

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**



**“ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS DE LA APLICACIÓN DE LAS  
PILAS DE COMBUSTIBLE EN AUTOS FCV, FUNCIONAMIENTO  
BÁSICO Y OTROS USOS”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**JUNIOR JORDY MENDOZA CHOQUE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2018**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



“ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS DE LA APLICACIÓN DE LAS PILAS DE  
COMBUSTIBLE EN AUTOS FCV, FUNCIONAMIENTO BÁSICO Y OTROS  
USOS”

TESIS PRESENTADA POR:

JUNIOR JORDY MENDOZA CHOQUE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:


PRESIDENTE:

  
Ing. LEONEL MARINO CASTILLO ENRIQUEZ

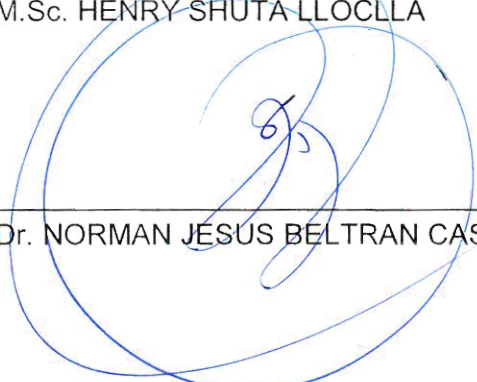
PRIMER MIEMBRO:

  
M.Sc. ANGEL MARIO HURTADO CHAVEZ

SEGUNDO MIEMBRO:

  
M.Sc. HENRY SHUTA LLOCLLA

DIRECTOR / ASESOR:

  
Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑON

ÁREA : ENERGÍAS RENOVABLES.  
TEMA : ANÁLISIS DE APLICACIÓN.

## DEDICATORIA

*Agradecer primeramente al Dios creador por su infinita gracia, misericordia y bendiciones, ya que es quien nos diseñó de una manera extraordinaria.*

*A mis queridos padres: Roger Mendoza e Hilda Choque; por su influencia a que tenga una perspectiva mucho más amplia, perspicacia, carácter, disciplina y visión.*

*A mi hermana Lucero, las huellas que dejas son sólo una referencia de lo que debes llegar, siempre alegrando la atmósfera.*

*También a mis amigos que siempre estuvieron conmigo en todo momento, que son pocos pero son de calidad.*

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional del Altiplano, por abrirme las puertas, brindándome una infraestructura y calidad educativa, principalmente a la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, a su plana de docentes y administrativos; que imparten sus experiencias y conocimientos que contribuyeron a mi formación profesional.*

*A mis padres, que siempre me apoyaron en todo momento, para poder lograr mis metas y virar más allá de mis propias posibilidades, solidificando mi carácter, y fortaleciendo mis debilidades.*

*A mis docentes de la E.P.I.M.E., quienes forjaron mis conocimientos y guiaron a tener una perspectiva profesional más amplia; a mis Jurados y Director de Tesis Dr. Norman J. Beltran, que contribuyeron en la culminación del presente trabajo de investigación.*

*A mis amigos y compañeros, por su trato afable, su respeto, por su compañerismo y apoyo para poder avanzar y concluir con lo trazado.*



## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	14
CAPÍTULO I .....	15
1.1. INTRODUCCIÓN .....	15
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	16
1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	16
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	18
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO II .....	20
MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	20
2.2. SUSTENTO TEÓRICO .....	21
2.2.1. VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (FCV), Y VEHÍCULOS HÍBRIDOS.....	21
2.2.2. ELEMENTOS DE UN FVC Y AUTOS ELÉCTRICOS.....	26
2.2.3. EL HIDRÓGENO.....	34
2.2.4. CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL HIDRÓGENO .....	37
2.2.5. POSICIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE COMO SOSTENIBLES. ....	40
2.2.6. PILAS DEL COMBUSTIBLE .....	43
2.2.7. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE .....	48
2.2.7.1. Celdas de combustible alcalinas (AFC).....	48
2.2.7.2. Celdas de combustible de metanol directo (DMFC) .....	50
2.2.7.3. Celdas de combustible de etanol directo (DEFC).....	51
2.2.7.4. Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).....	53
2.2.7.5. Celdas de combustible de Carbonatos fundidos (MCFC).....	54
2.2.7.6. Celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC).....	55
2.2.7.7 Celdas de combustible poliméricas (PEMFC).....	56
2.3. GLOSARIO DE TÉRMINOS BÁSICOS .....	58
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	60
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	60
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS .....	60
CAPÍTULO III .....	61
DISEÑO METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN.....	61

3.1. Tipo y diseño de la investigación .....	61
3.2. Población y muestra de investigación.....	61
3.3. Ubicación y descripción de la población .....	61
3.4. Técnicas e instrumentos para recolectar información .....	61
3.5. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos .....	62
3.6. Tratamiento de datos.....	62
CAPÍTULO IV .....	63
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	63
4.1. PARADIGMAS TECNOLÓGICOS.....	63
4.2. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE .....	74
4.2.1. REACCIÓN Y ECUACIONES BÁSICAS DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE .....	74
4.2.2. EFICIENCIA Y LÍMITES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	78
4.2.3. PÉRDIDAS QUE SE PRESENTAN EN UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE.....	84
4.2.4. PILA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEMFC) .....	98
4.2.5. GESTIÓN DEL AGUA.....	102
4.2.6. FLUJO DE AIRE, EVAPORIZACIÓN Y LA RELACIÓN DE HUMEDAD EN LAS FC .....	104
4.2.7. AUTO-HUMIDIFICACIÓN DE LAS CÉLULAS DE COMBUSTIBLE.....	109
4.3. BOSQUEJO DE DISEÑO DE UNA PEQUEÑA PILA DE COMBUSTIBLE .....	123
4.4. APLICACIONES PRÁCTICAS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	124
4.4.1. PEQUEÑOS SISTEMAS PRÁCTICOS CON PILAS DE COMBUSTIBLE.....	124
4.4.2. MEDIANOS SISTEMAS PRÁCTICOS CON PILAS DE COMBUSTIBLE.....	127
4.4.3. APLICACIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE EN EL PARQUE AUTOMOTRIZ .....	129
4.4.4. APLICACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE RESIDENCIALES.....	139
4.4.5. APLICACIÓN DE LOS FC EN LOS SISTEMAS DE COGENERACIÓN .....	140
4.4.6. APLICACIÓN EN GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA HÍBRIDA .....	145
4.5. ANÁLISIS Y GRÁFICOS COMPLEMENTARIOS .....	147
4.5.1. ANÁLISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	147
4.5.2. COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS DE AUTOS .....	148
4.5.3. COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DE UN MOTOR CONVENCIONAL CON UNA PILA DE COMBUSTIBLE. ....	149
4.6. SEGURIDAD DE MANEJO DEL HIDRÓGENO .....	150
4.7. EXPERIMENTACIÓN CON EL MÓDULO LUCAS-NÜLLE LABSOFT PILA DE COMBUSTIBLE DE LA E.P.I.M.E. – U.N.A.P.....	155
CONCLUSIONES .....	162
SUGERENCIAS.....	163
BIBLIOGRAFÍA.....	164
ANEXOS .....	167

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Ceremonia de inauguración del FCV MIRAI el 25 de marzo del 2015, frente a la estación de hidrógeno en la Universidad de Kyushu.....	22
Figura N° 2.2 Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid bus.....	23
Figura N° 2.3 Evolución de los Automóviles, Toyota hacia el uso de Fuel Cell.....	24
Figura N° 2.4 Utilización del hidrógeno tanto para autos y usos domésticos.....	25
Figura N° 2.5 Principales componentes que forman un motor eléctrico. ....	27
Figura N° 2.6 Motor eléctrico de rueda.....	28
Figura N° 2.7 Depósito de hidrógeno (H <sub>2</sub> ) a alta presión, diseño en AutoCAD.....	29
Figura N° 2.8 Inyector de compresión controlado de manera electrónica para el paso del hidrógeno, los depósitos de alta presión.....	32
Figura N° 2.9 Conducto de hidrógeno .....	33
Figura N° 2.10 Sistema de frenado regenerativo mediante fricción, modelado en Auto CAD 3D.....	33
Figura N° 2.11 Accidente hindenburg; una de las fotografías tomadas por la prensa en el momento del accidente. ....	35
Figura N° 2.12 Relación de expansión del Hidrógeno .....	38
Figura N° 2.13 Pila de combustible de electrolito alcalino utilizada en los transbordadores espaciales modernos.....	43
Figura N° 2.14 Diagrama de una celda de combustible alimentada mediante hidrógeno (H <sub>2</sub> ).....	47
Figura N° 2.15 Reacciones en los electrodos y la carga de flujo para pila de combustible con un .....	47
Figura N° 2.16 Estructura fundamental de un AFC .....	49
Figura N° 2.17 Esquema de una pila de combustible DEFC. ....	52
Figura N° 2.18 Esquema de una celda de combustible PAFC. ....	53
Figura N° 2.19 Esquema de una celda de combustible MCFC. ....	55
Figura N° 2.20 Esquema de una celda de combustible SOFC.....	56
Figura N° 2.21 Ejemplo de una membrane electrode assembly (MEA) .....	58
Figura N° 4.1 Modelo T automóvil presentado por Ford.....	64
Figura N° 4.2 Primer carro contruido en Perú y el america latina por Alberto Grieve...	70
Figura N° 4.3 Comportamiento básico de una Pila de combustible.....	75
Figura N° 4.4 Esquema del funcionamiento de la conducción eléctrica y la conducción iónica. ....	94
Figura N° 4.5 Pila Honda FC y caja de cambios (exhibido en el Salón de Tokio 2007). .....	99
Figura N° 4.6 Serenegy PEMFC de funcionamiento de alta temperatura refrigerado por líquido;una FC y su Sistema final. ....	101
Figura N° 4.7 Estructura básica de una PEMFC a baja temperatura con una simple configuración de la placa bipolar. ....	102
Figura N° 4.8 Ilustración esquemática de los diferentes movimientos del agua, dentro y desde el electrolito de una PEMFC.....	103
Figura N° 4.9 Superficie P-V-T de una sustancia que se contrae al congelarse. ....	105
Figura N° 4.10 Valores de Estequiometria seleccionadas con presión de salida del aire a 100 KPa.....	110
Figura N° 4.11 Tres células tipo PEMFC, pila con placas bipolares con reactivo separado y canales de aire de refrigeración.....	114
Figura N° 4.12 Ejemplo de una pila refrigerada por aire, fabricado por células Horizon Fuel.....	115

Figura N° 4.13 Diagrama que muestra la construcción de la placa bipolar de espuma de metal. ....	117
Figura N° 4.14 Los patrones de flujo de campo utilizados en PEMFC placas bipolares. ....	118
Figura N° 4.15 PEMFC estructura demostrada por Energía Inteligente. ....	119
Figura N° 4.16 Placas bipolares con mismo siseño pero diferentes recubrientos.....	119
Figura N° 4.17 Representación esquemática de un sistema simple de PEMFC, como se emplea en los módulos de células de combustible Hydrogenics. ....	120
Figura N° 4.18 Pila de combustible tipo PEMFC, ensamblado.....	124
Figura N° 4.19 Productos Horizon Fuel Cell .....	125
Figura N° 4.20 Cargador de teléfono móvil de energía inteligente (la UPP). ....	126
Figura N° 4.21 Micro pila de combustible desarrollado por IMTEK. ....	127
Figura N° 4.22 Hydrogenics, montado en bastidor, módulo de 'HYPM', cubiertas retiradas para mostrar la pila y artículos de balanza de planta. ....	128
Figura N° 4.23 Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid bus con sus Tanques de hidrógeno.....	129
Figura N° 4.24 Sistema inteligente de energía de 100 kW de células de combustible para vehículos: (a) pila refrigerada por agua y (b) Sistema de envasado. ....	130
Figura N° 4.25 Pila de Combustible del Toyota Mirai.....	131
Figura N° 4.26 Medelado de una célula de combustible del Toyota Mirai.....	131
Figura N° 4.27 Compresor de aire del Toyota Mirai. ....	132
Figura N° 4.28 Bomba de circulación de hidrógeno del Toyota Mirai.....	133
Figura N° 4.29 Motor eléctrico Toyota Mirai. ....	133
Figura N° 4.30 Unidad de control de potencia del Toyota Mirai. ....	134
Figura N° 4.31 Tanques de hidrógeno de alta presión del Toyota Mirai. ....	135
Figura N° 4.32 Sistema de refrigeración del Toyota Mirai. ....	137
Figura N° 4.33 Convertidor FC Boost del Toyota Mirai.....	138
Figura N° 4.34 Batería (hidruro de níquel-metal) del Toyota Mirai.....	138
Figura N° 4.35 El sistema de funcionamiento en general del Toyota Mirai. ....	139
Figura N° 4.36 Varios tipos de unidades de pila de combustible ENE-FARM para uso residencial. ....	140
Figura N° 4.37 Sistema de cogeneración simple.....	142
Figura N° 4.38 Sistema de cogeneración con una Pila de combustible FC. ....	142
Figura N° 4.39 Celda de combustible PEM, junto con un sistema de refrigeración por absorción.....	143
Figura N° 4.40 Comparación de los estados de temperatura en el sistema híbrido SOFC para las condiciones inicial y final. ....	146
Figura N° 4.41 Disposición interna del sistema híbrido 250 kWe SOFC-MGT. ....	147
Figura N° 4.42 Módulo del primer Convion C50 SOFC iniciado en Turín.....	147
Figura N° 4.43 Desarrollo de huecos en una prueba de resistencia a la tracción de una muestra de acero tubería de hidrógeno-cargada, JIS-SGP (0,078% C).....	151
Figura N° 4.44 Detector de gas de hidrógeno instalado en un laboratorio. ....	151
Figura N° 4.45 Componentes del modulo de laboratorio LUCAS-NÜLLE LabSoft. ....	155
Figura N° 4.46 Panel de pruebas y datos del módulo LUCAS-NÜLLE LabSoft. ....	156
Figura N° 4.47 Dimenciones de una célula de combustible del modulo FC.....	156
Figura N° 4.48 Pruebas de medición de las FCs con cargas específicas. ....	159
Figura N° 4.49 Modulo Pila de combustible LUCAS-NÜLLE LabSoft UniTrain .....	160

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1.1 Niveles de PM 2,5 en Lima y Callao; Fuente de la OMS.....	16
Gráfico N° 2.1 Países distribuidores y fabricantes de las pilas de combustible, en orden descendente. ....	41
Gráfico N° 2.2 Las 10 mejores concesionarias de US del 2014.....	42
Gráfico N° 2.3 Porcentajes de distribución de las pilas de combustible según el tipo..	42
Gráfico N° 4.1 La producción de vehículos y los órdenes en el mundo 1900-2012.....	66
Gráfico N° 4.2 Precio de petróleo por barril en USD. ....	69
Gráfico N° 4.3 Predicción del comportamiento de los combustibles y desarrollo de las energías alternativas. ....	72
Gráfico N° 4.4 Eficiencia máxima (HHV) de la celda de combustible de hidrógeno a presión estándar. A modo de comparación, el límite de Carnot se muestra para una temperatura de escape de 50 ° C.....	80
Gráfico N° 4.5 Voltaje versus rendimiento de densidad de corriente de una pila de combustible típica que funciona a baja temperatura y presión de aire. ....	85
Gráfico N° 4.6 Voltaje frente al rendimiento de densidad de corriente de una pila de combustible típica que funciona a aproximadamente 800 ° C y el aire a presión. ....	85
Gráfico N° 4.7 Tafel parcelas para reacciones electroquímicas lentas y rápidas.....	87
Gráfico N° 4.8 Voltaje de la célula frente a la densidad de corriente, considerando las pérdidas debidas sólo a la sobretensión de activación en un electrodo, para la densidad de corriente de canje y/o valores de 0,01; 1,0 y 100 mA cm <sup>-2</sup> .....	88
Gráfico N° 4.9 Voltaje de célula de combustible modelado utilizando sólo las pérdidas por cruce de combustible y pérdida por corriente interna.....	92
Gráfico N° 4.10 Comportamiento de la tensión y la densidad de corriente en condiciones de funcionamiento de bajas temperaturas PEMFC con Pérdidas.....	96
Gráfico N° 4.11 Comportamiento de la tensión y la densidad de corriente en condiciones de funcionamiento a altas temperaturas para una SOFC con Pérdidas..	97
Gráfico N° 4.12 Comportamiento gráfico de la presión de vapor saturado. ....	106
Gráfico N° 4.13 Gráfica de la humedad relativa frente a la temperatura para el aire de salida de una PEMFC con una estequiometría de aire de 2 y 4. El aire de entrada se supone que es seco, y la presión total es de 100 kPa. ....	110
Gráfico N° 4.14 diagrama de funcionamiento de Humidificación interna del Toyota Mirai. ....	136
Gráfico N° 4.15 Costo total de las Pilas de combustible según a la tasa de producción. ....	148
Gráfico N° 4.16 Comparación de utilización de energía en 100 Km.....	149
Gráfico N° 4.17 Desglose de utilización de energía de un motor convencional. ....	149
Gráfico N° 4.18 Desglose de utilización de energía de una Pila de combustible. ....	150
Gráfico N° 4.19 Perspectiva de Generación, almacenamiento, distribución y utilización del Hidrógeno y las Pilas de Combustible.....	153
Gráfico N° 4.20 Comportamiento de la tensión vs tiempo prueba 01.....	157
Gráfico N° 4.21 Comportamiento de la tensión vs tiempo prueba 02.....	158

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1 Presiones comunes de almacenaje del H <sub>2</sub> a alta presión. ....	29
Tabla N° 2.2 Aleaciones en depósitos de absorción de hidrógeno.....	30
Tabla N° 2.3 Datos técnicos de las baterías convencionales. ....	31
Tabla N° 2.4 Factores de compresibilidad a diferentes presiones.....	36
Tabla N° 2.5 Características y propiedades del Hidrógeno.....	37
Tabla N° 2.6 Tabla de densidades de energía de los combustibles mas importantes	39
Tabla N° 2.7 Punto de Inflamación de los combustibles mas resaltantes .....	39
Tabla N° 2.8 Temperatura de autoencendido de combustibles mas importantes. ....	39
Tabla N° 2.9 Número de Octano de los combustibles más importantes.....	40
<i>Tabla N° 2.10 Los materiales típicos usados en las pilas de combustible.....</i>	<i>58</i>
Tabla N° 3.1 Técnicas o procedimiento para recolectar información. ....	62
Tabla N° 4.1 $\Delta gf$ para la reacción $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$ a varias temperaturas.....	76
Tabla N° 4.2 Máximo voltaje de circuito abierto y límite de eficiencia termodinámica (HHV) para celdas de combustible de hidrógeno. ....	80
Tabla N° 4.3 Valores de $i_0$ para el electrodo de hidrógeno para varios metales en un electrolito ácido.....	89
Tabla N° 4.4 PEMFC tensiones a bajas densidades de corriente. ....	91
Tabla N° 4.5 Valores de ejemplo para los parámetros de la ecuación de sinergia de pérdidas para PEMFC y SOFC.....	96
Tabla N° 4.6 Presión de vapor saturado de agua a temperaturas seleccionadas.....	106
Tabla N° 4.7 Principales especificaciones de la pila Mirai FC .....	130
Tabla N° 4.8 Estructura de tres capas de los tanques de alta presión del Toyota Mirai. ....	135
Tabla N° 4.9 Comparación de tipos seleccionados de células de combustible por tipo. ....	141
Tabla N° 4.10 Tecnologías de generación de energía eléctrica de pequeña y mediana capacidad ,típicos.....	146
Tabla N° 4.11 Tensión nominal vs. Tensión medida en laboratorio.....	156
Tabla N° 4.12 Medición de tensión y corriente cuando las PEMFCs tienen diferentes Cargas, P 01. ....	159
Tabla N° 4.13 Medición de tensión y corriente cuando las PEMFCs tienen diferentes Cargas, P 02. ....	159

**ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo N° 1 Las aplicaciones que emplean almacenamiento de hidrógeno.....	167
Anexo N° 2 Valores de conversión del combustible con respecto al hidrógeno.....	168
Anexo N° 3 Datos Técnicos del electrolizador de Seimens - Silyzer 200.....	168
Anexo N° 4 Lista Global de Industrias manufactureras de las Pilas de combustible..	169
Anexo N° 5 Gráfico corriente vs. tensión en el software del módulo LUCAS-NÜLLE LabSoft.....	172
Anexo N° 6 Configuración convencional de una pila de combustible en un automóvil .....	172



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- A** : Constante conocido como la pendiente de Tafel.
- $\Delta\bar{g}_f$  : Energía libre de Gibbs.
- EW** : Peso equivalente de la membrana.
- $\Phi$  : Humedad relativa.
- HHV** : Mas Alto Valor de calentamiento.
- h** : Entalpia.
- I** : Densidad de corriente.
- $i_o$  : Densidad de corriente de intercambio.
- $\Lambda$**  : Estequiometria.
- LHV** : Valor de Calentamiento Inferior.
- $m_a$  : Masa del aire seco.
- $m_w$  : Masa del agua presente en la mezcla.
- $\eta$  : Eficiencia.
- P** : Presión parcial.
- P°** : Presión estándar.
- R** : la constante de los gases.
- $\mu_f$  : Coeficiente de utilización del combustible.
- $\omega$  : Humedad absoluta.
- s** : Entropía.
- SATP** : Temperatura ambiente y presión estándar.
- STP** : Temperatura y presión estándar.
- Vr** : Voltaje reversible.
- $Vr^\circ$  : Tensión reversible en condiciones estándar



## RESUMEN

En la presente investigación, se describe el comportamiento básico de las pilas de combustible, su funcionamiento teórico y real, analizando las pérdidas que padece al realizarse el proceso electroquímico y los diferentes tipos de celdas que existen según a su aplicación, ya que en el siglo XXI han tomado un posicionamiento imperante e importante, dentro del mercado de las energías limpias; tecnología que no consume combustibles fósiles, sino que trata de velar por una mejora en la calidad ambiental, una optimización de recursos renovables, optimización en la eficiencia de las tecnologías existentes, donde el combustible hegemónico viene a ser el hidrógeno ante los demás combustibles tales como el metanol, etanol, gas natural entre otros que también tienen potencial. La principal virtud del uso de la pila de combustible alimentado con el hidrógeno y oxígeno, es la cero emisión de contaminantes de efecto invernadero, que es el tema de preocupación mundial, y que los productos de la reacción electroquímica del proceso son electricidad directa, calor y agua, es por esto que las aplicaciones que tiene, están aumentando considerablemente, ya que varias industrias están desarrollando, investigando y fabricándolas para diferentes áreas, una de las más importantes es en el área automotriz donde destaca las pilas de tipo PEMFC, por su funcionamiento a temperatura ambiente o estándar y su practicidad, que intenta desplazar a los autos de combustión interna, para que haya un cambio de paradigma tecnológico convencional por uno tecnoambiental. Y no solo en esa área, sino que también en los sistemas de generación y cogeneración eléctrica, aplicaciones industriales, usos en sistemas pequeños o portátiles, medianos y grandes; ya que mientras más aplicaciones tenga, será más rentable y económico su producción, distribución y utilización.

**Palabras Clave:** Pila de combustible, pérdidas, eficiencia, autos FCV, mejora ambiental.

## ABSTRACT

In the present investigation, the basic behavior of a fuel cell is described, its theoretical and real functioning, analyzing the losses suffered by the electrochemical process and the different types of cells that exist according to its application, since in the century XXI have taken a prevailing and important position in the clean energy market; technology that does not consume fossil fuels, but tries to ensure an improvement in environmental quality, an optimization of renewable resources, optimization in the efficiency of existing technologies, where the hegemonic fuel becomes hydrogen compared to other fuels such as methanol, ethanol, natural gas among others that also have potential. The main virtue of the use of the fuel cell powered by hydrogen and oxygen, is the zero emission of greenhouse gases, which is the subject of global concern, and that the products of the electrochemical reaction of the process is direct electricity, heat and water, this is why the applications it has are increasing considerably, since several industries are developing, researching and manufacturing them for different areas, one of the most important is in the automotive area where PEMFC-type batteries stand out, for their operation at room temperature or standard and its practicality, which tries to displace internal combustion cars, so that there is a change of conventional technological paradigm for a techno-environmental one. And not only in this area, but also in electric cogeneration and generation systems, industrial applications, applications in small or portable systems, medium and large; since the more applications you have, the production, distribution and use will be more profitable and economical.

**Key Words:** Fuel cell, losses, efficiency, FCV cars, environmental improvement.

## CAPÍTULO I

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En el campo de las energías renovables, energías verdes o energías limpias, se tiene una variedad de tecnologías, que hasta por lo pronto, aún siguen teniendo un costo más elevado que las tecnologías convencionales, esto desalienta un poco a poder adoptar estas tecnologías. Empero, la ciencia y los investigadores están trabajando arduamente para que estas tecnologías limpias puedan ser más accesibles ya que, la contaminación ambiental está provocando efectos contraproducentes más notables cada año, lo que se pronostica que en el porvenir, las cuestiones económicas ya no serán imperantes. Si no se toma decisiones radicales en el futuro, lo más importante será intentar aferrarse al uso de tecnologías limpias para poder existir como humanidad.

Lo que se debe hacer es, empezar desde hoy un cambio de paradigma, lo que se habla en el capítulo 4.1. Los problemas no solo son ambientales, sino también de salud sociales, donde el hollín ha pasado a ser parte del aire, la inundación de carros de combustión interna que cada día beneficia al calentamiento global, donde se tiene procesos indirectos de producción de energía eléctrica, pudiendo tener energía eléctrica directamente de una Pila de combustible a través de su proceso electroquímico, y para poder empezar a ver este tema, tendremos que entender su funcionamiento básico que se habla en el capítulo 4.2. Donde se modela las reacciones que desarrollan el hidrógeno y el oxígeno, y los productos de esta reacción son electricidad, calor y agua, i.e. ausencia de CO<sub>2</sub>, CO, entre otros elementos contaminantes.

Es importante empezar de una vez la transición tecnológica, el cambio de paradigma. El movimiento del crudo es hegemónico hasta el día de hoy, influye demasiado en las economías de los países. Según los reportes internacionales, el petróleo y sus derivados tendrán un alza desproporcional en los postreros años, lo que desestabilizará las economías internacionales, es por esto que las energías alternativas deben tomar mayor mercado en todos los países, así también las pilas de combustible, los autos de hidrógeno, los autos eléctricos, y los autos híbridos.

**Cap I:** Se habla del planteamiento del problema, la descripción de ésta, la justificación y los objetivos que se quiere llegar con la presente investigación.

**Cap II:** Se describe los antecedentes que preceden a la investigación, el marco teórico, los diferentes tipos de pila de combustible y vira las hipótesis que toma la investigación.

**Cap III:** Se presenta la metodología de investigación, tipo, diseño, población y técnicas de tratamientos o procesos de datos.

**Cap IV:** El análisis e interpretación de resultados, se muestra la realización de la investigación en su forma más consolidada, dirimiendo diferentes dudas que se tengan y consolida la investigación con datos ciertos que le dan credibilidad y consistencia.

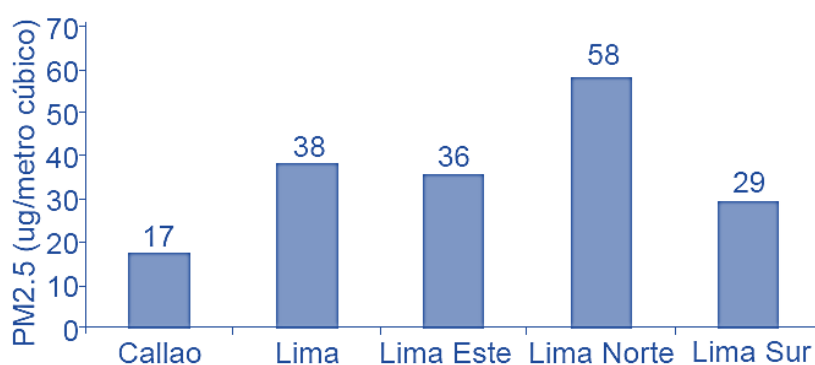
## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación ambiental viene siendo uno de los puntos más contundentes e importantes a tratar a nivel mundial, dado que en el 2015 el promedio global de CO<sub>2</sub> superaba una concentración de 400 ppm (Sasaki, Wen Li, Hayashi, Yamabe, & Ogura, 2016, p. 7), definitivamente estos datos deben haber aumentado hasta la actualidad, lo que nos lleva a poder investigar, diferentes alternativas tecnoambientales, para poder atenuar la contaminación mundial empezando desde, la contaminación local y nacional.

Describiendo la realidad nacional peruana, al ser un país poco desarrollado, presenta una contaminación considerable, sobre todo en la ciudad de Lima, pues los valores de material particulado (PM 2,5) estaban por encima de la norma tanto del Perú (20 ug/m<sup>3</sup>) como de la OMS (10 ug/m<sup>3</sup>). Esto ha salido a relucir con el informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que indica que Lima tiene la mayor contaminación del aire exterior por el PM 2,5 (materia particulada mayor de 2,5 micrones) de América Latina (38 ug/m<sup>3</sup>). El mismo reporte muestra que la zona de Lima Norte es la más contaminada de Lima (Gonzales, 2014). Por otro lado los demás departamentos del país no están exentos de esta realidad.

