placas de refrigerante incluyen puertos de gas y de agua para que de una forma uniforme el combustible, el oxidante y el refrigerante sean distribuidos desde la entrada hasta la salida de la apilación de celdas de combustible. Los sellos entre las placas de grafito aseguran que los flujos no se mezclen.

#### **4.4.5. Humedecedores**

Humedecer los gases reactantes es un aspecto importante en la operación de las celdas de combustible PEM. Si no hay una humedad adecuada, la conducción de iones no podría ocurrir y las celdas de combustible podrían sufrir daños.

La cantidad de agua que un gas puede absorber es altamente dependiente de la temperatura de humedecimiento, particularmente a baja presión. Los gases calientes pueden retener más agua que los gases fríos.

Debido a que la meta de humedecer es la de saturar los gases reactantes con la mayor cantidad de agua posible, los gases deben ser humedecidos a la temperatura de operación de la celda de combustible o muy cerca de esta temperatura (ajustada por la temperatura de refrigeración de la apilación de celdas de combustible). Si se humedece a una temperatura más baja, el gas no se saturará más, una vez este alcance la temperatura de operación. Si se humedece a una temperatura más alta, algo de agua se podría condensar dentro de la trayectoria del gas cuando caiga a la temperatura de operación.

En algunas apilaciones de celdas de combustible, los humidificadores están integrados dentro de las apilaciones mismas. En otras apilaciones de celdas de combustible, los humidificadores están separados, como componentes externos.

Los humidificadores internos consisten en una serie adicional de placas de grafito ensambladas dentro de la apilación de celdas de combustible. Estos separan la apilación de celdas de combustible en una sección activa, la que contiene las celdas de combustible, y una sección inactiva, la cual contiene las placas humidificadoras. Las placas humidificadoras son muy similares a las placas de flujo de campo y son utilizadas para conducir agua y gas a cada lado de la membrana hidrofílica. El agua emigra a través de la membrana y satura el gas adyacente. Una gran variedad de membranas están comercialmente disponibles para este propósito.

Los humidificadores internos sacan agua directamente del flujo de refrigerante resultando en un simple y buen sistema integrado, con excelentes características de temperatura. De cualquier modo, este arreglo utiliza agua pura en lugar de cualquier otro refrigerante. El agua pura agrava los problemas de arranque en climas fríos debido a que el agua refrigerante se podría congelar. Además, la combinación de la apilación de celdas y la de humidificadores tiende a que el sistema sea más voluminoso y que el servicio sea más complicado debido a que ambos componentes deben ser reparados concurrentemente.

Los humidificadores externos son comúnmente de diseño de membrana o de diseño de contacto. Los humidificadores de membrana operan de la misma manera que los humidificadores internos aun cuando están empacados

en otro lugar, separados. Los humidificadores de contacto trabajan humidificando por rociado de agua sobre la superficie caliente o dentro de una cámara de gran superficie a través de la cual los gases reactantes están fluyendo. El agua entonces se evapora directamente dentro del gas causando así la saturación.

Los humidificadores externos sacan el agua ya sea del flujo refrigerante o de un circuito de agua de humidificación separado. Las ventajas y desventajas de jalar el agua del flujo refrigerante son las mismas que con el humidificador interno. Cuando se utiliza un circuito de agua de humidificación separado, se puede utilizar un refrigerante con mejores características de baja temperatura que si se utiliza agua, aunque igualar la temperatura del humidificador y del apilamiento es más complicado. Independientemente de la fuente de agua, el uso de un humidificador externo da por resultado el uso de componentes individuales que son menos voluminosos y potencialmente más robustos, especialmente en un diseño de contacto.

## **4.5. Desempeño de la celda de combustible PEM**

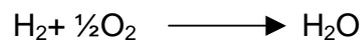
### **4.5.1. Eficiencia**

La eficiencia de las celdas de combustible es siempre uno de los beneficios primarios de la tecnología. Aunque es verdadero en principio, es importante distinguir entre la eficiencia de una apilación de celdas de combustible y la eficiencia del sistema con celdas de combustible.

#### **4.5.1.1. La eficiencia de la apilación de celdas de combustible**

Comúnmente significa la eficiencia actual de la reacción electroquímica. Esta eficiencia puede ser derivada como sigue.

La cantidad de energía liberada cuando el hidrógeno y el oxígeno se combinan para formar agua de acuerdo a la siguiente reacción:



Es cuantificada como la entalpía de la reacción ( $\Delta H^\circ$ ). Este valor se mide experimentalmente y depende de sí el agua es formada como gas o como líquido. Para las celdas de combustible, y el agua formada como gas, la entalpía de la reacción es conocida así:

$$\Delta H^\circ_{\text{gas}} = -242\text{KJ} / \text{mol}_{\text{Agua}}$$

Donde:

$$1 \text{ mol}_{\text{Agua}} = 6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas de agua}$$

El signo negativo significa que la energía es liberada durante la reacción, y no absorbida.

Este valor de la entalpía de la reacción es estrictamente correcta solo a 25 °C y a una atmósfera de presión. El efecto de la temperatura es más significativo que el de la presión, y la cantidad de energía liberada disminuye de acuerdo con la elevación de la temperatura.

Este cambio en la energía disponible solo varia un porcentaje pequeño por la temperatura de operación dentro de las celdas de combustible PEM, pero

puede ser como un 30% menor para las celdas de combustible para altas temperaturas. Por esta razón, las celdas de combustible para altas temperaturas son inherentemente de menor potencia que las celdas de combustible para bajas temperaturas.

Desafortunadamente, no toda la entalpía de la reacción está disponible para realizar trabajo útil. Una porción de la entalpía se pierde en forma de entropía y la sobrante es conocida como energía libre Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ). Para el agua en forma de gas (a 25 °C y una atmósfera de presión) ésta es conocida como:

$$\Delta G^\circ_{Gas} = - \frac{229 \text{ KJ}}{\text{mol}_{\text{Agua}}}$$

El voltaje de cada celda ( $E_{\text{Celda}}$ ) está relacionado con la energía libre Gibbs de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_{\text{Celda}} = - \frac{\Delta G^\circ}{nF}$$

Donde:

$n$  = Es el numero de electrones involucrados en la reacción. Esto es más conveniente expresarlo como moles de electrones (o mol  $e^-$ ) Donde cada mol  $e^-$  es igual a  $6.023 \times 10^{23}$  electrones.

De la reacción del ánodo y el cátodo ( $\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2e^-$  y  $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2e^- + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$ ), dos electrones están involucrados en la formación de cada molécula de agua. Así,  $n=2$  mol  $e^-$  por cada un mol<sub>Agua</sub> formada.

F = La constante de Faraday que es igual a 96,500 coulombs/mol e<sup>-</sup> .  
Los Coulombs son la unidad de carga eléctrica.

Sustituyendo valores en la ecuación tenemos:

$$\mathbf{E}_{Celda} = -\frac{-229kJ}{Mol_{Agua}} \times \frac{1000J}{1kJ} \times \frac{1Mol_{Agua}}{2Mole^{-}} \times \frac{1Mole^{-}}{96500coulombs}$$
$$\mathbf{E}_{Celda} = 1.187 \frac{J}{Coulomb} = 1.187V$$

Así cada celda puede generar un voltaje máximo teórico de 1.187 V (a 25 °C y una atmósfera de presión). La eficiencia de la celda de combustible es por lo tanto simplemente la relación entre el voltaje actual que la celda produce respecto del voltaje teórico máximo:

$$\mathbf{Eficiencia}_{Celda} = \frac{V_{Actual}}{E_{Celda}} \cong \frac{V_{Actual}}{1.2V}$$

Para celdas de combustible reales, generalmente el voltaje esta entre 0.5 y 0.6 voltios para cargas de operación normales y puede alcanzar valores de 1.1 voltios para condiciones de circuito abierto. La eficiencia electroquímica es generalmente entre aproximadamente 40 y 50% para cargas normales y con condiciones de circuito abierto puede alcanzar un 90%.

La cantidad de hidrógeno y oxígeno consumido está directamente relacionada con la corriente de operación:

- 7.0 cm<sup>3</sup> de hidrógeno son consumidos por minuto por amperio y por celda de combustible.

- 3.5 cm<sup>3</sup> de oxígeno son consumidos por minuto por amperio y por celda de combustible.

Los porcentajes de flujo de gas pueden ser mayores dependiendo de la estequiometría y dilución del combustible y el oxidante con gases no reactivos.

#### **4.5.1.2. Eficiencia del sistema con celdas de combustible**

La eficiencia del sistema con celdas de combustible se refiere a la eficiencia de todo el desempeño de la planta generadora de potencia eléctrica que trabaja con celdas de combustible.

Una apilación de celdas de combustible puede trabajar sólo si se abastece de aire e hidrógeno a presión y un flujo de refrigerante. Los sistemas con celdas de combustible prácticos requieren de equipo adicional para regular los flujos de gases y de líquidos, proporcionar lubricación, operar equipo auxiliar, controlar la salida de potencia y energía eléctrica y control del proceso. Algunos sistemas deben incluir reformadores para el proceso de combustible. Todos estos equipos introducen pérdidas y reducen la eficiencia total del sistema de su valor teórico ideal.

Para poder hacer comparaciones significativas de eficiencia entre las celdas de combustible y otros sistemas de generación de potencia eléctrica, cada planta de generación de potencia eléctrica debe ser delimitada de una manera similar.

En aplicaciones automotrices cuando comparamos una planta generadora de potencia eléctrica que utiliza celdas de combustible para trabajar en lugar del motor de combustión interna, con un motor de combustión interna

es conveniente definir cada uno como un dispositivo cuyas entradas son combustible y aire, y entrega a la salida potencia mecánica a un eje. En ambos casos, el combustible fluye del tanque y es alimentado en cualquiera de sus dos formas, ya sea líquida o gaseosa, y ha sido almacenado después de un proceso de refinado o de cualquier otro tipo.

Ambos sistemas comprimen el aire de la atmósfera; el motor de combustión interna lo hace mediante la acción de un pistón mientras que la planta de generación de potencia eléctrica con celdas de combustible utiliza un compresor externo. El motor de combustión interna entrega potencia mecánica al eje directamente mientras que la planta generadora de potencia con celdas de combustible utiliza un inversor y un motor eléctrico. Ambos sistemas mandan las pérdidas de calor al ambiente utilizando una bomba de refrigerante, un radiador y otro equipo de control de calor. Ambos sistemas abastecen cargas auxiliares iguales del vehículo.

La eficiencia de todo el sistema de un motor de combustión interna esta entre 15 y 25%. Estos valores son representativos para la eficiencia de salida en las llantas del vehículo, la eficiencia de salida en las llantas pero con el auto en el aire esta generalmente entre 30 y 35% e incluso un valor mayor para los motores diesel.

Para una planta generadora de potencia eléctrica con celdas de combustible que trabaja con hidrógeno puro, la eficiencia desarrollada comparativa en la salida de las llantas, pero con el auto en el aire es aproximadamente como sigue:

Eficiencia de la celda de combustible	40 a 50%
Compresión de aire	85%

Eficiencia del inversor	95%
Eficiencia del motor eléctrico	97%

Al multiplicar cada uno de estos valores se obtiene una eficiencia de todo el sistema de aproximadamente 31 a 39%.

Para sistemas con celdas de combustible que usan un reformador, esta eficiencia se reduce aun un 65 o 75% (dependiendo del tipo de reformador) para una eficiencia total del sistema de aproximadamente 20 a 29%.

Más difícil de cuantificar es el efecto del peso total de todo el sistema. Los sistemas con celdas de combustible (incluyendo el almacenado de combustible) son más pesados que los sistemas con motores de combustión interna de similar potencia y similar desplazamiento, por lo consiguiente utilizan más potencia.

Las baterías tienen eficiencia comparable a la de las celdas de combustible.

Cuando se utilizan como una planta de potencia eléctrica para automóviles, los sistemas con baterías también requieren de un inversor y de un motor eléctrico, aunque no necesitan de compresor de aire, equipo complejo de refrigeración y reformadores. Las baterías como medio de guardar potencia, son más pesadas que las celdas de combustible, aunque esto se compensa al eliminar otros componentes.

La fuente de combustible se convierte en un componente esencial de la eficiencia de todo el sistema. Con un motor de combustión interna, esto implica refinar combustibles hidrocarburos. Con las celdas de combustible, esto implica

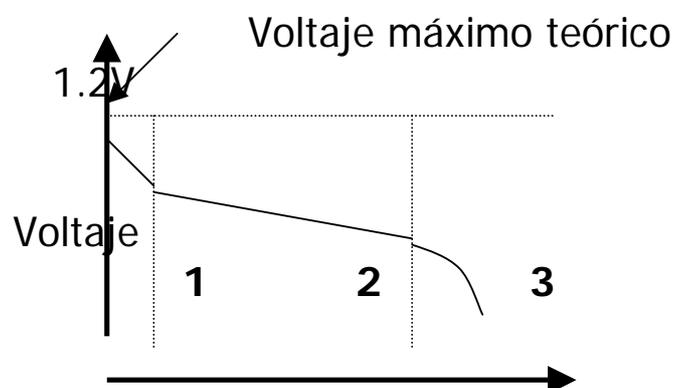
producir hidrógeno por medio de combustibles fósiles o a través de electrólisis del agua, o la producción de combustibles secundarios como el metanol para uso con reformadores a bordo. Con un sistema de baterías, esto implica una fuente de potencia eléctrica para poder cargarlas.

Analizar estos factores es complicado y depende de la fuente de combustible, el método de procesamiento, las dificultades de manipulación y transporte, y de otros factores tales como la energía requerida para comprimirlo o para cambiarlo a estado líquido.

#### 4.5.2. Características de polarización

En el mundo ideal, el voltaje teórico óptimo de la celda de combustible de 1.2 V se tendría que mantener para cualquier valor de corriente de operación. En la realidad, las celdas de combustible alcanzan su máxima salida de voltaje en condiciones de circuito abierto (sin carga) y el voltaje va cayendo con el incremento de flujo de corriente. Esto es conocido como polarización y está representado por la curva de polarización que se muestra a continuación.

**Figura 11. Curva típica de polarización de una celda de combustible PEM**



## Corriente

1. Polarización de activación
2. Polarización ohmica
3. Concentración de polarización

La curva de polarización muestra como varía el voltaje de la celda como función de la corriente. La corriente depende del tamaño de la carga eléctrica que se coloca entre las terminales de la celda de combustible. En esencia, la curva de polarización muestra la eficiencia electroquímica de la celda de combustible a cualquier corriente de operación debido a que la eficiencia es la relación entre el voltaje actual de la celda dividido entre el voltaje teórico máximo de 1.2V.

Los diseñadores de las celdas de combustible utilizan más el término densidad de corriente en lugar de corriente cuando describen el desempeño de las celdas de combustible. La densidad de corriente se calcula como la corriente dividida entre el área activa de la celda de combustible, con unidades  $A/cm^2$ . La densidad de corriente indica qué tan efectivos son los materiales del juego de electrodos y membrana MEA utilizados. Gran cantidad de densidad de corriente indica mayor efectividad comparada con menores cantidades de densidad de corriente.

Las baterías tienen curvas de polarización muy parecidas a las de las celdas de combustible. Tanto las baterías como las celdas de combustible tienen excelente desempeño con cargas parciales debido a que el voltaje aumenta conforme la carga disminuye. En contraste, los motores de combustión interna operan a su máxima eficiencia cuando trabajan a plena carga y

muestran un decrecimiento muy rápido en su eficiencia cuando trabajan a carga parcial.

La polarización es causada por factores químicos y físicos asociados con varios elementos de la celda de combustible. Estos factores limitan el proceso de la reacción cuando la corriente esta fluyendo. Hay tres regiones básicas en la curva de polarización de las celdas de combustible.

- Polarización de activación
- Polarización Óhmica (o polarización resistencia)
- Polarización de concentración

La desviación del potencial de la celda del comportamiento ideal es resultado directo de la suma de estos factores, sobre todo el rango de operación de la carga.

#### **4.5.2.1. Polarización de activación**

La polarización de activación está relacionada con la barrera de energía que debe ser vencida para iniciar una reacción química entre reactantes. Con flujos de corriente bajos, el porcentaje de transferencia de electrones es lenta y una parte del voltaje del electrodo se pierde por compensar la falta de actividad electro catalítica.

#### **4.5.2.2. Polarización Óhmica:**

La polarización óhmica (o polarización resistencia) se da debido a las pérdidas resistivas en la celda de combustible. Estas pérdidas resistivas ocurren dentro del electrolito (ionico), en los electrodos (electrónica y ionica) y en las conexiones de las terminales de las celdas. Debido a que las placas del

apilamiento de las celdas de combustible y el electrolito obedecen la ley de ohm ( $V=IR$ ), la cantidad de voltaje perdido para forzar la conducción varia linealmente a través de esta región.

#### **4.5.2.3. Polarización de concentración**

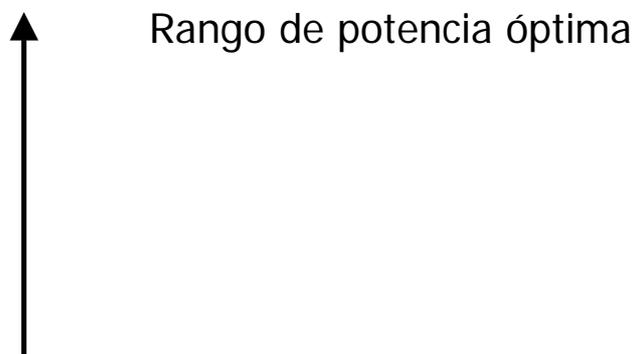
La polarización de concentración se da cuando la reacción del electrodo se dificulta por efectos de transferencia de masa. En esta región, los reactantes se consumen a mayores proporciones de lo que pueden ser suministrados, mientras que los productos se acumulan en mayor proporción que la proporción que puede ser removida. Estos efectos inhabilitan generalmente reacciones subsecuentes y el voltaje de la celda disminuye a cero.