Gráfico N° 1.1 Niveles de PM 2,5 en Lima y Callao; Fuente de la OMS.



Fuente: (Gonzales, 2014)

Una de las realidades del departamento de Puno, es que siguen usando la quema de materia prima, tales como la leña, bosta entre otros, para su cocina, calefacción u otros usos, pese a los programas locales de implementación de cocinas mejoradas, esto aún sigue ocasionando una contaminación latente en cada hogar. Además, entre las personas que usan combustible de biomasa en la cocina, como leña, bosta, o champa, que representa aproximadamente 10 millones de personas, estimamos que la exposición

a PM 2,5 dentro de las casas (promedio 100 ug/m<sup>3</sup>) resulta en aproximadamente 3000 muertes anuales prematuras entre adultos, sin contar otro número no conocido de muertes entre niños por enfermedades respiratorias, principalmente neumonía (Gonzales, 2014).

Y no solo es eso sino que también se estima los datos existentes de una elevación de temperatura de 0,2 °C por década en el Perú. Se ha resaltado que en las últimas tres décadas han ocurrido dos mega fenómenos del niño y se está estudiando su posible asociación con el cambio climático (Gonzales, 2014, p. 399). Que no solo se percibe estos cambios abruptos en el Perú, sino que también la influencia es en todo el mundo, lo que lleva a muchos científicos a poder estudiar estos fenómenos que son en sí, predecibles por culpa de la contaminación ambiental.

Es aún más preocupante saber que el Perú a diferencia de Chile, Brasil y Colombia, no tiene políticas y repositorios abiertos que permitan obtener datos históricos en tiempo real de contaminantes ambientales en diversas ciudades. Ya que solo hay una sola entidad que cuenta con esos datos y es el Senamhi, pero es de limitado acceso; la única fuente de información con datos abiertos históricos sobre calidad del aire es la de la Embajada de Estados Unidos en Perú. Donde El total de registros incluidos de PM 2.5 desde el 29 de febrero (fecha de inicio de las mediciones) hasta el 31 de diciembre de 2016 fue de 7286 mediciones, con un valor promedio de 38.1 µg/m<sup>3</sup> (rango: 10-170) (A. Hernández & Díaz, 2017, p. 507).

Junio tuvo el mayor valor promedio de PM 2.5 con 55.2 µg/m<sup>3</sup> (rango: 18-149). Asimismo, la mayor concentración promedio se registró a las 11 horas (47.5 µg/m<sup>3</sup>). Finalmente, un total de 5833 registros horarios estaba por encima del límite promedio de riesgo diario de 25 µg/m<sup>3</sup> (A. Hernández & Díaz, 2017). Uno se preguntaría, ¿cuáles son las causas de contaminación en el Perú, si hay pocas industrias?; la realidad que poco a poco está cambiando; es que, en todas las ciudades se usan carros antiguos, de segunda mano, de tercera mano, entre otros, y las pocas industrias artesanales o industrias que existen, pues no cumplen los estándares de calidad ambiental, al no tener un monitoreo o fiscalización ambiental más estrictos.

Esta realidad, pone en muestra la existente contaminación ambiental que existe en nuestro país, y en todos los países, que está despertando a una reacción más violenta y en cadena a fenómenos destructivos mundiales. Los productos de combustión interna de combustibles fósiles, deben ser remplazados por combustibles más limpios y renovables, como por ejemplo el hidrógeno y la aplicación de las pilas de combustible y su diversidad de usos.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El lenguaje común en preocupación mundial viene a ser la contaminación ambiental que se está viviendo en la actualidad, cuyo principal elemento de fatiga ambiental viene a ser la quema de combustibles fósiles en sus diversas aplicaciones; la demanda del crudo del 2017 en el país fue de 175 MBPD que aumentó un 29% con respecto al 2016; empero, de toda la demanda interna el 77% del crudo fue de origen de importaciones para su abastecimiento interno (Osinergmin, 2016, 2017).

Cabe señalar también que el costo del crudo ha tenido un comportamiento progresivo de aumento en los últimos años, según los importantes informes y reportes mundiales señalan y pronostican, un aumento del precio del Crudo por varios motivos; empezando desde la demanda, continuando que para la explotación están aumentando recursos de tecnología y ello implica un aumento de presupuesto y bien sabemos que tenemos reservas mundiales la cual la más importante es de EEUU (Anual Energy Outlook, 2018; Energy Information Administration, 2017; Worl Energy Resources, 2016).

Los combustibles fósiles al ser de tipo no renovables, sino limitados, es una preocupación en todos los ámbitos tanto económicos, ambientales, sociales que es el interés de esta investigación el poder amortiguar ciertos efectos contraproducentes del futuro, con las posibles aplicaciones tecnológicas de la Pila de combustible, que va desde el transporte que es una de las demandas base de combustible, en los Autos; hasta calefacción doméstica, aplicaciones industriales eléctricas, tecnológicas móviles, etc.

Considerando que el Perú ocupó el puesto número 72 de 132 países en el ranquin del The Global Competitiveness Report, del World Economic Forum (Schwab, 2018), revisando el reporte, se encontró que los puntos más débiles del país es en la innovación, que está en el puesto 113 y en cuanto a la disposición tecnológica, estamos en el puesto 86, quiere decir que falta demasiado trabajo en desarrollar tecnología y ponerla en disposición de la sociedad, falta innovar, falta inversiones sólidas para las investigaciones científicas, falta centros de investigación en diferentes ramas que como ejemplo es Japón, Alemania y Estados Unidos. Nos falta un compromiso serio como país y como egresados de universidades, en buscar el desarrollo tecnológico, económico, ambiental y social.

Otros detalles más técnicos se encuentran en el capítulo IV, donde se habla de los paradigmas convencionales y las razones de desestabilidad para un cambio de paradigma tecnológico.

## 1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.4.1. Objetivo general

Explicar y describir el comportamiento de las pilas de combustible, su funcionamiento, las pérdidas que tiene en el proceso, y sus aplicaciones; en particular, su uso en el área automotriz, puesto que los productos de reacción electroquímica son electricidad, calor y agua, es decir no produce gases de efecto invernadero, para dar un sustento de cambio de paradigma tecnológico, analizando sus principales virtudes para consolidar la adopción de estas tecnologías limpias.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Describir el funcionamiento básico de una pila de combustible, analizando sus pérdidas, comportamiento y describir los diferentes tipos de pilas de combustible.
- Ampliar las perspectivas de la aplicación de las Pilas de combustible en los rubros tales como, la automotriz, industrial, generación eléctrica, aplicaciones portátiles.
- Proporcionar información, criterios y avances tecnológicos para influenciar a las posteriores investigaciones, a que puedan consolidar las diferentes alternativas de la aplicación del hidrógeno en las pilas de combustible.
- Mostrar datos experimentales de funcionamiento básico de una pila de combustible en la ciudad de Puno.



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Una de las primeras investigaciones sobre la aplicación del hidrógeno como combustible para su aplicación en los motores de ciclo otto en nuestra región, fue desarrollada por (Montagne, 2016), que propone una adaptación o modificación al motor de ciclo otto para que en vez de que se le inyecte un combustible convencional sea remplazado por el hidrógeno, el cual sería producido mediante electrolisis y adaptado para que sea inyectado directamente al motor; pero tenemos en otra investigación que al no tener dichas características de diseño el motor de ciclo otto y al ser adaptado por el funcionamiento con hidrógeno, ocurre un efecto desfavorable llamado fragilización por hidrógeno y lo describe el investigador así: "... la presencia del hidrógeno en los aceros no es deseada ya que altera considerablemente las propiedades mecánico-metalúrgicas de estos materiales y puede llevarlos a la fractura" (Uribe, Velosa, & Zabala, 2011); empero, ya es una idea local que contribuye a la proyección de uso como combustible al hidrógeno.

"Los vehículos impulsados por hidrógeno pueden cumplir con la demanda creciente de bajas o cero emisiones" (Gámez, 2010, p. 80). Para el dimensionamiento y modelamiento de un vehículo eléctrico propulsado por Pilas de combustible, se considera en alta importancia los modelamientos matemáticos para los elementos característicos de los autos eléctricos, que vendrían a ser el Tren de potencia, modelo de batería, almacenaje del hidrógeno en una tanque (350 bar) modelos de celda de combustible, modelo del control del motor y el sistema de control del vehículo (Correa, Mathé, Moschen, & Muñoz, 2014), teniendo en consideración que la obtención de hidrógeno, fue mediante el método de electrolisis; y que el motor fue de tipo brushless, elegido para la impulsión del vehículo que tiene la capacidad de funcionar como freno regenerativo absorbiendo energía mecánica y transformándola en energía eléctrica para almacenar en las baterías (p. 60), comprobándose que la aplicación de hidrógeno en una pila de combustible tiene un efecto de eficiencia mayor que la de la nafta, y que es viable, económico y una buena solución a las problemáticas de la contaminación ambiental.

Uno de los inconvenientes clave para el desarrollo de estas tecnologías, viene a ser la Producción del hidrógeno en masa, pero importantes industrias vienen trabajando para solucionar estas vicisitudes; por ejemplo, la empresa Siemens, en una de sus



revistas presentó su último producto, que una de sus particularidades importantes es que su alimentación de energía puede ser mediante energía solar o eólica y nos refiere: “La Siemens SILYZER toma el principio conocido de la electrólisis un paso más allá con la membrana de intercambio de protones (PEM)”. Permeable a los protones, la membrana actúa como separador, entre otras cosas, por lo que es posible eliminar el uso de potasa cáustica. El reemplazo de electrolitos es, pues, el agua pura una verdadera ventaja medioambiental cuando se trata de operaciones” (Siemens, 2017).

“Un sistema de pila de combustible en combinación con una pequeña batería híbrida para apoyar la aceleración del vehículo y para recuperar la energía de frenado tiene una alta eficiencia de este modo un menor consumo de energía” (Töpler & Lehmann, 2016, p. 64), cuando hablamos de tiempos de recarga en la actualidad mundial la recarga de hidrógeno toma un tiempo de 3 minutos con diferencia de una batería que demoraría más de lo mencionado que es en el caso de los autos eléctricos EV, esto también representaría una ventaja en comparación con respecto a los combustibles convencionales.

Señalando también que el mantenimiento sería menor con referencia a los autos convencionales, en cuanto a los requisitos legales se menciona en referencia a interfaz de repostaje SAE J2601, EC79 norma presión europea / 2009 e ISO 26262 para la seguridad funcional. Ejemplos de autos y algunos detalles tenemos: Toyota Miray FCV, BMW i8 Mercedes-Benz B-Class, Mercedes-Benz Sprinter F-CELL (HYSYS) (H<sub>2</sub>-tanque sistema: 700bar, potencia de la batería (1,9kWh) Rango 300 Km Potencia del motor 70 Kw), Mercedes-Benz Citaro Fuel Cell-Hybrid (bus estándar 10 -15 KgH/100 Km). Otro dato importante también sería que el sistema de pila de combustible es controlado por una denominada unidad de control de células de combustible (FCU) en el que se implementan todos los algoritmos (Asensio, 2012).

## **2.2. SUSTENTO TEÓRICO**

### **2.2.1. VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (FCV), Y VEHÍCULOS HÍBRIDOS**

También conocidos como los autos de emisión cero; los vehículos de pila de combustible, en el siglo XXI tienen y tienden a imperar de manera más consolidada, mostrando su hegemonía ante los autos convencionales, que desarrollan diferentes países como, por ejemplo Japón. En la siguiente figura N°1 vemos una inauguración desarrollada por investigadores de la universidad Kyushu University, con un modelo de auto de pila de combustible Mirai.

*Figura N° 2.1 Ceremonia de inauguración del FCV MIRAI el 25 de marzo del 2015, frente a la estación de hidrógeno en la Universidad de Kyushu.*



Fuente: (Sasaki et al., 2016)

Los vehículos propulsados por un motor eléctrico, alimentado por una Pila de combustible son cero emisión, cuando hablamos de que el combustible sea hidrógeno puro, cuyo beneficio es mucho mayor hablando ambientalmente, dado que después del proceso químico desarrollado por una pila de combustible, su desecho viene a ser agua, es por ello que muchas industrias automotrices vienen trabajando esa tecnología de una manera más consolidada como por ejemplo: BMW, Daihatsu, DaimlerChrysler, Fiat, Ford, General Motors, Honda, Hyundai, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Peugeot Citroën, Renault, Suzuki, Toyota y Volkswagen (Solomon & Banerjee, 2006).

Cuando Ballard Power Systems (BPS), una empresa canadiense, presentó su primera PEMFC a finales de 1980, se hizo evidente que este tipo de pila de combustible era muy adecuado para su aplicación en los vehículos eléctricos. La alta densidad de potencia de las pilas PEMFC, junto con la virtud de cero emisiones cuando está alimentado por hidrógeno, provocó que las empresas como DaimlerChrysler y Shell compraran acciones de BPS en 1994. Las nuevas empresas se crearon por Daimler para desarrollar las pilas y trenes motrices para vehículos. Daimler construyó su primer vehículo, el NECAR ('nuevo coche eléctrico'), en 1994 y pasó los siguientes 20 años en la mejora de la tecnología de células de combustible a través de la optimización tanto de la pila y los componentes de transmisión. Los desarrollos posteriores llevaron a la Mercedes Clase B F-CELL, que, en 2009, fue el primer coche de pila de combustible en la producción en serie (Dicks & Rand, 2018).

En agosto de 1993, un autobús Ballard con 21 asientos, llevó a sus primeros pasajeros públicos en los Juegos de la Commonwealth en Vancouver. Este vehículo

contenía sólo una pequeña batería de arranque de plomo-ácido como Ballard quería demostrar que la pila de combustible podría proporcionar la fuerza motriz por sí mismo. Diecisiete años más tarde, en 2010, tenía suficiente confianza en la tecnología para ordenar veinte modelos 12-M, de piso bajo; autobuses de pila de combustible que llevarían a los participantes entre Vancouver y Whistler para los Juegos Olímpicos de Invierno. Estas pilas destacaron por su potencia de 130 kW con hidrógeno almacenado en un tanque a una presión de 36 MPa. Hibridado con una batería de níquel-metal-hidruro, los autobuses tenían una gama de unos 500 kilómetros de autonomía (Dicks & Rand, 2018).

*Figura N° 2.2 Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid bus.*



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Un diseño de 75 kW fue el estándar para la mayoría de los primeros coches de pila de combustible de Daimler. A medida que la confianza en la tecnología creció, las compañías automotrices han desarrollado su propia tecnología de pila. Los ejemplos incluyen los construidos por General Motors, Honda, Hyundai, Nissan, PSA Peugeot Citroen, Toyota y Volkswagen (Dicks & Rand, 2018).

## **TOYOTA**

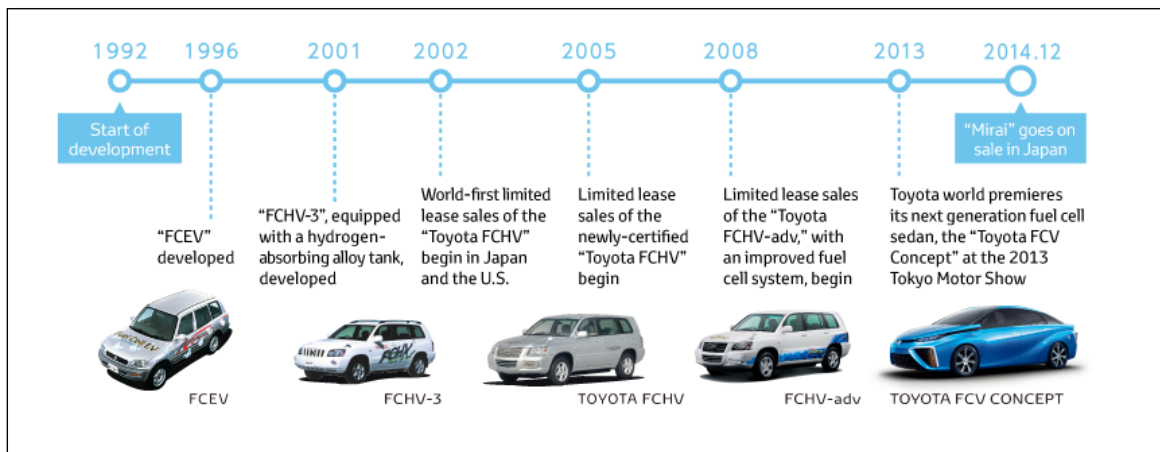
En anticipación de la diversificación de los recursos energéticos primarios tales como petróleo, gas natural, carbón, electricidad, y los recursos renovables, Toyota lanzó el vehículo híbrido Prius en 1997 y también ha hecho vehículo eléctrico (EV) y el plug-in de vehículos híbridos (PHV) versiones disponibles para mejorar la eficiencia del consumo de combustible y reducir las emisiones de gases de escape en comparación con los vehículos con motor de combustión convencionales. Por otra parte, Toyota ha desarrollado un vehículo pila de combustible (FCV) y se refiere a una sociedad sostenible como futuro escenario energético. En tal escenario, el suministro de energía

se basa no sólo en los combustibles fósiles, sino también en recursos renovables con el medio ambiente. La electricidad y el hidrógeno se utilizan como portadores de energía en una infraestructura común en el idealizada sociedad sostenible (Yoshida & Kojima, 2015).

Toyota comenzó en 1992, con el vehículo Fuel Cell Hybrid (FCHV), que fue alquilado por primera vez en 2002. Tres grandes cuestiones técnicas se trataron durante varios años: el rango de autonomía se incrementó a más de 500 km, arranque en frío se habilita desde -30 ° C, y los tiempos de recarga de combustible se redujeron a alrededor de 3 minutos (Yoshida & Kojima, 2015).

Toyota hizo uso de las experiencias del FCHV-adv y el bus FC de los clientes para ayudar a guiar el diseño del MIRAI FCV. Mirai conserva excelentes cualidades de FCHV-adv por ejemplo, cero emisiones, arranque en frío, y el tiempo de recarga corto, con mejoras adicionales hacia un funcionamiento silencioso y una mejor aceleración. También se añade una función de la fuente de alimentación en caso de emergencia. Actualmente, superar el obstáculo del costo, para proporcionar a los FCV una realidad comercial que es de suma importancia (Yoshida & Kojima, 2015).

Figura N° 2.3 Evolución de los Automóviles, Toyota hacia el uso de Fuel Cell.



Fuente: [https://www.toyotaglobal.com/innovation/environmental\\_technology\\_file/fuel\\_cell\\_hybrid.html#h301](https://www.toyotaglobal.com/innovation/environmental_technology/technology_file/fuel_cell_hybrid.html#h301)

Toyota ha anunciado el uso libre de derechos de aproximadamente 5680 patentes relacionadas con la pila de combustible hasta el final de 2020, incluidas las tecnologías críticas desarrolladas para el nuevo Toyota MIRAI. Bob Carter, vicepresidente de operaciones automotrices de Toyota Motor Sales, Inc. EE.UU., ha resumido esta iniciativa, "Los vehículos de pila de combustible de hidrógeno de primera generación, lanzada entre 2015 y 2020, será fundamental, lo que requiere un esfuerzo concertado y

la colaboración entre los no convencionales los fabricantes de automóviles, los reguladores del gobierno, la academia y los proveedores de energía. Mediante la eliminación de los límites corporativos tradicionales, podemos acelerar el desarrollo de nuevas tecnologías y avanzar hacia el futuro de la movilidad más rápida, eficaz y económica (Yoshida & Kojima, 2015).

Figura N° 2.4 Utilización del hidrógeno tanto para autos y usos domésticos.



Fuente: Toyota

Dentro de todos los mercados; Toyota, ha destacado por la eficiencia de sus pilas de combustible y por el sistema de tecnología que se presenta en el Toyota Mirai, el sistema híbrido del Toyota Prius con un Motor de combustión interna (gasolina), de 1.8 L, 4 cilindros, 16 válvulas Motor eléctrico, Motor generador 2 (MG2) tipo sincrónico de 13500 rpm con imanes permanentes y enfriado por aire, con un Voltaje máximo de 600V AC, una Potencia total del sistema HSD de 121 HP, con un Generador eléctrico, con imanes permanentes y enfriado por refrigerante, de un voltaje máximo de 600V AC, y una batería híbrida de Níquel-Hidruro metálico (Ni-MH) (Yoshida & Kojima, 2015).

La siguiente lista son los carros en esta categoría

- Honda — Honda FCX Clarity
- DaimlerChrysler — Mercedes-Benz Nocar 5
- Ford — Ford Focus FCV
- General Motors — Hy-wire, HydroGen3
- Honda — Honda EV Plus
- Hyundai — Hyundai Santa Fe FCEV
- Mazda — Mazda RX-83
- Nissan — Nissan X-Trail FCV
- Volkswagen



- Ferrari
- Hyundai Tucson FCEV
- Toyota Mirai - production version of the FCV concept car
- BMW 1 Series Fuel-cell hybrid electric
- BMW i8 fuel-cell prototype
- BMW 5 Series Gran Turismo fuel-cell prototype
- Z-SHINE FCV - Chang'an
- Jeep Commander II-hybrid vehicle
- Fiat Seicento Elettra H2 Fuel Cell-hybrid vehicle
- Ford Focus FCV.
- Honda FCV Concept
- Hyundai Intrado
- Kia Borrego FCEV-Fuel cell
- Mitsubishi FCV

#### Buses

- Mercedes-Benz Sprinter fuel cell van
- Ford E350 fuel cell shuttle bus
- Hyundai FC-Bus 2nd Generation

### 2.2.2. ELEMENTOS DE UN FVC Y AUTOS ELÉCTRICOS

En el interior de esta clase de vehículos, mediante una la pila de combustible polimérica, el hidrógeno ( $H_2$ ) es transformado en electricidad y agua ( $H_2O$ ), tras al reaccionar con el oxidante ( $O_2$ ). Esta electricidad generada, es la encargada de hacer funcionar a una serie de motores eléctricos, es decir, funciona al igual que un automóvil con motor eléctrico, con la diferencia de que éstos no requieren su recarga de energía, a través de una conexión a la red eléctrica (Arauzo, 2016).

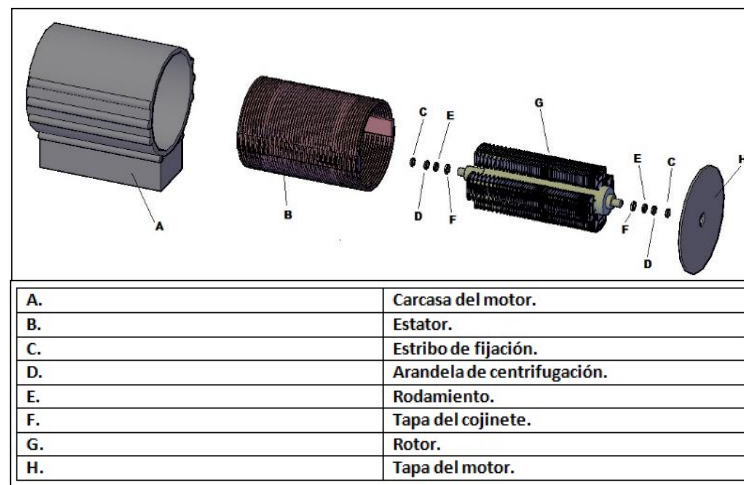
Al emplear un motor de estas características, se logra una importante ausencia de ruido y las emisiones contaminantes en su funcionamiento pueden llegar a ser nulas, dependiendo del origen del hidrógeno en el interior del vehículo (Arauzo, 2016).

#### Motores eléctricos

Se trata del único elemento mecánico de entre esta serie de componentes. Son máquinas eléctricas rotatorias, encargadas de convertir la energía eléctrica proporcionada por la pila de combustible, en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas, la cual es necesaria para desplazar al transporte. Posteriormente, se muestra una figura con los componentes fundamentales que forman un motor eléctrico de estas características (Arauzo, 2016).

El motor eléctrico, posee un menor número de piezas mecánicas que un motor de combustión interna, por lo cual son menos propensos a generar fallos, dando lugar a un tipo de motor de elevada comodidad y seguridad. Además, esta clase de motores son los de mayor agilidad, en lo que respecta a su variación de potencia, ya que pueden pasar instantáneamente desde su posición de reposo hasta su máximo funcionamiento. En cuanto a su tamaño, éste es más reducido debido a su menor cantidad de componentes, como pueden ser la no incorporación de un sistema de lubricación y refrigeración por líquido; la admisión de aire; un sistema de escape de gases; y una caja de cambios. A todas estas propiedades, se ha de añadir el nulo efecto que posee este tipo de motores frente al medio ambiente (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.5 Principales componentes que forman un motor eléctrico.



Fuente: (Arauzo, 2016)

En el interior de un vehículo de estas características, el motor eléctrico se encuentra posicionado bien sobre el eje delantero, o en algunos modelos sobre el eje posterior, con la función de conducir la energía mecánica hacia los ejes de las ruedas. Existen motores eléctricos de diversos tamaños, dependiendo del tipo de automóvil en el que trabajen (Arauzo, 2016).

#### Motor eléctrico en cada rueda.

A su vez, en los últimos años, han aparecido otra serie de motores eléctricos, los cuales son instalados en cada rueda del automóvil. De esta manera se libera una gran cantidad de espacio en el interior del transporte, reduciendo su peso y eliminando la transmisión existente entre el motor y las ruedas, proceso en el que se desprecia una importante cantidad de energía. Por lo tanto, mediante su uso, se consigue un 90% de la energía generada por dichos motores, frente al 35% que utiliza un motor convencional (Arauzo, 2016).

Otra de las ventajas de los motores eléctricos en cada rueda, es la posibilidad de configurar al vehículo con tracción delantera, con propulsión trasera o con tracción total, sin tener que alterar su diseño ni su espacio disponible. Par ello, el fabricante solo debe elegir en que ejes colocarlos y la cantidad de motores a colocar, la cual resulta entre dos y cuatro. A la hora de sincronizar el número de motores de rueda instalados, esta función es realizada mediante una unidad de control electrónica en el automóvil, la cual se encarga del control y estabilidad de todos sus componentes (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.6 Motor eléctrico de rueda.



Fuente: [www.motorafondo.net](http://www.motorafondo.net)

### Depósitos de almacenamiento de hidrógeno

Actualmente, las metodologías para su almacenamiento pueden estar basadas en métodos tales como el almacenamiento del gas a elevadas presiones; almacenamiento en forma líquida, denominado almacenamiento criogénico; almacenamiento en aleaciones metálicas; almacenamiento en estado sólido; almacenamiento en carbón, ya sea carbón activado, grafito, lechos de carbón molecular o nano-fibras entre otros; almacenamiento en forma de compuestos químicos como el tolueno ( $C_6H_5CH_3$ ) o el amoníaco ( $NH_3$ ); almacenamiento en micro-esferas de vidrio y almacenamiento en zeolitas (Arauzo, 2016).

De todas estas operaciones, actualmente solo las tres primeras presentan la suficiente fiabilidad como para estar presentes en el mercado y poder ser empleadas con suficientes garantías. A continuación se realiza una breve descripción sobre los métodos más empleados en los tanques de hidrógeno ( $H_2$ ) (Arauzo, 2016).

Su principio de funcionamiento está basado en un recipiente cilíndrico, el cual se encarga de almacenar hidrógeno ( $H_2$ ) gas a elevadas presiones, que actualmente rondan el orden de los 70MPa, por lo que en dichas condiciones el gas posee una densidad equivalente a los 40,816g/l (Arauzo, 2016).



Tabla N° 2.1 Presiones comunes de almacenaje del H2 a alta presión.

Presión en MPa.	Densidad en g/l.
70	40,816
35	24,030
20	16
1	0,900

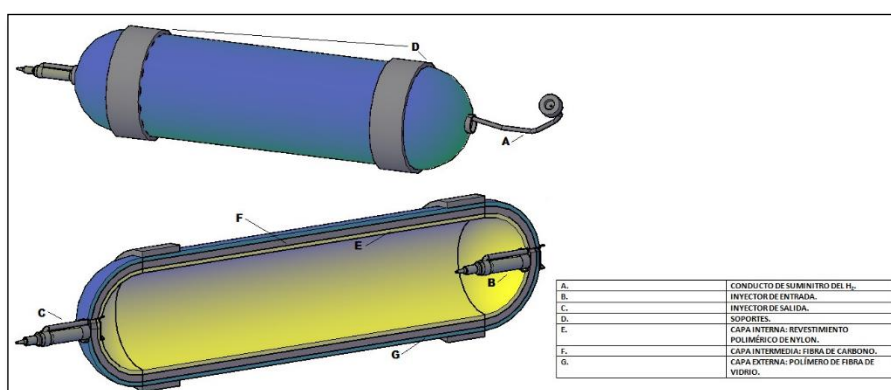
Fuente: (Arauzo, 2016)

Generalmente, estos depósitos poseen un espesor diez veces menor que su radio, por lo que se les considera depósitos de membrana y los esfuerzos asociados resultantes de su presión, son denominados como esfuerzos membranales (Arauzo, 2016).