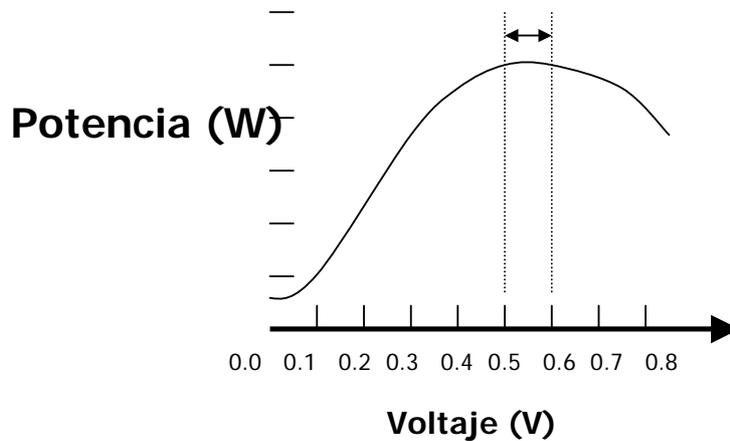
#### **4.5.3. Características de Potencia Eléctrica**

La potencia eléctrica es el producto del voltaje por la corriente ( $P=VI$ ). Debido a que la curva de polarización de las celdas de combustible indica la relación entre el voltaje y la corriente en todas las condiciones de operación, entonces puede ser utilizada para derivar la correspondiente curva de potencia eléctrica. En cualquier punto, a lo largo de la curva, la potencia eléctrica instantánea es representada gráficamente como el área del rectángulo que justo toca la curva.

Una curva típica de potencia eléctrica se muestra en la figura

**Figura 12. Curva de potencia típica de una celda de combustible PEM**





La potencia máxima se da aproximadamente entre 0.5 a 0.6V, que corresponde al intervalo de relativamente mayor corriente. En el punto del pico, la resistencia interna de la celda es igual a la resistencia eléctrica de la carga del circuito externo, lo cual cumple con el teorema de máxima transferencia de potencia que dice que la máxima transferencia posible se da cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia interna de la fuente de potencia. Los diseñadores de celdas de combustible deben escoger el rango de operación deseado de acuerdo a si es eficiencia o potencia el parámetro para una aplicación dada. Nunca es deseable que la celda de combustible trabaje en un rango más allá de donde la curva de potencia empieza a caer.

Los diseñadores de las celdas de combustible evalúan la efectividad de todo el sistema de apilación de celdas de combustible en términos de su densidad de potencia volumétrica. Esta es calculada como su máxima potencia dividida entre su volumen físico watts/Litro. Una alta densidad de potencia indica que mucha potencia es llevada desde una unidad pequeña.

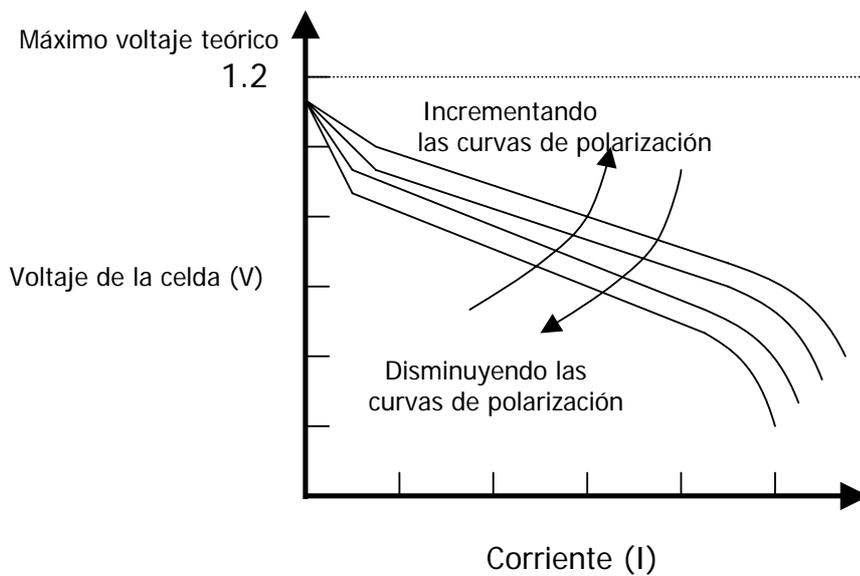
#### **4.5.4. Efectos de la temperatura y de la presión**

La forma de la curva de polarización depende de la temperatura y presión de operación de la apilación de celdas. En general, puede dibujarse una

familia de curvas de polarización que describen el desempeño de la apilación sobre todo el rango de operación.

En general, cualquier variación en los parámetros que causen que la curva de polarización tienda hacia arriba es beneficiosa debido a que resulta en una mayor potencia y en una mayor eficiencia electroquímica.

**Figura 13. Curvas de variación de la polarización**



#### 4.5.4.1. Presión

Las curvas de polarización de las celdas de combustible generalmente se incrementan con el aumento en la presión de trabajo. Recíprocamente, las curvas de polarización decrecen con una disminución en la presión de trabajo.

La razón de lo anterior es que la proporción de reacción química es proporcional a las presiones parciales del hidrógeno y del oxígeno. (Cada gas dentro de la mezcla de gas contribuye con una presión parcial, la suma de las cuales hace la presión total). Así, el efecto de aumentar la presión es más sobresaliente cuando se utiliza un oxidante diluido (como el aire) o un combustible diluido (como el reformado). En resumen, una presión mayor ayuda a forzar el contacto del hidrógeno y del oxígeno dentro del electrolito. Esta sensibilidad a la presión es más grande a mayores corrientes.

Aunque un incremento en la presión promueve la reacción electroquímica, este incremento introduce otros problemas. Las placas de flujo de campo de las celdas de combustible trabajan mejor a presiones pequeñas, ya que a menor presión disminuyen las pérdidas de flujo. Con el incremento de presión los sellos de las celdas de combustible trabajan a mayores esfuerzos. Se requiere de mayor compresión de aire, lo cual absorbe más de la potencia bruta.

$$Potencia\ bruta = Potencia\ Neta + Pérdidas$$

La potencia neta es la que se convierte en trabajo efectivo. Con el incremento de presión otros componentes del sistema deben ser rediseñados, en consecuencia algunos componentes aumentan de tamaño y de costo.

Además, los incrementos en la presión disminuyen las ganancias cuando se consideran la eficiencia y las consecuencias en conjunto. Por estos factores mencionados, las celdas de combustible PEM son generalmente operadas a presiones no mayores que unas pocas atmósferas.

Las curvas de polarización de la celda de combustible tienden a disminuir con el tiempo. El uso de combustible puro (como hidrógeno) o de oxidante (como el oxígeno) aumenta las curvas de polarización de la apilación; cuando no hay otros gases presentes, todas las presiones presentes ayudan a forzar el contacto de hidrógeno y oxígeno con el electrolito y no hay pérdidas por presurización de otros gases que no intervienen en la reacción.

#### **4.5.4.2. Temperatura**

Las curvas de polarización de las celdas de combustible se incrementan con el aumento en la temperatura de trabajo. Recíprocamente, las curvas de polarización decrecen con una disminución de la temperatura de trabajo.

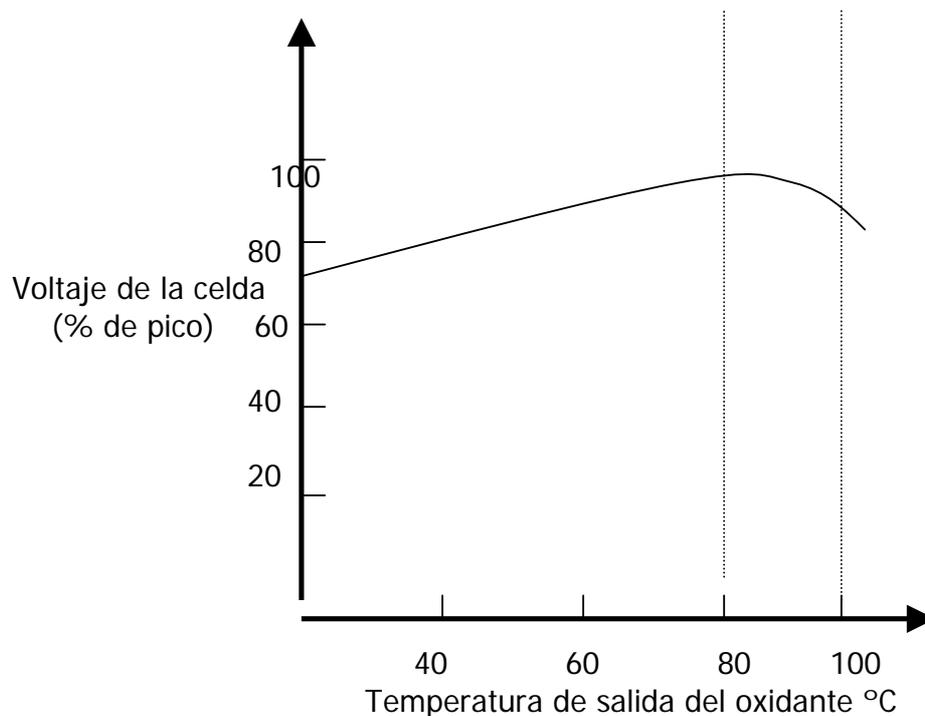
La razón de esto es que temperaturas mayores mejoran la transferencia de masa dentro de la celda de combustible dando como resultado un decrecimiento neto en la resistencia de la celda (conforme la temperatura aumenta, la conducción de electrones en los metales disminuye, pero la conducción iónica en el electrolito aumenta). Juntos, estos efectos mejoran la proporción de la reacción.

La acumulación del agua producida dentro del flujo oxidante limita efectivamente la temperatura de trabajo a debajo de 100 °C. A esta temperatura, el agua hierve y el vapor resultante reduce severamente la presión parcial del oxígeno. Esto, reduce drásticamente el desempeño de la celda debido a la falta de oxígeno. Esto puede dañar las celdas de combustible y reducir su vida útil.

En cierto grado, se pueden alcanzar altas temperaturas por el trabajo a altas presiones ya que debido a esto, aumenta el punto al que hierve el agua. Sin embargo, este efecto es despreciable a las presiones de trabajo prácticas para las celdas de combustible PEM.

El efecto neto es que el voltaje en las celdas de combustible aumenta con la temperatura hasta aproximadamente el punto en el que hierve el agua, en el cual, el voltaje empieza a disminuir. La temperatura óptima se da cerca de 80 °C donde los dos efectos se balancean el uno con el otro como se muestra en la siguiente figura. Generalmente las temperaturas de trabajo son de 70 a 90 °C.

**Figura 14. Efecto de la temperatura en el voltaje de la celda de combustible**



Al igual que al trabajar a presiones altas, al trabajar a altas temperaturas se afectan todos los componentes del sistema, algunos de los cuales deben rediseñarse de acuerdo con la temperatura.

#### **4.5.4.3. Efectos estequiométricos**

Estequiometría es la medición de reactantes que se basa en las leyes cuantitativas (¿Qué cantidad?) de la combinación química.

Las curvas de polarización de las celdas de combustible aumentan con el aumento de la estequiometría del gas reactante hasta cierto punto. Recíprocamente, las curvas de polarización decrecen con la disminución de la estequiometría del gas reactante.

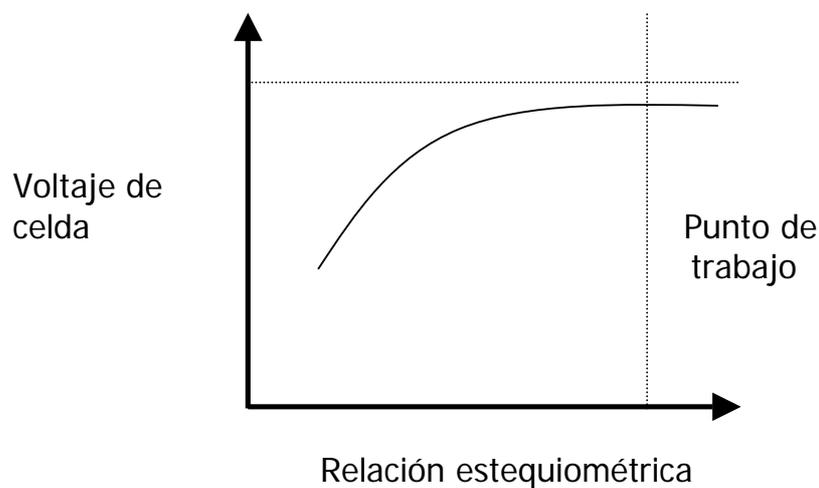
La razón de esto es que mayor estequiometría incrementa la posibilidad de que suficiente número de moléculas de hidrógeno y oxígeno interactúen con el electrolito. Una estequiometría insuficiente priva a la apilación de celdas de combustible de reactante suficiente y puede causar daño permanente.

Estequiometría es la relación de cantidad de gas presente relativo a la cantidad de gas que es necesario para completar exactamente la reacción. Así, una relación estequiométrica de 1 proporciona exactamente el número correcto de moléculas de gas que teóricamente completan la reacción. Relaciones estequiométricas mayores que 1 proporcionan un exceso de gas y relaciones

menores que 1 proporcionan gas insuficiente. Una relación estequiométrica de 2 proporciona exactamente dos veces el número de moléculas de gas que las requeridas.

Conforme aumenta la relación estequiométrica del flujo de gas, el voltaje resultante de la celda de combustible se aproxima a su voltaje terminal como se muestra en la figura 15. Las celdas de combustible prácticas se trabajan a una relación estequiométrica de hidrógeno de 1.4 y a una relación estequiométrica de oxígeno de 2 a carga nominal, gas adicional provee un pequeño beneficio adicional. Relaciones estequiométricas altas son requeridas cuando se trabaja a baja potencia.

**Figura 15. Efectos estequiométricos en las celdas de combustible**



#### 4.5.5. Efectos de la humedad

Para la operación de las celdas de combustible PEM es esencial humedecer lo suficiente el flujo de gas; ya que las moléculas de agua se

mueven con los iones de hidrógeno durante la reacción de intercambio de iones.

Insuficiente humedad de agua deshidrata la membrana y puede provocar que se produzcan grietas o agujeros en la membrana. Esto provoca un corto circuito químico, mezclas de gas locales, puntos calientes y la posibilidad de incendio.

Recíprocamente, el exceso de humedad de agua provoca condensación e inundación dentro de las placas de flujo de campo, lo que puede dar lugar a un fenómeno conocido como inversión de celda, donde las celdas afectadas producen un voltaje igual a cero o un voltaje negativo. Si un voltaje negativo suficientemente grande se produce, la celda de combustible afectada empieza a comportarse como un electrolizador, esto produce mucho calor y potencialmente puede destruir la celda. Típicamente se instalan sistemas de monitoreo del voltaje de celda para detectar la inversión del voltaje de celda antes de que la celda se dañe.

La humedad es típicamente medida como humedad relativa; relativa ya que depende de la presión y de la temperatura del gas. Cuando un gas ha absorbido tanta agua como es físicamente capaz para una temperatura y una presión dada, se dice que está saturado y que tiene una humedad relativa del 100%. Si este gas saturado luego se pone más caliente (sin mayor adición de agua), la humedad relativa disminuye. (Por cada grado centígrado que incrementa la temperatura la humedad relativa disminuye en aproximadamente 4%). Sí el gas se enfría, algo de agua se condensa y el gas permanece saturado a la nueva temperatura.

Las celdas de combustible típicamente trabajan en las condiciones de saturación a la temperatura de trabajo de la celda de combustible (que es ajustada por la temperatura del refrigerante), o cerca de ella. Esto provee la máxima cantidad de agua posible mientras impide una inundación.

El uso de agua con propósitos de humedecer limita efectivamente la temperatura de trabajo y de almacenamiento del combustible a entre 0 y 100 °C. Fuera de estos límites, el agua se congela o hierve respectivamente.

Una consideración adicional es que los humedecedores de agua deben mantenerse no conductivos. Una falla en mantenerlos no conductivos podría causar cortos circuitos y corrientes corrosivas dentro de la apilación de celdas de combustible. El agua se vuelve conductiva conforme absorbe iones de los alrededores y para eliminar estos iones, el agua debe mantenerse fluyendo continuamente a través del filtro desionizador.

## **5. SISTEMAS DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE**

Una apilación de celdas de combustible requiere de combustible, oxidante y refrigerante para trabajar. La composición, presión y relación de flujo de cada uno de estos flujos debe ser regulada. Además los gases deben ser humedecidos y la temperatura del refrigerante debe ser controlada. Para lograr esto, la celdas de combustible deben estar rodeadas por un sistema de combustible, un sistema de reparto de combustible, un sistema de aire, un sistema refrigerante y un sistema humedecedor.

Una vez trabajando, la potencia de salida generada por las celdas de combustible debe ser condicionada y absorbida por la carga. Alarmas convenientes deben apagar el proceso si ocurre una condición de operación insegura y un sistema de control de voltaje debe controlar el desempeño de las celdas de combustible. Estas funciones son ejecutadas por sistemas eléctricos y por sistemas de control.

Adicionalmente, se requieren sistemas de enfriamiento, sistemas de lubricación, sistemas de detección de fugas, sistemas de detección de fuego, sistemas contra incendio.

### **5.1. Descripción de los sistemas**

La descripción del sistema indica el funcionamiento básico de cada sistema, el tipo de componentes requeridos, y su interrelación.

### **5.1.1. Sistema de aire**

El sistema de aire suministra aire regulado a las celdas de combustible para alimentar la reacción para la generación de potencia eléctrica.

El aire del ambiente entra al sistema de aire y pasa a través de un filtro de partículas que remueve la suciedad del aire y la suciedad que se genera en el silenciador que amortigua el ruido que produce el aire generado por el compresor.

El aire es comprimido en dos etapas, usando un compresor de aire y un turbocargador. La velocidad del compresor de aire aumenta la presión del aire y ajusta la relación de flujo de aire. El turbocargador incrementa adicionalmente la presión al recuperar energía del flujo de aire de escape. Bajo condiciones normales de trabajo, la presión de aire que entra a las celdas de combustible es normalmente 2 bar.

La presurización de aire incrementa bastante la temperatura del flujo de aire y puede introducir partículas de aceite desde y por la interacción del sistema de lubricación del compresor. Las partículas de aceite envenenan la celda de combustible. Para prevenir daños en la celda de combustible, el flujo de aire caliente pasa a través de un enfriador después de ser comprimido para ser enfriado a la temperatura de trabajo de la celda de combustible. El calor es transferido al sistema de enfriamiento.

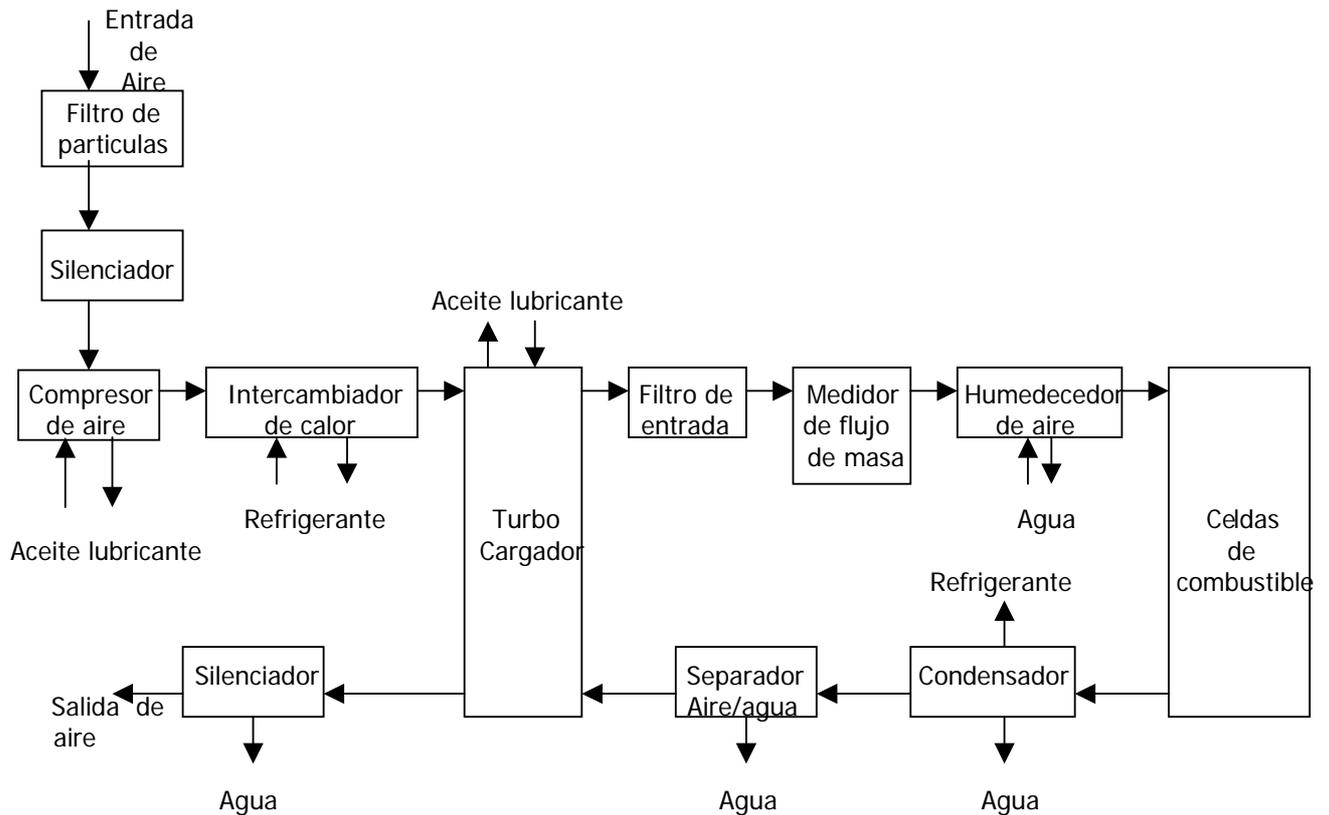
El aire enfriado destinado para las celdas de combustible fluye a través de un filtro para removerle cualquier aceite contaminante y un medidor de flujo de masa mide el flujo de aire. El flujo de aire luego pasa a través de un humedecedor, donde es saturado con agua a la temperatura de operación y

entra a la celda de combustible donde este alimenta la reacción para generación de potencia eléctrica.

El aire caliente que se extrae de las celdas de combustible contiene agua como un producto de la reacción de generación de potencia eléctrica y de la humidificación. El agua extraída está primero en estado de vapor y se pasa a estado líquido haciendo pasar el aire a través del condensador y de un separador aire/agua. El condensador transfiere calor al sistema de enfriamiento. El condensador y el separador pasan el agua recuperada al tanque de agua del humidecedor. Algo de aire fluye dentro y a lo largo del tanque con el agua; este proporciona una ventilación del tanque mientras mantiene un balance de presión entre los sistemas de aire y de agua.

Después del separador de aire/agua, el aire regresa a la turbina turbocargadora, pasando a través de un segundo silenciador, y luego se ventea a la atmósfera.

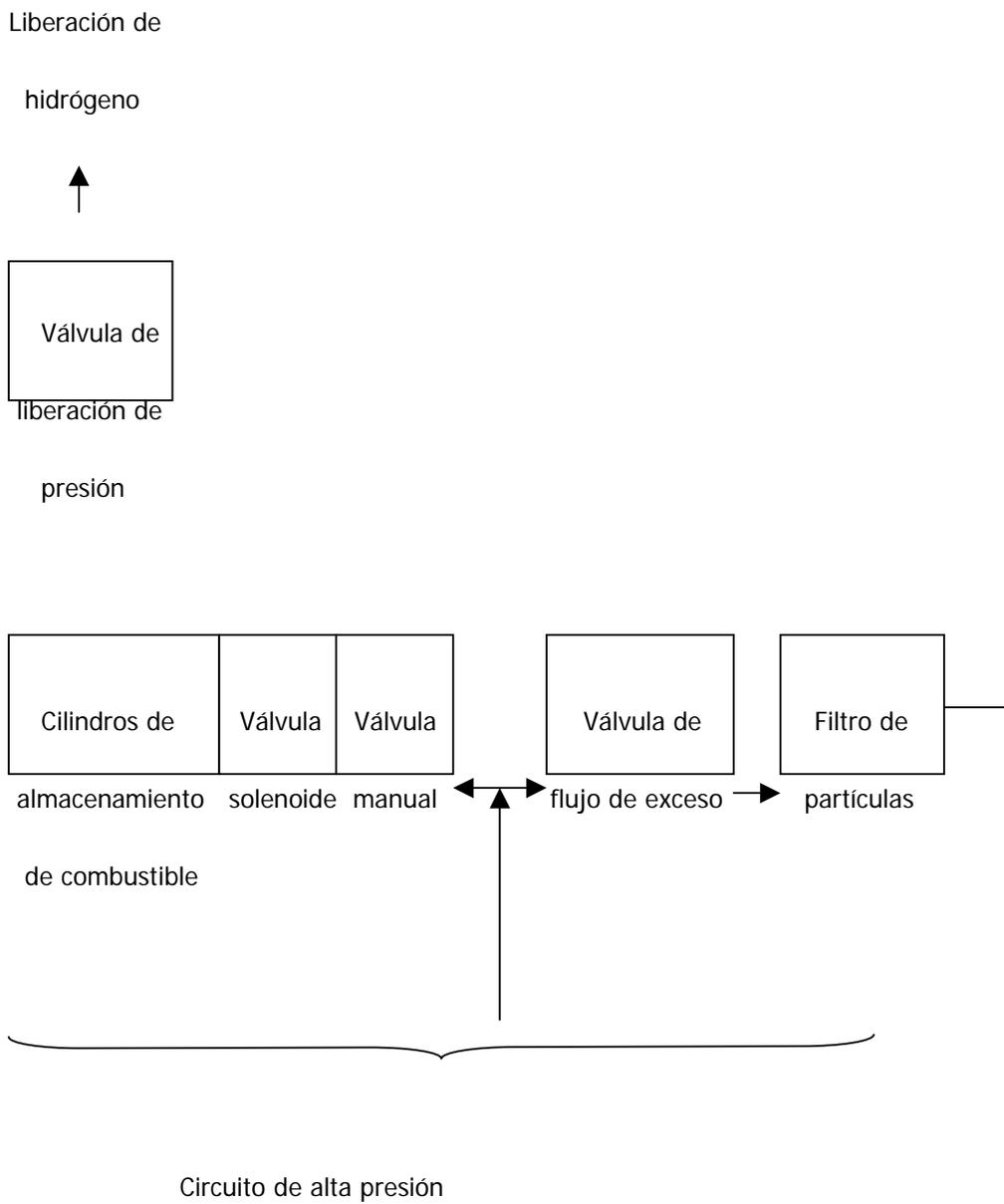
**Figura 16. Diagrama de flujo de un sistema de aire**

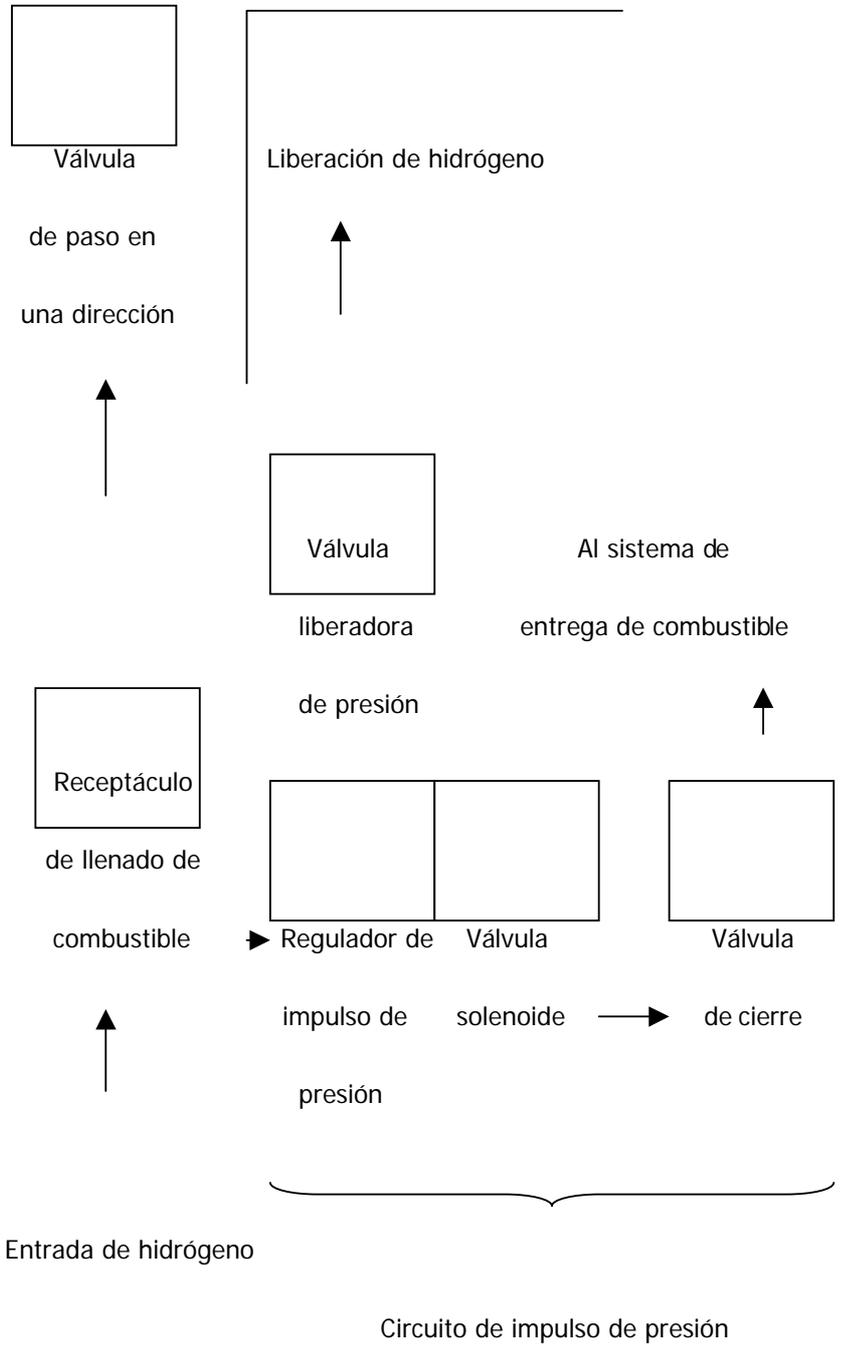


### 5.1.2. Sistema de almacenamiento de combustible

El sistema de almacenamiento de combustible recibe, almacena y distribuye el combustible hidrógeno. El sistema de almacenamiento de combustible consiste en un circuito de recepción y llenado, los cilindros de almacenamiento, un circuito de alta presión y un circuito de impulso de presión.

**Figura 17. Diagrama de flujo de un sistema de almacenamiento de combustible**





### **5.1.2.1. Circuito de llenado de combustible**

El circuito de llenado recibe el combustible a través del receptáculo de llenado. Luego el combustible fluye a través de la válvula de paso para prevenir el regreso del flujo, hacia un circuito de alta presión el cual vuelve a llenar los cilindros de almacenamiento de hidrógeno.

### **5.2.1.2. Cilindros de almacenamiento de hidrógeno**

Los cilindros de almacenamiento de hidrógeno guardan el combustible hidrógeno como un gas a alta presión para ser consumido.

En el extremo del cilindro, a través del cual el combustible fluye hacia adentro o hacia afuera de cada cilindro se incluye una válvula solenoide integral, una válvula de paso en una dirección, una válvula de exceso de flujo y una válvula de cierre manual.

La válvula solenoide automáticamente cierra y aísla el cilindro cuando se apaga por cualquier causa todo el sistema de generación de energía eléctrica. La válvula de paso en una dirección permite el llenado mientras la válvula solenoide está cerrada.

La válvula de exceso de flujo interrumpe el flujo de combustible hacia afuera del cilindro siempre que la relación de flujo sea excesiva (como cuando se está quemando una tubería o durante una ventilación vigorosa).

La válvula de cierre manual puede ser usada para aislar el contenido del cilindro, pero normalmente está totalmente abierta.

Una válvula de mano externa se instala típicamente en la entrada de la tubería de cada cilindro. Esta válvula provee un nivel de seguridad adicional y es un método conveniente de aislar los cilindros individuales durante el llenado de combustible o durante la ventilación.

Los dispositivos de liberación de presión están unidos al final de cada extremo de cada cilindro para protección contra las explosiones en el caso de un incendio para poder liberar el gas interno dejándolo escapar a través de una tubería que lo lleva al aire libre.

#### **5.1.2.3. Circuito de alta presión**

Cuando se está en operación, el hidrógeno a alta presión pasa desde los cilindros hacia el circuito de alta presión, desde donde fluye a través de la válvula de exceso de flujo hasta el regulador de impulso de presión. Las válvulas de exceso de flujo se cierran si se da un flujo excesivo.

El circuito de alta presión incluye una válvula de escape operada a mano, usada para descargar y purgar el circuito de alta presión durante mantenimiento.

#### **5.1.2.4. El circuito de impulso de presión**

El circuito de impulso de presión suministra hidrógeno a una presión intermedia al sistema de reparto de combustible.

El circuito de impulso de presión consiste de un ensamblaje de reguladores de presión, un filtro y una válvula de cierre de combustible.

El regulador de presión reduce la presión de hidrógeno desde la presión de almacenamiento hasta una presión intermedia (o de impulso) de aproximadamente (12 bar).

La válvula de alivio de presión protege la celda de combustible y libera hidrógeno a través de una tubería al aire libre, si la presión de impulso excede 17 bar.

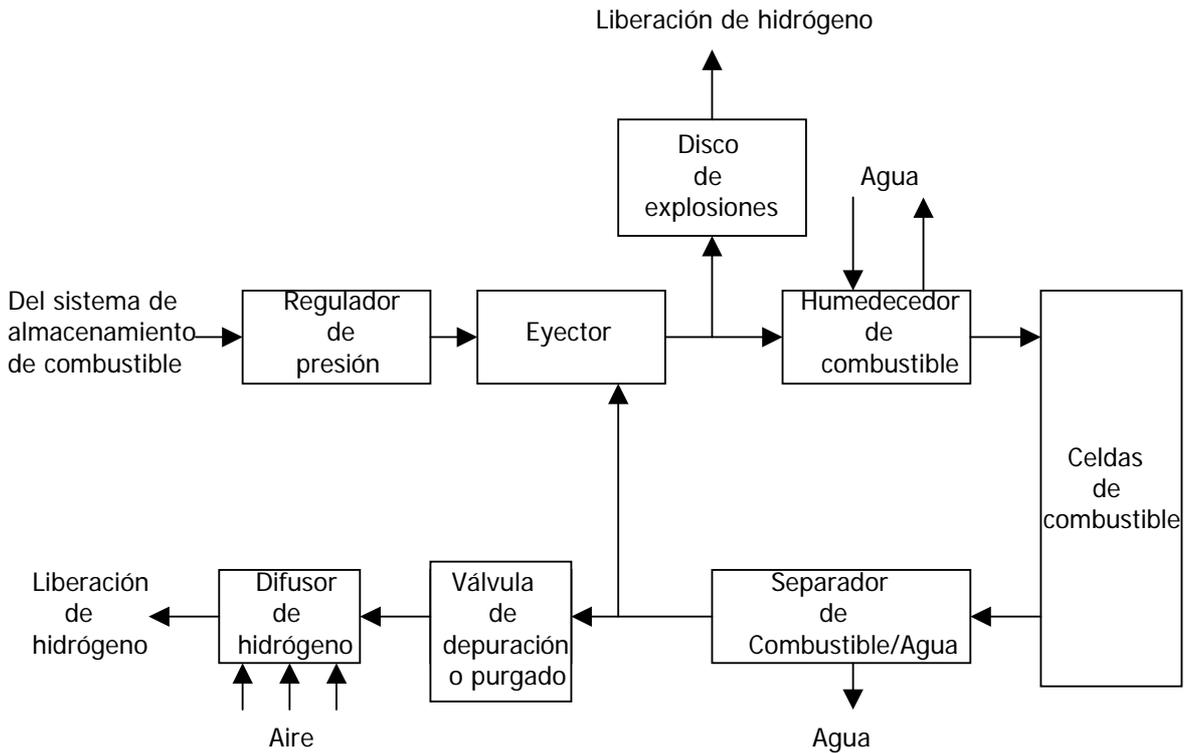
El filtro remueve partículas de desechos y líquidos del combustible.

La válvula de cierre de combustible proporciona un método manual para interrumpir el flujo de combustible hacia las celdas de combustible. Esta válvula es solo para uso estrictamente de emergencia, debido a que al interrumpir el flujo de combustible hacia la celda de combustible mientras esta está funcionando puede causar daños en la celda de combustible.

### **5.1.3. Sistema de reparto de combustible**

El sistema de reparto de combustible regula el hidrógeno que pasa a través de las celdas de combustible. El sistema consiste en un circuito de reparto y un circuito de depuración o purgado.