Hasta hace pocos años, se empleaban depósitos de acero, los cuales presentaban una importante fragilidad ante las altas presiones, por lo que su peso al utilizar este tipo de material, se volvía desproporcionado. Investigaciones recientes, por parte de las diferentes compañías automovilísticas, aconsejan emplear materiales compuestos, tales como polímeros, ya que de esta forma se reduce notablemente su peso y se aumenta su resistencia ante los esfuerzos membranales, haciendo de estos un elemento de importante seguridad (Arauzo, 2016).

Por ejemplo, la compañía Toyota, con su reciente modelo de automóvil Toyota Mirai, utiliza dos depósitos formados por tres capas de diferentes materiales, con una capacidad de 60 litros cada uno. Este modelo de depósito, proporciona una autonomía alrededor de los 500km, con un tiempo de repostaje de cinco minutos, lo que da lugar a un depósito de elevada competencia en el mercado (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.7 Depósito de hidrógeno (H2) a alta presión, diseño en AutoCAD.



Fuente: (Arauzo, 2016)

**Requisitos que debe cumplir:**

1. La aleación debe ser fácilmente formada y descompuesta (Arauzo, 2016).

2. La cinética de las reacciones de absorción y desorción, ha de tener una elevada velocidad para poder satisfacer los requerimientos de carga y descarga en el sistema (Arauzo, 2016).
3. La presión de equilibrio correspondiente a la temperatura de descomposición de la aleación, debe ser en todo momento compatible con los requerimientos de seguridad del sistema (Arauzo, 2016).
4. Debe contener óptimas condiciones de operación durante el mayor número posible de ciclos, tanto de carga como de descarga (Arauzo, 2016).
5. Finalmente, debe poseer la máxima tolerancia posible a las impurezas gaseosas que aporte el hidrógeno, ya que éstas dificultan las reacciones y disminuyen la vida útil del sistema (Arauzo, 2016).

Entre este tipo de aleaciones en desarrollo, destacan fundamentalmente las cuatro nombradas en la siguiente tabla.

*Tabla N° 2.2 Aleaciones en depósitos de absorción de hidrógeno.*

1	Aleación de titanio (Ti) con manganeso (Mn) y vanadio (V).
2	Aleación de titanio (Ti) con cromo (Cr) y vanadio (V).
3	Aleación de titanio (Ti), vanadio (V), cromo (Cr) y manganeso (Mn). 4.
4	Aleaciones de titanio (Ti) y Cromo (Cr).

Fuente: (Arauzo, 2016)

Actualmente, este valor de capacidad de almacenaje puede parecer diminuto, pero las capacidades de almacenaje de estas aleaciones están entre las investigaciones más prometedoras a día de hoy para almacenar a dicho elemento. Se esperan alcanzar densidades de almacenamiento de igual valor que en los depósitos criogénicos. Sus principales inconvenientes son la elevada necesidad de refrigeración de estos depósitos mientras se carga el hidrógeno ( $H_2$ ); los esfuerzos, similares a los depósitos de alta presión, a los que se encuentran sometidos y la dificultad para liberar el hidrógeno ( $H_2$ ) a bajas temperaturas (Gámez, 2010).

### **Baterías de ion litio (Li)**

Esta primera clase de baterías eléctricas, posee como principal característica el empleo de un electrolito líquido, en el cual se encuentra contenida una sal de iones de litio (Li), ya que de esta manera se consiguen los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible, la cual tiene lugar entre los electrodos. Estos electrodos, están compuestos por un lado de grafito, para dar lugar al ánodo, mientras que en el cátodo se identifica trifilina ( $LiFePO_4$ ), óxido de cobalto u óxido de magnesio ( $MgO$ ) (Arauzo, 2016).

En su estructura, los iones de litio (Li) que se encuentran dentro del electrolito cambian del cátodo al ánodo espontáneamente, a través de dicho elemento, el cual permite su circulación, pero sin embargo no permite lo mismo con los electrones (Arauzo, 2016).

### Ventajas de las baterías de ión litio (Li)

1. Elevada densidad de energía: Acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen (160Wh/kg) (Arauzo, 2016).
2. Bajo peso: A igualdad de carga almacenada, son menos pesadas y ocupan menos volumen que otras baterías convencionales (Arauzo, 2016).
3. Alta tensión por célula: Cada celda de la batería genera 3,6 V. Este potencial es aproximadamente equivalente al total generado por tres celdas de otras baterías, tales como las de metal níquel, las cuales generan 1,2V cada una (Arauzo, 2016).
4. Carecen de efecto memoria: Fenómeno el cual reduce su capacidad frente a cargas incompletas (Arauzo, 2016).
5. Descarga lineal: Durante toda la descarga, el potencial de la batería apenas varía, lo que evita la necesidad de circuitos reguladores. Esto es una ventaja, ya que hace muy fácil saber la carga almacenada por la batería (Arauzo, 2016).
6. Baja tasa de auto-descarga: En el caso de estas baterías, su valor de auto-descarga es inferior a un 6%, en comparación con otras baterías convencionales, en un mismo periodo de tiempo, ya que este tipo, tras seis meses en reposo, pueden retener aún el 80% de su carga (Arauzo, 2016).

Tabla N° 2.3 Datos técnicos de las baterías convencionales.

Modelo de batería.	Tensión por unidad de celda (V).	Densidad energética (Wh/kg).	Ciclos de vida.
Ion litio	3.6	160	500-1500
Plomo ácido	2	40	200-300
Metal níquel	1.2	80	500-700

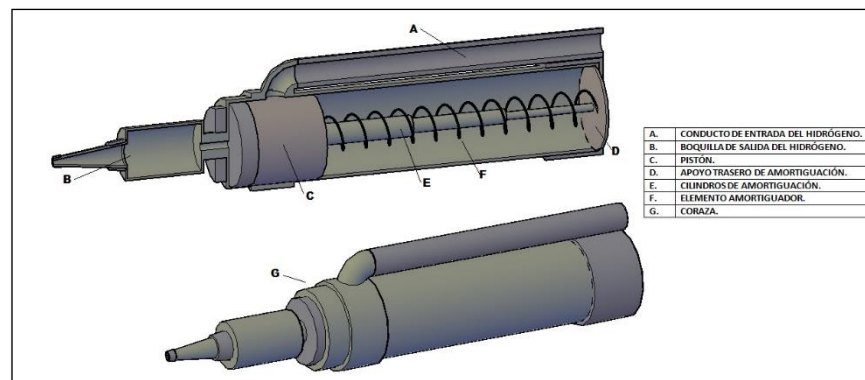
Fuente: (Arauzo, 2016)

### Unidad electrónica de control

Este elemento computacional, funciona como el cerebro del sistema, ya que es el encargado de controlar su funcionamiento. Entre su amplio campo de funciones dentro del automóvil, permite medir y controlar tanto las presiones, como las temperaturas del

hidrógeno ( $H_2$ ) contenido en el interior de los depósitos; permitir la entrada del aire ( $O_2$ ) a la pila de combustible; controlar y regular la entrada de hidrógeno ( $H_2$ ) en las celdas de combustible; regular la tensión y la corriente eléctrica generada en la pila; mantener el control sobre el motor eléctrico; regular los procesos de carga y descarga en los sistemas de almacenamiento energético; detectar los picos de demanda requeridos en el motor eléctrico, para a continuación combinar tanto la energía generada por la pila como la energía almacenada en las baterías; detectar fallos generados en el sistema para mantener la seguridad de éste; y controlar el resto de componentes del vehículo, tales como el sistema de alumbrado e intermitencia o los limpiaparabrisas, entre otros. A continuación, se muestra un ejemplo de un inyector de hidrógeno ( $H_2$ ), el cual es controlado mediante la unidad electrónica de control (Arauzo, 2016).

*Figura N° 2.8 Inyector de compresión controlado de manera electrónica para el paso del hidrógeno, los depósitos de alta presión*



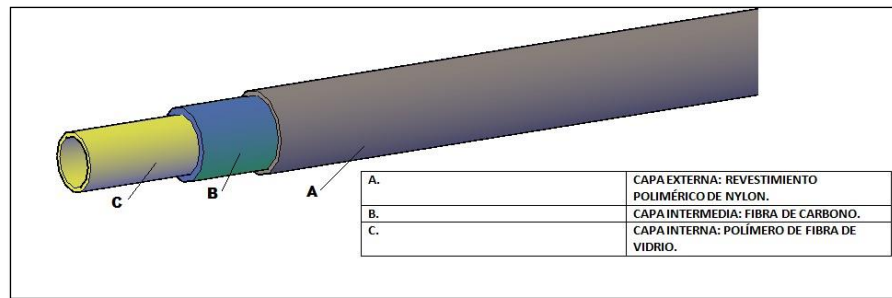
Fuente: (Arauzo, 2016)

### Sistema de conductos para gases

Este conjunto de tuberías, es el encargado de comunicar a la pila de hidrógeno ( $H_2$ ) con los depósitos del combustible y de realizar la conducción tanto de dicho gas, como del oxidante ( $O_2$ ) y de los productos generados, en este caso el agua ( $H_2O$ ) (Arauzo, 2016).

En los conductos por los cuales circula el oxígeno ( $O_2$ ) proveniente del exterior y en los que circula el agua ( $H_2O$ ) generada, se pueden emplear los materiales convencionales al igual que en los automóviles que basan su funcionamiento en combustibles convencionales, pudiendo ser polímeros o aleaciones metálicas. Sin embargo, en tubos que comunican a la pila de combustible con los depósitos de hidrógeno ( $H_2$ ), debido a la circulación de este gas, se deben emplear materiales que proporcionen una importante seguridad y así evitar las posibles fugas de este gas. Entre ellos, destaca el empleo de conductos de tres capas al igual que en los depósitos anteriormente explicados (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.9 Conducto de hidrógeno



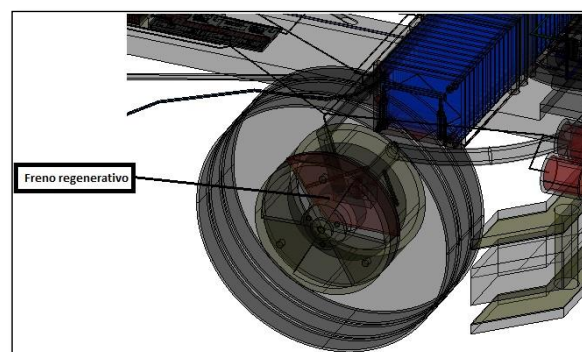
Fuente: (Arauzo, 2016)

- La capa interna, la cual se encuentra en contacto con el combustible, se trata de un revestimiento polimérico de nylon, la cual se encarga fundamentalmente de prevenir las pérdidas y fugas de gas (Arauzo, 2016).
- La capa intermedia, proporciona una elevada solidez estructural dentro del sistema, por lo cual se encuentra formada por un plástico reforzado de fibra de carbono (Arauzo, 2016).
- La capa externa, se encarga de proporcionar una resistencia ante la abrasión del depósito. Para ello, se encuentra compuesta de un polímero reforzado con fibra de vidrio (Arauzo, 2016).

### Sistema de frenado regenerativo.

Son dispositivos de fricción instalados en las ruedas, los cuales son capaces de recuperar y generar energía eléctrica tras las frenadas, desaceleraciones y aceleraciones, la cual es almacenada en las baterías. Los dispositivos regeneradores se encuentran situados junto a los frenos hidráulicos, siendo capaces de proporcionar hacia el sistema de baterías, una potencia que en algunos modelos alcanza desde los 15 a los 20kW (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.10 Sistema de frenado regenerativo mediante fricción, modelado en Auto CAD 3D



Fuente: (Arauzo, 2016)

## 2.2.3. EL HIDRÓGENO

### 2.2.3.1. HISTORIA DE HIDRÓGENO

El dihidrógeno gaseoso ( $H_2$ ) fue formalmente descrito por primera vez por T. Von Hohenheim que también se le conocía como Paracelso (1493 – 1541), que lo obtuvo artificialmente mezclando metales ácidos fuertes, pero este aun no era consciente de este nuevo elemento reconocido y hallado, hasta 1671 que Robert Boyle (1627 – 1691) redescubrió y describió la reacción que se producía entre la limadura de hierro y ácidos diluidos y que este generaba dihidrógeno gaseoso. Empero, a quien tradicionalmente se le considera como el descubridor de este elemento es a Henry Cavendish en 1766; ya que fue el primero en reconocer el hidrógeno gaseoso como una sustancia discreta, identificando el gas producido en la reacción metal – ácido, como aire inflamable, descubriendo también que su combustión generaba agua como también varias de sus propiedades fundamentales (Gámez, 2010).

Ese elemento o aire inflamable fue nombrado como Hidrógeno por primera vez por Antoine Lavoisier en 1783 que curiosamente hidrógeno deriva del griego (ὑδρογένοσ-ου), que significa “generador de agua”(Asensio, 2012; Gámez, 2010). En aquella época se producía hidrógeno haciendo reaccionar ácido sulfúrico con hierro y una de sus primeras aplicaciones fue como gas ligero para zepelines. El hidrógeno impulsó el ascenso de la primera forma casi segura de viaje por aire, un globo aerostático inventado por Jacques Charles en 1783. Posteriormente, en 1852, Henri Giffard inventó el primer dirigible que utilizaba hidrógeno para volar y el conde alemán Ferdinand von Zeppelin promovió la idea de los dirigibles rígidos de hidrógeno, que más tarde pasarían a llamarse zepelines, el primero de los cuales tuvo su primer vuelo en 1900. La planificación regular de vuelos se inició en 1910 y hacia el estallido de la Primera Guerra Mundial, en agosto de 1914, habían llevado a unos 35000 pasajeros sin un incidente grave. Durante la guerra, los zepelines fueron utilizados como plataformas de observación y bombarderos (Gámez, 2010).

Todo era una novedad interesante como forma de transporte, a no ser por el infortunio y trágico caso del 6 de mayo de 1937, donde el dirigible Hindenburg se incendió en pleno vuelo sobre la ciudad de Nueva Jersey, que por una ignición por una fuga de hidrógeno fue la que ocasionó la tragedia, la tela aluminizada que era el revestimiento de la nave se prendió a causa de la electricidad estática, y como se sabe, el hidrógeno es muy inflamable destruyendo en tan solo casi 30 segundos un dirigible de 193882 kilos, de 245 metros de largo x 45.47 metros de alto; fue desde entonces que



el recién emergente Hidrógeno cayó su reputación como su interés a ser utilizado para diferentes usos e investigaciones (Gámez, 2010).

*Figura N° 2.11 Accidente hindenburg; una de las fotografías tomadas por la prensa en el momento del accidente.*



Fuente: (Asensio, 2012)

Pero fue que en 1973, a casusa de la crisis del petróleo que se le volvió a estudiar y quizá a poder aprovechar sus bondades o cualidades. Es muy interesante y curioso que el primer motor de combustión interna fuera alimentado por una mezcla de hidrógeno y oxígeno (oxi-hidrógeno) en 1806; no solo ello sino que también se inventó el soplete de gas de hidrógeno en 1819 por Edward Daniel Clarke. El hidrógeno fue licuado por primera vez por James Dewar en 1898, y al año siguiente él mismo produjo hidrógeno sólido; las baterías de hidrógeno-níquel se utilizaron por primera vez en 1977 a bordo del U.S. Navy's Navigation technology satellite-2 (NTS-2), y desde entonces la Nasa ha continuado en más investigaciones y aplicaciones para el hidrógeno (Gámez, 2010).

### **PROPIEDADES Y DATOS GENERALES DEL HIDRÓGENO**

El “generador de agua” como su traducción del griego lo especifica, es un elemento químico que se le representa por el símbolo **H**, que lo encontramos en una tabla periódica con el numero atómico “Z” de 1, es el primero de la tabla periódica que se conoce académicamente, es incoloro, inodoro y no tóxico; constituido sencillamente por un protón y un electrón con ausencia de neutrones, con una característica de ser un elemento muy ligero tanto así que es casi 15 veces más ligero que el aire, y abundante; tanto en la tierra como en el espacio exterior, que es responsable del brillo de las estrellas y también de la energía que recibimos que es del sol, se menciona que es el elemento más abundante del universo, las tres cuartas partes de la materia cósmica son hidrógeno y el decimoquinto elemento más abundante en la superficie terrestre (Asensio, 2012).

En condiciones normales de presión y temperatura es un gas diatómico: Dihidrógeno o hidrógeno diatómico ( $H_2$ ). El dihidrógeno ( $H_2$ ) es una molécula formada por dos átomos de hidrógeno. A temperatura ambiente es un gas diatómico incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable. Así pues, cada vez que hablemos de hidrógeno, a no ser que se especifique lo contrario, estaremos hablando de su forma diatómica; en un estado puro y transitorio es difícil encontrar al hidrógeno, es más su presencia en compuestos, tanto como el agua y compuestos orgánicos, por lo que la obtención de su estado puro se debe obtener mediante métodos, procesos etc.

Existen 3 isótopos naturales de hidrógeno y otros 4 sintéticos. El isótopo más común en la naturaleza, conocido como protio ( $^1H$ ), tiene un solo protón en su núcleo y un electrón orbitando a su alrededor. En los compuestos iónicos el hidrógeno puede adquirir carga positiva, convirtiéndose en un catión sin electrones llamado hidrón ( $H^+$ ), o carga negativa, convirtiéndose en un anión conocido como hidruro ( $H^-$ ). El hidrógeno juega un papel importante en la química ácido-base con muchas reacciones de intercambio de protones ( $^1H^+$ ) entre moléculas solubles (Gámez, 2010).

El hidrógeno es el segundo elemento de la tabla periódica que dispone de los puntos de ebullición y de fusión más bajos, después del helio. A presión atmosférica, se encontrará en estado líquido por debajo de su punto de ebullición ( $-252,77\text{ }^\circ C$ ) y, en estado sólido, por debajo de su punto de fusión ( $-259,2\text{ }^\circ C$ ). Así pues, el hidrógeno líquido es un líquido criogénico, ya que su temperatura se encuentra por debajo de  $-73\text{ }^\circ C$  (Gámez, 2010).

Esto supone un inconveniente, ya que lo que se suele buscar en los combustibles es que a temperatura ambiente se encuentren en estado líquido, de manera que ocuparán menos espacio que los combustibles gaseosos, además de ser más fáciles de transportar. Aunque el punto de ebullición de una sustancia pura aumenta a medida que se eleva la presión, en el caso del hidrógeno sólo es posible aumentarlo hasta un máximo de  $-240\text{ }^\circ C$  aplicando aproximadamente 13 bar<sub>g</sub> (Gámez, 2010).

*Tabla N° 2.4 Factores de compresibilidad a diferentes presiones.*

Presión (bar)	1	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800	900	1000
Factor comp.	1	1,032	1,065	1,089	1,132	1,166	1,201	1,236	1,272	1,344	1,416	1,489	1,560	1,632	1,70

Fuente: (Gámez, 2010).

En cuanto a la capacidad **calorífica específica del hidrógeno**, éste tiene un calor específico a presión constante ( $C_p$ ) de 28,623 kJ/kmol·K; y un calor específico a volumen constante ( $C_v$ ) de 20,309 kJ/kmol·K. El hidrógeno dispone de una densidad en estado gaseoso (a 20°C y 1 atm) de 0,08376 kg/m<sup>3</sup>; y una densidad líquida de 0,0708



kg/l, este es obtenido a partir de otros combustibles fósiles que viene acompañado generalmente por nitrógeno, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y otros gases, la mayoría de los cuales son también inodoros, descoloridos e insípidos (Gámez, 2010).

## 2.2.4. CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL HIDRÓGENO

Tabla N° 2.5 Características y propiedades del Hidrógeno

INFORMACIÓN GENERAL	
Nombre	Hidrógeno
Símbolo	H
Número atómico	1
Clasificación de elemento	No Metal
Grupo	1
Periodo	1
Bloque	S (SHARP)
Configuración electrónica	1s <sup>1</sup>
Propiedades físicas	
Estado	Gaseoso
Estructura cristalina	Hexagonal
Color	Incoloro
Volumen atómico	14,24 cm <sup>3</sup> /mol
Densidad	0,08988 Kg/ m <sup>3</sup>
Conductividad térmica	0,1815 W/(m*K)
Calor específico	14304 J/Kg*K
Punto de fusión	14,025 K
Entalpía de fusión	0,05868 KJ/mol
Punto de ebullición	20.268 K
Entalpía de vaporización	0.44936 KJ/mol
Presión de vapor	209 Pa a 23 K
Velocidad del sonido	1270 m/s
Propiedades atómicas	
Masa atómica	1,00797 DA
	1,007825 DA (H <sup>1</sup> )
Volumen atómico	14,4 cm <sup>3</sup> /mol
Radio atómico	0,79 Å
Radio medio	25 PM
Radio covalente	0,32 Å
Radio de Van Der Waals	120 PM
Radio iónico	2,08 o 154 PM
Número de oxidación (óxido)	1 (Anfótero)
Potencial 1° de ionización (EV)	13,65
Electronegatividad	2,1 (Pauling)
Potencial de ionización	1,312 KJ/mol
Afinidad electrónica	73 KJ/mol

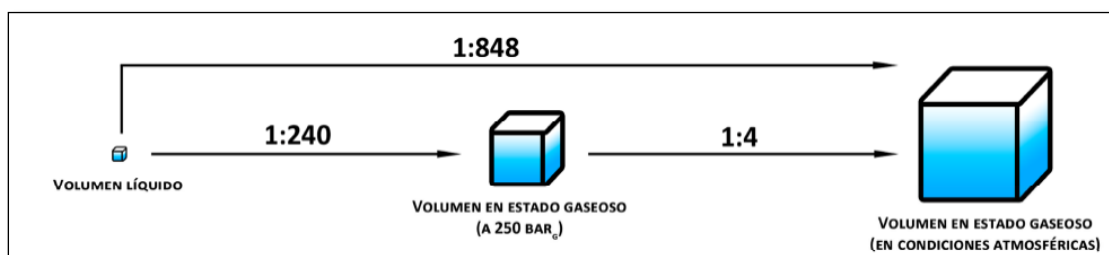
Fuente: (Gámez, 2010)

**El volumen específico** es el inverso de la densidad y expresa la cantidad de volumen por unidad de masa. Así, el volumen específico de gas de hidrógeno (con unas condiciones de 20°C y 1 atm) es de 11,9 m<sup>3</sup>/kg, mientras que el volumen específico del hidrógeno líquido (a -253°C y 1 atm) es de 0,014m<sup>3</sup>/kg. La relación de expansión del hidrógeno es de 1:848, y significa que el hidrógeno, en su estado gaseoso en

condiciones atmosféricas, ocupa 848 veces más que cuando se encuentra en estado líquido (Gámez, 2010).

**Relación de expansión:** Cuando el hidrógeno se almacena como un líquido, se evapora durante su expansión a condiciones atmosféricas, con un aumento correspondiente en su volumen. La relación de expansión del hidrógeno es de 1 : 848, y significa que el hidrógeno, en su estado gaseoso en condiciones atmosféricas, ocupa 848 veces más que cuando se encuentra en estado líquido (Gámez, 2010).

Figura N° 2.12 Relación de expansión del Hidrógeno



Fuente: (Gámez, 2010)

**Contenido de energía del hidrógeno:** El poder calorífico es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas resultantes de la combustión (Gámez, 2010).

En el caso del hidrógeno, éste dispone de un **PCS** de 141,86 kJ/g (a una temperatura de 25° C y una presión de 1 atm.); y de un **PCI** de 119,93 kJ/g (en las mismas condiciones anteriores). El hidrógeno dispone de la relación peso – energía más alta que cualquier combustible, al ser el elemento más ligero y no disponer de ningún átomo de carbón pesado. Es por esta razón que el hidrógeno se ha utilizado extensivamente en los diferentes programas espaciales, donde el peso resulta un elemento crucial. La cantidad de energía liberada durante la combustión del hidrógeno, es cerca de 2,5 veces el calor producido en la combustión de los hidrocarburos más comunes (gasolina, diésel, metano, propano...) (Gámez, 2010).

**Densidad de energía:** La densidad de energía indica la cantidad de energía que hay en un cierto volumen de combustible y es el producto del contenido en energía (PCI) y de la densidad de un combustible determinado (Gámez, 2010).

Tabla N° 2.6 Tabla de densidades de energía de los combustibles mas importantes

COMBUSTIBLE	DENSIDAD DE ENERGÍA (PCI)	ESTADO
HIDRÓGENO	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 <sub>e</sub> Y 15 °C
	4.500.000 kJ/M <sup>3</sup>	GAS A 690 BAR <sub>e</sub> Y 15 °C
	8.491.000 kJ/M <sup>3</sup>	LÍQUIDO
METANO	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 <sub>e</sub> Y 15 °C
	20.920.400 kJ/M <sup>3</sup>	LÍQUIDO
PROPANO	86.670 kJ/M <sup>3</sup>	GAS A 1 ATM Y 15 °C
	23.488.400 kJ/M <sup>3</sup>	LÍQUIDO
GASOLINA	31.150.000 kJ/M <sup>3</sup>	LÍQUIDO
DIÉSEL	31.435.800 kJ/M <sup>3</sup>	LÍQUIDO
METANOL	15.800.100 kJ/M <sup>3</sup>	LÍQUIDO
ETANOL	21.100.000 kJ/M <sup>3</sup>	LÍQUIDO

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

**Punto de inflamación o flashpoint:** La característica que describe la facilidad de evaporar los combustibles es su punto de inflamación o flashpoint y se define como la temperatura mínima a la cual el combustible desprende vapores inflamables suficientes a presión atmosférica, que arden al entrar en contacto con una fuente de ignición, pero sin propagarse la combustión a la masa líquida del combustible. El punto de inflamación es siempre más bajo que el punto de ebullición del combustible (Gámez, 2010).

El punto de inflamación es el momento más propicio para el peligro de incendio de los combustibles líquidos y su conocimiento es de suma importancia. La siguiente tabla muestra los valores del punto de inflamación de los más importantes combustibles.

Tabla N° 2.7 Punto de Inflamación de los combustibles mas resaltantes

COMBUSTIBLE	PUNTO DE INFLAMACIÓN
HIDRÓGENO	< -253 °C
METANO	-188 °C
PROPANO	-104 °C
GASOLINA	-43 °C
DIÉSEL	ENTRE 52 °C Y 96 °C
METANOL	-11 °C
ETANOL	13 °C

Fuente: (Gámez, 2010)

**Temperatura de autoencendido:** La temperatura de autoencendido es la mínima temperatura necesaria para iniciar la combustión de una mezcla de combustible en ausencia de fuente de ignición. (Gámez, 2010).

Tabla N° 2.8 Temperatura de autoencendido de combustibles mas importantes.

COMBUSTIBLE	TEMPERATURA DE AUTOENCENDIDO
-------------	------------------------------

HIDRÓGENO	585 °C
METANO	540 °C
PROPANO	490 °C
GASOLINA	DE 230 °C A 480 °C
DIÉSEL	DE 204,4 °C A 260 °C
METANOL	385 °C
ETANOL	428,8 °C

Fuente: (Gámez, 2010)

**Octanaje:** El número de octano describe las características antidetonantes de un combustible cuando se comprime, en el cilindro de un motor de combustión interna (Gámez, 2010).

*Tabla N° 2.9 Número de Octano de los combustibles más importantes*

COMBUSTIBLE	NÚMERO DE OCTANO
HIDRÓGENO	130
METANO	125
PROPANO	105
GASOLINA	De 87 a 93
DIÉSEL	30
METANOL	99
ETANOL	100

Fuente: (Gámez, 2010)

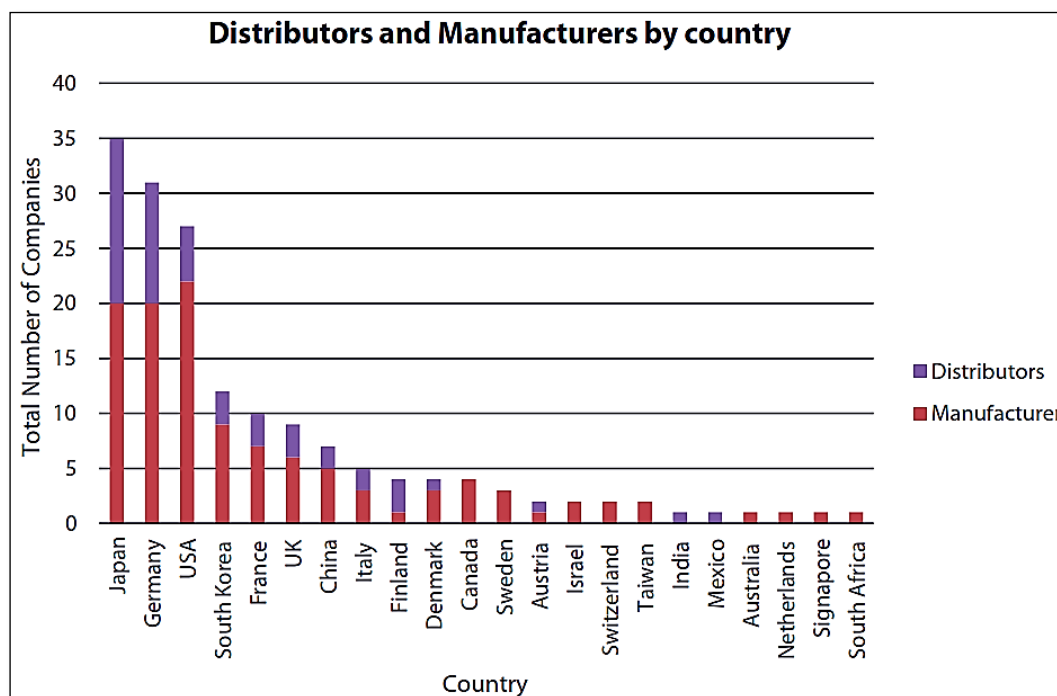
### 2.2.5. POSICIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE COMO SOSTENIBLES.