**Figura 18. Diagrama de flujo del sistema de reparto de combustible**



### **5.1.3.1. Circuito de reparto de combustible**

El circuito de reparto de combustible recibe hidrógeno a presión intermedia desde el circuito de impulso de presión. Un regulador de presión en la entrada del circuito de reparto controla la presión de entrada del combustible al módulo de celdas. Este regulador recibe una señal de retroalimentación desde la entrada de hidrógeno en las celdas de combustible.

El hidrógeno a baja presión circula a través de las celdas de combustible usando un eyector. El hidrógeno nuevo entra al eyector donde este se mezcla con el flujo recirculante por medio de succión. Una porción de hidrógeno es consumido por la reacción de generación de potencia, y el exceso se recircula.

El hidrógeno en exceso contiene agua debido a la humidificación del flujo de combustible. Esta agua se recupera por medio del separador y es ya sea drenada a través de un sifón o es colectada para usarse en el sistema humedecedor.

El disco de explosiones protege el circuito de reparto de combustible y libera el hidrógeno a través de un ventilador si la presión excede de 3.2 bar.

#### **5.1.3.2. Circuito de depuración**

El circuito de depuración está unido al circuito de distribución de combustible y permite las descargas periódicas de cualquier acumulación de agua o de gas residual no combustible, esto pasa periódica y automáticamente.

Una válvula solenoide controla la descarga. Esta válvula queda abierta siempre que el motor se apaga y permite que el circuito de impulso de presión y el circuito de baja presión de hidrógeno sean ventilados cuando no están en uso.

El gas de escape es expulsado a través de un difusor de hidrógeno.

El agua residual es drenada a través de una trampa de agua o colectada para ser utilizada en el sistema humedecedor.

#### **5.1.4. Sistema de humidificación**

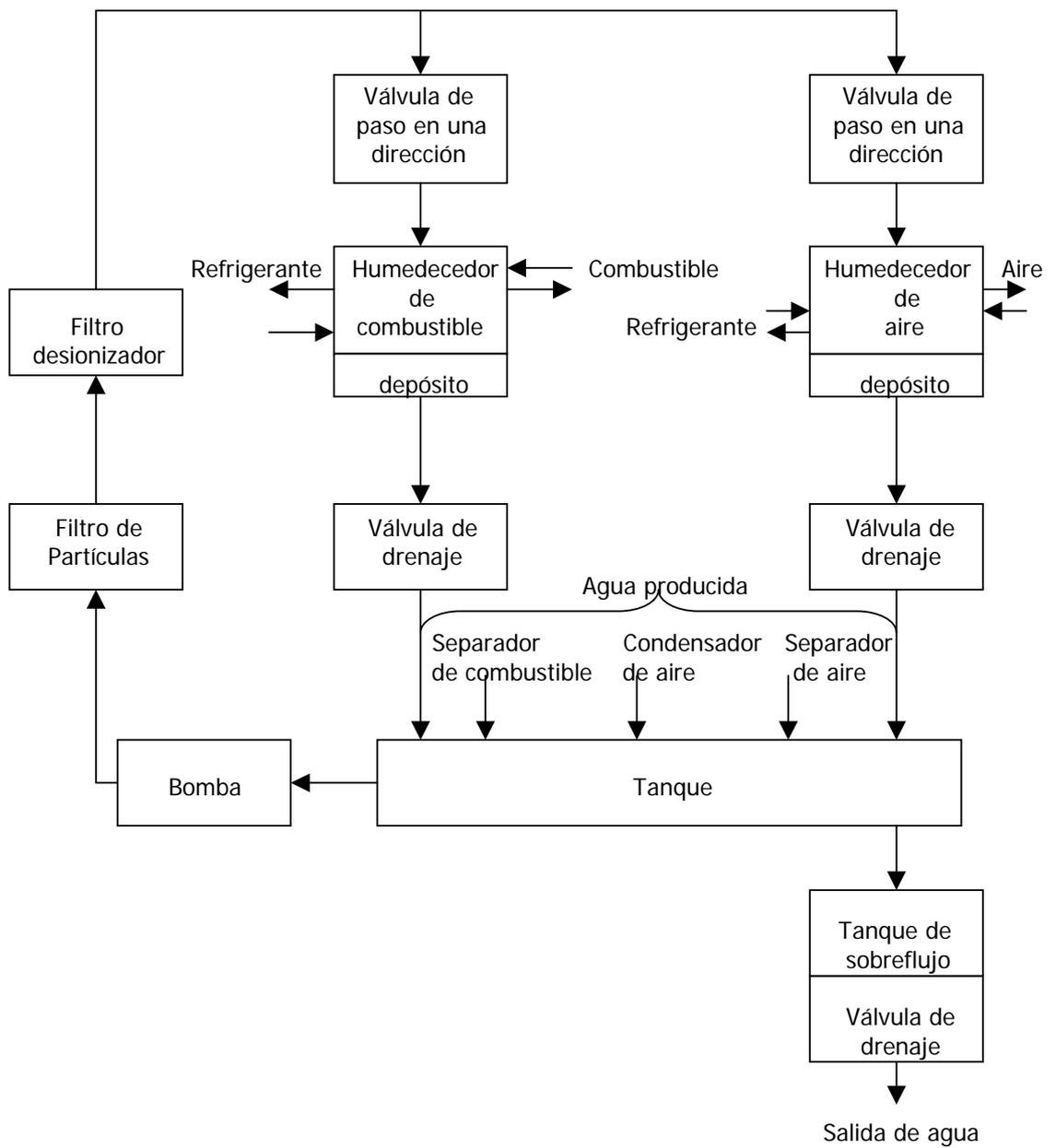
El sistema de humidificación satura el hidrógeno y el aire con agua antes de ser utilizados en las celdas de combustible, y controla el agua producida resultado de la reacción en las celdas de combustible.

##### **5.1.4.1. Humidificación**

Algunas plantas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible combinan el sistema de humidificación con el sistema de enfriamiento. Esto resulta en un sistema simple bien integrado con excelentes características de ajuste de temperatura. De cualquier forma, este arreglo evita el uso de cualquier otro refrigerante, para utilizar solo agua.

El sistema humedecedor consiste en un circuito simple que lleva el agua humedecedora desde el tanque de agua producida, usando una bomba, y pasando el agua a través de un filtro de partículas y un filtro desionizador. El filtro de partículas remueve las partículas del agua. El filtro desionizador remueve los aniones y los cationes.

Figura 19. Diagrama de flujo del sistema de humidificación



Los iones causan conductividad en los fluidos y se acumulan durante las operaciones normales. La conductividad dentro de cualquier fluido que pasa a través de las celdas de combustible puede causar cortos circuitos dentro de las celdas de combustible. Asimismo, causa corrientes corrosivas que disminuyen el desempeño de las celdas de combustible y les pueden causar daños.

El agua que deja el filtro desionizador se divide en dos flujos, un flujo es utilizado para humedecer el combustible y el otro para humedecer el aire. Cada flujo pasa a través de una válvula de paso hacia cada humidificador. Algo de agua pasa por el flujo de gas y el sobrante se junta en un depósito dentro del humidificador. Este exceso de agua pasa a través de una válvula de drenaje de regreso al tanque de agua producida.

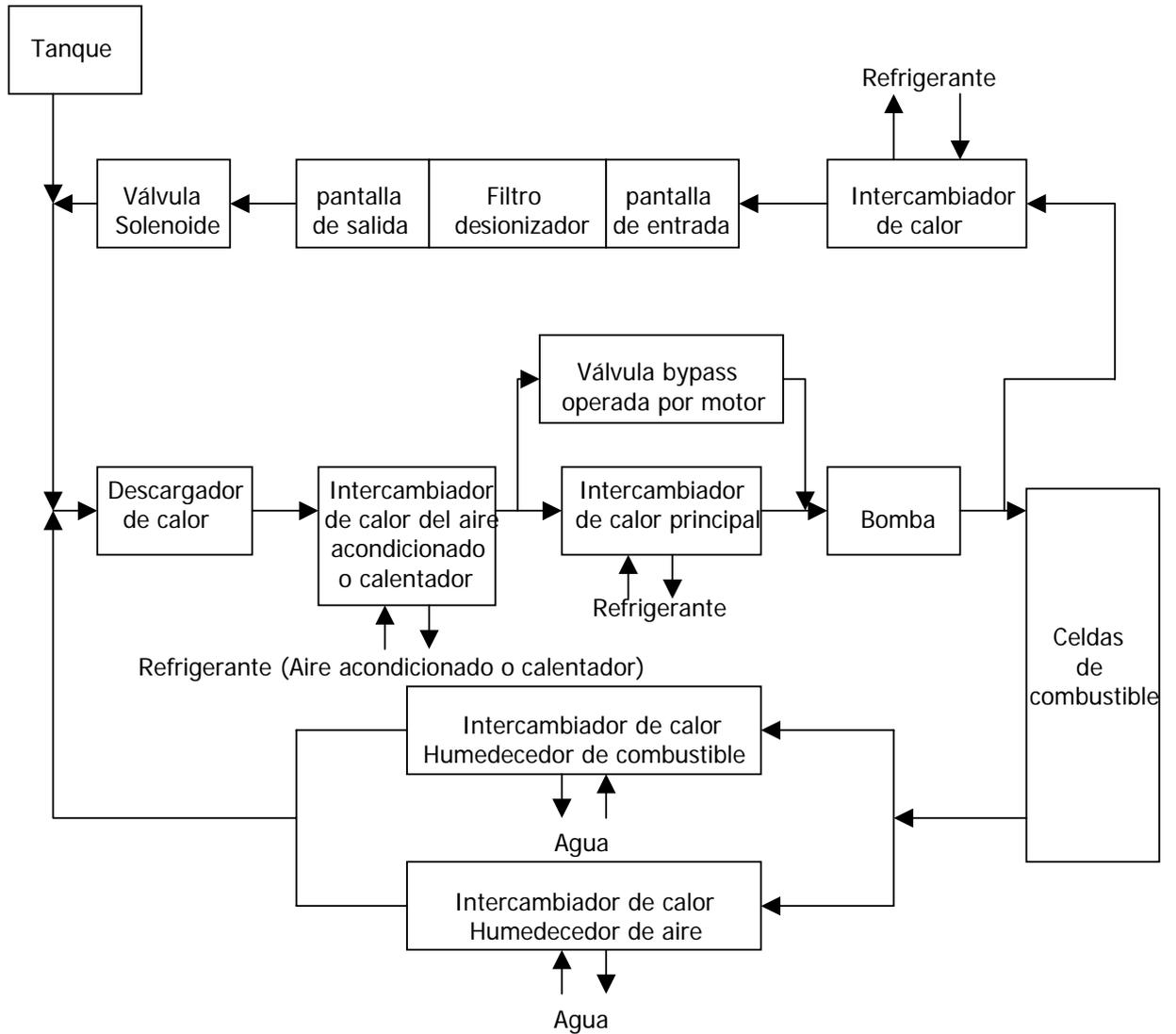
La fuente de calor del humidificador es el circuito refrigerante. Esto asegura que tanto la celda de combustible y el humidificador trabajan a la misma temperatura.

#### **5.1.5. Sistema de enfriamiento**

El sistema de enfriamiento regula la temperatura de reacción en las celdas de combustible y es la fuente de calor para humedecer los gases reactantes y provee calor para el sistema de aire acondicionado.

El sistema de enfriamiento consiste de un circuito principal de enfriamiento y un circuito de desvío para filtrado.

Figura 20. Diagrama de flujo del sistema de enfriamiento



### **5.1.5.1 Circuito principal de refrigerante**

El circuito principal de refrigerante pone en circulación el refrigerante a través de las celdas de combustible donde absorbe el calor y mantiene las celdas de combustible a su temperatura óptima de trabajo.

Conforme el refrigerante deja el depósito, fluye a través de los intercambiadores de calor de los humidificadores de aire e hidrógeno donde le proporciona el calor necesario al agua para humidificación. Luego el agua entra al descargador. El descargador consiste de un compartimiento a través del cual el refrigerante fluye, dentro del compartimiento se suspende una resistencia. La resistencia transfiere calor al sistema de enfriamiento durante el arranque inicial, para aumentar rápidamente la temperatura del refrigerante y por consiguiente la temperatura del combustible a la temperatura de operación, asimismo sirve para vaciar los reactantes residuales de las celdas de combustible, cuando se para la operación. El refrigerante que deja el descargador pasa a través del intercambiador de calor el cual transfiere calor según sea necesario al circuito de aire acondicionado o de calentamiento del ambiente.

El refrigerante que deja el intercambiador principal y la válvula de desvío entra a la bomba y pasa de regreso a las celdas de combustible. Refrigerante adicional se agrega conforme se necesite.

#### 5.1.5.2. Circuito de desvío para filtrado

Así como con el agua humedecedora, el refrigerante debe ser no conductor para prevenir corto circuitos internos cuando pasa a través de las celdas de combustible. Lo anterior se consigue, desviando una parte del flujo refrigerante a través del circuito de desvío el cual incluye un filtro desionizante. El refrigerante puede ser agua pura desionizada o una mezcla de 50% de agua pura desionizada con un 50% de glicol etileno puro (el glicol debe de estar libre de aditivos que puedan dañar la celda de combustible).

Cuando se utiliza agua pura, el sistema refrigerante puede ser unido al sistema humedecedor, reduciendo la complejidad del sistema total (debido a que el agua refrigerante puede ser utilizada para humedecer directamente el gas reactante). Aun cuando el uso de agua complica el trabajo en clima frío debido a que el agua se congela a 0 °C. Por otro lado, el uso de la mezcla agua/glicol mejora el desempeño en climas fríos, pero necesita del uso separado de un sistema de humidificación.

El sistema de refrigeración, en las aplicaciones de las celdas de combustible para automóviles, absorbe el calor de varios sistemas asociados con las celdas de combustible y expulsa el exceso de calor a la atmósfera.

La bomba de refrigerante hace circular el refrigerante a través de los siguientes componentes:

- Inversor.
- Condensador.
- Intercooler.
- Compresor de aire.
- Intercambiador de calor principal.
- Intercambiador de calor del filtro desionizante del agua humidificadora.
- Fluido refrigerante de la caja de transmisión (en aplicaciones en vehículos).
- Enfriador del aceite lubricante.

El refrigerante absorbe el calor de cada componente, excepto del difusor de hidrógeno, el cual se calienta para prevenir la formación de hielo.

En aplicaciones en vehículos, debido a que el refrigerante de un automóvil no tiene contacto directo con las celdas de combustible, no necesita ser desionizado y consiste de una solución normal de 50% de glicol y 50% de agua limpia.

#### **5.1.6. Sistema de lubricación**

El sistema de lubricación proporciona lubricación y enfriamiento a los componentes que están en movimiento.

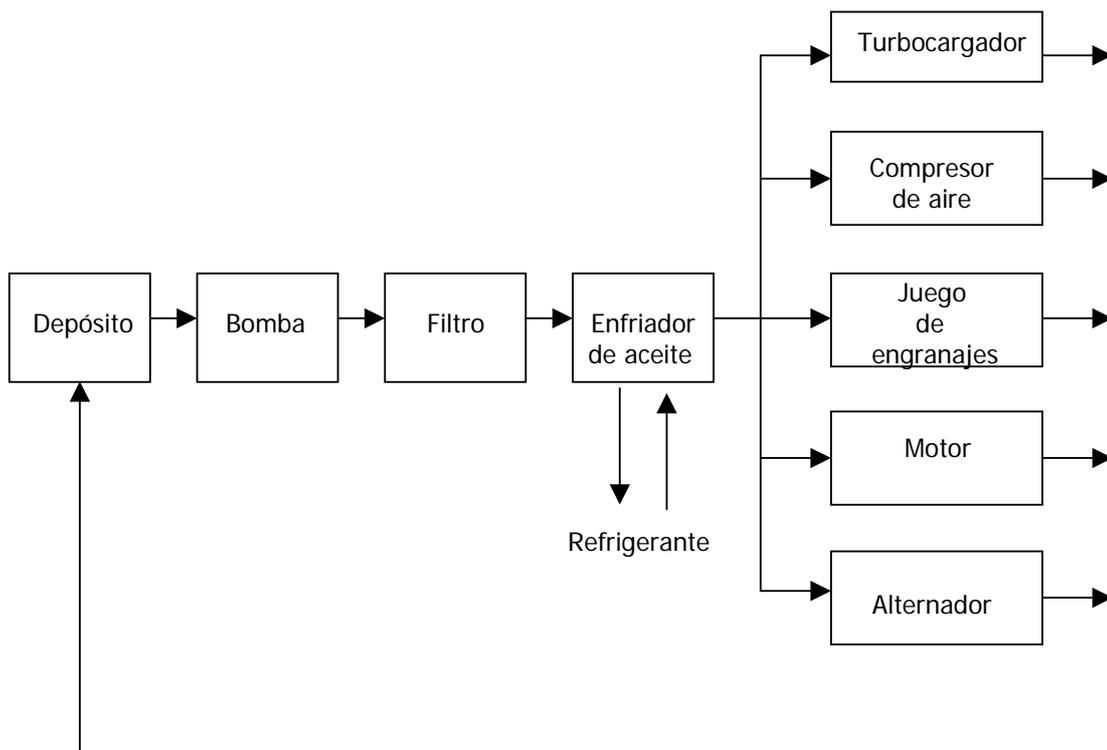
La bomba fuerza al aceite a pasar a través de un filtro de partículas.