Desde que Grove, tras descubrir y demostrar la posibilidad de generar corriente eléctrica a partir de una reacción electroquímica, que inicialmente lo llamaría “batería de gas” y que hoy en la actualidad se conoce como “Pila de combustible”, esta investigación ha ido creciendo y obteniendo mayor madures tecnológica, y que se está posicionando en los mercados internacionales, el país que más ha desarrollado esta tecnología es Japón, luego Alemania y Estados Unidos, esto influencia a virar también en conocer sobre el tema, y tratar de ponerse a la vanguardia tecnológica, porque los paradigmas mundiales están cambiando y un país como el nuestro no puede quedarse atrás.

Desde la evolución de los motores de combustión interna, hasta ahora no ha habido un cambio radical en bien de la naturaleza o el medio ambiente, por lo que es preocupante para las generaciones futuras. El cambio empieza desde lo unipersonal hasta lo social, y al final puede tener una repercusión global.

Un ejemplo considerando a los vehículos particulares se referencia que consume 6 millones de barriles diarios de petróleo en EE.UU. Si un 20% de automóviles utilizaran celdas de combustible, los EE.UU. reducirían sus importaciones de petróleo en 1.5 millones de barriles al día (Almarza & Salueña, 2010, p. 161). Pasaría de un consumo de 6 MBD a 1.5 MBD, en términos de porcentaje estaríamos hablando de una disminución del 75% de consumo de petróleo al día, y con tan solo que el 20 % cambie de usar un automóvil de combustión interna por un auto de pilas de combustible o más conocidos como FCV (Almarza & Salueña, 2010). A nivel mundial habría grandes cambios, es por esto que el paradigma y el cambio tecnológico deben consolidarse mucho más.

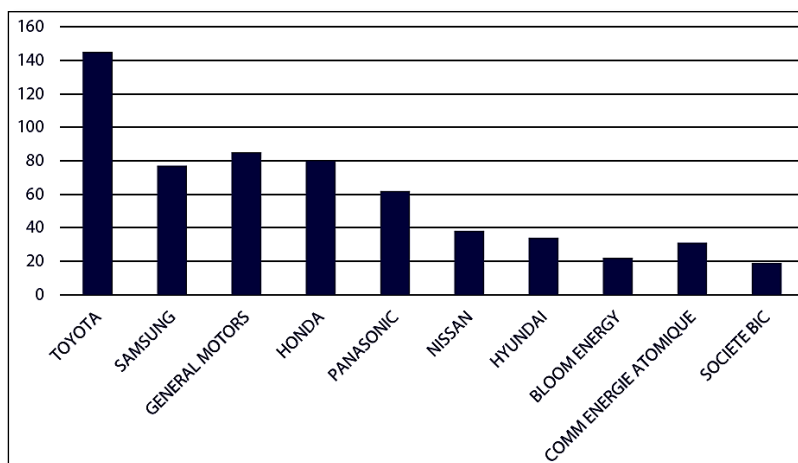
Gráfico N° 2.1 Países distribuidores y manufactureros de las pilas de combustible, en orden descendente.



Fuente: (Moore, Lessard, Maillard, Hardman, & Chandan, 2015)

Ahora veremos las 10 mejores concesionarias de US

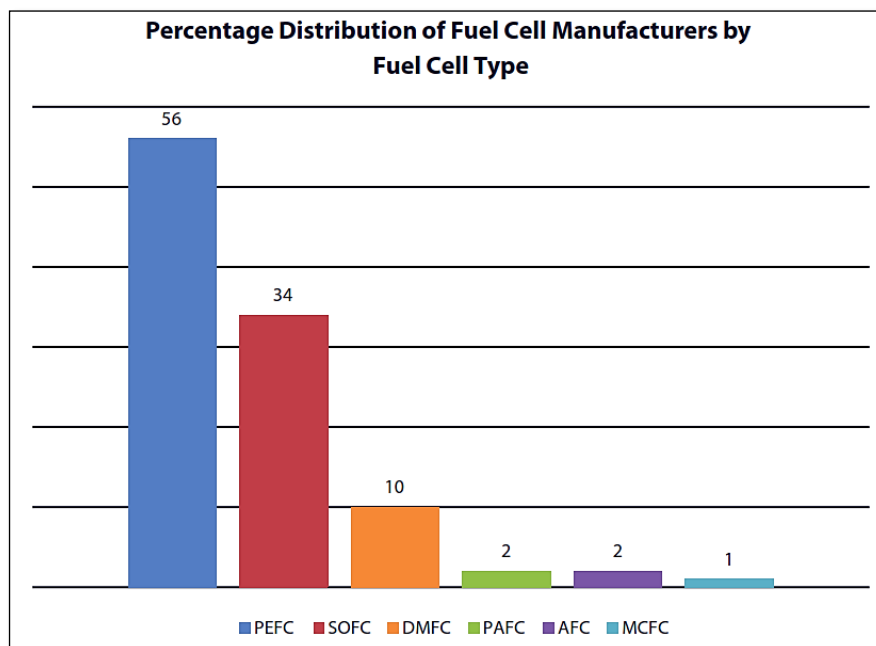
Gráfico N° 2.2 Las 10 mejores concesionarias de US del 2014



Fuente: (Moore et al., 2015)

Como podemos apreciar, Toyota está en primer lugar, por el trabajo que viene realizando desde hace años, entre otras empresas, y no solo ellos, sino que también está dando a conocer las patentes para que sigan investigando los que se avocan a estos temas.

Gráfico N° 2.3 Porcentajes de distribución de las pilas de combustible según el tipo.



Fuente: (Moore et al., 2015)

Todos los tipos de pilas están madurando tecnológicamente, y aún falta más; pero hasta ahora, puede sustentarse que es una alternativa altamente confiable, puesto que la emisión de gases contaminantes es casi cero, y los países de primer mundo están avanzando en aminorar los costos de producción y la eficiencia de las FC, lo que debe ser aprovechado, estudiado, analizado, investigado por los países en desarrollo.

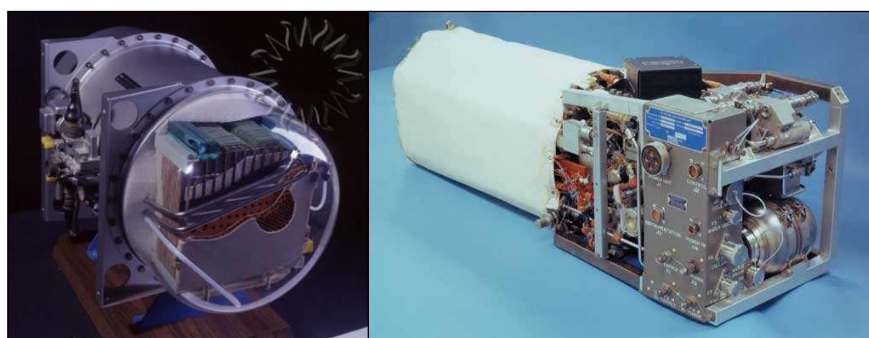
## 2.2.6. PILAS DEL COMBUSTIBLE

### 2.2.6.1. INTRODUCCIÓN

En 1839, se concebía una de las más interesantes e imperantes ideas, con una influencia distinguida hasta el siglo XXI, aquel experimento que fue develado por William Grove, tras descubrir y demostrar la posibilidad de generar corriente eléctrica a partir de una reacción química o técnicamente llamado como electroquímica, entre el reactivo y reactante del hidrógeno y oxígeno, que en sus inicios lo llamo “batería de gas” y que hoy en la actualidad se conoce como “Pila de combustible, celdas de combustible, células de combustible”, entre otros nombres; que tiene la virtud de convertir estos reactivos en energía eléctrica, energía que puede ser directamente utilizable, he ahí la gran diferencia de entre otros dispositivos, ya no se tiene que referenciar a la energía potencial o cinética para generar corriente eléctrica, sino que simplemente este dispositivo electroquímico necesita de hidrógeno (u otros combustible) y oxígeno, para producir una cantidad determinada de energía eléctrica.

Este experimento fue evolucionando a través de los años, con diferentes elementos, recubrimientos, combustibles, formas, tamaños, exigencias, necesidades, entre otros, que también centros de investigación, consideraron para proyectos que demandaban practicidad, eficiencia, tenacidad. La Nasa se atrevió a incluirlo en uno de sus proyectos, en su época llamado Apolo, esta pila de combustible que estaba incluido en Apolo podía generar una potencia de hasta 12 KW, pesaba 120 Kg y media 36 x 38 x 114 cm, con el apilamiento de 32 celdas conectadas en serie, cada célula trabajaba a 0.875 V (Almarza & Salueña, 2010, p. 16).

*Figura N° 2.13 Pila de combustible de electrolito alcalino utilizada en los transbordadores espaciales modernos.*



Fuente: Nasa

Hay un pequeño disenso, sobre quien realmente descubrió el efecto celular del combustible, ya que otros historiadores acreditan a Schönbein en 1838 quien describió los principios de funcionamiento en Philosophical Magazine (Dicks & Rand, 2018;



Kupecki, 2018). Empero, tradicionalmente se le consideró a Grove como “El padre de la Pila de combustible” (esto solo como una referencia histórica).

Desafortunadamente, la invención del primer motor de combustión interna se convertiría en un éxito comercial por Jean Joseph Étienne Lenoir en 1859, junto con irónicamente anterior descubrimiento de fuerza electromagnética de Faraday, desviado el curso de la generación de electricidad a partir de electroquímica a métodos electromagnéticos. Como resultado, la pila de combustible se convirtió en un mero objeto de curiosidad científica durante gran parte de ese próximo medio siglo (Dicks & Rand, 2018). Definitivamente no se abandonó esa posibilidad de continuar con las investigaciones, aunque fue lento pero si hubo avances en cuanto a las baterías y otros. Sin embargo este boom de los motores de combustión interna, presentarían varios inconvenientes, tanto ambientales como técnicos, y es donde surge una voz que disienta con el mercado que estaba ocupando los motores que consumían combustibles fósiles (Dicks & Rand, 2018).

En 1894, una crítica bien documentado contra los motores térmicos fue expresada por Friedrich Ostwald, que llamó la atención a los pobres problemas de eficiencia y contaminantes asociados con la producción de energía eléctrica a través de la combustión de combustibles fósiles, en lugar de la oxidación electroquímica directa. Una célula de combustible es inherentemente un dispositivo más termodinámicamente eficiente ya que, a diferencia de un motor en el cual el calor se convierte en trabajo mecánico, la célula no está sujeto a las reglas del ciclo de Carnot (Dicks & Rand, 2018).

*“El camino que ayudará a resolver este problema técnico más grande de todos, este camino debe ser encontrado por la electroquímica. Si tenemos un elemento galvánico que suministra directamente energía eléctrica del carbón y el oxígeno, [...] enfrentamos una revolución técnica que debe retrasar la de la invención de la máquina de vapor. Imagine cómo cambiará la apariencia de nuestros lugares industriales. No más humo, no más hollín, no más máquina de vapor, ni siquiera más fuego, [...] ya que el fuego ahora solo será necesario para los pocos procesos que no se pueden realizar eléctricamente, y esos disminuirán diariamente. [...] Hasta que se haga frente a esta tarea, pasará algún tiempo... Friedrich Ostwald” (Dicks & Rand, 2018).*

En la década de 1930, Emil Bauer y H. Preis en Suiza experimentaron con pilas de combustible de óxido sólido (SOFC). Dadas las limitaciones de óxidos sólidos en ese momento (es decir, la mala conductividad eléctrica y la estabilidad química), G.H.J. Broers y J.A.A. Ketelaar a finales de 1950 se volvió a la utilización de sales fundidas como electrolitos. El trabajo dio a luz a la célula de combustible de carbonato fundido

(MCFC), que finalmente se convirtió en uno de los principales tipos de pila de combustible en la producción comercial (Dicks & Rand, 2018).

El renacimiento del concepto de pila de combustible en el siglo 20 se puede atribuir en gran parte a la labor de inglés FT Bacon (Tom). Era un ingeniero de profesión y por lo tanto apreciado las muchas ventajas potenciales de la pila de combustible tanto sobre el motor de combustión interna y la turbina de vapor como fuente de energía eléctrica. Su interés en pilas de combustible de fecha tan lejana como 1932, y araba un surco solitario, con poco apoyo o respaldo, pero mostró gran dedicación al reto de desarrollar células prácticos. Al principio de su carrera, Tom acogió estudiar la pila de combustible de electrolito alcalinotérreos (AFC), Finalmente, en agosto de 1959, demostró la primera célula de combustible viable – un sistema 40 de células que podrían producir alrededor de 6 kW de potencia, lo cual fue suficiente para ejecutar una carretilla elevadora y de operar una máquina de soldadura, así como una sierra circular (Dicks & Rand, 2018).

Una gran oportunidad para aplicar las pilas de combustible surgió en la década de 1960 con el advenimiento de la exploración espacial. En los Estados Unidos, se emplearon primero pilas de combustible para proporcionar energía nave espacial durante la quinta misión del Proyecto Géminis. Se adoptó un sistema de células de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) fabricado por la General Electric Company para las misiones Gemini (dos módulos, cada uno con una potencia máxima de alrededor de 1 kW), pero esto fue reemplazado en el Proyecto Apolo por un AFC de circulante diseño de electrolito, quien el pionero de la idea fue Tom y desarrollado por el Pratt y Whitney Aircraft Company (más tarde la United Technologies Corporation) (Dicks & Rand, 2018).

#### **2.2.6.2. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE LA CÉLULA DE COMBUSTIBLE.**

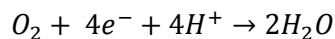
Para entender cómo la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno produce una corriente eléctrica, y donde se liberan los electrones, es necesario considerar la reacción que tiene lugar en cada electrodo. Las reacciones varían para los diferentes tipos de pila de combustible, pero es conveniente comenzar con una célula en torno a un electrolito ácido, no sólo porque este sistema fue utilizado por Grove, sino también porque es el más simple y sigue siendo el más elegido para aplicaciones comerciales (Dicks & Rand, 2018).

En el ánodo de una célula de combustible de ácido, el hidrógeno se oxida y por lo tanto libera electrones y crea iones  $H^+$ , tal como se expresa por:

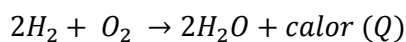


Esta reacción también libera energía en forma de calor.

En el cátodo, el oxígeno reacciona con los electrones extraídos del electrodo, y los iones  $H^+$  desde el electrolito, para formar agua, es decir.



Así, la reacción global de la célula es:



Claramente, tanto para las reacciones en los electrodos para proceder continuamente, los electrones producidos en el electrodo negativo deben pasar a través de un circuito eléctrico a la positiva. También, los iones  $H^+$  deben pasar a través de la solución de electrolito - un ácido es un fluido con  $H^+$  iones libres y así sirve para este propósito muy bien. Ciertos polímeros y materiales cerámicos se pueden hacer también para contener  $H^+$  iones móviles. Estos materiales se denominan comúnmente “membranas de intercambio de protones”, como un ion  $H^+$  también se conoce como un protón (Dicks & Rand, 2018).

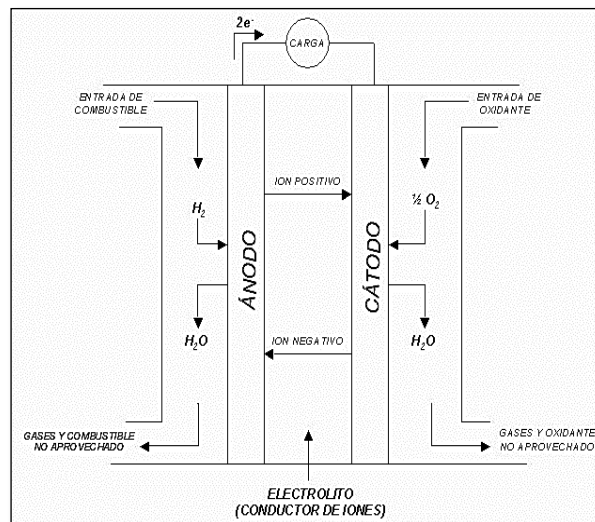
Los componentes básicos los cuales conforman una celda de combustible, son los electrodos, el cátodo o polo positivo, el ánodo o polo negativo, un electrolito, la sustancia portadora de los iones producidos en las reacciones, la matriz contenedora del electrolito y una placa bipolar, la cual funciona como colector de corriente y distribuidor de gas. En un primer lugar, se ha de saber cualquier sustancia susceptible de oxidación química que pueda ser suministrada de manera continua a la pila, puede emplearse como combustible. En el mismo modo, aquella sustancia que se reduzca de manera química en un periodo relativamente corto, se puede utilizar como oxidante. El hidrógeno ( $H_2$ ) y el oxígeno ( $O_2$ ), son el combustible y el oxidante, más empleados en la actualidad en el ánodo y en el cátodo correspondientemente (Arauzo, 2016).

Los gases, pasan hacia el electrolito a través de los polos que contienen los electrodos, los oxidantes a través del cátodo y los combustibles a través del ánodo. De esta manera, se genera una interface entre el electrodo, el electrolito y los reactivos, la cual es determinante en el comportamiento electroquímico de la celda. En esta interface, el gas es difundido a través de una región de finas micras de espesor, hasta la superficie del electrodo mojada por el electrolito. En éste lugar, tiene origen la reacción electroquímica, la cual genera las cargas eléctricas y los iones que son transportados a través del electrolito, cerrando de esta manera el circuito (Arauzo, 2016).

La cantidad de electrolito presente en la interface, presenta un factor clave, ya que un excesivo contenido de éste dificulta el acceso de los gases a los centros reactivos, donde se encuentra el catalizador. Por el contrario, un bajo contenido de electrolito, limita el transporte de los iones hacia los lugares donde la reacción es producida (Arauzo, 2016).

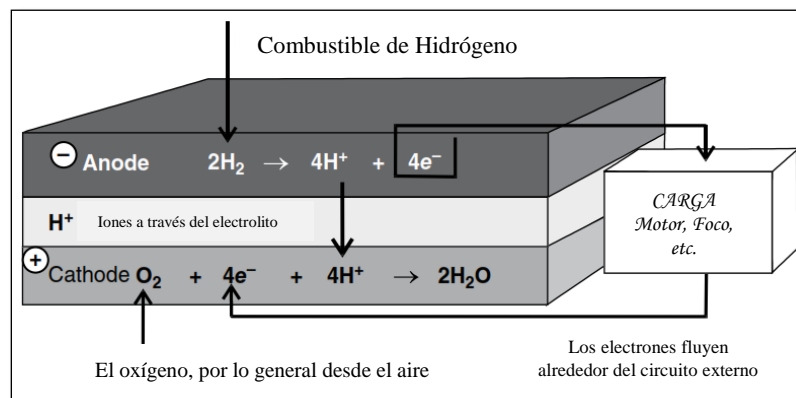
Esta tecnología, es potencialmente más eficiente que cualquier otro sistema, a pesar de que estas celdas presenten eficiencias fluctuantes entre el 35% y el 76%. Se debe señalar que estos equipos ya comienzan a ser empleados en aplicaciones tanto de baja energía como de alta. Las celdas de combustible alimentadas por hidrógeno, consisten en mecanismos muy silenciosos, sin olvidar que generan corriente eléctrica y calor, mientras que como residuo producen única y exclusivamente vapor de agua (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.14 Diagrama de una celda de combustible alimentada mediante hidrógeno (H<sub>2</sub>).



Fuente: (Almarza & Salueña, 2010)

Figura N° 2.15 Reacciones en los electrodos y la carga de flujo para pila de combustible con un electrolito ácido.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

## 2.2.7. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible, se tratan en realidad de una serie de tecnologías, las cuales emplean diversos electrolitos funcionando a diversas temperaturas. De esta manera, es posible hablar tanto de celdas de combustible de altas temperaturas ( $>200^{\circ}\text{C}$ ), como de celdas de combustible de bajas temperaturas, las cuales operan hasta los  $40^{\circ}\text{C}$ . Una de las principales diferencias derivadas de la temperatura, consiste en el empleo de diferentes materiales, en especial los electrolitos, ya que a elevadas temperaturas, se no han de emplear electrolitos acuosos (Arauzo, 2016).

Explicando las celdas de combustible de elevada temperatura, se tiene como objetivo la generación de energía eléctrica para potencias superiores a 1MW, ya que poseen una alta eficiencia. Por el contrario, las de baja temperatura, se encuentran en desarrollo para generar potencias menores a esa cantidad. A continuación, se van a explicar las celdas de combustible existentes a día de hoy, con el funcionamiento y las propiedades de cada una de ellas (Arauzo, 2016).

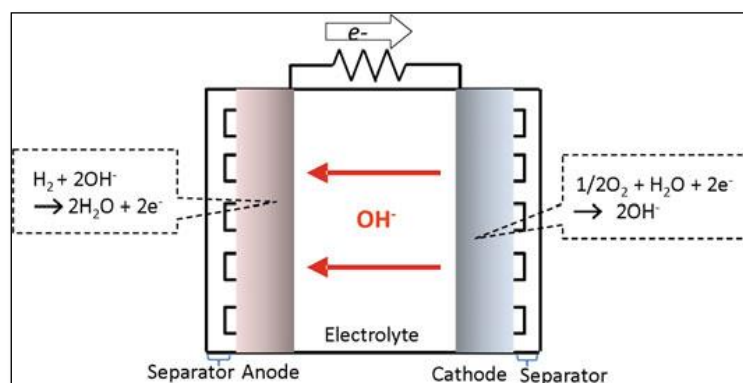
### 2.2.7.1. Celdas de combustible alcalinas (AFC).

Este tipo de celdas, se caracteriza por el uso de hidróxido de potasio (KOH) concentrado en proporciones de entre el 35% y el 50%, como electrolito. En ciertas ocasiones, cuando las temperaturas de operación han alcanzado los  $250^{\circ}\text{C}$ , puede lograr concentraciones en torno al 85%. Debido a que se trata de un electrolito líquido, es necesario el empleo de una matriz de asbestos, capaz de retenerlo. A su vez, los electrodos poseen altos contenidos en metales nobles, tales como ánodos de platino (Pt) o paladio (Pd), y cátodos de oro (Au) o platino (Pt). Por esta razón, se pueden emplear altos rangos de electrolizadores, bien sea el níquel (Ni), la plata (Ag), óxidos metálicos o incluso espinelas. Este tipo de celdas, ya se encuentra en un estado bastante desarrollado, debido a que han sido empleados en dispositivos de índole espacial (Arauzo, 2016).

Tratando sobre su combustible, ha de emplearse hidrógeno puro, ya que si existen moléculas de  $\text{CO}_2$ , éstas son absorbidas por el electrolito de hidróxido de potasio, dando lugar a la formación de carbonato potásico. Sin embargo, esta formación, da lugar a una notable reducción en su eficiencia. Por motivos como el elevado coste en la producción de la pureza del combustible, este tipo de celdas son poco rentables, siendo empleadas básicamente en aplicaciones militares, a pesar de observar un incremento dentro de las instalaciones estacionarias de baja potencia (Gutierrez, 2015).

#### Reacción en las AFC

Figura N° 2.16 Estructura fundamental de un AFC



Fuente: (Sasaki et al., 2016)

En estas pilas, se genera una reacción Redox entre el hidrógeno y el oxígeno, en la cual el hidrógeno es oxidado en el ánodo. Esta reacción, genera agua y libera cuatro electrones, los cuales circulan a través de un circuito externo para llegar al cátodo, generando la reducción del oxígeno. Finalmente, se liberan cuatro iones de hidróxido, por lo que la reacción completa consume un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, en la producción de una molécula de agua. Como producto, se genera electricidad y calor (Gámez, 2010).

### Electrolitos empleados en los AFC

La mayoría de estas estructuras, los electrodos se encuentran separados mediante una matriz porosa saturada en una solución acuosa alcalina, principalmente hidróxido de potasio (KOH). Este electrolito, es fácilmente intoxicado con dióxido de carbono, a través de su conversión a carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ), por lo que han de emplearse gases purificados y filtros para retener el  $CO_2$ . Este proceso es irreversible, sin embargo, ciertos modelos de este tipo de celdas poseen una alta resistencia ante el fenómeno. Estos modelos se dividen en tres categorías (Arauzo, 2016):

- ❖ De electrolito líquido estático: Emplean un electrolito de amianto saturado en hidróxido de potasio (KOH), junto con un catalizador de platino (Pt), para así generar agua pura en el ánodo. A su vez, posee una alta sensibilidad al  $CO_2$  (Arauzo, 2016).
- ❖ De electrolito líquido circulante: Se tratan principalmente de las pilas ASK y de las pilas Elo Flux, las cuales se explican a continuación (Gámez, 2010).

Pilas ASK: En este modelo de celda, el electrolito que circula entre los electrodos se mezcla con el agua producida, razón por la cual deba ser substituido manualmente cada cierto tiempo. Se caracteriza también por su alta resistencia, fruto de la separación de los electrodos para permitir la



circulación del electrolito, lo que provoca al mismo tiempo una disminución en su potencia de salida.

Pilas Elo Flux: En este segundo modelo de celda de electrolito líquido circulante, éste circula a través de los electrodos, con la ventaja de ser reemplazado con facilidad, siendo su proceso de fabricación menos costoso.

- ❖ Celda alcalina con membrana de intercambio aniónico: Dichas celdas, se caracterizan por poseer una serie de membranas semi-impermeables, compuestas de ionómeros. De esta manera, permiten el paso de aniones, pero retienen las partículas de oxígeno e hidrógeno. Para su fabricación se emplean materiales compuestos de metales del grupo de los no nobles, principalmente hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni), para así evitar la formación de carbonatos sobre las superficies de los electrodos (Arauzo, 2016).

#### **Variantes en las celdas AFC.**

Las celdas de boro-hidruro directo y de hidruro metálico, son subclases relativamente recientes dentro de este tipo de pilas de combustible. Principalmente se caracterizan por su alta capacidad para combinar químicamente y almacenar hidrógeno en su interior (Gámez, 2010).

- ❖ Celdas de boro-hidruro directo
- ❖ Celdas de hidruro metálico

#### **2.2.7.2. Celdas de combustible de metanol directo (DMFC)**

Este tipo de celda de combustible, se caracteriza como bien lo nombra su nombre, por el uso de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), bien de forma líquida o gaseosa, como combustible de alimentación. Específicamente, emplea una mezcla de un 3% de metanol en agua como combustible, mientras que emplea el oxígeno del aire como oxidante. Este desarrollo, permite el uso directo de este combustible sin la necesidad de implementar el reformador en el sistema, ya que el metanol produce su oxidación directa en el ánodo, sin modificación alguna por parte del hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) (Arauzo, 2016).

Gran parte de ellos, muestran un funcionamiento similar al que poseen las pilas de polímeros sólidos con membrana de intercambio iónico y electrodos de carbono, junto con una mezcla de platino (Pt) y rutenio (Ru) como catalizador en el cátodo y otra de platino (Pt) en el ánodo (Gutiérrez, 2015).

Dichas celdas de combustible, ofrecen rendimientos entre el 20% y el 40%, con temperaturas que rondan los  $90^\circ$  a presión atmosférica, por lo que es utilizada en

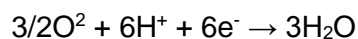
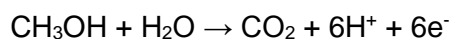
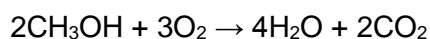


aplicaciones de pequeños tamaños, ya que su rango de temperaturas es relativamente bajo. Si se incrementa su temperatura de operación, se consigue incrementar su eficiencia, pero sin embargo se genera un aumento en el permeado del combustible, desde el ánodo hasta el cátodo sin producir corriente eléctrica alguna (Arauzo, 2016).

Se trata de un compuesto, el cual se presenta en estado líquido desde los  $-97^{\circ}\text{C}$  hasta los  $64,4^{\circ}\text{C}$ , ante una presión atmosférica. Su densidad energética en volumen, es mayor que la del hidrógeno comprimido y quince veces superior que la de las baterías de litio, mientras que posee una densidad en masa de igual valor a  $6,1\text{kWh/kg}$  (Arauzo, 2016).

### Reacción producida en las DMFC

Principalmente, estas pilas de combustible basan su funcionamiento en la oxidación del metanol en una capa catalizadora, para así formar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), mientras que el agua, es producida en el cátodo y consumida en el ánodo. Los protones ( $\text{H}^+$ ) deben atravesar la membrana intercambiadora de protones, de tal forma que llegan al cátodo donde sucede la correspondiente reacción con el oxígeno y así producir agua. De esta manera, los electrones se transportan a través de un circuito externo para producir corriente eléctrica de ánodo a cátodo (Arauzo, 2016). Ahora veremos la reacción en general, la reacción en el ánodo y reacción en el cátodo.