El aceite pasa a través del enfriador de lubricante donde suelta el calor y luego pasa a través de los siguientes componentes:

- Compresor de aire

- Turbocargador
- Caja de engranajes (en aplicaciones en vehículos)
- Motor (en aplicaciones en vehículos)
- Alternador (en aplicaciones en vehículos)

**Figura 21. Diagrama de flujo del sistema de lubricación**

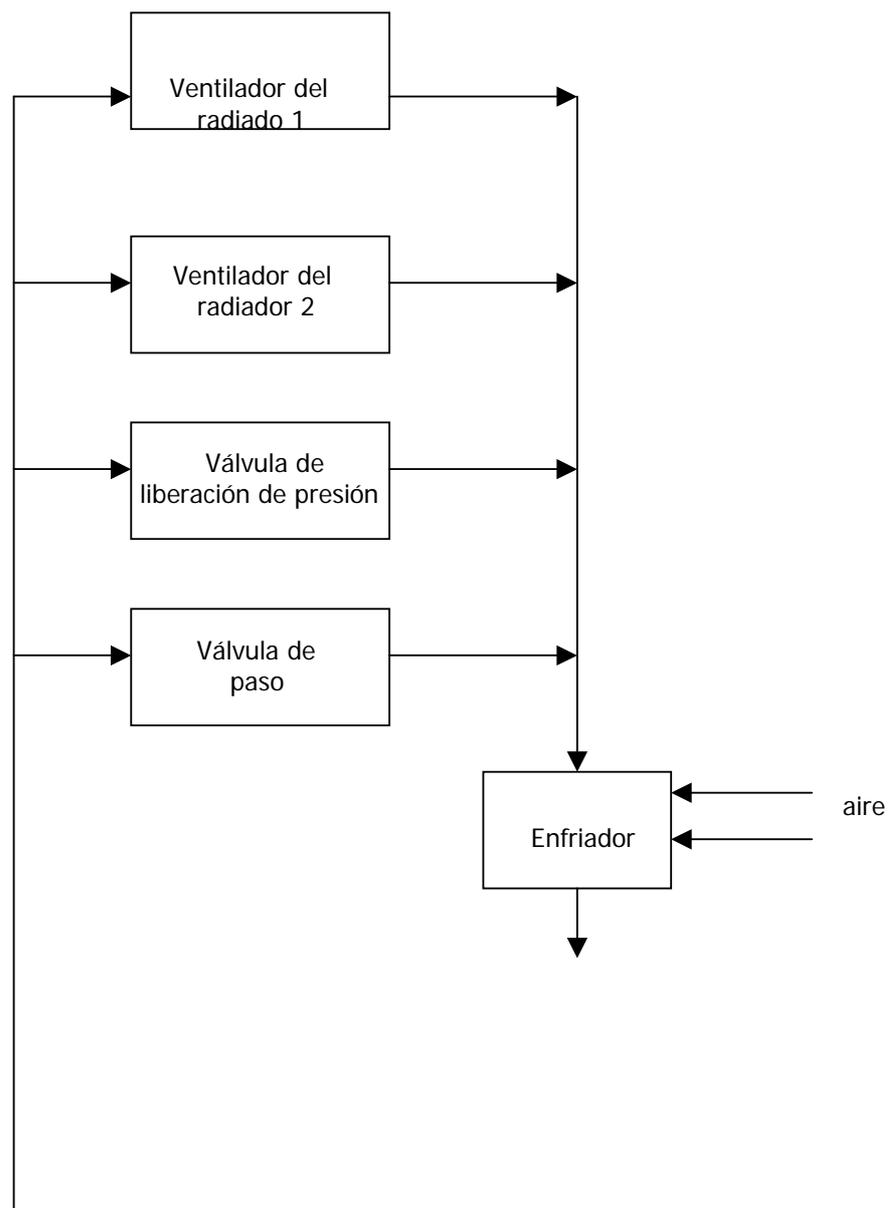


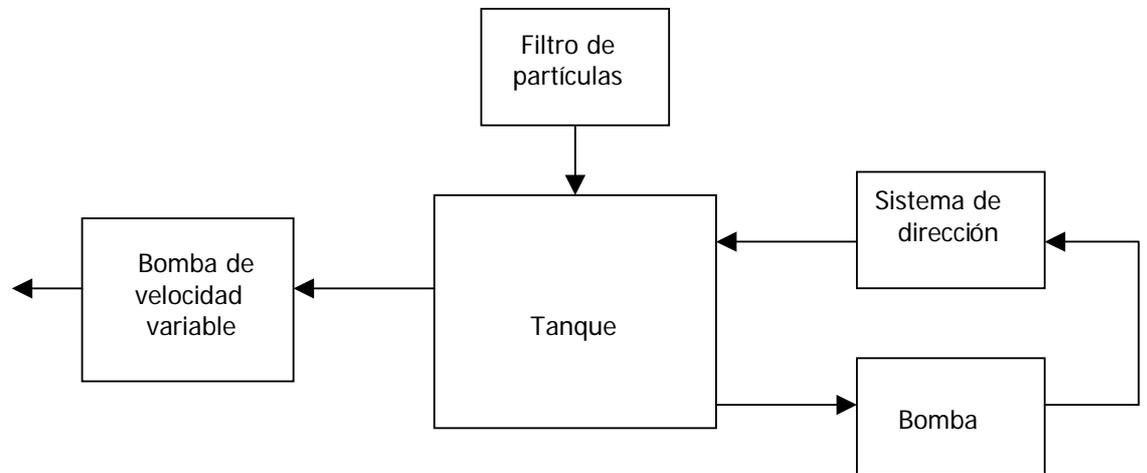
La manera en que los componentes individuales están unidos (paralelo o serie) depende de la naturaleza de la carga a lubricar y de la ubicación física de cada componente.

### 5.1.7. Sistema hidráulico

En vehículos, el sistema hidráulico impulsa los ventiladores del radiador y el sistema de dirección. El sistema hidráulico consiste en el circuito que impulsa los ventiladores del radiador y en el circuito de dirección.

**Figura 22. Diagrama de flujo del sistema hidráulico**





Para que giren los ventiladores de aire para ventilar los radiadores se utiliza una bomba de velocidad variable, que envía el fluido hidráulico desde el tanque hasta los ventiladores de aire, haciéndolos girar.

#### 5.1.7.1. Circuito de ventiladores del radiador

El circuito hidráulico que impulsa los ventiladores del radiador lleva el fluido hidráulico desde el tanque utilizando una bomba de velocidad variable. El fluido luego se divide en tres flujos; dos, sirven para impulsar directamente cada uno de los dos ventiladores de los radiadores. El tercer flujo va directo a la válvula de desvío para liberación de presión y proteger la bomba en caso de que se incremente la resistencia al paso del fluido por los ventiladores. La bomba cambia de velocidad y por consiguiente los ventiladores cambian de velocidad de acuerdo con los requerimientos de rechazo de calor.

La válvula de paso actúa como un liberador de presión cuando se para el sistema.

### **5.1.7.2. Circuito de dirección**

En aplicaciones en vehículos, para el funcionamiento suave del sistema de dirección, una bomba bombea el fluido hidráulico desde el tanque hacia la caja de engranajes del sistema de dirección. En algunos sistemas este tanque es el mismo que el usado en el circuito de ventiladores de los radiadores, en otros se utilizan tanques separados.

### **5.1.8. Sistema eléctrico**

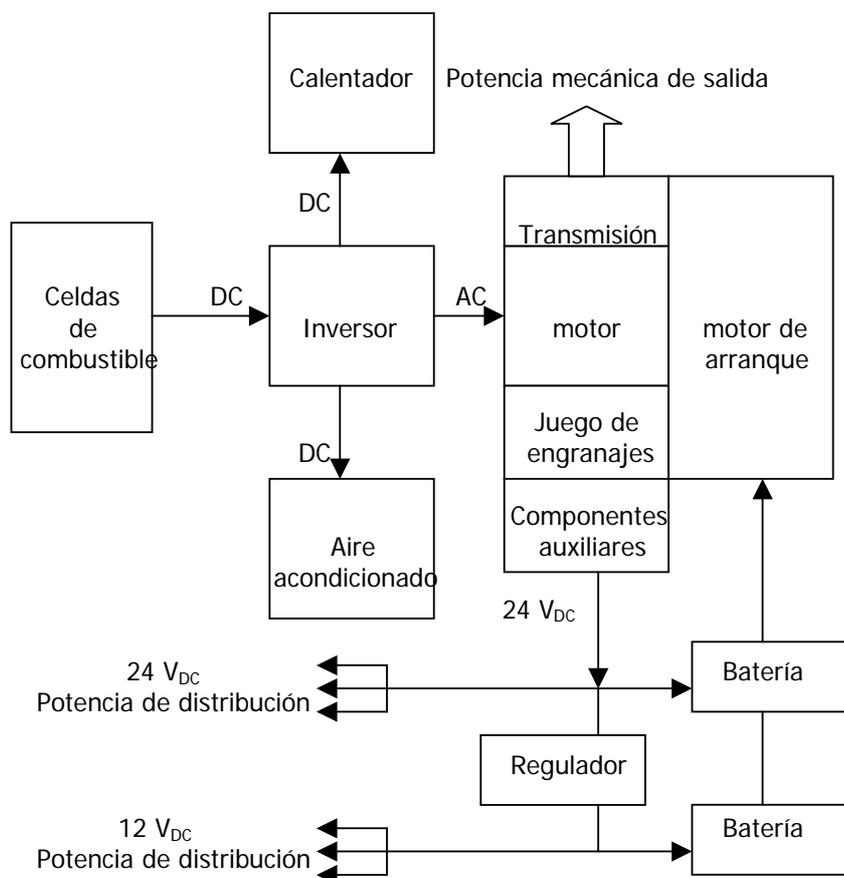
El sistema eléctrico regula, condiciona, y distribuye la potencia eléctrica generada por las celdas de combustible.

La potencia eléctrica de corriente directa generada por las celdas de combustible pasa directamente a un inversor. El inversor la convierte en corriente eléctrica alterna trifásica, que en aplicaciones en vehículos es de frecuencia variable, para poder trabajar el motor en respuesta a las necesidades de torque que recibe del sistema de control. El inversor tiene un detector de fallas a tierra que dispara una señal de advertencia si existe una corriente de fuga a tierra entre las conexiones de potencia de las celdas y el chasis de la instalación. Las pérdidas de calor generadas por el inversor son transferidas al sistema de refrigeración.

En las aplicaciones en vehículos el motor transfiere la potencia mecánica al eje y a la caja de engranajes. Desde la caja de engranajes se impulsa a los componentes auxiliares incluyendo el alternador, compresor de aire, bomba refrigerante, la bomba del ventilador del radiador del motor, la bomba de

dirección, la bomba de aceite lubricante, el compresor de refrigerante para aire acondicionado. Un motor de arranque hace girar al motor y a los componentes auxiliares durante el arranque.

**Figura 23. Diagrama de flujo del sistema eléctrico para aplicaciones en vehículos**



El alternador genera a 24 VDC la potencia eléctrica de salida; esta potencia es regulada y carga las baterías. Un ecualizador proporciona cargas adecuadas para obtener una fuente de 12 VDC y 24 VDC.

La corriente de 12 V<sub>DC</sub> es distribuida a través de una serie de fusibles, interruptores y relés para alimentar los diferentes circuitos de corriente directa de baja potencia, tales como luces, pildoras, bocina, etc.

#### **5.1.9. Sistema de control**

El sistema de control regula las operaciones del generador de celdas de combustible y colecta los datos operacionales.

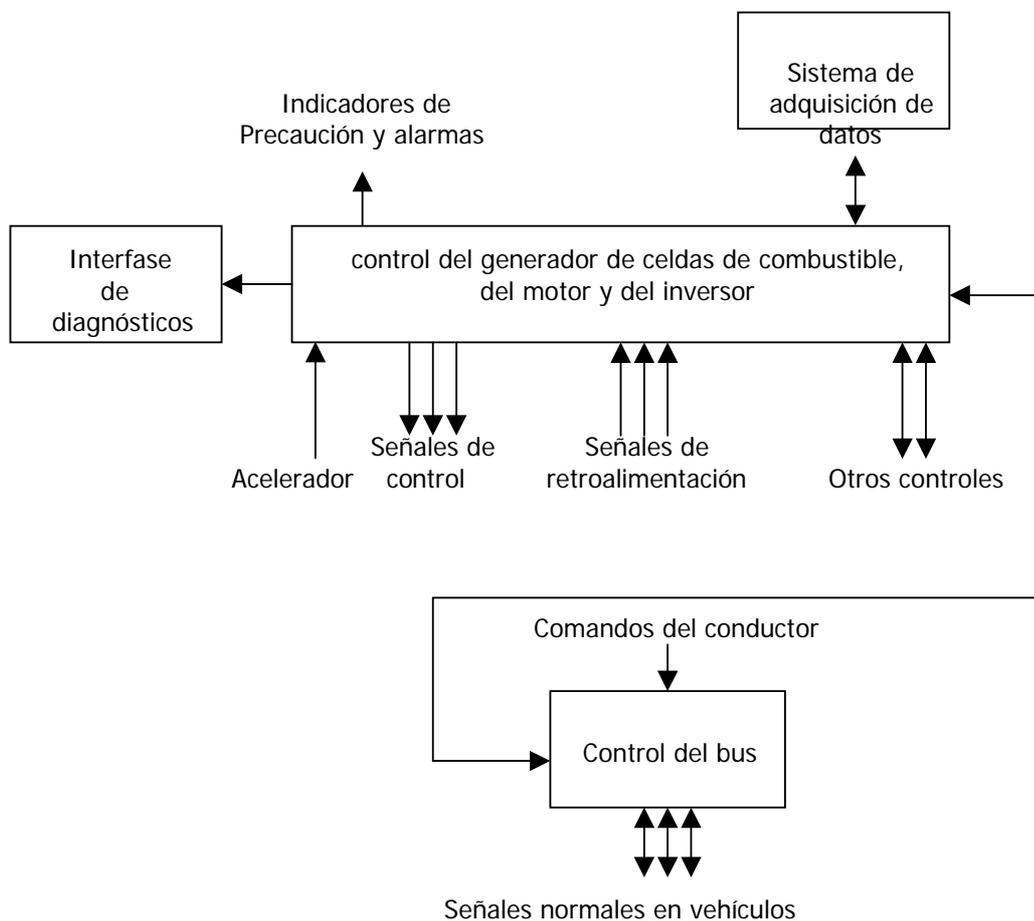
El control lógico en aplicaciones en vehículos reside en tres componentes principales: el control del generador de celdas de combustible, el control del vehículo y el sistema de adquisición de datos.

##### **5.1.9.1. Control del motor**

En aplicaciones en vehículos, el control del motor maneja las funciones del motor que trabaja con celdas de combustible tales como el sistema de encendido, el sistema de apagado, operaciones en estado transitorio, advertencias y alarmas. Los comandos de control, reciben señales de retroalimentación de los transductores, comunicados con otros dispositivos de control, y recibe señales de otros sistemas. El algoritmo de control deriva comandos inversores, componentes de ajuste, y posiciones de las válvulas utilizando un ajuste de relación matemática. Las advertencias y las alarmas se

indican por medio de luces luminosas, en un centro de mensajes en la pantalla (display), o de alguna otra manera. El control del motor transmite datos de operación en tiempo real a la interfase de diagnóstico para propósitos de diagnóstico.

**Figura 24. Diagrama de flujo del sistema de control**



### **5.1.9.2. Control del vehículo**

El control del vehículo es suministrado por la fabrica del chasis del vehículo y maneja las funciones normales del vehículo, tales como las luces, las puertas y el control del clima. El control del vehículo recibe las órdenes del piloto desde el área de los interruptores y se retroalimenta de los transductores y de los componentes normales de los vehículos, envía señales de comunicación al control del motor.

### **5.1.9.3. Adquisición de datos**

El sistema de adquisición de datos es un componente opcional para control, instalado en algunos lados para grabar algunas condiciones de operación para análisis futuros.

### **5.1.10. Sistema de detección de fugas**

El sistema de detección de fugas percibe la presencia de hidrógeno y pasa una serie de señales de alarma al sistema de control. El sistema de detección de fugas consiste en una serie de sensores de fuga, indicadores de fuga y unas cajas de unión.

El sistema de detección de fugas es energizado siempre que el sistema de control es energizado.

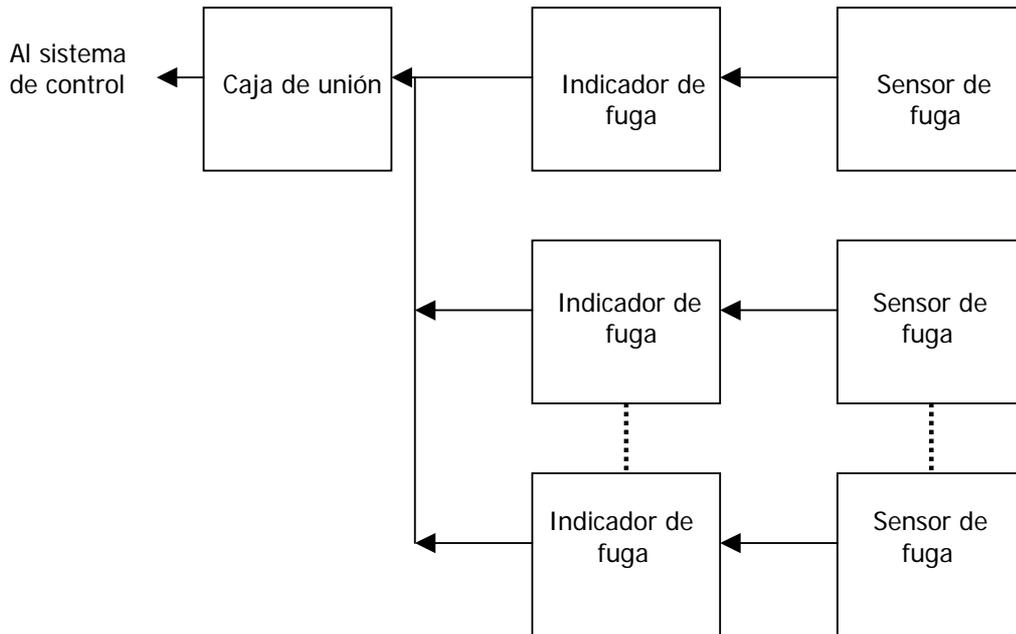
#### **5.1.10.1. Sensores de fugas**

Los sensores de fugas de gas están calibrados para medir concentraciones de gas de hidrógeno. Los sensores están generalmente instalados en los compartimientos de los cilindros de combustible, dentro de la caja de llenado, radiadores y baterías. Los sensores están instalados sobre los componentes de hidrógeno o en los espacios de aire donde el hidrógeno se podría empezar a acumular. Los sensores están casi siempre cubiertos para prevenir que les entre agua y sucio, y se montan en goma especial para protegerlos contra la vibración. Los sensores tienen vida útil de alrededor de 2 a 3 años y su señal de salida tiende a fluctuar con el tiempo o conforme se contaminan.

Los sensores se deben calibrar después de su instalación y después a intervalos periódicos.

Cuando un sensor ha quedado desenergizado por varios días puede tomarle hasta 24 h de operación para estabilizarlo completamente.

**Figura 25. Diagrama de flujo del sistema de detección de fugas**



#### **5.1.10.2. Indicadores de fuga y caja de unión**

Cada sensor de gas está enlazado a un indicador de fuga de hidrógeno. Cuando se utilizan sensores múltiples, también se utilizan indicadores múltiples. Cada indicador de fugas de hidrógeno energiza a un único sensor y exhibe la concentración de gas detectada por ese sensor.