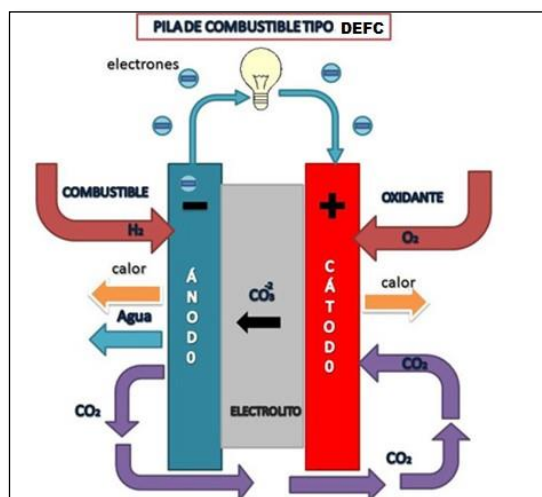
El agua y el metanol, son absorbidos por un catalizador de platino (Pt) y rutenio (Ru), perdiendo agua hasta la formación de dióxido de carbono. Ya que el agua es consumida en el ánodo durante la reacción, el metanol puro no puede utilizarse sin proveer agua a la celda, por lo que su densidad queda limitada, complicando de esta forma el diseño de los sistemas de aprovisionamiento de agua. Actualmente, se emplea un catalizador de platino tanto en la oxidación como en la reducción, afectando negativamente al rendimiento de la celda. Esto es debido a que el metanol presente en la zona del cátodo se oxida. Si se fija otro catalizador para la oxidación, este problema queda solucionado y además se reduce significativamente su coste (Arauzo, 2016).

#### 2.2.7.3. Celdas de combustible de etanol directo (DEFC)

Se trata de una clase de celdas de combustible de propiedades similares a las que emplean metanol, con la diferencia de que ofrecen una serie de ventajas al emplear

etanol ( $C_2H_5OH$ ) como fuente del combustible. Principalmente, se ha de conocer que su grado de toxicidad no es tan elevado como en el caso anterior, por lo que perjudica de menor forma a la celda, ofreciendo una amplia gama de facilidades a los consumidores. Para su empleo, ya existe en el mercado actual, una cadena de suministro, debido a sus expandidas aplicaciones, incluso es utilizado en algunos motores de explosión (Gutiérrez, 2015).

Figura N° 2.17 Esquema de una pila de combustible DEFC.



Fuente: (Arauzo, 2016)

Hoy en día, se han desarrollado nuevos catalizadores nano-estructurados para este tipo de celdas, los cuales emplean metales del grupo de los no nobles, esencialmente hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni), mezclados en el ánodo y puros en el cátodo. De esta forma, se ha logrado incrementar su rendimiento y reducir su coste. Como electrolito, se emplea un polímero. Por consiguiente, el etanol líquido ( $C_2H_5OH$ ) es oxidado en el ánodo, gracias a la presencia de agua, por lo que se da lugar el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), a cationes de hidrógeno ( $H^+$ ) y a electrones ( $e^-$ ). Estos electrones, viajan a través de un circuito externo, mientras que los protones cruzan la membrana, para dar lugar junto con el oxígeno y los electrones a una determinada cantidad de agua en el otro extremo del dispositivo (Arauzo, 2016).

El etanol, el cual posee una densidad energética de  $8kWh/kg$ , puede ser obtenido en grandes cantidades de la biomasa mediante una serie de procesos de fermentación, empleando recursos renovables como pueden ser la caña de azúcar, el trigo, el maíz o la paja (Arauzo, 2016). Otro de los atractivos que presenta el bio-etanol, es su elevado potencial de absorción de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) atmosférico, de tal forma que aunque las celdas liberen este gas, esto da lugar a un ciclo cerrado. Otra de las

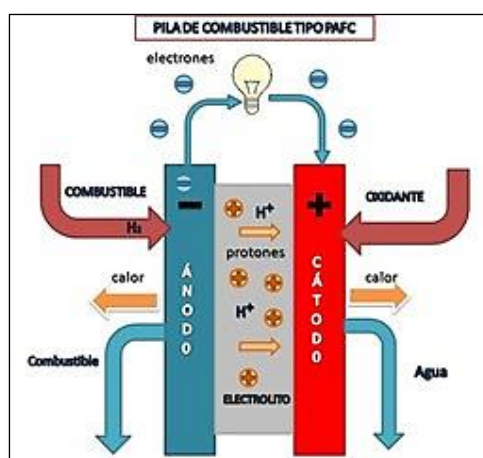
principales ventajas, es su transporte y almacenamiento, que al igual que en los combustibles convencionales, puede emplear depósitos similares (Gutiérrez, 2015).

#### 2.2.7.4. Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

Este tipo de celdas de combustible, basan su empleo en el uso de ácido fosfórico como electrolito ( $H_3PO_4$ ), el cual se encuentra en el interior de una matriz de carburo de silicio ( $SiC$ ) a temperaturas de entre los 150 y 250°C de operatividad. El ácido fosfórico, se solidifica a los 40°C, lo que dificulta su puesta en marcha, limitando su funcionamiento continuo. A su vez, emplea platino (Pt) soportado sobre láminas de carbón, como material componente de sus electrodos, por lo que poseen una alta sensibilidad a ser envenenados mediante monóxido de carbono (Arauzo, 2016).

Este tipo de celdas, son muy tolerantes a las impurezas, ofreciendo elevadas eficiencias de alrededor del 85%, cuando el vapor generado es empleado para cogeneración. Si este producto no es empleado en cogeneración, se observa un importante descenso en su eficiencia, hasta alcanzar valores del 37%, a pesar de que siguen siendo porcentajes importantes (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.18 Esquema de una celda de combustible PAFC.



Fuente: [www.energíasrenovablesinfo.com](http://www.energíasrenovablesinfo.com)

De acuerdo a su implementación, se ha de resaltar, que su implementación tiene lugar a corto plazo. Esto es debido a su alta tolerancia a los diferentes contaminantes generados en los procesos de reformado de los hidrocarburos, siendo dichas tolerancias muy superiores a las del resto de celdas de combustible existentes (Arauzo, 2016).

A la hora de tratar sobre sus aplicaciones, junto con las celdas de combustible alcalinas, este grupo de pilas posee uno de los mayores rangos de aplicación, debido a que poseen un alto desarrollo tecnológico, aplicado en gran cantidad de aplicaciones estacionarias. Entre algunas de las aplicaciones más corrientes, se encuentra su

implementación en diferentes clínicas, hospitales, hoteles entre otros edificios de elevado personal, sin olvidar su empleo en ciertos vehículos, en los cuales ya se han llevado a cabo ciertos proyectos demostrativos (Arauzo, 2016).

Por el contrario, a pesar de su alto número de aplicaciones, el uso de ácido fosfórico como electrolito, presenta una elevada corrosión y un complicado manejo debido a su peligrosidad, lo que genera que su uso tienda a restar frente a otros modelos de celdas (Arauzo, 2016).

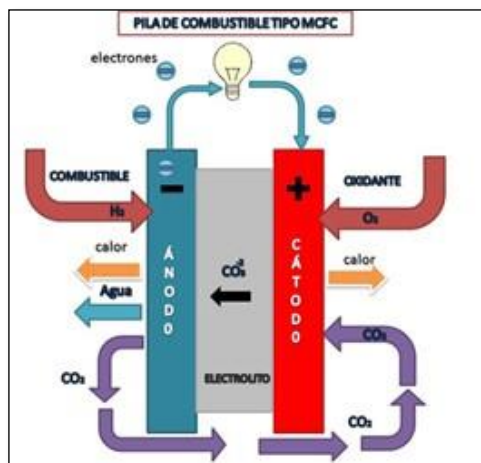
#### **2.2.7.5. Celdas de combustible de Carbonatos fundidos (MCFC)**

Dentro de este cuarto tipo de celdas de combustible, se ha de destacar el uso de una sal fundida de carbonatos alcalinos, principalmente litio (Li), sodio (Na) y potasio (K), retenidos en una matriz de aluminato de litio, como electrolito. Estos compuestos, han de operar a temperaturas superiores a los 600°C, ofreciendo elevados rendimientos del 60%, los cuales pueden lograr el 85%, si su calor residual es correctamente recuperado y aprovechado (Arauzo, 2016).

En el momento de construir los electrodos, se emplea níquel (Ni) dopado de cromo (Cr) o aluminio (Al) en el ánodo, mientras que óxido de níquel (Ni) litiado en el cátodo, encontrándose en desarrollo otros materiales compatibles, los cuales ofrezcan una mayor resistencia a la corrosión (Gámez, 2010).

Entre una de sus principales ventajas, se encuentra su capacidad de admisión de elevadas concentraciones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en sus gases de alimentación. Esta característica, las hace óptimas al empleo de cualquier tipo de combustibles, tales como gas natural, biogás o bioetanol, entre otros. Los óxidos de carbono, son generados durante el proceso de reformado de estos combustibles, por lo que no es necesaria su eliminación, como en el caso de otros tipos de celdas. Debido a esta propiedad, ya que ninguno de los dos gases anteriormente nombrados afectan a sus componentes, se creen que también pueden funcionar con óxidos de carbono empleados como combustibles e incluso usarse en el reformado del carbón en hidrógeno. A su vez, presentan una elevada resistencia al sulfuro y a otros elementos que intervienen en el proceso (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.19 Esquema de una celda de combustible MCFC.



Fuente: [www.energiasrenovablesinfo.com](http://www.energiasrenovablesinfo.com)

Además, al contrario que en otros tipos de celdas de combustible que operan a temperaturas inferiores, las de carbonato fundido no requieren de un reformador externo que transforme determinados combustibles en hidrógeno, ya que su elevada temperatura los transforma directamente mediante un proceso denominado reformado interno. Mediante este mecanismo, los costes también son reducidos (Arauzo, 2016).

Hasta la actualidad, esta clase de pilas han sido operadas con hidrógeno, monóxido de carbono, gas natural, propano, gas de relleno sanitario, diésel marino y otros productos simulados tras la gasificación del carbón, mediante el empleo de celdas desde 10kW hasta 2MW. Sus elevadas temperaturas durante su operación, poseen una elevada ventaja, ya que ello da lugar a unas mayores eficiencias y flexibilidades en el uso de diferentes combustibles, mediante el empleo de catalizadores de menor coste. Esto se debe a que las reacciones de rotura en los enlaces de carbono presentes en las cadenas de hidrocarburos, ocurren a mayor velocidad a medida que la temperatura se va incrementando. Sin embargo, este aumento de temperaturas puede dar lugar a procesos corrosivos y fallos en el sistema (Arauzo, 2016).

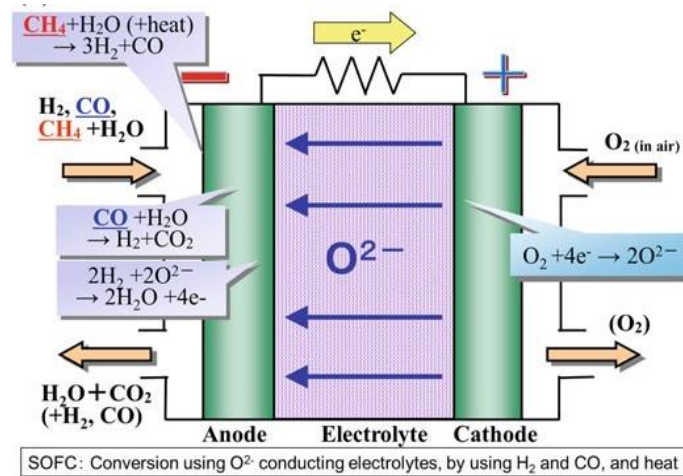
Generalmente, su empleo tiene lugar en aplicaciones estacionarias, como por ejemplo, industrias, plantas energéticas o aplicaciones de índole militar.

#### 2.2.7.6. Celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC)

Se trata de otro tipo de celda de combustible altamente prometedoras, debido a su alta capacidad de operación ante costos competitivos y a su bajo coste de producción, las cuales podrían en un futuro ser empleadas de aplicaciones de potencia, tales como en estaciones generadores de energía eléctrica a gran escala, o en industria (Gámez, 2010).

Basa su funcionamiento en el empleo de electrolitos en estado sólido, por lo que no presenta problemas de corrosión, dando lugar a un amplio rango de ventajas frente a otros tipos de celdas de combustible. Ya que se trata de un sistema de óxido sólido, se utiliza un material sólido cerámico, principalmente zirconio (Zr), permitiendo alcanzar temperaturas de operación cercanas a los 1000°C (Arauzo, 2016).

Figura N° 2.20 Esquema de una celda de combustible SOFC.



Fuente: (Sasaki et al., 2016)

Al igual que el anterior tipo de pilas de combustible, el hidrocarburo alimentado puede ser reformado en el interior de la celda. Para ello, emplean un sistema de tubos de longitud igual a un metro, cuya disposición permite el alcance de grandes eficiencias, mientras que en otras variaciones se presenta un disco comprimido, ofreciendo a su vez, importantes ventajas en su fabricación y eficiencia. Dicha morfología, nace a la hora de vaciar el material sólido en diferentes estructuras durante su fabricación, por ejemplo de forma plana, tubular o monolítica. Al igual que en otros tipos de celdas, si el calor residual es utilizado para cogeneración, su eficiencia puede superar el 80% (Gutiérrez, 2015)

Actualmente, se encuentra unidades de 25kW y otra de 100kW en estado de prueba.

### 2.2.7.7 Celdas de combustible poliméricas (PEMFC)

Este tipo de pilas de combustible, ha sido el responsable del gran impulso de estas nuevas tecnologías a lo largo de estos últimos años, tanto a la hora de considerar su producción energética como sus aplicaciones automovilísticas. El desarrollo de este nuevo tipo de celdas, aparece tras el empleo de un polímero denominado Nafion, como electrolito. Esta clase de electrolito, consiste en una membrana compuesta por este polímero, la cual se encuentra unida a grupos funcionales, capaces de intercambiar aniones y cationes (Arauzo, 2016).



A pesar, de no ser notablemente más eficientes que los otros tipos de pilas de combustible estudiadas hasta el momento, poseen una ventaja fundamental, por la cual se encuentran en cabeza. Su operatividad a temperaturas no muy elevadas, rondando alrededor de los 90°C. Esta temperatura de funcionamiento, permite a este tipo de celdas realizar arranques en cortos periodos de tiempo, junto con un alto grado de respuesta frente a los cambios demandados de potencia.

También, se ha de comentar su alto valor de densidad de potencia, lo cual les proporciona una importante eficacia durante la automoción, donde su volumen y su peso, les convierte en una tecnología ideal, sin ser afectados por el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Otras dos características importantes a tener en cuenta dentro de este tipo de celdas, son la eliminación de productos corrosivos, debido al uso único y exclusivo de agua (H<sub>2</sub>O) y su baja susceptibilidad a la orientación de la pila (Gámez, 2010).

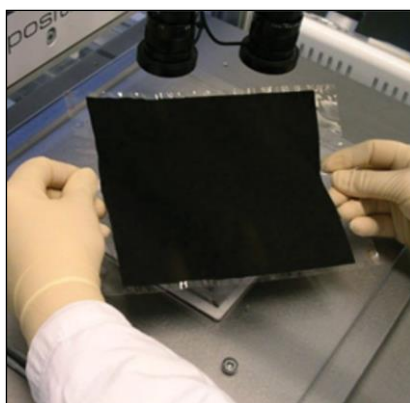
Esta tecnología, permite su fabricación, con una estructura de alto grado de compactación, tal como el grosor de una hoja de papel, de tal forma que dé lugar a una generación de varios miliamperios de corriente por cada centímetro cuadrado. Los prototipos más novedosos dentro de este grupo de pilas de hidrógeno, evitan la presurización del combustible a la hora de incrementar su eficiencia, siendo controlado el manejo de agua (H<sub>2</sub>O) en el sistema, para así evitar posibles derrames e inundaciones en los electrodos. De esta forma, se mantiene a su vez la humedad necesaria en el interior de la membrana, para que ésta permita la conducción iónica de las cargas positivas que provienen del ánodo (Arauzo, 2016).

Producto residual dentro de este tipo de celdas, se obtiene una importante cantidad de calor útil, el cual no puede a día de hoy ser utilizado en cogeneración, pero puede ser aprovechado en sistema calefactorios del propio vehículo, o de agua caliente (Arauzo, 2016).

Su investigación está dentro del campo en aplicaciones de obtención energética estacionaria, ya que se tratan de las más adecuadas a la hora de penetrar masivamente en el mercado. De esta manera, se prevén unas mayores expectativas en las próximas décadas, debido a que han sido probadas con un menor rango que los otros tipos de celdas y su eficacia es relativamente baja todavía, a pesar de que ya poseen importantes aplicaciones (Arauzo, 2016).



Figura N° 2.21 Ejemplo de una membrane electrode assembly (MEA)



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

La membrana es un poco más grande que los electrodos que se adjuntan. Los 10 cm<sup>2</sup> de membrana es típicamente de 0,05 - 0,1 mm de espesor, los electrodos son aproximadamente 0,03 mm de espesor, y la GDL es de entre 0,2 y 0,5 mm de espesor (Dicks & Rand, 2018).

Tabla N° 2.10 Los materiales típicos usados en las pilas de combustible

	Pilas de combustible de electrolito de polímero (PEFC)	Pilas de combustible alcalinas (AFC)	Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)	Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC)	Pilas de combustible de óxido sólido (SOFC)
Temperatura de funcionamiento (° C)	20-80	20-90	160-210	600-700	600-1000
Gas combustible	H <sub>2</sub> , alcohol	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO	H <sub>2</sub> , CO, C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>
oxidante	Aire, O <sub>2</sub>	Aire, O <sub>2</sub> (Sin CO <sub>2</sub> )	Aire, O <sub>2</sub>	Aire (+ CO <sub>2</sub> )	Aire
Materiales de electrolitos	membrana de intercambio catiónico	KOH solución	concentrado H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> solución	(Li, K) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ZrO <sub>2</sub> (Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) CeO <sub>2</sub> (Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) La (Sr) Ga (Mg) O <sub>3</sub>
Materiales de electrodo, electrocatalizador	Pt / C Pt-Ru / C Pt-Co / C	catalizador basado en Pt, Ni-Al, catalizador de metal de transición	catalizador basado en Pt	placa porosa a base de Ni	La (Sr) MnO <sub>3</sub> La (Sr) Co (Fe) O <sub>3</sub> , Ni - ZrO <sub>2</sub> (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Materiales componentes de la pila	Papel carbón, aleación resistente a la corrosión	Ni	placa de carbono, Teflon, SiC	aleación de Ni, acero inoxidable, LiAlO <sub>2</sub>	aleación a base de Cr, acero inoxidable, La (Sr) CrO <sub>3</sub>

Fuente: (Sasaki et al., 2016).

### 2.3. GLOSARIO DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Absorción:** El proceso por el cual un líquido o gas se introduce en los poros permeables de un material sólido (Dicks & Rand, 2018).

**Adsorción:** La adhesión de las moléculas de los gases, sustancias disueltas o líquidos a la superficie de sólidos o líquidos con los que están en contacto; distinguen de absorción, un proceso en el que una sustancia realmente penetra en la estructura interna de la otra (Dicks & Rand, 2018).

**Ánodo:** Un electrodo en el que pasa por un proceso de oxidación, es decir, la pérdida de electrones. En una pila de combustible, el ánodo es el electrodo negativo, donde se consume hidrógeno. Durante la electrólisis, el ánodo es el electrodo positivo en el que se desarrolla el oxígeno. En una batería secundaria (o celular), el ánodo es el electrodo positivo en la carga y el electrodo negativo en la descarga (Dicks & Rand, 2018).

**Catalizador:** Una sustancia que aumenta la velocidad de una reacción química (Dicks & Rand, 2018).

**Cátodo:** Un electrodo en el que un proceso de reducción, es decir, ganancia de electrones, está ocurriendo. En una pila de combustible, el cátodo es el electrodo positivo en el que se consume oxígeno. Durante la electrólisis, el cátodo es el electrodo negativo en el que se desprende hidrógeno. En una batería secundaria, el cátodo es el electrodo negativo en la carga y el electrodo positivo en la descarga (Dicks & Rand, 2018).

**Membrana:** Una capa de material que sirve como una barrera selectiva entre dos fases y sigue siendo impermeable a las partículas específicas, moléculas o sustancias cuando se expone a la acción de una fuerza de conducción. Algunos componentes se permite el paso por la membrana en una corriente de permeado, mientras que otros son retenidos por ella y se acumulan en la corriente de retenido. En una pila de combustible, la membrana actúa como un electrolito (intercambiador de iones), así como una película de barrera que separa los gases en el positivo (cátodo) y compartimentos (ánodo) electrodo negativo (Dicks & Rand, 2018).

**Placa bipolar:** Conductor denso que conecta eléctricamente el electrodo positivo en una celda a la negativa en la adyacente. Las células están conectados en serie y así permite que la tensión que se acumule. Las Placas bipolares también sirven como un medio para distribuir combustible o aire a los electrodos, para eliminar productos de reacción y para transferir el calor. Dependiendo del tipo de célula electroquímica, la placa puede estar hecha de carbono, metal o un polímero conductor (que puede ser un material compuesto de relleno de carbono) (Dicks & Rand, 2018).

**Sobrepotencial:** El cambio en el potencial de un electrodo a partir de su valor de equilibrio como resultado del flujo de corriente (Dicks & Rand, 2018).

## **2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL**

Con la utilización del hidrógeno como fuente de energía, aplicado en las Pilas de combustible, habrá una reducción del consumo de combustibles fósiles y una reducción de gases contaminantes, es decir una mejora ambiental, una mejora en la calidad de salud, tecnológica y social.

### **2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

- a) Reemplazando el consumo del petróleo y sus derivados por la aplicación del Hidrógeno como fuente de energía, en las pilas de combustible; habrá una reducción de emisión de gases de efecto invernadero y una mejora ambiental, económica, tecnológica y social.
- b) Al adoptar las tecnologías de las Pilas de combustible en el área automotriz, se podrá paulatinamente desplazar a los motores de combustión interna y ser reemplazadas por los vehículos de pilas de combustible FCV, continuando con las aplicaciones de los diferentes tipos de Pilas de combustible FCs en diferentes áreas tales como residencial, industrial, generación de energía eléctrica etc.
- c) El desarrollo de este análisis de aplicación de las pilas de combustible, provocara una influencia para el cambio de los paradigmas tecnológicos convencionales, y motivará a continuar con más investigaciones teóricas y experimentales.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo y diseño de la investigación

El enfoque de la presente investigación es de tipo cuantitativo – Hipotético deductivo. Dado que se obtendrá datos comparativos, eficiencias, valores experimentales (Popper, 1962).

El tipo de diseño de la investigación desarrollada es exploratorio y descriptivo, dado que el objetivo de la investigación es explorar, describir y analizar el funcionamiento y las aplicaciones de las Pilas de Combustible, también proporcionar en particular conceptos básicos de funcionamiento de las pilas de combustible de tipo PEMFC. También se realizará mediciones experimentales al módulo LUCAS-NÜLLE LabSoft UniTrain.

#### 3.2. Población y muestra de investigación

La población de la presente investigación son las Pilas de combustible.

#### 3.3. Ubicación y descripción de la población

Cabe mencionar que las pilas de combustible es una apreciación general, es decir que está en el mercado internacional, y aun no se ha consolidado en el Perú, pero al hacerse unas pruebas en la ciudad de puno a una pequeña Pila de combustible tipo PEM, se hace referencia a esta ubicación.

Departamento	: Puno
Provincia	: Puno
Distrito	: Puno
Altura	: 3810 m.s.n.m.
Humedad relativa	: 54 %
Temperatura media	: 8.4 °C

Fuente: Senamhi

#### 3.4. Técnicas e instrumentos para recolectar información

En cuanto a las técnicas para recolectar información, será según al tipo de investigación, primeramente en la búsqueda de información por diferentes medios, ya sean físicos, digitales o virtuales, para hallar variables o temas concernientes a la investigación, según el procedimiento que se ha aplicado se aprecia en la siguiente

tabla. En cuanto al laboratorio se ha utilizado un multímetro, una computadora que contiene el software del módulo para poder controlar los diferentes procesos.

*Tabla N° 3.1 Técnicas o procedimiento para recolectar información.*

Técnicas	Instrumentos
Búsqueda y recopilación de información de tesis	Repositorio UNAP, RENATI, otros
Búsqueda y recopilación de información de libros	Biblioteca UNAP, otras bibliotecas e Internet
Búsqueda y recopilación de información de Artículos científicos, revistas e informes	Bibliotecas, paginas como: Spriger, Wiley, Redalyc, Dial net, Scielo, IEEE, Oxfordjournal, etc.

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

En cuanto a las técnicas para procesamiento de datos, no se utiliza algún instrumento en particular, dado que el tema es explicativo y analítico, por lo que no hay alguna medición directa en algún entorno físico. Empero, los análisis de datos recopilados se hacen por medio de gráficos de dispersión de líneas rectas, gráficos de columnas agrupadas, gráfico circular para muestra de proporciones y gráfico de barras. Contrastando las investigaciones de los diferentes autores. Para las pruebas de laboratorio se utiliza su propio software y un multímetro marca Prasek Premiun PR-85.

### 3.6. Tratamiento de datos

Para hacer un análisis y diseño de pilas de combustible se debe conocer, básicamente que comportamiento tiene en circuito abierto (OCV), que elementos la componen, que tipos de pila de combustible hay, y en que se especializan cada uno de estas, es decir las aplicaciones particulares que tienen, una vez

1. Comprensión del funcionamiento básico de una Pila de combustible.
2. Reconocimiento de las pilas de combustible y sus aplicaciones en el mercado internacional.
3. Análisis de datos y comparación con tecnologías convencionales.
4. Mediciones con multímetro en OCV y CCV al LabSoft UniTrain.
5. Cambio de paradigma tecnológico, unipersonal y social.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. PARADIGMAS TECNOLÓGICOS

##### 4.1.1. Introducción al cambio de paradigma automotriz

La industria automotriz, desde sus inicios, ha ido evolucionando constantemente, a nivel mundial ha tenido diferentes procesos y refinamientos, el ser humano siempre ha buscado su comodidad, eficiencia; satisfacer las necesidades que cada día percibía, a través de la historia se ha podido ver que el hombre cambió del caballo a el automóvil, para ello siempre hubo un cambio de paradigma, una forma de pensar, de ser percibir, de visión, enfoque.

Con los acontecimientos presentes sobre contaminación ambiental, hace falta una reforma de pensar, se necesita desplazar paradigmas antiguos para poder mejorar la calidad ecológica de nuestro entorno, y adoptar nuevos paradigmas, para hacer posible el ingreso de nuevas tecnologías, nuevos procesos, nuevas industrias y manufacturas etc., teniendo como referencia, que uno de los puntos estratégicos de ingreso a cambios, es una sociedad informada e influenciada por conceptos sólidos para un progreso tecnológico.

##### 4.1.2. Cambio de paradigma tecnológico en el automóvil

Debido a la evolución histórica del automóvil, tratando en particular sus formas de accionamiento de la base de desarrollo actual; se hará un análisis de las causas y fundamentos de la disminución de la sostenibilidad del actual paradigma tecnológico, ya que se tiene la necesidad y la presión de innovar en un cambio de paradigma; en consecuencia de la actual contaminación ambiental que se está dando y por el agotamiento de los recursos energéticos no renovables y teniendo como fuerte influencia de cambio de paradigma, la evolución tecnológica alternativa desarrollado hasta el 2018.

El accionamiento eléctrico, en los automóviles se está desarrollando de una manera más consolidada, tanto como los autos convencionales como los autos eléctricos están empezando a tener una competencia a nivel técnico, económico y ambiental, donde ya se habla de una madurez tecnológica y por consecuente de un desplazamiento de paradigmas tecnológicos en cuanto a coste y eficiencia del automóvil. Por historia sabemos que la primera movilidad que tuvo el hombre cuasi civilizado fue un caballo, donde a partir de ahí hubo constantes modificaciones y cambios de paradigma,

comenzando en que el caballo también podía llevar una carreta y ahí también se podía llevar a las personas, y pasar de un transporte unipersonal a un transporte público, que con el pasar del tiempo tendería a transiciones, por cuestiones de velocidad, comodidad, y nuevas tecnologías.

Para que haya un cambio de paradigma, debe surgir necesidades o problemas en una determinada área; todo inicio con ideas, conceptos teóricos, experimentación que llevo a cometer errores y mejoras continuas para el desarrollo de las tecnologías venideras, que se vieron en los años de 1890, problemas técnicos como el diseño de transmisiones que se resolvieron en gran parte por estos años, que demostraron la viabilidad técnica, con el fin de beneficios económicos, sociales y ambientales. Un ejemplo interesante de comparación de cambios tecnológicos es la siguiente: En 1900 en los EE.UU., tenían una demanda de venta de 1681 Automóvil de vapor (40%), 1575 vehículos eléctricos (38%) y 929 (22%) de los vehículos con motor de combustión interna; en los años posteriores a 1900, la competencia tecnológica se intensificó, con la facilidad de uso, velocidad, alcance, mantenimiento, seguridad y durabilidad fueron medidas de resultado importantes que se reflejó en las ventas en el año de 1905 Vehículos con motores de combustión interna (86%) y se limita a 1575 automóviles de vapor (7%) y 1425 vehículos eléctricos (7 %) fueron vendidos (Knappe, 2014, p. 143).