Las concentraciones de gas se muestran como un porcentaje del límite bajo de inflamabilidad del hidrógeno. Cuando la concentración de gas excede el umbral ajustado, se envía una señal de precaución o de alarma desde el indicador a través de una caja de uniones al sistema de control. Cuando se da una señal de alarma, se detiene la operación.

Los ajustes de advertencia de fugas típicos son a 5, 10 o 15% y alarma a 25% del LFL (límite de inflamación bajo) del hidrógeno. Estos ajustes corresponden a concentraciones del 0.2, 0.4, 0.6 y 1.0% de hidrógeno en el aire respectivamente.

#### **5.1.11. Sistema de supresión de incendios**

El sistema de supresión de incendios protege contra incendios y pasa señales de alarma al sistema de control. El sistema de supresión de incendios puede ser organizado en una serie de zonas que sirven a áreas específicas. Cada zona puede contener sensores de incendio, conductores térmicos, tanques retardadores de incendio y boquillas de salida del material retardador de incendios.

El sistema de supresión de incendios está activo todo el tiempo, a menos que el sistema de baterías sea interrumpido. El sistema de control no necesita estar activado para que el sistema de supresión de incendios funcione. Funcionará aún cuando las luces de precaución o alarma de la sala de control u otros indicadores fallen. Cabe señalar que el sistema de baterías debe permanecer siempre activo, y debe haber un conjunto de baterías en espera, para cuando se haga mantenimiento al conjunto que está en operación normal.

## **6. SEGURIDAD DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE**

### **6.1. Hidrógeno**

Todos los combustibles son peligrosos debido a su alta reacción química, la que los hace una excelente fuente de energía. El hidrógeno no es inherentemente más peligroso que otros combustibles, tales como el gas natural y la gasolina, pero sus propiedades son únicas y debe ser manipulado con el cuidado apropiado. De muchas maneras, el hidrógeno es más seguro que otros combustibles.

Las fugas de hidrógeno forman la base del riesgo del hidrógeno gaseoso, debido a que sin una fuga no hay oportunidad de que el hidrógeno se mezcle con el aire, y por consiguiente no hay forma de riesgo de incendio o de asfixia. Además, la temperatura baja del hidrógeno líquido forma la base del riesgo de quemadura por congelamiento y de riesgo de condensación de oxígeno.

#### **6.1.1. Fugas de hidrógeno**

Las propiedades del hidrógeno que contribuyen al riesgo de fuga son, porque:

- Tiene el peso molecular más pequeño y forma la molécula más pequeña de cualquier elemento.
- De todos los elementos tiene la densidad más pequeña y de este modo la mayor flotación.
- Puede ser abrasivo para ciertos materiales.

- Es incoloro, inodoro y sin sabor.
- Actúa como un simple asfixiante cuando está presente en concentraciones suficientes para reducir el nivel de oxígeno.

El tamaño pequeño de las moléculas de hidrógeno las hace más difícil de contener que otras moléculas de otros gases. En gran magnitud, la posibilidad de fugas de hidrógeno son minimizadas a través del diseño. Los materiales de construcción deben estar diseñados para su uso con hidrógeno y ser resistentes a la corrosión metálica. Las tuberías de combustible nunca deben pasar a través de los compartimientos con personas, eliminando así la posibilidad de fugas de hidrógeno dentro de estos compartimientos.

Los cilindros de almacenamiento contienen la gran mayoría de hidrógeno. La cantidad de hidrógeno presente en la celda de combustible o en el motor de combustión interna es muy pequeña cuando están operando y ninguna cuando están apagados. Además, el hidrógeno en los cilindros de almacenamiento y en el colector está a alta presión, mientras el hidrógeno dentro de las celdas de combustible está a una presión baja. Cuanto más alta sea la presión es más fácil de que ocurra una fuga.

En las celdas de combustible de hidrógeno, los flujos de hidrógeno y de aire que pasan a través de las celdas de combustible están diseñados para no mezclarse directamente. Esto es posible por el uso de sellos o empaques. Un generador de celdas de combustible tiene miles de empaques. Las celdas de combustible desarrollan fugas, ya sean internas (entre las rutas de flujo) o externas hacia el medio ambiente. Para tratar con este riesgo de fugas, las apilaciones de celdas de combustible están generalmente encerradas y ventiladas con aire forzado para prevenir la acumulación de hidrógeno. Las

fugas en las celdas de combustible a menudo se manifiestan de otras maneras como un pobre desempeño eléctrico de las celdas de combustible individuales.

Una fuga de hidrógeno no es por sí sola un riesgo, sino que se convierte en un riesgo potencial de incendio cuando se mezcla con aire en proporciones apropiadas y es un riesgo de asfixia cuando desplaza el oxígeno del aire.

El hidrógeno suficiente para constituir un riesgo de asfixia solo puede acumularse, si la fuga de hidrógeno es en un área encerrada. Al aire libre, la difusión del hidrógeno es tan rápida que este riesgo es despreciable. Debido a que el hidrógeno es incoloro, inodoro y sin sabor, su presencia no puede ser detectada por los seres humanos, y por lo mismo no hay ningún síntoma de advertencia antes de perder la conciencia.

Las fugas de gases pueden ser calientes y representan un peligro de quemadura, asimismo pueden ser dañinas por la falta de presión.

#### **6.1.1.1. Detección de fugas de hidrógeno**

Las fugas de hidrógeno pueden ocurrir. Las fugas que no se logran detectar son la mayor causa de accidentes con hidrógeno. Para este propósito las aplicaciones con celdas de combustible incluyen un sistema de detección de fugas.

El sistema de detección de fugas consiste en una serie de sensores que están unidos al sistema de control. Así, el sistema de detección de fugas da la señal de precaución o de alarma antes de que la concentración del gas alcance un nivel peligroso.

Las fugas de hidrógeno pueden ser grandes o pequeñas. Las fugas se pueden manifestar como un sonido audible de gas presurizando, una lenta o repentina caída de presión, o el disparo del sistema de detección de fugas. Las fugas muy pequeñas no pueden ser detectadas por ninguna de las señales anteriores, y solo pueden ser detectadas por medio de una prueba de fuga.

Las pruebas de fugas son parte rutinaria del sistema de mantenimiento del sistema de combustible, y las pruebas de detección de fugas en la apilación de celdas de combustible son parte importante del mantenimiento de las celdas de combustible. Las pruebas de fuga generalmente son de tres tipos: observación de caída de presión en el tiempo, el uso de un detector de fugas de mano, o la aplicación de una solución detectora de fugas. Estos métodos proveen un aumento de precisión del lugar de la fuga de hidrógeno y se llevan a cabo en secuencia:

- Una prueba de caída de presión indica si una fuga existe en un área grande; es decir, en un área generalizada.
- La prueba con el detector de fugas de mano indica si la fuga existe dentro de un área localizada. El detector de fugas de mano solo trabaja con circuitos presurizados con gas inflamable, no trabajan con circuitos presurizados con aire o gases inertes como el nitrógeno.
- La prueba de la solución detectora de fugas indica si una fuga existe en una ubicación precisa. Esta solución trabaja con cualquier gas, inflamable o no.

### **6.1.1.2. Cómo detener las fugas de hidrógeno**

Las fugas de hidrógeno se paran apretando o reemplazando el accesorio o el componente con fuga.

Las fugas de hidrógeno deben ser arregladas en un área segura donde el hidrógeno no se pueda acumular y que esté libre de fuentes de incendio. Idealmente esto debería hacerse al aire libre, fuera de obstrucciones superiores, o dentro de un lugar con facilidades de mantenimiento, seguras para hidrógeno. El personal debe estar limitado a componer esa fuga. Fumar está estrictamente prohibido.

Cuando existe una fuga, el hidrógeno restante está almacenado seguramente. La única razón para ventilar el hidrógeno restante es para reparar algún componente que esté en el circuito de almacenamiento.

Antes de que la fuga sea reparada, debe ser localizada haciendo una prueba de fugas y utilizando el equipo de localización de fugas. Una fuga únicamente puede existir cuando los componentes están presurizados. El circuito de almacenamiento de combustible se mantiene a presión, aunque la planta esté apagada o en el caso de vehículos cuando el motor este apagado. Otros circuitos, como el de entrega de combustible, están solo a presión cuando el generador está operando. En el caso de un vehículo, si el vehículo no se puede apagar, desconecte la batería, así el vehículo estará eléctricamente muerto mientras se arregla la fuga.

Una vez que se localice la fuga, apriete las conexiones, y si la fuga persiste a pesar de haberse apretado, reemplace los componentes de los alrededores.

Nunca apriete cualquier montaje mientras esté presurizado. Nunca afloje un montaje mientras esté presurizado.

### **6.1.2. Incendios por hidrógeno**

Una vez que se ha fugado, el hidrógeno se mezcla con el aire y se puede incendiar sobre un ancho rango de concentraciones. Esta mezcla es muy fácil de encender y una vez encendida, se quema con gran fuerza. La llama es casi invisible a la luz del día. Si la fuga de hidrógeno es en un área encerrada, el riesgo de combustión o de explosión se incrementa. Si la fuga de hidrógeno es en un ambiente abierto, se eleva y se esparce rápidamente, reduciendo el riesgo de incendio. Las llamas tienen forma vertical y generalmente duran un corto período de tiempo.

En alguna magnitud, el riesgo de incendio se reduce a través del diseño. Los materiales de construcción deben ser resistentes a los incendios y estar aterrizados completamente para prevenir la acumulación de carga estática. Los cilindros de almacenamiento de alta presión incluyen un dispositivo liberador de presión que está diseñado para liberar el contenido del cilindro cuando hay riesgo de incendio, previniendo así una explosión a presión dentro del cilindro.

#### **6.1.2.1. Detección de incendios por hidrógeno**

La casi invisibilidad de los incendios por hidrógeno los hace difícil de detectar y son un riesgo serio para el personal.

Los incendios con hidrógeno pueden ser grandes o pequeños. La ferocidad del incendio está directamente relacionada con el nivel de presión de la fuga. Los incendios se pueden manifestar a través de la presencia de llamas,

humo en los equipos adyacentes sumergidos en llamas, olas de calor, olor a quemado, explosiones, daño en los componentes y la activación del equipo contra incendios. Los incendios muy pequeños puede que no sean percibidos de las maneras anteriores.

#### **6.1.2.2. Como extinguir un incendio con hidrógeno**

El protocolo para combatir un incendio con hidrógeno es similar al protocolo para combatir un incendio producido por gas. Lo principal es eliminar la fuente de combustible. Si esta no es una opción, hay que permitir que se quemara el combustible bajo condiciones controladas. El objetivo es el de minimizar el riesgo de lesión o de daño a personas, y el riesgo de daño al equipo de las áreas de los alrededores. Así como con cualquier incendio, hay que evacuar a todo el personal, excepto a las personas que lo están combatiendo, contactar a las autoridades locales si es necesario y combatir el incendio desde la mayor distancia posible. Los incendios grandes solo pueden ser extinguidos cerrando la fuente de combustible.

#### **6.1.3. Peligro con las temperaturas bajas**

La propiedad del hidrógeno que causa peligro de bajas temperaturas es que tiene el segundo punto de ebullición más bajo de todas las sustancias, después únicamente del helio.

Solo existe peligro de temperaturas bajas cuando el hidrógeno es almacenado en forma líquida. La temperatura extremadamente baja del hidrógeno líquido resulta en un severo peligro de quemaduras por helarse y secundariamente en peligro de incendio.

El hidrógeno líquido es almacenado a  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  en depósitos llenados al vacío, completamente aislados para evitar el contacto con la superficie exterior del depósito, y por ello siempre que la piel tiene contacto con el hidrógeno líquido, vapores de hidrógeno líquido, o superficies en contacto directo con hidrógeno líquido, se quema. Cualquier contacto con la piel puede causar daño extensivo al tejido, quemaduras, congelamiento o rasgaduras. Cualquier superficie en contacto con hidrógeno líquido es un peligro de quemaduras por baja temperatura.

Para minimizar el peligro de esas temperaturas bajas todos los tubos, depósitos y equipos que contienen hidrógeno líquido deben estar completamente aislados con los materiales adecuados. Las áreas de mantenimiento deben ser de concreto o estar cubiertas con materiales adecuados.

## **6.2. Altas temperaturas**

Agua, soluciones glucosas, aceites y gases circulan a través de tuberías y otros recipientes cuando las celdas de combustible están en funcionamiento. La temperatura máxima alcanzada por cualquiera de estos flujos se encuentra en la salida del turbocargador, que puede alcanzar los  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si se tocan las superficies expuestas pueden causar serias quemaduras.

Durante la operación normal, los compartimientos expuestos a calor se cubren para prevenir la exposición a las superficies calientes, además las celdas de combustible se pueden operar con los cobertores abiertos. Si el cobertor está abierto, como cuando está en mantenimiento el sistema, se debe evitar el contacto con cualquier superficie interna que contenga líquidos o gases

en circulación. Los componentes internos pueden permanecer calientes por un gran período de tiempo después de que se ha dejado de operar el sistema.

### **6.3. Presión alta**

El hidrógeno que se utiliza en aplicaciones en automóviles es generalmente almacenado en cilindros y la presión de trabajo es arriba de 250 bar, y potencialmente tan alto como 345 bar. El personal manipula el hidrógeno a alta presión cuando se están llenando estos cilindros. Esta presión alta es extremadamente peligrosa y puede resultar en una fuerza explosiva si se da una fuga o la ruptura de algún componente. Aun cuando están vacíos los cilindros de hidrógeno, la presión residual es de 21 a 35 bar.

Todos los componentes a alta presión son certificados como recipientes de presión y deben ser inspeccionados regularmente y reemplazados si les ocurre cualquier daño o falla.

Los cilindros de hidrógeno y el circuito de alta presión permanecen presurizados aun cuando las celdas han dejado de operar.

El hidrógeno, el agua, el aire y el refrigerante trabajan a una presión máxima de 2.4 bar dentro de la celda de combustible. El aceite lubricante y el fluido hidráulico trabajan a una presión de aproximadamente 6.2 bar. El sistema de aire trabaja arriba de 9 bar. Estas presiones son potencialmente peligrosas y se debe tener precaución cuando se trata con cualquier componente a presión.

#### **6.4. Choque eléctrico**

Una planta de generación de energía eléctrica operada a base de celdas de combustible contiene una variedad de componentes tanto de bajo voltaje como de alto voltaje.

Una apilación de celdas de combustible produce un voltaje proporcional al número de celdas de combustible, y puede llegar a exceder los 1000 V<sub>DC</sub> (voltaje de circuito abierto) para las aplicaciones grandes. Este voltaje se convierte en alterno con la ayuda de un inversor. El inversor ajusta la salida de la potencia eléctrica a la frecuencia requerida y en el caso de aplicaciones automotrices ajusta también la potencia de salida a la frecuencia necesaria para poder alcanzar el torque necesario, pero no puede alcanzar niveles tan altos.

Las plantas de generación de energía eléctrica que trabajan con celdas de combustible tienen altos voltajes AC y DC. Se debe tener precaución cuando se tiene acceso a cualquier componente eléctrico para prevenir un choque eléctrico o el riesgo de electrocutarse.

Las celdas de combustible, el inversor y otros componentes de alto voltaje están encerrados y localizados en compartimientos, los cuales durante la operación normal ofrecen una barrera de protección contra choques eléctricos. Las barreras de protección deben permanecer en su lugar. Nunca se deben operar las celdas de combustible con algunas barreras de protección fuera de lugar.

Siempre hay que suponer que las celdas de combustible y sus componentes están cargadas eléctricamente, hasta confirmar que no existe voltaje.

Los anillos, relojes, brazaletes y collares pueden concentrar corriente eléctrica cuando están en contacto con componentes cargados eléctricamente, o cuando una corriente pasa a través del cuerpo humano. Estas concentraciones de corriente pueden causar serias quemaduras. Además, para minimizar la conductividad, las manos y la ropa deben estar bien secas.

El sistema de control y otros componentes trabajan a 12 y 24 voltios DC. Esta potencia es suministrada por una o más baterías cuando la planta está apagada, en aplicaciones de vehículos cuando el motor está apagado y por el alternador mientras el motor está encendido. Estos componentes de bajo voltaje están localizados en varios lugares y no representan un riesgo de un choque eléctrico, pero sí de quemaduras o cortos circuitos. Algunos de estos componentes pueden permanecer cargados aún cuando el motor se apaga.

#### **6.5. Monitor de falla a tierra**

Los componentes de alto voltaje están eléctricamente aislados de la estructura. Para proteger contra la fuga de corriente a tierra, un monitor de falla a tierra es incorporado en el inversor, el cual constantemente compara la resistencia entre los dos planos. Una resistencia alta indica que hay muy poca o no hay fuga de corriente a tierra, y una resistencia muy pequeña indica que existe una fuga de corriente.

Una fuga de corriente, o una falla a tierra, ocurre donde un corto circuito eléctrico aparece y generalmente deriva de la acumulación iónica en el agua de humidificación o en el refrigerante de la apilación. Si la resistencia es muy pequeña, el monitor de falla a tierra genera una advertencia o el disparo de una señal de alarma.

## **6.6. Físicos**

Los peligros físicos incluyen los peligros con el equipo rotativo y el peligro por peso.

Las plantas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible incluyen ventiladores y equipo rotativo que tal vez está parcialmente expuesto, o podría estar expuesto si se le quita el protector.

Durante la operación normal, los cobertores previenen la exposición a los componentes rotativos, sin embargo se puede operar con estos cobertores abiertos. Si los cobertores se abren, como en el caso de mantenimiento, es posible tener un contacto con el equipo rotativo, el cual debe ser evitado.

No se debe utilizar ropa floja, para evitar el peligro de que entre en contacto con el equipo rotativo.

Los componentes individuales en las plantas de generación de energía eléctrica pueden ser muy pesados, por lo que es necesario tener equipo para levantar peso, incluso es necesario tener una grúa capaz de levantar seguramente componentes pesados en algunos procedimientos de mantenimiento.

Hay que vestirse con el equipo apropiado de seguridad, tal como botas con puntas de acero cuando se manipulan componentes pesados.

## **7. CÓMO TRABAJA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE**

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico; la energía química del combustible se convierte directamente en energía eléctrica con gran eficiencia. No tiene partes internas móviles y su operación es muy similar a las baterías. Consiste en la producción directa de electricidad con una alta eficiencia mediante el uso de químicos, que generalmente son hidrógeno y oxígeno sin existir combustión, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno como oxidante, el cual es obtenido directamente del aire.