En los años posteriores, la potencia de un motor de combustión de combustibles fósiles que había ganado hasta ese entonces, se estableció como un nuevo paradigma tecnológico en esos años, que ya en 1913 ya estaba tomando mayor fuerza con la producción en masa iniciada por el pionero Henry Ford, donde varios autores señalan y los describen como “la primera revolución en la industria del automóvil” (Reichhuber, 2010, p. 22), donde Ford ofrece el modelo t, y se muestra en la siguiente figura:

*Figura N° 4.1 Modelo T automóvil presentado por Ford.*



Fuentes: (Knappe, 2014)



Que en 1908 el costo de este modelo era de 850 USD, y en 1916 su costo era mucho menor gracias a las nuevas tecnologías que habían desarrollado para la mejora de producción en serie o en masa, que era de 360 USD, se ve una gran diferencia de costo reducido de producción llevado a la venta, que para esto tuvo que haber grandes riesgos que correr de parte de los empresarios, cambiar de hacer carrozas para adaptarlas a los caballos a hacer motores y sistemas complejos para armar y ensamblar autos (Knappe, 2014); teniendo que dirimir diferentes tipos de inconvenientes espontáneos, para poco a poco llevarlo a una calidad y perfeccionamiento.

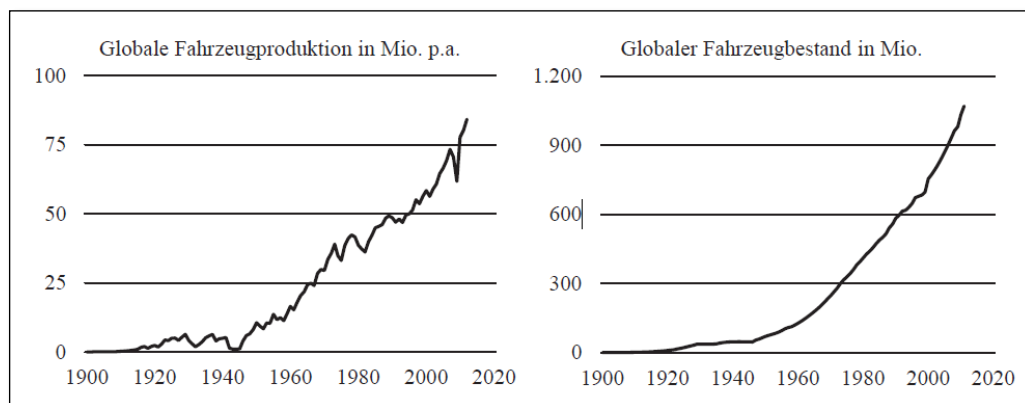
Empero, el creciente desarrollo tecnológico, permitió nuevas ideas de mejora de calidad, y complejidad, y se podía introducir conceptos de rendimiento, confort, seguridad, eficiencia de consumo de combustible, y suntuosidades que se presentaban; nuevas demandas o necesidades, nuevas ampliaciones paradigmáticas. Ante las nuevas vicisitudes que se vio en los años 1973 y 1979, ante esa crisis del costo del petróleo, fue que re-llevó a pensar en otras opciones tecnológicas, y nos referimos a accionamientos eléctricos; empero, no hubo un sólido sustento contra el paradigma de accionamiento convencional, y su régimen de un consumismo de combustibles fósiles como fuente primaria, debido a que a principios de la década de 1980, la madurez de los automóviles había llegado a puntos óptimos, tanto así que la demanda mundial de automóviles había sobrepasado las expectativas de las industrias automotrices, dando lugar a una estabilidad de los autos de combustión interna (Knappe, 2014).

En 1970, entro al entorno competitivo el diésel, que fue creado en la industria automotriz Japonesa, con una filosofía innovada, que sería conocida como cultura Lean, que logro un éxito que se extendió por todo el mundo, que consistía en un enfoque constante en la eficiencia, para evitar desperdiciar y optimizar el uso de los recursos, incluyendo un requisito indispensable de una mejora continua en todas las áreas de la empresa y la cadena de valor (Knappe, 2014).

Esta filosofía contribuyo a una mejora en todos los aspectos que, hasta ese entonces se tenía o concebían como algo sólido, esta filosofía prohibía la clasificación de un estado ya alcanzado de optimo, a solo un punto temporal de optimo, que llevo a Ford a activar y reducir al mismo tiempo los inventarios y mejorar la prestación, justo a tiempo y justo en secuencia; llevando a una estandarización de productos, a usar sistemas de prevención y controles de calidad, llevando al aumento de una mejora en la calidad y la reducción del costo de producción (Knappe, 2014), en consecuencia Ford estaba logrando una industria más madura una ventaja tecnológica que competía y se imponía con sus estándares a una influencia internacional.

Así aumento la producción mundial de vehículos tal como se muestra en el siguiente gráfico, que data del periodo de 1900 al 2012, que constaba de 84 millones de unidades al año, la flota mundial creció a 1,1 mil millones de unidades (Knappe, 2014).

Gráfico N° 4.1 La producción de vehículos y las órdenes en el mundo 1900-2012.



Fuente: (Knappe, 2014)

Aunque el coche fue técnicamente evolucionado significativamente durante este período, el paradigma tecnológico de su unidad se mantuvo. Como antes, los motores alternativos convierten la energía de enlace químico de los combustibles (fósiles) en los procesos de ciclo termodinámico en energía cinética que transmiten a través del cigüeñal y la transmisión al eje de accionamiento para su funcionamiento y desplazamiento. Este paradigma sigue siendo sólido en estos tiempos, pero tras los diferentes cambios ambientales, nacen nuevas necesidades sanitarias, y así también desafíos que se tendrán que dilucidar y dirimir.

#### 4.1.3. Factores de cambio de paradigmas tecnológicos

En los siguientes párrafos se examinará, las causas de la disminución de la sostenibilidad del motor alternativo de combustión interna, como un paradigma que hasta ahora se ha sostenido sólidamente para la conducción de automóviles. Se consideran las consecuencias de la creciente demanda mundial de autos de combustión interna, tanto petroleros como gasolineros, y los efectos de la sobre explotación, desestabilización ecológica, ambiental, económica y social, estos aspectos conducen a la disminución de la sostenibilidad del paradigma actual de la tecnología de transmisión de automóviles (Knappe, 2014).

La demanda de energía mundial viene a ser la preocupación de muchos científicos. El aumento de la población mundial genera la necesidad de un capital natural mayor, cabe referir que la población mundial en 1830 todavía ascendía alrededor de mil millones de personas, durante los siguientes cien años, en 1930 de duplico a 2 mil millones de personas, en 1975 ascendía a los 4 mil millones, y se espera una proyección

de 8 mil millones de personas para el 2025 (Knappe, 2014, p. 149). Los efectos que ha creado la industrialización, más, el crecimiento de la población, se reflejan en una dimensión ambiental, social y económica; cuyo uno de sus resultados positivos que la industrialización ha provocado, fue el aumento de la prosperidad; empero, el aumento de la población también provocó un aumento de la demanda de energía, materia prima, recursos naturales, etc., de una manera muy heterogénea según el capital natural mundial.

En este contexto, estamos en un problema de exceso de consumo del capital natural, materia prima, y otros, que dará como resultado una escasez cada vez mayor, y hablando un poco más puntuales, pese a que se sigan encontrando yacimientos de combustibles fósiles, esta materia prima es finita; y su uso mundial viene provocando varias reacciones negativas por su uso masivo, uno de sus impactos negativos imperante, que se proyecta para el año 2100, es que la temperatura promedio de la tierra aumente de 2 a 6 °C (Eichelseder & Klell, 2008, p. 6); las consecuencias de este fenómeno, incluyen en particular el desplazamiento de las zonas de vegetación, condiciones climáticas extremas, desertificaciones por doquiera, derretimiento de glaciares, aumento del nivel del mar, peligros alimentarios y acuáticos, así como la extinción de plantas y animales (Gerl, 2002, p. 18), quizá también un inicio a la extinción de la humanidad, ya que dependemos totalmente de los recursos naturales de la tierra, para poder sobrevivir; dado que por consecuencia del óxido de nitrógeno y los clorofluorocarbonos y otros elementos repercuten contraproducentemente en la capa de ozono y esto será perjudicial para la mayoría de los organismos, incluyendo a las personas ocasionado por los rayos ultravioleta que provocará cáncer a la piel, y dañará el genotipo, entre muchos efectos negativos que se darán.

En resumen, se puede decir que los humanos causan un daño global, regional y local al quemar combustibles fósiles. Como representa una amenaza a los medios de subsistencia de las generaciones futuras, se debe poner en marcha un plan, para tratar de dirimir los efectos posteriores y considerar el paradigma actual como, insostenible y contraproducente, trazando una trayectoria a usos masivos a fuentes de energías renovables.

#### **4.1.3.1. Desestabilización ecológica**

Tras escrutar los efectos negativos que acarrea el uso de los autos de motor de combustión interna, atiborrando las calles de estos mismos, se tiene que la participación antropogénica de las emisiones mundiales de dióxido de carbono es de alrededor del 4%, de la cual aproximadamente el 19% es causada por el tráfico y aproximadamente

el 13% por el tráfico rodado (Wallentowitz, Freialdenhoven, & Olschewski, 2010, p. 5); quiere decir, que al haber un exceso del uso de autos a nivel mundial, estos representan una fuerte influencia en emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, y dióxido de azufre; el tráfico genera una contaminación imperante.

Además, el tránsito vehicular causa más de la mitad de todas las emisiones de monóxido de carbono y óxido de nitrógeno en todo el mundo y casi el 50% de las emisiones de hidrocarburos (Gerl, 2002, p. 18); en comprobaciones simples se puede ver las nieblas de humo en las ciudades metropolitanas, que cada vez son más espesas por la masividad de uso de los autos convencionales, provocando molestias respiratorias en los ciudadanos o transeúntes, que no solo quedara en molestias sino quizá en problemas o enfermedades respiratorias posteriores, y que no solo eso este efecto contribuye a el calentamiento global; una de las teorías más interesantes es que el aumento de la entropía siempre será positiva, ya que el pronóstico predice un aumento de vehículos, actualmente se cuenta con 1,1 mil millones y aumentara a 2,9 mil millones para el 2050 (Chamon, Mauro, & Okawa, 2008, p. 272).

Por lo tanto, queda decir que si el actual paradigma sigue vigente, sabiendo que la flota de vehículos sigue creciendo a nivel local, regional, y global, y que conduce a una expansión masiva de los efectos perjudiciales ecológicos; se compartirá la responsabilidad de acelerar el colapso del ecosistema global. El estado y la expansión de los efectos que deliberadamente se ha usado de la naturaleza, del medio ambiente; están causando axiomáticamente que la sostenibilidad del paradigma tecnológico convencional de los autos de combustión interna, Falle e impele a una propensión de desestabilización ecológica.

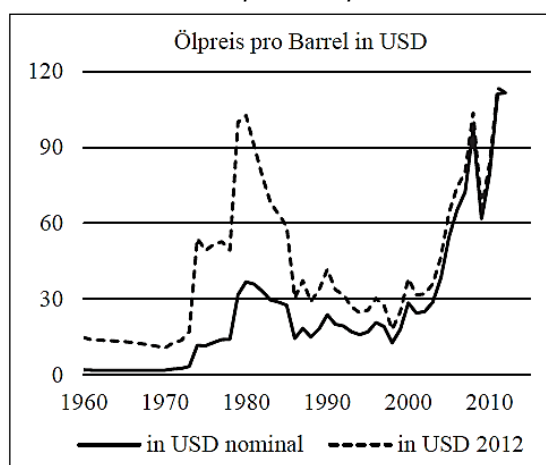
#### **4.1.3.2. Desestabilización económica.**

Se mencionó que uno de los beneficios de cambio tecnológico fue económico, ya que al haber más industrias, la revolución industrial automotriz, aumento el nivel de vida de los países industrializados; empero, tras medrar el inventario de los automóviles también aumento la demanda de combustible, y por ende provoco el aumento de su precio (VDA, 2013) cabe señalar que el patrón de uso de los combustibles fósiles, se podría clasificar como un consumo de capital no renovable, lo que es una preocupación al ser un recurso limitado y una población en crecimiento; la disponibilidad de energía asequible es un factor clave para poder hablar y considerar una estabilidad económica firme y constante.

La Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), juegan un papel importante para la distribución de las reservas del petróleo ya que cuenta con el 80% de las reservas de petróleo técnicamente Utilizables, que consiste de los países del medio

Oriente, África y América de Sur, y este está encargado también ser proveedor, que provoca un aumento de precios, con la meta, de reducir la cantidad ofrecida; en un punto los recortes de suministro de la OPEP en 1973 y 1979 desencadenaron una crisis petroleras, que llevaron los precios del petróleo a alturas sin precedentes (Knappe, 2014); se concluye que la dependencia del sistema económico mundial depende demasiado de la OPEP, ya que en el periodo de 1998 – 2004 el precio del petróleo aumento en un 170% (Hüttenrauch & Baum, 2008, p. 45). Sea que se tenga una entidad global que administre esto, hay efectos económicos inevitables que serán perjudiciales, una pregunta sería; ¿hasta cuándo el crudo será dominante en el mundo?; El siguiente gráfico ilustra la evolución del precio del crudo.

Gráfico N° 4.2 Precio de petróleo por barril en USD.



Fuente: (Knappe, 2014)

Por lo tanto, debe quedar sustentado a nivel económico que el paradigma convencional debe certificarse como una amenaza al crecimiento económico actual y futuro, y tomarse las medidas correctivas para neutralizar con otras tecnologías renovables dando cabida al Uso de Pilas de Combustible y otras alternativas.

#### 4.1.3.3. Desestabilización Social

Una sociedad económicamente desarrollada, es una sociedad con mayores posibilidades; comprende de una sociedad en la que el bienestar se retroalimenta y llega a la mayoría. En el caso particular del Perú tiene muchas taras, desde escándalos sobre sus autoridades judiciales y muchas deficiencias de los poderes del estado que lo constituyen; si ya hay una desestabilidad social auto inducida, pues las influencias de los mercados internacionales son más contundentes en afectar la economía peruana.

La sociedad global a lo largo de los años, se ve afectada por los cambios tecnológicos que transcurren, los gustos generacionales y la demografía influyen los cambios de

tecnologías. En el año de 1950 a nivel global la perspectiva que se tenía del adquirir un automóvil era como un símbolo de estatus clásico; empero, entre 1960 y 1970, la sociedad tenía una actitud más negativa hacia el simbolismo material llamada pos materialismo; en 1980 había un cambio un poco más brusco, ya que se definió para ese entonces, otros símbolos de estatus, relacionados con el estilo de vida, posesiones, grados, tener hasta ese entonces los conocidos como teléfonos inteligentes, que ha logrado mermar la importancia o prioridad de tener un automóvil de entre 18 a 29 años de edad (Bernhart & Zollenkop, 2011, p. 281).

Se ha notado también que, en los países económicamente desarrollados, está surgiendo un efecto de disminución de interés por la posesión de un automóvil, ya que la juventud tiene diferentes enfoques que la población madura o adulta (Knappe, 2014). En el caso particular de Perú, ha tenido un atraso muy notable tecnológicamente hablando. Según el diario el comercio no se tiene una referencia exacta de cuando haya habido por primera vez en Perú un automóvil, pero si se sabe que en 1899, el minero Arturo Wertheman trajo un Gardner Serpollet, este vehículo llegó a Huaraz traído desde Europa para ser armado y circular a más de 4.000 msnm.

El primer automóvil que pudieron ver los limeños fue en 1903, un locomobile a vapor, de origen Europeo; luego en 1905 llegó por primera vez un auto norteamericano marca Reo, empero, en un taller del Jr. Washington N°117, se diseñó y construyó un motor de 20 HP, y finalmente en 1908 estaba listo en Primer automóvil construido en América del Sur, que fue considerado como una joya de precisión mecánica, digna rival de los más modernos y perfeccionados motores Europeos, dado que su performance fue comparada con la de un Renault o un Brassiere, y fue considerado como los mejores coches a principios del siglo XX (Ísmodes, 2006), quien fue el magnífico creador, un ingeniero de minas, pero excelente en la ingeniería mecánica eléctrica Alberto Grieve (Rodríguez & Seiner, 2000).

*Figura N° 4.2 Primer carro contruido en Perú y el america latina por Alberto Grieve.*



Fuente: (Rodríguez & Seiner, 2000)



Cabe señalar, que todos los avances iniciaron con ciertas negativas, los primeros motores eran muy ruidosos y molestos a nivel social, luego fueron mejorando y su aceptación creció conforme a la demanda, continuo con la comodidad, velocidad, eficiencia, hasta llegar un punto limite, donde la sociedad empieza a incomodarse, por la contaminación que existe en las ciudades, por los humos expedidos de los autos convencionales el tráfico que has en las calles, los sonidos de las bocinas, una entropía que genera estrés que va en aumento en las calles. Una desestabilidad social que se percibe y que irá en aumento, por el uso de autos y tecnologías convencionales, la tecnología convencional ha llegado a sus puntos límite de eficiencia ambiental, dado que los motores modernos de gasolina y diésel tienen una eficiencia pico de 35% y 43% (Golloch, 2005, p. 1) dado que está limitada por las leyes naturales de termodinámica.

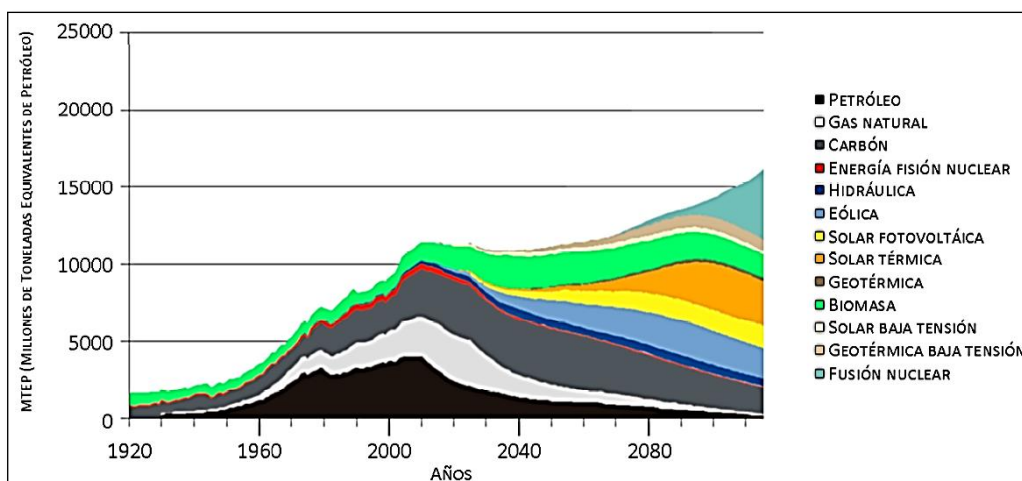
Uno de los restos considerables es la reducción del uso de los combustibles fósiles y sus derivados, y disminuir las emisiones de gases contaminantes, “El valor límite de las emisiones medias de dióxido de carbono de los vehículos nuevos es de un máximo de 95 g / km en 2020, que corresponde a un volumen de consumo de 3,6 litros de diésel o 4,1 litros de gasolina por cada 100 km, ya no es posible con el paradigma de conducción existente” (VDA, 2013, p. 68), se ha mejorado el aerodinamismo de los vehículos pero aun así la contaminación continúa; se debe considerar un cambio de paradigma por que el actual es insostenible, las Pilas de combustible ya están entrando en esta área, solo falta consolidarla y establecerla como un nuevo paradigma tecnológico ambientalmente aceptable lo que le lleva a una creciente presión para su innovación.

### **LAS PERSPECTIVAS DE PARADIGMAS TECNOLÓGICOS ALTERNATIVOS.**

Se necesita una visión de desarrollo sostenible, donde las exigencias hacia los automóviles incluyan estándares ambientales, y de sostenibilidad; reorientados hacia un sistema tecnoeconómico, tecnoambiental, que esté desconectado de un consumo de recursos insostenibles y limitados, cuyo punto de partida sea el de un suministro de energía sostenible, renovable, maduro etc., en la gráfico N° 4.3 se muestra una predicción de los siguientes alternativas globales de combustibles o fuentes de energía.



Gráfico N° 4.3 Predicción del comportamiento de los combustibles y desarrollo de las energías alternativas.



Fuente: (Gámez, 2010)

Vemos claramente en el gráfico N° 4.3, que el petróleo dejará de ser uno de los principales suministros de combustible para la producción de energía, y que dará mayor lugar a las energías renovables como la solar fotovoltaica, solar térmica, geotérmica, biomasa, solar baja tensión, geotérmica baja tensión, fusión nuclear, entre otras, cabe señalar que la obtención de energía mediante la fusión nuclear, es peligrosa, pero hasta ese porvenir las tecnologías se habrán consolidado y madurado.

Empero, **Las pilas o celdas de combustible** permiten promover una diversidad de energía y una transición hacia fuentes de energías renovables, debido a la variedad de combustibles que pueden ser usados en éstas tales como el hidrógeno, metanol, etanol, gas natural, etc... (Gámez, 2010, p. 80).

Las pilas de combustible, puede y está calificado para ser una potencial alternativa, para reemplazar a los motores de combustión interna, por accionamientos eléctricos, motores eléctricos y varias herramientas para la producción de energía eléctrica, energía mecánica, etc., ya que esta puede convertir directamente los combustibles mencionados en el párrafo anterior en energía eléctrica; y a diferencia de los demás, cuando el combustible es el hidrógeno pues las emisiones de gases contaminantes es casi nula, este proceso químico es una alternativa que no se puede dejar pasar por alto otra vez; por el contrario se debe empezar a invertir en investigaciones, diseños y la construcción de estos nuevos productos de tecnología de este siglo.

**CONSOLIDACIONES FINALES: CAMBIO DEL PARADIGMA TECNOLÓGICO CONVENCIONAL, HACIA UNA RENOVACIÓN Y ACTUALIZACIÓN TECNOLÓGICA PARA EL PERÚ.**

Para poder concluir sobre el paradigma, ya se tiene una noción de cómo inició un paradigma prometedor, consumista de energías no renovables; revolucionario en su tiempo, que empezó a madurar poco a poco, hasta llegar a una madurez tecnológica, una sinergia tecnológica; empero, también paradójicamente se llegó a puntos de dependencia de los combustibles fósiles, que provocaron crisis económicas mundiales, y no solo ellos, sino que también se percibió reacciones de contaminación ambiental, consecuentemente se habla del efecto invernadero, de un calentamiento global, de agujeros en la capa de ozono, de contaminación de recursos hídricos, y varios otros efectos contraproducentes.

Es tiempo de cambiar los paradigmas, el Perú tiene una capacidad pionera en materia prima, como también una sociedad pluricultural, y se sabe que para que una idea tecnológica pueda desarrollarse y que haya un mercado en cualquier tecnología, la sociedad es la que debe ser unos de los primeros en adoptar dichos productos. Cuando Grieve en 1908 construyó su carro Grieve, le propuso al hasta ese entonces el presidente Leguía para que pueda contar con un auspicio al gobierno y construir tres vehículos para la dirección de correos, y otros tres para la prefectura, la respuesta que dio dicho presidente fue “nosotros necesitamos de los productos de países avanzados y no experiencias con productos peruanos” (Ísmodes, 2006; Rodríguez & Seiner, 2000). Comentaristas e historiadores comentan que, si dicho presidente hubiera apoyado esa idea, tendríamos en nuestro país una industria automotriz como la de Toyota o Hyundai entre otros.

Lamentablemente se sigue teniendo esa idea, ese paradigma en nuestra sociedad peruana; desde las autoridades hasta los ciudadanos, esto es también lo que debemos de cambiar, para poder emerger de este letargo en el que estamos tecnológicamente; necesitamos desarrollar productos tecnológicos de nuestra manufactura, tratar de ponernos a la vanguardia, madurar económicamente y tecnológicamente, donde el gobierno debe invertir en los investigadores peruanos, y no decir como aquel presidente dijo: “necesitamos productos de países avanzados”; acaso nosotros no tenemos la capacidad de hacer tecnología, de mejorar algún producto, de evolucionar y revolucionar tecnológicamente; claro que si se puede, pero depende del gobierno y de la sociedad el que se pueda efectivizar y consolidar esta idea.

Las Pilas de combustible es una interesante idea, que tuvo altibajos, pero que en la actualidad hasta el 2018, está madurando aún más, en transporte público, en industrias, en el hogar, en el sector de electricidad entre varios, que se debe seguir investigando y tratando de adoptar estas tecnologías para nuestro país y como también considerar

localmente en seguir creciendo de manera más explícita y porque no desarrollar en la ciudad de Puno proyectos pioneros de desarrollo e investigación sostenible. Que traerá desarrollo, trabajo y beneficios multidisciplinarios.

Iniciando en empezar diferentes investigaciones, tanto teórica y experimentales, empezando en entender básicamente el funcionamiento y comportamiento que tiene una pila de combustible del cual trataremos de describir y desarrollar en el siguiente tema.

## 4.2. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE

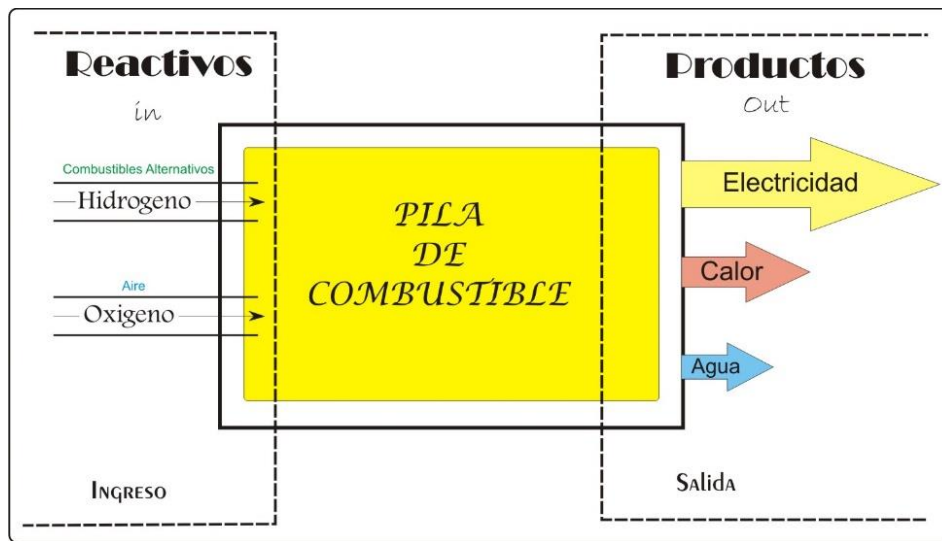
### 4.2.1. REACCIÓN Y ECUACIONES BÁSICAS DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE

Como se tiene un preámbulo de que las pilas de combustible funcionan gracias a una reacción química, se considerará involucrar temas con respecto a termodinámica, recordando palabras como, entalpía ( $h$ ), entropía ( $s$ ), variación ( $\Delta$ ); en temas de química, reacciones químicas, energía, energía libre de gibbs ( $g$ ) o la función de Gibbs, la función de Helmholtz ( $a$ ), poder calorífico ( $h_c$ ), valor calorífico, etc. Una de las palabras más interesantes que podemos resaltar y describir es la palabra **exergía** (Dicks & Rand, 2018); que en el desarrollo de las pilas de combustible ha tomado una mayor importancia.

La exergía o también llamada disponibilidad, viene a ser el trabajo útil máximo que puede obtenerse del sistema en un estado y un ambiente especificado (Cengel & Boles, 2012, p. 427), u otro enfoque también es considerado como la energía liberada o absorbida en un proceso reversible a presión constante y temperatura constante, como también el trabajo mínimo ( $P$ =constante) requerido para conducir una reacción química, y que la **energía libre de Gibbs** se considera como una cantidad que se puede utilizar para determinar si una reacción es termodinámicamente viable o no es viable (Dicks & Rand, 2018, p. 27).

La energía libre de gibbs o la ecuación de gibbs viene a ser  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , donde “ $\Delta H$ ” viene a ser la variación de entalpía, “ $\Delta S$ ” viene a ser la variación de entropía entre los reactivos y productos, y “ $T$ ” viene a ser la temperatura absoluta. Continuando con las pilas de combustible a continuación se muestra en la figura el ingreso de los reactivos tales como el hidrógeno y oxígeno, los productos de la reacción química que vendría a ser electricidad directa, calor y vapor de agua que estas puedes ser aprovechadas con una alta eficiencia (Dicks & Rand, 2018).

Figura N° 4.3 Comportamiento básico de una Pila de combustible.

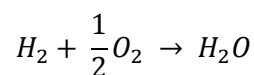
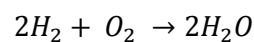


Fuente: Elaboración propia

En la ecuación de Gibbs, tanto como la entalpia y la entropía son desconocidos, pero la temperatura y la presión se pueden trabajar en condiciones estándar, según la IUPAC, se conoce como standard temperature and pressure (STP), donde se considera una temperatura de 273.15 °K, y una presión de 1 bar, también hay una temperatura ambiente y presión estándar (SATP) que es de 298.15 °K y 1 bar de presión; en consecuente tendremos una función de Gibbs de formación estándar  $G_f^\circ$  en la pila de combustible, al cambio en la energía libre de gibbs de formación  $\Delta G_f$ , que genera energía eléctrica liberada por la célula de combustible será la diferencia entre la energía libre de Gibbs de formación de los productos y la energía libre de Gibbs de formación de los reactivos (Dicks & Rand, 2018); i.e.

$$\Delta G_f = G_f(\text{productos}) - G_f(\text{reactivos}) \tag{4.1}$$

La reacción básica química que ocurre en una célula de combustible es (Dicks & Rand, 2018):



Donde tenemos los reactivos de 1 mol de  $H_2$  y  $\frac{1}{2}$  mol de  $O_2$ , cuyo producto es 1 mol de  $H_2O$ , entonces

$$\Delta G_f = G_f(\text{productos}) - G_f(\text{reactivos})$$

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(\bar{g}_f)_{O_2} \tag{4.2}$$

La energía libre de Gibbs de la formación no es constante (Dicks & Rand, 2018), ya que varía según al estado y también a la temperatura, en la siguiente tabla N°4.1, veremos algunos datos del comportamiento de la energía libre de Gibbs de la anterior reacción.

Tabla N° 4.1  $\Delta\bar{g}_f$  para la reacción  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$  a varias temperaturas

Form of water product	Temperature (°C)	$\Delta\bar{g}_f$ (kJ mol <sup>-1</sup> )
Liquid	25	-237.2
Liquid	80	-228.2
Gas	80	-226.1
Gas	100	-225.2
Gas	200	-220.4
Gas	400	-210.3
Gas	600	-199.6
Gas	800	-188.6
Gas	1000	-177.4

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Para poder continuar debemos recordar la constante de Faraday, donde referiremos que un mol de cualquier sustancia siempre tiene el mismo número de entidades, de modo que un mol de electrones tiene  $6.022140857 \times 10^{23}$  electrones, la carga es  $N_A e^-$ , donde  $e^-$  es  $1.60217662 \times 10^{-19}$  coulombs la carga en un electrón; ésta cantidad se llama constante de Faraday que en general se describe como:  $F = N_A e^- = 96485$  coulombs (Dicks & Rand, 2018), y también sabemos que son  $2N_A$  electrones que circulan alrededor del circuito externo para cada molécula de agua producido y cada molécula de hidrógeno utilizado en una célula de combustible de hidrógeno, por lo tanto ello nos lleva a la siguiente ecuación sabiendo que la carga de un electrón es negativo:

$$-2 N_A e^- = -2F \tag{4.3}$$

Si “V” es la tensión de la pila de combustible, y el trabajo eléctrico está en joule (J), gastada en el movimiento de la carga alrededor del circuito, tendremos la siguiente formula (Dicks & Rand, 2018):

$$\text{Trabajo Eléctrico Hecho} = \text{carga} * \text{voltaje} = -2FV \tag{4.4}$$

Considerando si el sistema es termodinámicamente reversible i.e. no tiene pérdidas de energía, entonces el trabajo eléctrico hecho será igual a la energía libre de Gibbs liberado por la reacción de la célula de combustible (Dicks & Rand, 2018, p. 30):

$$\text{Trabajo Eléctrico Hecho} = \Delta\bar{g}_f \tag{4.5}$$

$$\Delta\bar{g}_f = -2FV_r \tag{4.6}$$

$$\text{Despejando } V_r \text{ tendremos que... } V_r = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F} \quad (4.7)$$

Donde “ $V_r$ ” será el voltaje reversible, a través de los terminales de la celda cuando no hay flujo de corriente neta, que vendría a ser la tensión de cada celda estándar cuando el combustible sea hidrógeno; la tensión reversible en condiciones estándar  $V_r^\circ$  (STP) es de 1.229 V a 25 ° C, si la celda funciona a una temperatura de 200 °C,  $\Delta\bar{g}_f$  a esa temperatura según la tabla N° 4.1 será -220.4 KJmol<sup>-1</sup> y  $F = 96485$ ; entonces  $V_r$  tomara el siguiente valor (Dicks & Rand, 2018):

$$V_r = \frac{220.4 * 10^3}{2 * 96485} = 1.1422 = \mathbf{1.14 V}$$

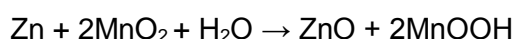
Este resultado está dado en condiciones estándar e idealmente, considerando al hidrógeno como combustible puro; empero en lo real o la práctica, la tensión será inferior, debido a las pérdidas que más adelante analizaremos.

También se considera a otros combustibles o tipos de pilas de combustible, para estos casos, la formula será casi similar y se introducirá  $z$  como variable, será de la siguiente forma (Dicks & Rand, 2018):

$$V_r = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{zF}$$

Donde  $z$  es el número de electrones transferidos por cada molécula de combustible, como ejemplo tendremos los siguientes valores ideales que será para una célula alcalina con electrodos de zinc y dióxido de magnesio, considerando  $\Delta\bar{g}_f = -277$  KJ mol<sup>-1</sup>,  $z = 2$  electrones, en un circuito abierto de tensión (OCV) (Dicks & Rand, 2018).

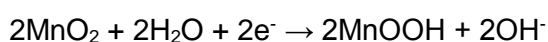
Reacción global de la célula en esta batería puede expresarse simplemente por (Dicks & Rand, 2018):



En el electrodo negativo de la reacción se puede dar como:



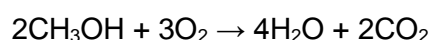
En el electrodo positivo:



Entonces la tención será:

$$V_r^\circ = \frac{277 * 10^3}{2 * 96485} = 1.44 \text{ V}$$

Otro ejemplo tendremos a una celda de combustible de metanol, con los datos ideales de  $\Delta\bar{g}_f = -698.2 \text{ KJ mol}^{-1}$ , serán 12 los electrones que pasen por el circuito i.e. serán 6 electrones por cada molécula de metanol  $z=6$ , la reacción será la siguiente y la tensión será (Dicks & Rand, 2018):



$$V_r^\circ = \frac{698.2 * 10^3}{6 * 96485} = 1.21 \text{ V}$$

#### 4.2.2. EFICIENCIA Y LÍMITES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

En temas de ingeniería la eficiencia es un tema trascendental, para poder optar, viabilizar, considerar, mejorar, concretizar, una idea, diseño, proyecto etc., ya que en este punto vemos teórica y prácticamente cuanto es el aprovechamiento de energía que se invierte y que realmente se utiliza; y cuando hablamos de Pilas de combustible, se necesita saber cuánto de la fracción de energía del combustible se convierte realmente en energía eléctrica útil de salida. Durante muchos años se ha dicho teóricamente que la eficiencia de una pila de combustible a comparación con la eficiencia de los motores de combustión convencional es mucho mayor, dado que los motores térmicos están sujetos y limitados a los principios de Carnot, y esta idea teórica ha coadyuvado a desarrollar y mejorar las pilas de combustible, los autos FVC, entre muchas aplicaciones que se ven hasta el 2018.

Se le llama eficiencia térmica a La fracción de la entrada de calor que se convierte en salida de trabajo neto es una medida del desempeño de una máquina térmica (Cengel & Boles, 2012), y representa la siguiente ecuación:

$$\eta_{ter} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} \quad (4.8)$$

Donde " $W_{neto}$ " es el trabajo neto, " $Q_{entrada}$ " es el calor que ingreso.

La eficiencia para un motor térmico es la siguiente ecuación:

$$\eta_{motor\ termico} = \frac{W}{\Delta H} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (4.9)$$

Donde " $W$ " es el trabajo generado, " $\Delta H$ " es el calor de combustión, " $T_1, T_2$ " son las temperaturas absolutas con las que opera el motor térmico; cabe referir que en la práctica los motores térmico son irreversibles, por lo tanto su eficiencia es muy limitada,



y dependiente de los principio de Carnot como ya se mencionó, un ejemplo de aplicación se ve en una turbina de vapor, que funciona 773 K y una temperatura de salida de 373 K, entonces (Dicks & Rand, 2018):

$$\frac{773 - 373}{773} * 100 = 51.75\%$$

Para la célula de combustible la eficiencia ideal, bajo condiciones isotérmicas está dado por (Dicks & Rand, 2018):

$$\eta_{max} = \frac{W_{max}}{\Delta H} = \frac{1-T\Delta S}{\Delta H} \quad (4.10)$$

La eficiencia ideal que se presenta en una pila de combustible, por lo general está en un promedio de entre 60% - 70%; y aun hablando teóricamente en condiciones isotérmicas, puede llegar a un 100% en eficiencia, pero como sabemos en cuestiones reales o practicas eso es utópico, siempre habrá perdidas en el circuito, cuando está conectado al motor, al tren de potencia etc. Cuando hablamos de entalpia, sabemos que el valor de este no es constante, sino que depende del estado en el que se encuentre, la temperatura en la que se encuentra y depende del reactivo que sea, para este caso veremos una variación de oxidación del hidrógeno (Dicks & Rand, 2018):



Desde otra perspectiva según Kabza, las reacciones de las entalpias varían según el estado y otros puntos que más adelante se analiza; para tener un poco más claro se considera al producto de la reacción anterior para establecer como referencia que  $\Delta \bar{h}_f$  = HHV o LHV según al estado en que se encuentre el producto de la reacción de la siguiente manera (Kabza, 2015).

$$\Delta \bar{h}_{f_{H_2O(g)}} = LHV = -241.82 \text{ KJmol}^{-1}$$

$$\Delta \bar{h}_{f_{H_2O(l)}} = HHV = -241.83 \text{ KJmol}^{-1}$$

Al más alto valor de las entalpias de formación anterior se llamara, Mas Alto Valor de calentamiento (HHV), y al menor valor, Valor de Calentamiento Inferior (LHV), los valores que tomaran HHV y LHV, dependerán del tipo de combustible que se hará reaccionar. El Valor de calentamiento inferior por lo general se considera como la cantidad máxima de calor que se puede recuperar en el mismo aparato (Dicks & Rand,

2018); y el HHV se considerar como la eficiencia límite para una pila de combustible; la siguiente tabla tiene datos en respecto a lo mencionado.

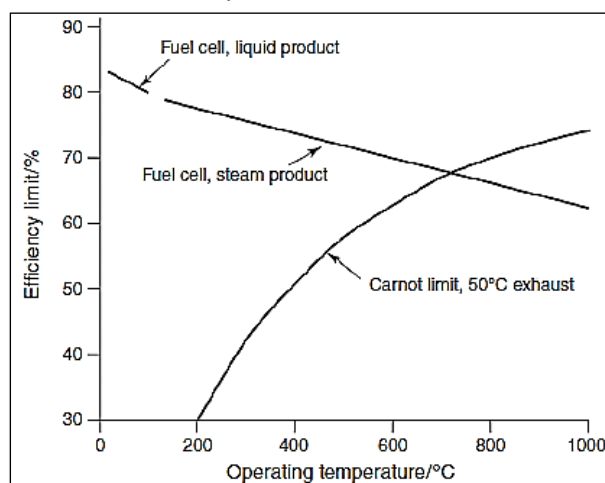
Tabla N° 4.2 Máximo voltaje de circuito abierto y límite de eficiencia termodinámica (HHV) para celdas de combustible de hidrógeno.

Form of water product	Temperature (°C)	$\Delta\bar{g}_f$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	Maximum open-circuit voltage (V)	Efficiency limit (HHV) (%)
Liquid	25	-237.2	1.23	83
Liquid	80	-228.2	1.18	80
Gas	100	-225.3	1.17	79
Gas	200	-220.4	1.14	77
Gas	400	-210.3	1.09	74
Gas	600	-199.6	1.04	70
Gas	800	-188.6	0.98	66
Gas	1000	-177.4	0.92	62

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

En el gráfico N°4.4, se muestra el comportamiento de la eficiencia de la pila de combustible ya sea que los productos de la reacción química sean en estado líquido o vapor, y se puede observar que a menor temperatura es mayor le eficiencia; empero la tensión o voltaje disminuye, y que en un ciclo de Carnot es a lo contrario a mayor temperatura es mayor la eficiencia.

Gráfico N° 4.4 Eficiencia máxima (HHV) de la celda de combustible de hidrógeno a presión estándar. A modo de comparación, el límite de Carnot se muestra para una temperatura de escape de 50 °C.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

### Eficiencia y voltaje

Si toda la energía del combustible de hidrógeno, es decir, el valor de calentamiento o la entalpía de la formación, se transformara en energía eléctrica, el voltaje estaría dado por (Dicks & Rand, 2018):

$$V_r = \frac{-\Delta\bar{h}_f}{2F} \quad (4.11)$$

Si los valores de la tensión vendrían a ser de 1.48V y 1.35V, considerando si es HHV y LHV, estos valores mencionados en el reglón anterior sería cuando la eficiencia de la pila de combustible ha alcanzado un 100%, o sea en un caso teórico, por lo que la real eficacia de la pila de combustible depende de la tensión real que esta puede ofrecer, como también se sabe que en todos los procesos ya sea en un motor de combustión pues no todo el combustible es utilizado, i.e. que en una pila de combustible el reactivo que ingrese en este caso el hidrógeno, este no será utilizado en la reacción química en su totalidad, sino que habrá moléculas transitorias, y ello conlleva a agregar un coeficiente de utilización del combustible ( $\mu_f$ ) o reactivo que veremos en la siguiente ecuación (Dicks & Rand, 2018):

$$\mu_f = \frac{\text{masa de combustible reaccionado en la celda}}{\text{masa de entrada de combustible a la celda}} \quad (4.12)$$

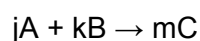
Que vendría a ser la relación entre la corriente entregada por la pila de combustible y la que se obtendría si todo el combustible reaccionara (Dicks & Rand, 2018), y con este dato se podría completar la ecuación de eficiencia de la célula de combustible con la siguiente ecuación (Dicks & Rand, 2018):

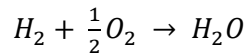
$$\eta = \mu_f \frac{V_c}{1.48} * 100\% \quad (4.13)$$

El valor de 1.48 solo es referencial, puede ser sustituido por otros datos como 1.25 como valor relativo con referencia de LHV, se ha llegado a un consenso a estimar  $\mu_f = 0.95$  que permite estimar de una manera relativamente precisa la eficiencia de una celda de combustible a partir de una medición directa y simple de su voltaje, cabe señalar que puede ser inferior, ya que es un dato que ayuda con fines experimentales (Dicks & Rand, 2018).

### INFLUENCIA DE LA PRESIÓN Y GAS DE CONCENTRACIÓN

El valor de la energía libre de Gibbs varía según a la temperatura en que se trabaje, así también de modo complejo influye la presión del reactivo y de su concentración, y cuando hablamos de presión se involucran principios termodinámicos, donde involucraremos también la ecuación de Nernst que consta en lo siguiente (Dicks & Rand, 2018):





$$\text{Donde... } a = \frac{P}{P^\circ} \quad (4.14)$$

$$\text{Considerando para el producto } H_2O... a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P^\circ_{H_2O}} \quad (4.15)$$

“A, B” serán los reactivos y “C” el producto, “j, k, m” serán los números de moles que acompañan según corresponde; tanto los reactivos y los productos tendrán una actividad asociada a la que llamaremos como “a”, donde tendremos para cada elemento i.e.  $a_A$ ,  $a_B$  y  $a_C$ , donde en general se vio que  $a = \frac{P}{P^\circ}$ , “P” será la presión parcial y “P°” será la presión estándar. Considerando el modelo de la ecuación de Nernst, tenemos la siguiente ecuación (Dicks & Rand, 2018).

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (4.16)$$

Donde “E” es el potencial corregido del electrodo, “E°” el potencial en condiciones estándar (los potenciales se encuentran tabulados para diferentes reacciones de reducción), “R” la constante de los gases, “T” la temperatura absoluta (escala Kelvin), “n” la cantidad de mol de electrones que participan en la reacción, “F” la constante de Faraday (aproximadamente 96500 C/mol), “Q” el cociente de reacción correspondiente (Dicks & Rand, 2018).

Las reacciones de los reactivos y los productos, van a modificar el valor de la energía libre de Gibbs de la reacción en general, por ende se usara los principios termodinámicos, para una adaptación con la ecuación de Nernst considerando los mismos principios, a través de una sinergia lógica de la siguiente manera (Dicks & Rand, 2018):

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^\circ - RT \ln \left( \frac{a_A^j * a_B^k}{a_C^m} \right) = \Delta \bar{g}_f^\circ - RT \ln \left( \frac{a_{H_2} * a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \quad (4.17)$$

El comportamiento de la energía libre de Gibbs, ya sea en su aumento o disminución depende en dos proposiciones; la primera consta en que si la actividad de los reactivos aumenta, entonces  $\Delta \bar{g}_f$  va a tender a ser más negativo, y esto quiere decir que se liberara más energía que podrá ser aprovechada; el segundo caso consta en que si la actividad o energía aumenta en los productos,  $\Delta \bar{g}_f$  se vuelve menos negativo, en consecuente se liberara menos energía, y esto influye directamente tanto en la eficiencia como en la tensión que puede brindar la pila de combustible (Dicks & Rand, 2018).

De la ecuación  $V_r = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F}$  que describimos en el punto 4.2.1., se modificara matemáticamente en la ecuación libre de Gibbs que hasta este punto llegamos a obtener, y obtendremos lo siguiente si se cambia las variables de "E, E°" y se remplazara por "V<sub>r</sub>, V<sub>r</sub>°" de la ecuación de Nernst (Dicks & Rand, 2018):

$$V_r = \frac{-\Delta\bar{g}_f^\circ}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{a_{H_2} * a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) = V_r^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{a_{H_2} * a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \quad (4.18)$$

La ecuación de Nernst, puede ser manipulado con fines académicos, teórico y prácticos para recopilación y obtención de datos de la influencia de diferentes parámetros sobre el funcionamiento y/o el rendimiento de una pila de combustible. Donde  $V_r^\circ$  está en OCV en condiciones STP, cuando tenemos al producto en estado de vapor, se puede suponer que este se comporta como gas ideal teniendo las siguientes disgregaciones (Dicks & Rand, 2018):

$$a_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P^\circ}, a_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P^\circ}, a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P^\circ},$$

De las cuales remplazaremos a la anterior ecuación obtendremos la siguiente ecuación (Dicks & Rand, 2018).

$$V_r = V_r^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{\frac{P_{H_2}}{P^\circ} * \left(\frac{P_{O_2}}{P^\circ}\right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{P_{H_2O}}{P^\circ}}} \right) \quad (4.19)$$

Para generalizar esta ecuación debemos tener en cuenta que no solo serán reactantes el hidrógeno y el oxígeno, sino que también pueden involucrarse otros reactivos que influirán en la reacción, por lo tanto  $P_{H_2} = \alpha P, P_{O_2} = \beta P, P_{H_2O} = \delta P$ ; considerando que en todos los casos las presiones serán presiones parciales, ya que a presión en los electrodos positivos y negativos serán prácticamente las mismas (Dicks & Rand, 2018, p. 38), y esto simplifica para el diseño de las pilas de combustible. Las variables de " $\alpha, \beta, \delta$ " serán las constantes que dependen de las masas molares, quedando la anterior ecuación de la siguiente manera (Dicks & Rand, 2018):

$$V_r = V_r^\circ - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{\alpha * \beta^{\frac{1}{2}}}{\delta} * P^{\frac{1}{2}} \right) = V_r^\circ - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{\alpha * \beta^{\frac{1}{2}}}{\delta} \right) + \frac{RT}{4F} \ln(P) \quad (4.20)$$

Esta ecuación queda como base para las diferentes reacciones que se pueden darse en casos experimentales, ya que tanto los reactivos como los productos pueden ser

mayores o menores, pero esto se puede adaptar a los distintos casos que se puedan estudiar.

Cuando la presión parcial del hidrógeno cambia, quiere decir que  $P_1 \neq P_2$ , entonces habrá una modificación que provocará una variación de tensión de la siguiente forma, aplicando propiedad de logaritmos (Dicks & Rand, 2018):

$$\Delta V = \frac{RT}{2F} \ln(P_2) - \frac{RT}{2F} \ln(P_1) = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (4.21)$$

## OXIDACIÓN DEL COMBUSTIBLE

Esta parte es muy interesante, dado que anteriormente mencionamos sobre la utilización del combustible, pues cuando hablamos de oxidación del combustible, en su comportamiento en una pila de combustible, ocurre que al pasar el aire por el cátodo, electrodo (+), el aire se consumirá y habrá una reducción de la presión parcial, del mismo modo ocurrida en el ánodo, electrodo (-), con el combustible; y por consecuente habrá un aumento de energía no utilizada adjunto al producto de la reacción (Dicks & Rand, 2018).

Lógicamente se pensaría que al ocurrir este efecto la tensión (V) en el ingreso será mayor, que la tensión en el egreso, dado que el oxidante será menor en las terminales de la célula de combustible. Empero gracias a la eficiencia de los electrodos que asegura la uniformidad de la tensión en la célula y las celdas, disiente con la lógica anterior, lo que si varía, es la densidad de corriente que se experimenta en toda la célula de combustible, ya que la densidad de corriente será mayor en el ingreso, porque la reacción será rica, mientras que en el tramo final será menor por la variación de presión (Dicks & Rand, 2018).

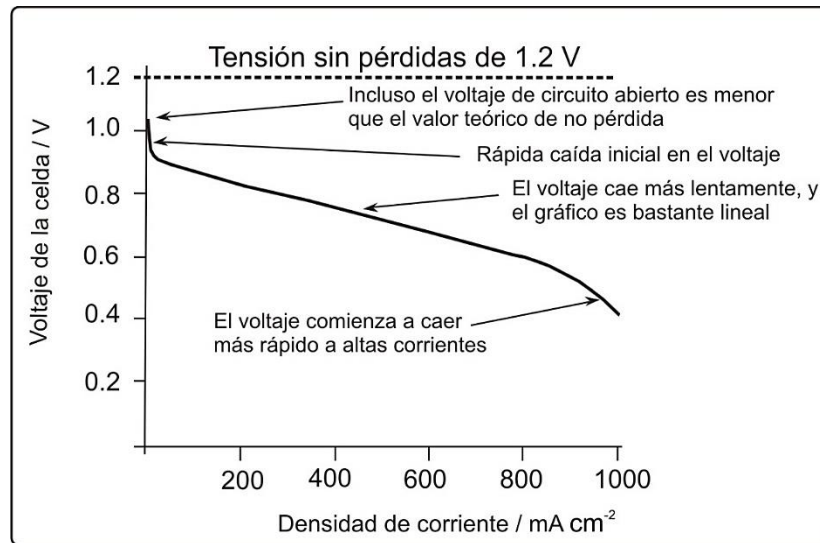
### 4.2.3. PÉRDIDAS QUE SE PRESENTAN EN UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE

Hasta ahora según lo descrito se ha modelado teóricamente e idealmente un circuito de tensión abierta, es decir que no está conectado a una demanda sino al vacío o abierto un OCV, y no se había hablado específicamente las pérdidas que hay en la reacción de una pila de combustible, teniéndose un valor teórico (en un OCV) de una tensión de 1.2 V, para una célula que opera con una temperatura de 100 °C, empero en la práctica se tiene una tensión de servicio, quiere decir que se tratará de un CCV, y la tensión de 1.2V será menor para este caso (Dicks & Rand, 2018).

Cuando hay una tensión de servicio o se conecta a una demanda de tensión, el comportamiento de la pila de combustible tiende a variaciones de tensión y densidad de

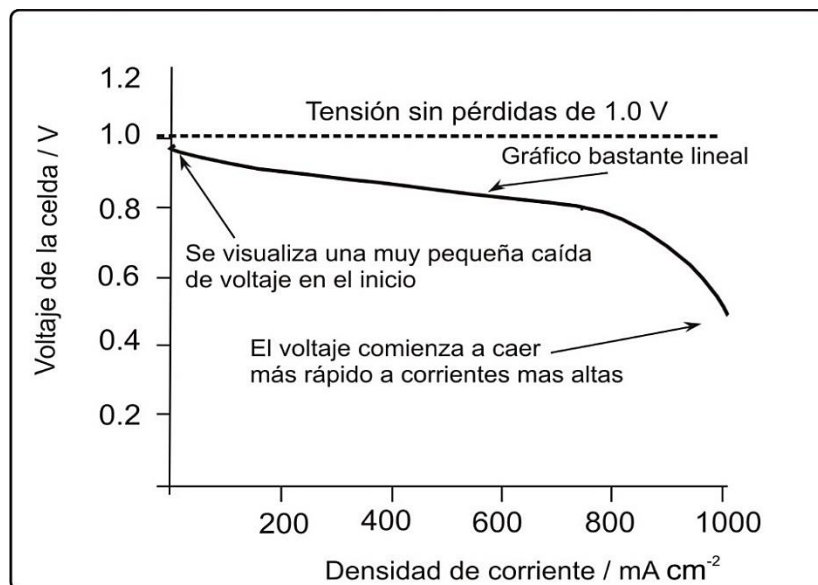
corriente distintos a los cálculos teóricos; para el caso de una pila de combustible que funciona con bajas temperaturas la caída de tensión inicial será muchas más rápida pero luego será lenta y más lineal, para la densidad de corriente mientras la tensión disminuye esta aumenta este veremos en el gráfico N°4.5. En otro caso, para una celda de combustible de óxido de solido (SOFC) que opera a una temperatura de 800 °C, el voltaje de un circuito abierto será casi similar al valor teórico, y la caída de tensión será muy pequeña en comparación con el anterior caso y este se ilustra los siguientes gráfico (Dicks & Rand, 2018).

Gráfico N° 4.5 Voltaje versus rendimiento de densidad de corriente de una pila de combustible típica que funciona a baja temperatura y presión de aire.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)  
Elaboración propia

Gráfico N° 4.6 Voltaje frente al rendimiento de densidad de corriente de una pila de combustible típica que funciona a aproximadamente 800 ° C y el aire a presión.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)



En condiciones estándar se tendrá también el electrodo de condiciones estándar (SHE), como referencia para cálculos teóricos y contrastes prácticos (Dicks & Rand, 2018).

#### 4.2.3.1. DESCRIPCIÓN DE PÉRDIDAS EN LAS CÉLULAS DE COMBUSTIBLE

También se conoce como irreversibilidades, como en cualquier circuito, siempre habrá pérdidas, y para las pilas de combustible se tendrá los siguientes (Dicks & Rand, 2018):

##### 1. Pérdidas por activación:

Quando se habla de motores de combustión interna, en el momento de la ignición del combustible puede darse por una chispa o por presión según sea el tipo; pero en las pilas de combustible no hay una pieza externa que provoque una reacción de inmediato, por lo cual al ingresar los reactivos se presentará una lentitud de reacción, y esta se da en la superficie de los electrodos, una fracción de la tensión generada se perderá en la conducción de la reacción química que transfiere los electrones hacia o desde el electrodo.

Quando se tiene un caso de sobretensión en cualquiera de los electrodos la pérdida por activación se modela de la siguiente manera (Dicks & Rand, 2018):

$$\Delta E_{act} = E - E_{eq} \quad (4.22)$$

Donde “E” será el potencial del electrodo medido y “E<sub>eq</sub>” será el potencial del electrodo de equilibrio teórico, se mencionó el caso de una sobretensión y también se añadirá la palabra sobrepotencial que considero y planteo en sus experimentos Julius Tafel para las reacciones electroquímicas; dicho comportamiento investigado por Tafel se muestra en el gráfico N°4.7, conocido también como la gráfica de Tafel, se observa que cuando la reacción es lenta el sobrepotencial aumenta rápidamente, en el caso de una reacción rápida el sobrepotencial no se dispara tan rápido como el caso de una reacción lenta (Dicks & Rand, 2018).

$$\Delta E_{act} = a \log \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (4.23)$$

Donde “a” es una constante conocida como la pendiente de Tafel, “i” es la densidad de corriente, “i<sub>0</sub>” es densidad de corriente de intercambio, donde el sobrepotencial comienza a manifestarse, la reacción en el electrodo de oxígeno de una membrana de intercambio de protones o de pilas de combustible de electrolito ácido se visualiza de la siguiente manera (Dicks & Rand, 2018):

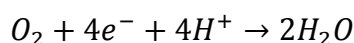
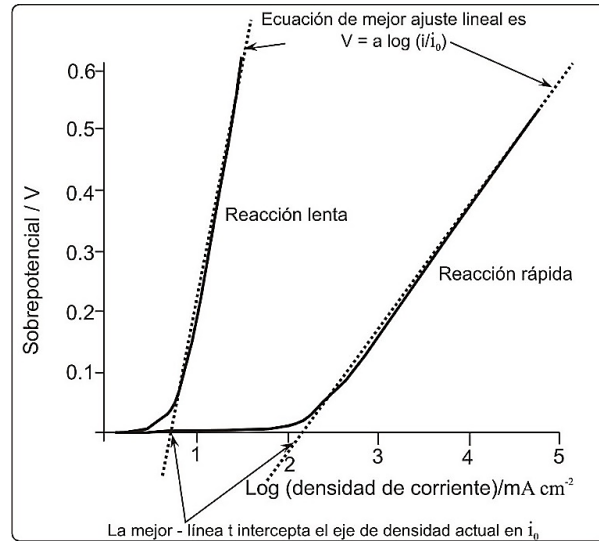


Gráfico N° 4.7 Tafel parcelas para reacciones electroquímicas lentas y rápidas.