Una diferencia importante entre las baterías y las celdas de combustible es que las baterías solo almacenan energía, mientras que las celdas de combustible pueden producir electricidad continuamente mientras se le suministre el combustible.

Las celdas de combustible van más allá de la ruta común de la producción tradicional de electricidad en las plantas modernas de generación de energía eléctrica, la cual consiste en obtener calor a base del combustible, convertir este calor en energía mecánica y finalmente transformar esta energía mecánica en energía eléctrica. Debido a que la generación de energía eléctrica con celdas de combustible es directa de la reacción química, la eficiencia que alcanza una celda de combustible puede ser muy elevada, además al no tener partes en movimiento son muy silenciosas. Sumado a todo hay que agregar que la celda de combustible no usa la combustión como mecanismo de generación de energía, lo que la hace prácticamente libre de contaminación. El futuro de la generación de energía eléctrica es inimaginable, sin ellas. Adicionalmente, las

celdas de combustible son consideradas como el candidato principal para producción de energía eléctrica ecológica, por ser limpias, silenciosas y eficientes. Aún cuando su arribo al escenario popular es relativamente reciente, las celdas de combustible han iniciado a ser comercializadas y utilizadas en aplicaciones estacionarias, tales como edificios, plantas de generación de energía eléctrica, en aplicaciones móviles como en transporte terrestre, y en aplicaciones portátiles.

En cierta forma, el cuerpo humano trabaja como una celda de combustible debido a que nuestro cuerpo oxida todos los compuestos hidrocarburos que se obtienen de la comida y luego libera energía química sin necesidad de una combustión.

También pueden ser usados en las celdas de combustible otros tipos de combustibles que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diesel entre otros.

Las celdas de combustible funcionan bajo el principio de intercambio de carga electroquímica entre una placa positiva y una placa negativa. Cuando se utiliza hidrógeno como combustible básico se produce electrolisis inversa, dando agua y calor como subproductos, sin producir contaminantes, y convirtiendo directamente energía química en eléctrica.

El funcionamiento de una celda de combustible consiste básicamente en la oxidación del hidrógeno, la reacción producida genera directamente energía eléctrica, calor y agua sin pasar por generadores u otros artefactos.

Toda celda de combustible está compuesta básicamente por un ánodo, un cátodo y electrolito. Sin embargo, siendo la oxidación del hidrógeno igual para

todos los tipos de celdas de combustible, por su variedad de combustible, los materiales usados en las celdas de combustible son muy variados.

El proceso de generación de energía eléctrica, inicia alimentando el ánodo de la celda con hidrógeno y el cátodo con oxígeno, los cuales están separados por una membrana electrolítica. La reacción se produce dentro de la misma. La producción de agua toma lugar en distintas partes de la celda dependiendo del electrolito utilizado.

El hidrógeno fluye hacia el ánodo de la celda, donde una cubierta de platino ayuda a quitar los electrones a los átomos de hidrógeno dejándolo ionizado, o sea, en forma de protones ( $H^+$ ).

Los electrones no pasan a través de la membrana, salen del ánodo por medio de un circuito externo a la celda de combustible en forma de corriente eléctrica; ésta es la corriente eléctrica que se utiliza para hacer trabajar los diferentes dispositivos eléctricos. Luego, a medida que el cátodo deja fluir a través de él al oxígeno, este último se combina, con los protones, y los electrones que recorrieron el circuito externo en forma de corriente eléctrica, para formar agua. Esta reacción también libera energía en forma de calor.

Los diferentes tipos de celdas de combustible se caracterizan generalmente por el material de su electrolito y del combustible utilizado. El electrolito es la sustancia que sirve como puente para el intercambio de iones entre el ánodo y el cátodo.

Existen cinco tipos principales de celdas de combustible:

- Celdas de combustible alcalinas: contienen electrolito líquido alcalino y son utilizadas principalmente en aplicaciones espaciales. La temperatura de operación es de 65 a 220 °C. Este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta un 70%. Hasta hace poco eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales, pero varias compañías están examinando la forma de reducir los costos y mejorar la flexibilidad de su operación.
- Celda de combustible con membrana de intercambio de protones: contienen un polímero sólido, como electrolito. La temperatura de operación es de 70 a 90 °C. Su baja temperatura de trabajo las hace ideales para uso en automóviles. Tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida de potencia y satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una cantidad inicial de energía bastante importante.
- Celdas de combustible de ácido fosfórico: utilizan ácido fosfórico como electrolito y son la única clase de celdas de combustible comercializadas para la generación de energía. La temperatura de operación es de aproximadamente entre 150 y 205 °C. Este es el tipo de celda de combustible más desarrollada a nivel comercial, ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas, 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 produce es empleado en otras aplicaciones, comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna. Este tipo de celda puede ser usado en vehículos grandes como autobuses y locomotoras. Existen en producción comercial unidades de alrededor de 200 kW.

- Celdas de combustible con carbonato fundido: contienen como electrolito una mezcla fundida de carbonato de litio y carbonato de potasio, su temperatura de operación es de aproximadamente 650 °C. Las celdas de combustible de carbonato fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles a base de carbón. En este tipo de celdas es aprovechada la electricidad y el calor generado.
- Celdas de combustible de óxidos sólidos: utilizan cerámica como electrolito para poder operar hasta a 1000°C. La temperatura de operación es hasta de 1000 °C. Son las únicas celdas que pueden utilizar monóxido de carbono como combustible. Es una celda de combustible altamente prometedora, podría ser utilizada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también hacen uso de ellas en vehículos automotores. Las unidades que abrigan van desde 25 hasta 100Kw de potencia, el sistema de óxido sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación sea muy elevada. La eficiencia de generación de potencia alcanza un 60%.

## 8. PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA BASADA EN CELDAS DE COMBUSTIBLE

8.1. Componentes de una planta de generación de energía eléctrica basada en celdas de combustible

### 8.1.1. Apilación de celdas de combustible

**Una celda de combustible simple es solo capaz de producir aproximadamente 1 voltio, por lo tanto, las celdas de combustible se diseñan de tal forma que las celdas individuales queden unidas formando una apilación para producir un voltaje mayor. Una apilación de celdas de combustible puede estar configurada con varios grupos de celdas en conexiones serie y paralelo para ampliar el voltaje, la corriente y la potencia. El número de celdas individuales que hay en una apilación es típicamente mayor que 50 y varía significativamente según la aplicación y diseño de la apilación.**

**Los componentes básicos de una apilación de celdas de combustible incluyen los electrodos y el electrolito con componentes adicionales requeridos para las conexiones eléctricas y/o para aislamiento y para el flujo de combustible y oxidante. Estos componentes importantes incluyen los colectores de corriente y las placas separadoras. Los colectores de corriente conducen electrones entre los electrodos y las placas separadoras. Las placas separadoras proveen las conexiones eléctricas entre las celdas y físicamente separan el flujo oxidante de una celda del flujo de combustible de la celda adyacente. Los canales en los**

**colectores de corriente sirven como camino de distribución del combustible y del oxidante. Frecuentemente los dos colectores de corriente y la placa separadora están combinados en una simple unidad llamada placa bipolar.**

#### **8.1.2. Electrolito**

**Es de material no metálico en el cual la corriente fluye debido al movimiento de iones. En el caso de una celda de combustible con membrana de intercambio de protones, el electrolito es una membrana que también actúa como una capa separadora, pues separa los gases de los compartimientos del ánodo y el cátodo de la celda de combustible.**

#### **8.1.3. Electrodo**

**Es un conductor eléctrico a través del cual la corriente eléctrica entra o abandona un medio, ya sea una solución electrolítica, sólida, masa fundida, gas o vacío.**

- Ánodo es el electrodo en el cual ocurre la oxidación. En celdas de combustible que crean potencial, es también el electrodo hacia el cual fluyen los iones negativos.**
- Cátodo Es el electrodo en que ocurre la reducción.**

#### **8.1.4. Catalizador**

**Es una sustancia química que aumenta la proporción de la reacción, sin ser consumida; después de la reacción puede ser potencialmente recuperada de la mezcla de la reacción, químicamente sin**

**cambios. El catalizador disminuye la energía requerida para activar, permitiendo que la reacción se realice más rápidamente o a una temperatura menor.**

#### **8.1.5. Colectores de corriente**

**Término utilizado para describir el material conductor, dentro de una celda de combustible, que colecta los electrones (en el lado del ánodo) o del cual salen los electrones (en el lado del cátodo). Los colectores de corriente son microporosos (para permitir que el fluido pase a través de ellos) y están entre el catalizador / las superficies del electrolito y las placas bipolares.**

#### **8.1.6. Ensamblaje membrana electrodo (MEA)**

**En el caso de una celda de combustible PEM (membrana de intercambio de protones), la MEA es la estructura que consiste de un electrolito PEM, con las superficies cubiertas por una capa catalizadora colocada entre dos capas conductoras microporosas, éstas últimas funcionan como capas difusoras de gas y colectoras de corriente.**

#### **8.1.7. Placas separadoras o placas bipolares**

**Son placas conductoras bipolares que en una apilación de celdas de combustible van al lado del ánodo en una celda y al lado del cátodo de la celda adyacente. La placa puede estar hecha de metal o de polímero conductor (el cual podría ser un compuesto de carbón). La placa usualmente incorpora canales de flujo para la alimentación de los fluidos y puede también tener conductos para la transferencia de calor.**

#### 8.1.8. Tubos de unión (colectores)

Los tubos de unión, o colectores, son los conductos de un dispositivo que reparte el gas a cada una de las partes que deben ser alimentadas con gas. Los tubos de unión o colectores en una apilación de celdas de combustible pueden ser internos o externos.

Un tubo de unión o colector externo actúa como cañería del sistema, la cual dirige el combustible al compartimiento del ánodo y el oxidante (aire) al compartimiento del cátodo.

Los puntos importantes en desarrollo relacionados con los tubos de unión o colectores externos son:

- Distribución uniforme del combustible y el oxidante
- Exposición a altas temperaturas y ambientes corrosivos.
- Aceptables caídas de presión
- Requerimientos de espacio compactos

Un tubo de unión o colector interno es un sistema de reparto interno de reactante que solo requiere conexiones con los tanques externos de reactantes para operar.

Los puntos importantes en desarrollo relacionados con los tubos de unión o colectores internos son:

- Reparto uniforme de combustible y oxidante a las superficies de los electrodos
- Múltiples conceptos para integración

- **Integral con placas separadoras o placas bipolares**
- **Integral con refrigerante**
- **Integral con los electrodos**

#### 8.1.9. Intercambiadores de calor

**Son dispositivos utilizados para transferir el calor de un fluido (líquido o gas) hacia otro fluido, donde los dos se encuentran físicamente separados.**

**Los intercambiadores de calor son necesarios para enfriar las celdas de combustible y para mantener la temperatura de trabajo adecuada. Son usados generalmente por las celdas de combustible de baja temperatura (celdas de combustible de ácido fosfórico, celdas de combustible de membrana de intercambio de protones y celdas de combustible alcalina). El refrigerante típico es el agua.**

##### 8.1.9.1. Hay varios tipos de intercambiadores de calor

- **Gas – Gas**
- **Gas – Líquido**
- **Condensadores**
- **Humidificadores**

#### 8.2. Procesamiento típico del combustible

##### 8.2.1. Reformador

**Un recipiente dentro del cual combustible y otro flujo de gas reciclado reaccionan con vapor de agua y calor, generalmente en presencia de un catalizador, para producir un gas rico en hidrógeno para ser utilizado dentro de las celdas de combustible.**

**Hay diversidad de diferentes fuentes de hidrógeno y métodos para reformado.**

#### **8.2.2. Reformación con vapor**

- El combustible reacciona con agua a través de un catalizador**
- Requiere de una entrada de una fuente de calor**

#### **8.2.3. Oxidación parcial**

- El combustible reacciona con aire (con o sin catalizador)**
- Generalmente produce calor**

#### **8.2.4. Autotérmico**

- Combinación de los anteriores (combustible, agua y aire)**
- No se requiere ni se produce calor neto.**

### **8.3. Conversión de potencia y electrónica**

**Las celdas de combustible producen corriente directa o potencia en corriente directa. Hoy en día la mayoría de los edificios y de las aplicaciones requieren de corriente alterna para trabajar. Esto tiene como consecuencia la necesidad de un dispositivo de conversión de corriente**

**directa en corriente alterna como parte del sistema de generación de energía eléctrica utilizando celdas de combustible.**

**Hay muchas aplicaciones que pueden hacer uso de la corriente directa como las computadoras y la iluminación.**

**Actualmente se está utilizando la tecnología para tener una mayor eficiencia (reduciendo las pérdidas), incrementando la confiabilidad y mejorando los costos.**

8.3.1. Cualidades de los dispositivos electrónicos que se utilizan en las plantas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible

- **Convertir la corriente directa en corriente alterna.**
- **Controlar el voltaje y la corriente**
- **Retroalimentar el sistema de control**
- **Protección contra altos voltajes y contra corto circuitos**
- **Conectar y controlar el almacenamiento de energía**
- **Conectar y controlar las cargas**
- **Sincronizar a la red del sistema interconectado y con otros generadores.**

8.4. Requerimientos de los dispositivos electrónicos utilizados en las plantas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible

- **Confiabilidad**
- **Protección contra sobre corriente**
- **Protección contra corto circuitos**
- **Protección contra sobre velocidad**
- **Bajas temperaturas de trabajo**

- **Dispositivos electrónicos de alta eficiencia, se desea mayor del 97%**
- **Alta eficiencia del sistema, se desea mayor del 95%; es típico, en la actualidad aproximadamente el 92%**
- **Controles para el funcionamiento uniforme de los motores**
- **Tener baja inductancia parásita**
- **Ambientalmente sellados**
- **Calidad de alta potencia**
- **Sincronización a la red de potencia**
- **Funcionamiento en paralelo en la red para reducir los picos**
- **Potencia sin interrupción**
- **Capaz de arrancar automáticamente en negro (black start capability)**
- **Capaz de hacer diagnósticos completos**
- **Sistemas de control y de comunicación, interna y externa**
- **Ajustabilidad**
- **Desconexión automática de la red con generación de potencia en isla.**
- **Potencia de reserva continua**
- **Rango dinámico grande**

## 8.5. Componentes auxiliares y de soporte

### 8.5.1. Filtros

**Los filtros remueven los materiales sólidos que se encuentran en algún medio, como un gas o un fluido. En el caso del aire, los filtros pueden ser instalados como parte del sistema de calentamiento o de enfriamiento a través del cual el aire fluye con el propósito quitarle las**

partículas antes y/o después de que el aire entre a los componentes. En el caso de un líquido o de un gas, puede ser un paso anterior a la reformación por ejemplo remoción de azufre.

La etapa de filtrado es importante para todas las aplicaciones, particularmente para quitar el azufre.

#### 8.5.2. Empaques y sellos

Los empaques o sellos son utilizados para prevenir las fugas de los fluidos y para poder mantener la presión en un compartimiento. Específicamente, un empaque se utiliza entre dos superficies estáticas para proporcionar un sello. El sellado es importante para todas las aplicaciones.

Algunas áreas en desarrollo hoy en día son:

- **Empaques para alta temperatura**
  - **Aplicable a las celdas de combustible de carbonato fundido y a las celdas de combustible de óxido sólido**
  - **Componentes que se encargan del procesamiento de combustible**
  
- **Alto desempeño contra:**
  - **Cambios de carga**
  - **Gradientes térmicos**

- Transitorios rápidos (presión y temperatura)
- Ciclos múltiples
  
- Resistencia a la corrosión
- Sellos herméticos
- Sellos de estado sólido
- Sellos de vidrio

### 8.5.3. Válvulas

Son dispositivos utilizados en la conducción de fluidos por medio de tuberías, para controlar el suministro de fluido a cualquier sección del sistema o para llevarlo al equipo donde se utiliza.

A continuación se describen los distintos tipos de válvulas que se utilizan en la planta de generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible

**Automáticas:** son dispositivos que consisten esencialmente de una válvula y un operador y sirven para controlar el suministro de combustible durante la operación normal del equipo. El operador puede hacerse trabajar por medio de la aplicación de presión del combustible sobre un diafragma flexible, o por medio eléctrico, por medio mecánico o por cualquier otro medio.

En cuanto el operador recibe la señal de cierre o apertura automáticamente opera la válvula.

***Tipo diafragma:*** es un dispositivo que consiste esencialmente de una válvula automática que trabaja por medio de la aplicación de presión de combustible sobre un diafragma flexible.

***Tipo eléctrico:*** es un dispositivo que trabaja mediante energía eléctrica para controlar el suministro de combustible. Se clasifican así:

**Modulares:** es una válvula diseñada para que la apertura de la válvula sea controlada dentro de un estrecho límite en todas partes del rango, de totalmente abierta hasta la posición de cerrado.

**Motor:** es una válvula controlada eléctricamente que es automáticamente cerrada por medio de un resorte u otro procedimiento mecánico en el caso de que el circuito eléctrico sea interrumpido.

**Solenoides:** es una válvula que se abre o se cierra por medio de la acción de una excitación eléctrica de una bobina que crea un campo magnético en una barra de acero unida al disco de la válvula.

**Paso (manual):** es una válvula que tiene un mecanismo rotativo generalmente con tres posiciones con diferentes niveles de flujo de combustible.

***Quemadora:*** es una válvula que trabaja manualmente o mecánicamente, la cual permite controlar el flujo de combustible.

***Control de combustión de entrada:*** es una válvula de control automático para regular el combustible de entrada.

***Tipo pestillo:*** es una válvula de gas manual, la cual requiere de por lo menos dos acciones o movimientos separados para activar la válvula.

***Enchufe Lubricado:*** es una válvula de tipo enchufe y barril que tiene superficies con cojinetes diseñados para ser relubricados sin desarmar la válvula.

***Quemador principal, individual:*** es una válvula que controla el suministro de combustible a un quemador principal individual.

***Semi-automática:*** es una válvula que abre manualmente y que cierra automáticamente o viceversa.

***Apagado manual:*** es una válvula operada manualmente en una tubería de combustible con el propósito de completamente abrir o cerrar el suministro de combustible al equipo.

***Apagado de seguridad:*** es una válvula que cierra automáticamente debido a la acción del sistema de control de seguridad o por algún dispositivo de seguridad de emergencia.

#### 8.5.4. Boquillas de rociado

- Es muy importante en aplicaciones para transporte, se utilizan en
  - Inyectores para combustible líquido
  - Humedecedor de spray
- También se utilizan en aplicaciones de planta remota y de respaldo o planta de emergencia.

- **Diesel, u otro combustible de rociado líquido**
- **Se utilizan donde hay necesidad de una buena mezcla o características de vaporización**
  - **Componentes de tamaño pequeño, vaporizadores**
  - **Bajas emisiones de contaminantes**
  - **Desempeño consistente sobre anchos rangos de operación**
  - **Desempeño consistente contra transitorios**

## **9. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE**

Esta tecnología limpia, silenciosa y flexible ya está empezando a servir a la humanidad en una gran variedad de maneras útiles, pero el volumen de producción es bajo y los costos son todavía muy altos. El soporte público es necesario para ayudar a generar la demanda inicial para romper este ciclo.

Cada uno de los diferentes tipos de celda de combustible ha sido desarrollado o fabricado debido a que sus características la hacen atractiva para ciertos tipos de aplicaciones. Por ejemplo, la mayor eficiencia y la mayor temperatura de operación de las celdas de combustible de carbonato fundido y las celdas de combustible de óxido sólido, las hace más útiles para aplicaciones en plantas de generación de energía eléctrica estacionarias donde las pérdidas por calor pueden ser utilizadas en otras aplicaciones auxiliares como calentar agua o aire para proveer calefacción.

Así también, las celdas de combustible de baja temperatura de trabajo como las de membrana de intercambio de protones y las celdas de combustible ácido fosfórico las hace ideales para aplicaciones de transporte donde el calor no es ni utilizable, ni deseable.

Las celdas de combustible individuales pueden combinarse para producir motores más potentes y pueden ser fabricadas de distintos tamaños y para distintas aplicaciones que van desde su uso en teléfonos hasta el uso de estas para motores de automóviles y para generar energía eléctrica.

Las tres aplicaciones principales de las celdas de combustible son:

- Generación de energía eléctrica estacionaria
- Transporte móvil
- Energía portátil

### 9.1. Generación de energía eléctrica con plantas estacionarias

Las celdas de combustible podrán potencialmente producir electricidad para ser utilizada en los hogares, negocios e industria a través de plantas de generación de potencia eléctrica estacionaria. Los rangos de tamaño van desde 1 kilovatio (una casa promedio en los Estados Unidos consume de 1 a 2 kW con picos de 15 kW en las horas de mayor consumo) hasta varios megavatios (suficiente para energizar instituciones y fábricas).

Los generadores que trabajan con celdas de combustible están suministrando potencia y calor a cientos de edificios alrededor del mundo. Cuando el costo baje a niveles competitivos, se espera que el bajo nivel de sistemas de generación que trabaja con celdas de combustible tenga un crecimiento en el mercado de equipo de potencia eléctrica. El desarrollo de pequeños sistemas con celdas de combustible (3kW – 10 kW) para usos residenciales está basado en proveer con electricidad y calor a hogares, con un significativo ahorro económico comparado con los servicios convencionales.

Las celdas de combustible hacen de la generación distribuida una alternativa competitiva debido a que tienen una única combinación de ventajas. Por ser las celdas de combustible pequeñas, silenciosas y ecológicamente limpias pueden colocarse en cualquier lugar donde se necesite energía

eléctrica, incluso en el lugar urbano más congestionado. Esto permite alimentar una demanda de electricidad sin tener una central eléctrica cercana y sin aumentar el sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica. Además, se eliminan las pérdidas de distribución y se reduce la necesidad de las feas líneas de transmisión y la radiación electromagnética asociada. Los sistemas con celdas de combustible son capaces de extenderse rápidamente para seguir el crecimiento de la carga. La flexibilidad de colocación también permite que el calor sea usado en alguna aplicación, aumentando la eficiencia.

Las aplicaciones de las plantas de generación de energía eléctrica estacionarias con celdas de combustible requerirán del desarrollo de inversores de potencia a bajo costo, confiables y eficientes, así como de tecnología de interfase con la red. El inversor de potencia es necesario para convertir la potencia generada en corriente directa por las celdas de combustible, en corriente alterna. También es necesaria tecnología de control para lograr confiabilidad y un efectivo costo de operación de las celdas de combustible, para producir potencia eléctrica de alta calidad.

Las celdas de combustible se suponen superiores en eficiencia debido a que están en el lugar de trabajo y por lo tanto no hay interrupciones de servicio debidas a cualquier tipo de falla en las líneas de transmisión o de distribución. Además por no tener las celdas de combustible partes en movimiento, tienen menos probabilidad de fallas mecánicas.

Generadores que trabajan con celdas de combustible han sido colocados en hospitales y centros de computación donde hay necesidad de energía sin interrupción y de alta calidad.

## 9.2. Generación de energía eléctrica distribuida

La generación de energía eléctrica distribuida se define como la generación de energía eléctrica a pequeña escala, localizada cerca de la carga a la cual se va a alimentar.

A veces también se le refiere como potencia en el lugar donde se va a utilizar, o también como potencia distribuida, la cual incluye además de la generación de energía eléctrica, su almacenamiento.

Las celdas de combustible son una forma de generación de energía eléctrica distribuida y pueden contribuir con el mercado de generación de energía eléctrica distribuida debido a sus características.

La generación de energía eléctrica distribuida contrasta con la generación de energía eléctrica por medio de una central eléctrica. En el caso de la central eléctrica, la potencia es generada con una planta grande (Megavatios) y la electricidad se transporta por medio de líneas de transmisión y líneas de distribución hacia los lugares donde va a utilizarse.

En el caso de la generación de energía eléctrica distribuida la ventaja potencial consiste en generar potencia eléctrica en el lugar donde se va a consumir y alimentar la red de distribución con el exceso de potencia eléctrica generada en el lugar, así como también, en alimentar cualquier déficit de generación en el lugar con energía de la red de distribución.

Las celdas de combustible son una alternativa atractiva para sustituir los sistemas que actualmente se utilizan para acondicionar la electricidad de la red del sistema convencional, tales como:

Los caros sistemas de fuentes ininterrumpibles de potencia, filtros en las líneas de transmisión, y sistemas de almacenamiento de energía.

Otra ventaja de la generación de energía eléctrica distribuida con celdas de combustible es que además de la elevada eficiencia de la electricidad, el calor producido por la celda de combustible puede ser utilizado en alguna aplicación en el lugar.

La Generación de Energía Eléctrica Distribuida con Celdas de Combustible tiene los siguientes beneficios:

- Reduce la contaminación
- Aumenta la confiabilidad local y del sistema
- Aumenta la calidad de la potencia eléctrica debido a que se libera de los problemas de variación de frecuencia, transitorios, caídas de voltaje y picos que se dan en los sistemas interconectados.
- Aumenta la eficiencia al disminuir las pérdidas de energía eléctrica ya que se reduce la distancia que la electricidad debe de viajar desde la fuente hasta el lugar donde va a utilizarse.
- Reduce los costos del sistema ya que no se utilizan líneas de transmisión y distribución; asimismo reduce los costos de mantenimiento, por el mismo motivo.
- Aumenta la flexibilidad en el diseño del sistema, expansión y crecimiento
- Mejora la respuesta a cambios de cargas
- Reduce los costos en que incurren los clientes por las interrupciones del servicio.

### 9.3. Aplicaciones de las celdas de combustible en

#### 9.3.1. Transporte móvil

Una importante aplicación comercial de la celda de combustible es la posibilidad de reemplazar al motor de combustión interna en aplicaciones de transporte. Hoy en día, las fábricas más grandes de vehículos y algunas compañías relacionadas están desarrollando prototipos de vehículos que trabajan con celdas de combustible para investigar sus posibilidades. En las aplicaciones de las celdas de combustible en transporte, los desarrollos más importantes incluyen el manejo del combustible y el procesado del combustible. Por ejemplo, la celda de combustible con membrana de intercambio de protones que es considerada como la primera candidata para las aplicaciones en transporte necesita hidrógeno puro y limpio como combustible. Por lo tanto, requisitos severos de limpieza, deben cumplirse en el proceso de transporte de combustibles como la gasolina y el metanol para eliminar los compuestos que pueden envenenar las celdas.

El desarrollo de una tecnología para un reformador compacto productor de hidrógeno de alta pureza, eficiente, efectivo en costo es la clave de estos requisitos. Una estrategia alternativa para remediar la necesidad del reformador de combustibles líquidos, es el almacenamiento y uso directo del hidrógeno. Un desarrollo significativo de la infraestructura de fuentes de hidrógeno será necesario.

Las celdas de combustible producen dramáticamente menos contaminación que el carbón, combustibles aceitosos o tecnologías de combustión que existen hoy en día.

Aún con las celdas de combustible se produce un poco de CO<sub>2</sub> cuando se utilizan combustibles con base en hidrocarburos; la producción de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y partículas es prácticamente nula.

Los programas como el de cero emisiones en California son grandes incentivos para los fabricantes para utilizar las celdas de combustible. Los buses de transporte urbano representan una entrada para las celdas de combustible en el mercado del transporte. Esto es debido a que los buses convencionales son fuentes significativas de emisiones nocivas en áreas urbanas.

Depósitos centrales de llenado de combustible facilitarán el uso de hidrógeno, se espera que los buses que trabajan con celdas de combustible tengan menor mantenimiento y costo de operación.

Los buses que trabajan con celdas de combustible están tecnológicamente listos para entrar en el mercado, pero un extenso campo de demostraciones y pruebas son necesarias para probar su desempeño y la confianza en la tecnología. Un bus utiliza típicamente una planta de energía eléctrica con celdas de combustible de 250 kW utilizando celdas de combustible de ácido fosfórico y de membranas de intercambio de protones.

La aplicación más grande del mercado disponible para las celdas de combustible son los vehículos ligeros y ha sido el foco de intenso esfuerzo y empeño para su desarrollo. La mayoría de las compañías automotrices tienen actualmente programas de vehículos que trabajan con celdas de combustible.

### 9.3.2. Energía portátil

También hay un interés creciente en micro celdas de combustible que se utilizan como generadores portátiles y que sustituirían a las baterías.

Las celdas de combustible comparadas con las baterías, son rápidas y fáciles de llenar con combustible, tienen mayor tiempo de trabajo y menor costo de operación. Los sistemas han sido desarrollados para un gran número de aplicaciones, incluyendo las computadoras portátiles, teléfonos celulares, cámaras de video, generadores pequeños para distintas aplicaciones y como potencia eléctrica de emergencia.

## CONCLUSIONES

1. El hidrógeno cuando se quema es casi un combustible ideal en términos de reducción de contaminación. El hidrógeno no contiene carbono o azufre y por lo tanto no se crea CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> y ceniza durante la combustión. El hidrógeno no es tóxico y por lo tanto el que no se ha utilizado para combustión no es un riesgo directo para la salud. El hidrógeno tiene la más alta relación energía peso de todos los combustibles debido a que es el elemento más ligero y que no contiene átomos de carbono pesados. Específicamente, la cantidad de energía liberada durante la reacción de hidrógeno, sobre una unidad base de masa, es aproximadamente 2.5 veces el calor de combustión de los combustibles hidrocarburos comunes (gasolina, diesel, metano, propano, etc.) Así, para un servicio de carga dado, la masa de hidrógeno requerida es solo una tercera parte de la masa necesaria de combustible hidrocarburo.
2. El proceso de extraer el hidrógeno del agua es llamado electrólisis, y la principal característica de la electrólisis es que puede ser totalmente no contaminante y utiliza recursos renovables, pero requiere de una gran cantidad de energía eléctrica. En la electrólisis, se utiliza la electricidad para descomponer el agua en sus componentes elementales: hidrógeno y oxígeno. La electrólisis es el método preferido para la producción de hidrógeno debido a que es el único proceso que no necesita de combustibles fósiles. También porque el producto tiene alta pureza y es factible para producción de hidrógeno en pequeña y gran escala. La electrólisis puede operar en un ancho rango de valores de capacidad de

energía eléctrica, por ejemplo se puede obtener ventaja de la abundancia de electricidad en la noche después de la hora pico y en la madrugada.

3. Los sistemas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible, operan sin contaminación cuando trabajan con hidrógeno puro, los únicos productos derivados son agua pura y calor.
4. Cuando se utilizan como generadores de energía eléctrica, las celdas de combustible requieren de menos transformaciones de energía que las máquinas que utilizan calor.
5. Las celdas de combustible pueden ser utilizadas en aplicaciones de cogeneración. Además de potencia eléctrica, las celdas de combustible generan agua pura caliente y calor en grado medio, y ambos pueden ser potencialmente utilizados en aplicaciones domésticas e industriales. Las celdas de combustible no requieren de afinación o de ponerlas a punto. Las celdas de combustible no requieren recarga. En lugar de recargarse, las celdas de combustible deben abastecerse de combustible, lo cual es más rápido que recargar una batería y pueden proveer un mayor tiempo de uso, dependiendo del tamaño del tanque de almacenamiento.
6. Las plantas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible de membrana de intercambio de protones PEM más grandes a la fecha son las del sistema de generación de energía Ballard que tienen 250 kW y operan actualmente en varios sitios alrededor del mundo. Aunque 250 kW es una cantidad pequeña de potencia comparada con las estaciones de generación de potencia convencionales, es una cantidad adecuada para vecindarios o lugares incomunicados o para funcionar como planta de emergencia para instalaciones críticas, como hospitales.

7. El desarrollo de pequeños sistemas con celdas de combustible ( 3 kW – 10 kW ) para usos residenciales está basado en proveer con electricidad y calor a hogares, con un significativo ahorro económico comparado con los servicios convencionales. Las celdas de combustibles portátiles pueden ser potencialmente utilizadas en muchas aplicaciones que comúnmente utilizan baterías. Hay unidades comercialmente disponibles que proveen arriba de 1.2 kW de potencia eléctrica.
8. Una característica básica de las celdas de combustible es que la corriente eléctrica de la carga determina la relación de consumo de hidrógeno y oxígeno.
9. Una celda de combustible puede operar usando una variedad de combustibles y oxidantes; el hidrógeno ha sido reconocido como el más efectivo de los combustibles para las celdas de combustible prácticas, actualmente utilizadas debido a que tiene la mayor reacción electroquímica comparándolo con otros combustibles como los hidrocarburos o los alcoholes.
10. Las celdas de combustible hacen de la generación distribuida una alternativa competitiva debido a que tienen una única combinación de ventajas. Por ser las celdas de combustible pequeñas, silenciosas y ecológicamente limpias pueden colocarse en cualquier lugar donde se necesite energía eléctrica, incluso en el lugar urbano más congestionado. Esto permite alimentar una demanda de electricidad sin tener una central eléctrica cercana y sin aumentar el sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica. Además, se eliminan las pérdidas de distribución y se reduce la necesidad de las feas líneas de transmisión y la radiación electromagnética asociada. Los sistemas con celdas de combustible son

capaces de extenderse rápidamente para seguir el crecimiento de la carga. La flexibilidad de colocación también permite que el calor sea usado en alguna aplicación, aumentando la eficiencia.

11. Las celdas de combustible se suponen superiores en eficiencia debido a que están en el lugar de trabajo y por lo tanto no hay interrupciones de servicio debidas a cualquier tipo de falla en las líneas de transmisión o de distribución. Además, por no tener partes en movimiento, tienen menos probabilidad de fallas mecánicas.
  
12. La generación de energía eléctrica distribuida con celdas de combustible tiene los siguientes beneficios:
  - Reduce la contaminación
  - Aumenta la confiabilidad local y del sistema
  - Aumenta la calidad de la potencia eléctrica debido a que se libera de los problemas de variación de frecuencia, transitorios, caídas de voltaje y picos que se dan en los sistemas interconectados.
  - Aumenta la eficiencia al disminuir las pérdidas de energía eléctrica ya que se reduce la distancia que la electricidad debe viajar desde la fuente hasta el lugar donde va a utilizarse.
  - Reduce los costos del sistema ya que no se utilizan líneas de transmisión y distribución; asimismo reducen los costos de mantenimiento por el mismo motivo.
  - Aumenta la flexibilidad en el diseño del sistema, expansión y crecimiento
  - Mejora la respuesta a cambios de cargas
  - Reduce los costos en que incurren los clientes por las interrupciones del servicio.

## RECOMENDACIONES

1. Para reducir la contaminación ambiental, se deben utilizar celdas de combustible, empleando hidrógeno puro para generar energía eléctrica y para utilizarlas como fuentes de energía en buses y automóviles, por ser unos de los mayores contaminantes del aire.
2. Utilizar celdas de combustible en aplicaciones de cogeneración. Además de potencia eléctrica, las celdas de combustible generan agua pura caliente y calor en grado medio, y ambos pueden ser potencialmente utilizados en aplicaciones domésticas e industriales. Cuando esto se hace, la eficiencia de todo el sistema combinado se incrementa.
3. Promover el uso de las celdas de combustible utilizando hidrógeno para la generación de energía eléctrica distribuida, por las ventajas descritas de este sistema sobre el sistema convencional.
4. Producir hidrógeno por medio de electrólisis, utilizando la electricidad proveniente de generación de energía eléctrica limpia, como la hidroeléctrica, en periodos de bajo costo de la electricidad, como la producida en las horas de la noche posteriores a la hora pico y en la madrugada.
5. Fomentar la investigación, tecnificación y desarrollo de la tecnología en celdas de combustible utilizando hidrógeno, en vista de que es el futuro para la generación de energía eléctrica y porque el petróleo y sus derivados son cada vez más caros, son productos no renovables y que

tienden a agotarse a largo plazo, aparte de la contaminación ambiental que causan. Asimismo es necesario para no quedarnos a la zaga de los países que ya utilizan la tecnología de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrógeno.

## BIBLIOGRAFÍA

1. GOTTFELD S. **Direct Methanol Fuel Cells: Developments for Portable Power and for Potential Transportation Applications.** California 1998, 531 p.
2. MOORE, R. M. **A Comparison of a Direct-Methanol Fuel Cell with a Direct-Hydrogen Fuel Cell,** in “Proton Conducting Membrane Fuel Cells. New Jersey, 1998. 587 p.
3. VERGARA, Argos. **Diccionario enciclopédico.** 756 p.
4. FITZGERALD, A. E. y otros. **Máquinas eléctricas.** México: McGraw-Hill, Inc, 1994.
5. WOOD, Jesé. **Química general.** University of Tennessee. 312 p.
6. JACKSON, Kenneth. **Diccionario de ingeniería eléctrica.** Barcelona: Hurope, 1986.