Fuente: (Dicks &amp; Rand, 2018)

Si el valor de  $i_0$  es alta, entonces se podría decir que la superficie del electrodo será más activa, lo que llevara a una baja pérdida de activación; si el valor de  $i_0$  es baja, el sobrepotencial de activación será alta. La ecuación de Tafel se puede expresar en muchas formas a la ecuación anterior también se le puede escribir de la siguiente manera considerando un logaritmo natural (Dicks & Rand, 2018):

$$\Delta E_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (4.24)$$

Donde "A" tiene un valor mayor para una reacción química que es lenta, sin embargo la ecuación de Tafel solamente es válida cuando  $i > i_0$ , y la constante "A", también constante de Tafel estará compuesto de la siguiente manera (Dicks & Rand, 2018):

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (4.25)$$

Donde "T" es la temperatura en grados Kelvin (K), "R" es la constante universal de los gases ( $R=8.314\ 472\ \text{KJ}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ), " $\alpha$ " es el coeficiente de transferencia de carga, que es la proporción de la energía eléctrica aplicada que se aprovecha en el cambio de la velocidad de una reacción electroquímica, cuyo valor depende de la reacción implicada y el material utilizado para el electrodo que debe estar en el intervalo de 0-1.0 para el electrodo del hidrógeno, en promedio se tiene que el valor de  $\alpha$  es aproximadamente 0.5 para una amplia variedad de materiales de electrodos (Dicks & Rand, 2018, p. 48), en el electrodo del oxígeno el coeficiente de transferencia de carga esta entre 0.1 – 0.5 en la mayoría de las circunstancias (Dicks & Rand, 2018).

Una de las claves para que el efecto de activación del sobrepotencial sea lo más bajo posible es controlar el " $i_0$ " ya que esta variable puede variar en varios

órdenes de magnitud, además esta variable está influenciada por varios parámetros distintos del material utilizado para el electrodo. La densidad de corriente de canje es crucial en el control de la actuación de un electrodo de pila de combustible, además se podrá reorganizar las anteriores ecuaciones para describir las corrientes de la celda como una función de la tensión aplicando propiedades logarítmicas a la forma exponencial de la siguiente forma (Dicks & Rand, 2018):

$$i = i_0 \exp\left(\frac{2\alpha F \Delta E_{act}}{RT}\right) \tag{4.26}$$

Teniendo dicha forma, mediante la ecuación de Butler – Volmer se expresara plenamente la siguiente ecuación.

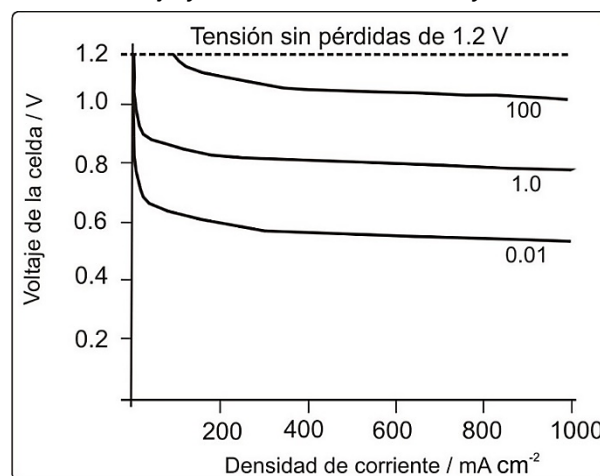
$$i = i_0 \left( \exp\left(\frac{n\alpha_a F \Delta E_{act}}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-n\alpha_c F \Delta E_{act}}{RT}\right) \right) \tag{4.27}$$

Donde “n” es el número de electrones transferidos en la reacción electroquímica “ $\alpha_a$  y  $\alpha_c$ ” son los coeficientes de transferencia de carga en los electrodos positivos y negativos. Para una célula de combustible que no tiene perdidas excepto para el sobrepotencial en un electrodo, la tensión de la celda estaría dado por (Dicks & Rand, 2018):

$$V_c = V_r - A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \tag{4.28}$$

Donde “ $V_r$ ” es la tensión de un circuito abierto, los gráficos de tensión de la célula “ $V_c$ ” frente a la densidad de corriente mediante la ecuación anterior los valores de  $i_0$  serán de 0.01, 1.0 y 100 mA cm<sup>-1</sup>, usando un valor típico de A de 0.06V y se visualiza en la siguiente figura (Dicks & Rand, 2018).

Gráfico N° 4.8 Voltaje de la célula frente a la densidad de corriente, considerando las pérdidas debidas sólo a la sobretensión de activación en un electrodo, para la densidad de corriente de canje y/o valores de 0,01; 1,0 y 100 mA cm<sup>-2</sup>.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Cuando los valores de  $i_o$  son altos, se tendrá altas tensiones en las celdas, pero si son valores bajos, se tendrá tensiones también bajas, como se puede observar en el gráfico N°4.8, y también se ve que si  $i_o$  es  $100 \text{ mA cm}^{-2}$  la caída de tensión es mínima, hasta que la densidad de corriente “i” sea mayor que  $100 \text{ mA cm}^{-2}$  (Dicks & Rand, 2018).

Los valores de  $i_o$  para el electrodo de hidrógeno a  $25 \text{ °C}$  para diversos sustratos metálicos están dados en la tabla N°4.2, cuyas mediciones se llevaron a cabo en los electrodos tipo lisas planas. La gran variación en las corrientes de canje indica que algunos metales son más catalíticamente activos que otros, empero, el valor de  $i_o$  para un electrodo es mucho mayor que las de la tabla N°4.3, debido a que la rugosidad del electrodo hace que la superficie verdadera sea muchas veces mayor que el largo por ancho nominal (Dicks & Rand, 2018).

La reacción de oxidación del hidrógeno (HOR) sobre el ánodo, es una reacción muy rápida y simple; por el contrario la reacción de reducción de oxígeno (ORR) en el cátodo, es muchas veces más lento debido a que es más complejo, debido a que implica varias etapas de reacción (Dicks & Rand, 2018, p. 50). Se consensa que el sobrepotencial en el ánodo es insignificante en comparación con el cátodo cuando el combustible es hidrógeno (Dicks & Rand, 2018).

Tabla N° 4.3 Valores de  $i_o$  para el electrodo de hidrógeno para varios metales en un electrolito ácido.

Metal	$i_o \text{ (A cm}^{-2}\text{)}$
Pb	$2.5 \times 10^{-13}$
Hg	$3 \times 10^{-12}$
Zn	$3 \times 10^{-11}$
Cd	$8 \times 10^{-10}$
Mn	$1 \times 10^{-11}$
Ti	$2 \times 10^{-8}$
Ta	$1 \times 10^{-7}$
Mo	$1 \times 10^{-7}$
Fe	$1 \times 10^{-6}$
Ag	$4 \times 10^{-7}$
Ni	$6 \times 10^{-6}$
Pt	$5 \times 10^{-4}$
Pd	$4 \times 10^{-3}$

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Para el caso de una célula de metanol directo de combustible (DMFC) el sobrepotencial en el ánodo no es despreciable. En estos sistemas la ecuación para la sobretensión total de activación sería la combinación de contribuciones de las dos polaridades de los electrodos, una ecuación de la siguiente forma (Dicks & Rand, 2018):

$$\text{Sobretensión de activación} = A_a \ln\left(\frac{i}{i_{oa}}\right) + A_c \ln\left(\frac{i}{i_{oc}}\right) \quad (4.29)$$

Donde  $i_{oa}$  y  $i_{oc}$  son las densidades de corriente de canje en el ánodo y el cátodo respectivamente (Dicks & Rand, 2018).

Reajustes para reducir las pérdidas por activación de sobretensión (Dicks & Rand, 2018).

- El aumento de la rugosidad de los electrodos.
- Aumento de la concentración del reactante y reactivo, oxígeno puro.
- El aumento de la presión, para mejorar la velocidad de reacción en la pila de combustible (FC).

Es importante considerar esto seriamente para el diseño y modelamiento de una FC, ya que influye a varias variables que compromete al desempeño y la eficiencia de las celdas de combustible.

2. **Perdidas por corrientes internas y cruce de combustibles:** en otras palabras, ésta pérdida se da porque una pequeña cantidad de combustible, se pasa a través del electrolito desde el ánodo hasta el cátodo, como también en menor cantidad los electrones pasan a través del electrolito, pero teóricamente son solo los iones los que deben pasar a través del electrolito a través de la célula; sin embargo, siempre ocurre filtraciones mínimas que no se consideran pero, que si se tienen en cuenta en el diseño de las Pilas de combustible (Dicks & Rand, 2018).

Se habló del coeficiente de utilización del hidrógeno, justamente también porque este efecto de cruce, hace que una pequeña fracción de hidrógeno se difunda desde el ánodo, a través del electrolito hasta el cátodo, haciendo que el hidrógeno reacción directamente con el oxígeno para ser consumido, pero sabemos que las reacciones que producen electricidad son a través de las cargas de los iones y los electrones, quiere decir que al pasar el hidrógeno al cátodo pues no generará ninguna corriente; por lo tanto solo se considerará como un desperdicio de combustible a esto se le llama cruce de combustible (Dicks & Rand, 2018). En el caso anterior se consideró solo a las pérdidas de activación sobrepotencial, para este caso también se usara esa misma ecuación.

$$V_c = V_r - A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right)$$

Para una PEMFC, que opera aproximadamente a 30 °C, y el uso del aire a presión atmosférica, los valores razonables de los parámetros de la ecuación

anterior son para  $V=1,2$  V;  $A=0,06$  V y  $i_0=0,04$  mA cm<sup>-2</sup> y se observa la siguiente tabla. PEMFC tensiones a bajas densidades de corriente (Dicks & Rand, 2018).

Tabla N° 4.4 PEMFC tensiones a bajas densidades de corriente.

Densidad de Corriente mA cm <sup>-2</sup>	Voltaje (V)
0	1,20
0,25	1,05
0,5	1,01
1,0	0,97
2,0	0,92
3,0	0,90
4,0	0,88
5,0	0,87
6,0	0,86
7,0	0,85
8,0	0,84
9,0	0,83

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Elaboración propia

Debido a las corrientes internas, la densidad de corriente no es cero, como se puede apreciar en la tabla N°4.1, cuando es cero teóricamente la tensión en la celda alcanza un valor de 1.2 V, pero eso es casi imposible; cuando la densidad de corriente toma el valor de 1.0 mA cm<sup>-2</sup> en una pila de combustible PEMFC, la tensión o voltaje de la celda es de 0.97 V se aprecia una reducción de más del 19% con respecto al valor teórico, en un circuito abierto, y también se puede observar que mientras aumenta la densidad de corriente, disminuye el voltaje pero de una forma paulatina que ya se vio gráficos anteriores (Dicks & Rand, 2018).

La medición insitu de este tipo de pérdida de cruce de combustible, no es fácil, empero, se trata de maneras empíricas que consta en medir tanto la masa de ingres con las masa de salida, esto en pequeñas pilas de combustible, con medidores de flujo, conteo de burbujas etc., un ejemplo que se puede considerar para una experimentación sería teniendo este dato de una PEM de área de 10 cm<sup>2</sup> que podría tener el aproximado de consumo de hidrógeno de 0.0034 cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, a temperatura y presión normal, que según la ley de Avogadro el volumen de 1 mol de cualquier gas es 2.24 x 10<sup>4</sup> cm<sup>3</sup> en STP, por lo tanto, haciendo operaciones entre estos datos tendremos que (Dicks & Rand, 2018):

$$1 \text{ mol} \rightarrow 2.24 \times 10^4 \text{ cm}^3$$

$$X \text{ mols} \rightarrow 0.0034 \text{ cm}^3$$

Tendremos 1.5179 x 10<sup>-7</sup> mol s<sup>-1</sup>, en otras palabras es lo que se usa de hidrógeno en un segundo, la siguiente ecuación muestra la tasa de uso del

combustible hidrógeno en una sola célula “1” relación de la corriente (Dicks & Rand, 2018).

$$\text{Consumo de Gas} = \frac{I}{2F} \text{ mol s}^{-1} \tag{4.30}$$

$$I = 2F * \text{consumo de gas (H)} = 2 \times (9.65 \times 10^4) \times 1.5179 \times 10^{-7}$$

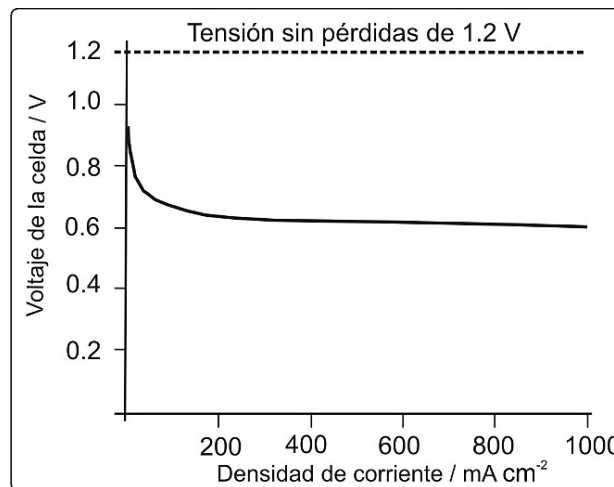
$$I = 0.0292 = 29 \text{ mA}$$

Las pérdidas corresponden a una corriente de 29 mA suponiendo que el área de la celda es de 10 cm<sup>2</sup> la densidad de corriente será de 2.9 mA cm<sup>-2</sup> (Dicks & Rand, 2018, p. 53), y es la suma de la corriente equivalente de combustible perdido de cruce y la densidad de corriente interna real. Si “i<sub>n</sub>” es el valor de esta densidad de corriente interna, entonces puede refinarse en la siguiente ecuación.

$$V_c = V_r - A \ln \left( \frac{i + i_n}{i_0} \right)$$

Considerando los valores típicos para una celda de combustible de bajas temperaturas de funcionamiento, para V= 1.2 V, A = 0.06 V, i<sub>o</sub>=0.04 mA cm<sup>-2</sup>, i<sub>n</sub>= 3 mA cm<sup>-2</sup>, se tendrá una figura como la siguiente según el comportamiento de la densidad de corriente y la tensión de la celda (Dicks & Rand, 2018).

Gráfico N° 4.9 Voltaje de célula de combustible modelado utilizando sólo las pérdidas por cruce de combustible y pérdida por corriente interna.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

La importancia de la corriente interna es menor para las células de combustible de funcionamiento con altas temperaturas, porque el cambio de densidad de corriente “i<sub>o</sub>” es mucho mayor, por ende la caída inicial en el voltaje es menos dramática (Dicks & Rand, 2018).

3. **Pérdidas por resistencias, o pérdidas óhmicas:** en la rama de la electricidad, este término es muy conocido e importante en transmisión de corriente alterna; en las pilas de combustible también son importantes ya que si hay electrones en



circulación habrá una resistencia que tendrá que experimentar al pasar por una distancia y el material que lo constituye para dicho electrón, en caso de las células será el paso hacia los electrodos, las diversas interconexiones, resistencia al flujo de iones a través del electrolito, etc., donde la caída de tensión será linealmente proporcional a la densidad de corriente (Dicks & Rand, 2018).

Según a la ley de Ohm tendremos que:

$$\Delta V = I \times R = i \times r \quad (4.31)$$

La resistencia “R” será principalmente por el electrolito. Expresado en términos de densidad de corriente las unidades de “i” y “r”, serán mA cm<sup>-2</sup> y KΩ cm<sup>2</sup> (Dicks & Rand, 2018).

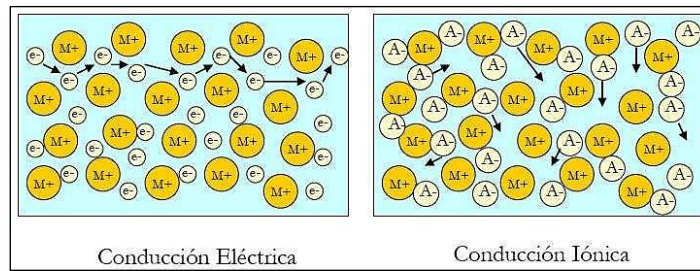
Los dos tipos principales de cargas que participan en este proceso son los electrones y los iones hidrógeno, cuyo movimiento a través de la pila va directamente asociado a lo que se conoce como Polarización Resistiva. Debido a que este tipo de pérdidas van directamente asociadas a la resistencia eléctrica en general, también se las suele denominar Polarizaciones Óhmicas, y contribuyen a ello tanto la parte eléctrica ( $R_{elec}$ ) como la parte iónica ( $R_{ionic}$ ). Reformando la ecuación sería (Almarza & Salueña, 2010):

$$\Delta V_{ohmica} = IR_{ohmic} = I * (R_{elec} + R_{ionic}) \quad (4.32)$$

El término  $R_{ionic}$  domina en la ecuación anterior, ya que por norma general, el transporte de carga a través de la membrana de intercambio de protones es más complicado que la circulación de electrones a través del resto de la pila de combustible (electrodos catalizados, capas de difusión, conexionado externo y unión entre celdas) (Almarza & Salueña, 2010).

Por otra parte, las diferencias entre la conducción eléctrica y la iónica son bastante notables. En la conducción eléctrica, los electrones tienen total libertad para moverse a lo largo y ancho del conductor, mientras que los iones se mueven entre los distintos espacios que quedan vacantes en la estructura cristalográfica, aprovechando así los defectos estructurales del material. Por lo tanto, la conductividad eléctrica de un material es mayor que la conductividad iónica. El fenómeno de polarización resistiva está en su mayoría dominado por la conductividad iónica, que depende a su vez de la temperatura y, como ya es sabido para las pilas PEM, del contenido en agua en el material conductor (Almarza & Salueña, 2010).

Figura N° 4.4 Esquema del funcionamiento de la conducción eléctrica y la conducción iónica.



Fuente: (Almarza & Salueña, 2010)

En cuestiones de diseño se debe tomar en cuenta esta pérdida para optimizar en la toma de decisiones para optar por el tipo de electrolito, electrodo etc., para todos los tipos de pilas de combustible, en especial atención con los SOFC.

- Optimización de diseño y haciendo que el electrolito sea lo más fino **Perdidas por concentración o masa de transporte de perdidas**: se debe a la variación de concentración tanto del reactante y del reactivo, en la superficie de los electrodos; el combustible reacciona con una cantidad molar de oxígeno mínima o el reactante con respecto a reactivo, dependiendo la situación, el percance estaría en el transporte del reactivo a la superficie del electrodo, he ahí que se considera como pérdida para consideración de funcionamiento de una pila de combustible (Dicks & Rand, 2018).

Se considera en un caso ideal que el reactante o reaccionante es oxígeno, pero por cuestiones prácticas es más el aire que se utiliza que en sí el oxígeno puro, por lo cual será evidente que habrá una ligera reducción de concentración de oxígeno para la reacción con el combustible, lo que provocara caídas de presión y eso a su vez caídas de tensión, para poder modelar una ecuación que represente a esta pérdida, se considera la ecuación de Nernst que se desarrolló anteriormente, para luego introducir la expresión de  $P_2 = P_1(1 - (i/i_l))$ , reemplazando de la siguiente manera (Dicks & Rand, 2018):

$$\Delta V = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

$$\Delta V = -\frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right)$$

Considerando que la tensión también depende de la presión en la reacción ( $P_1$  y  $P_2$ ), la ecuación anterior se puede usar para estimar la caída de tensión como resultado de la disminución de la presión causada por el consumo tanto del reactante y el reactivo. Donde “ $i_l$ ” será la densidad de corriente límite; el combustible se consume a una velocidad igual a la velocidad de suministro máximo, quiere decir que la densidad de corriente no puede elevarse por encima

de un valor que depende directamente del suministro que se le puede ingresar de combustible, sea hidrógeno u otros, además el ingreso de los reactivos tienen una velocidad o flujo de ingreso prediseñados o predeterminados que debe cumplirse (Dicks & Rand, 2018).

De modo más general tendremos la siguiente ecuación para pérdidas de transporte de masa. Donde “B” es un parámetro que depende de la celda de combustible y su estado de funcionamiento (Dicks & Rand, 2018).

$$\Delta V = - B \ln \left( 1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (4.33)$$

Si a B lo ajustamos a 0.05 V, e  $i_l$  a 1000 mA cm<sup>-2</sup>, se obtendría ajustes interesantes a las curvas de los graficos anteriores, pero claro en el caso hipotético de que el reactante sea oxígeno puro en vez de aire. También hay una relación empírica para cuantificar estas pérdidas (Dicks & Rand, 2018, p. 56).

$$\Delta V = m \exp(ni) \quad (4.34)$$

Donde “m” y “n” son constantes que tomaran los siguientes valores;  $m = 3 \times 10^{-5}$  V y  $n = 8 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup> mA<sup>-1</sup>, esta ecuación puede dar un buen ajuste para cuantificar las pérdidas de tensión que se mide experimentalmente y es ampliamente aceptado por los investigadores y desarrolladores de FC (Dicks & Rand, 2018).

### SUMATORIA DE PÉRDIDAS O IRREVERSIBILIDADES

Para concretizar este tema, se unirán todo lo que representa pérdidas cuantificables de lo descrito anteriormente para poder tener la siguiente ecuación (Dicks & Rand, 2018):

$$V_c = V_r - (i + i_n)r - A \ln \left( \frac{i+i_n}{i_0} \right) + B \ln \left( 1 - \frac{i+i_n}{i_l} \right) \quad (4.35)$$

- ❖  $V_r$  es la tensión de un circuito abierto.
- ❖  $i_n$  es la suma de densidades de corriente equivalente de cruce de combustible y la corriente interna.
- ❖ A es la pendiente de la línea Tafel.
- ❖  $i_0$  es la densidad de corriente de intercambio en el electrodo positivo si el sobrepotencial es mucho mayor que el del electrodo negativo, o es una función de ambas densidades de corriente de intercambio.
- ❖ B es el parámetro en la sobretensión de transferencia de masa
- ❖  $i_l$  es la densidad de corriente límite en el electrodo que tiene la densidad de corriente límite más baja.
- ❖ r es la resistencia específica de área (ASR).

Esta ecuación se puede modelar según los parámetros o datos siguientes, considerando que los valores de  $(i + i_n) \gg i_0$  y que la densidad de corriente limite no debe ser excedido  $(i + i_n) > i_l$ , para poder visualizar el comportamiento se dará la siguiente tabla de datos y luego se graficará el comportamiento con la ecuación general de todas las pérdidas descritas (Dicks & Rand, 2018).

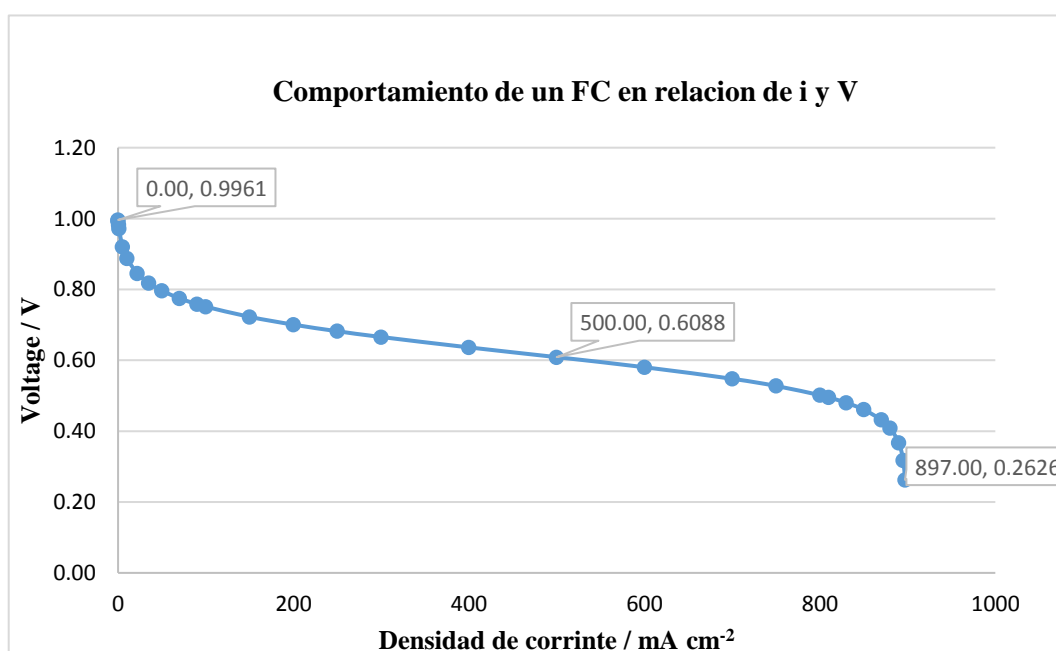
Tabla N° 4.5 Valores de ejemplo para los parámetros de la ecuación de sinergia de pérdidas para PEMFC y SOFC

Parámetros	Funcionamiento a	Funcionamiento a
	temperaturas bajas para PEMFC	temperaturas altas para SOFC
$V_r$	1.2	1.0
$I_n$	2	2
$r$	$30 \times 10^{-6}$	$300 \times 10^{-6}$
$i_0$	0.067	300
$A$	0.06	0.03
$B$	0.05	0.08
$i_l$	900	900

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)  
Elaboración Propia

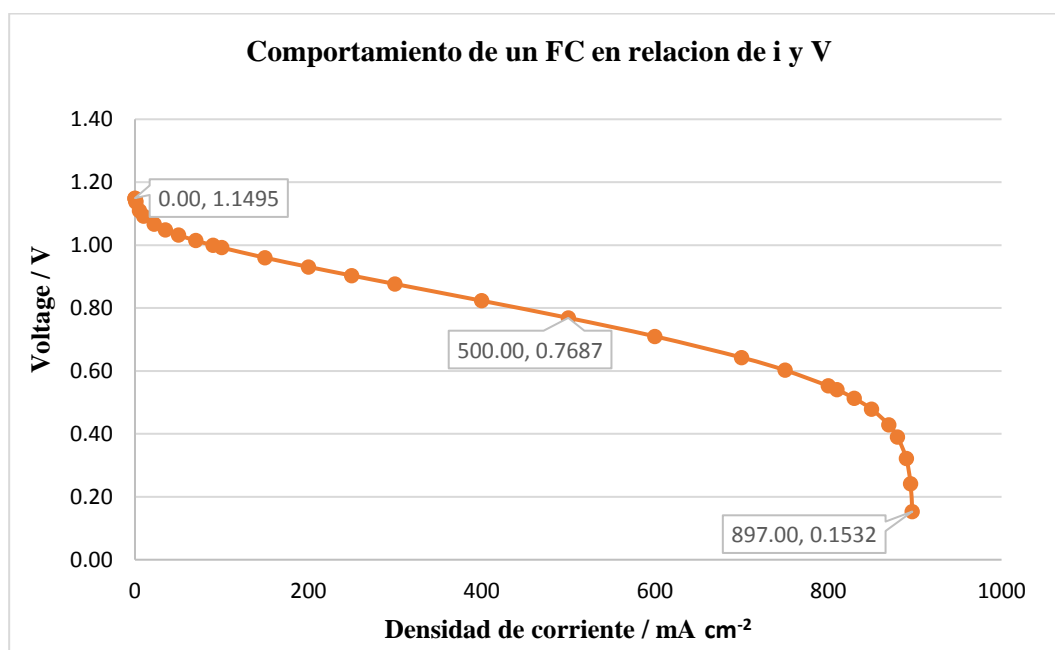
Continuando tendremos el comportamiento de estos datos con los datos aleatorios que puede tomar "i" en la siguiente figura tanto en funcionamiento a bajas temperaturas y de altas temperaturas (Dicks & Rand, 2018).

Gráfico N° 4.10 Comportamiento de la tensión y la densidad de corriente en condiciones de funcionamiento de bajas temperaturas PEMFC con Pérdidas.



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico N° 4.11 Comportamiento de la tensión y la densidad de corriente en condiciones de funcionamiento a altas temperaturas para una SOFC con Pérdidas.



Fuente: Elaboración propia.

Se ha tomado datos aleatorios para "i", desde cero hasta 897, donde claramente se puede visualizar, el comportamiento de la tensión, tanto para una PEMFC y una SOFC, donde destaca una mayor tensión alcanzada para una SOFC, que para una PEMFC; sin embargo la caída de tensión es más brusca en la cola para una SOFC que para una PEMFC.

#### 4.2.3.2 TÉCNICAS PARA DISTINGUIR IRREVERSIBILIDADES

Para poder visualizar en laboratorio estas pérdidas o comportamiento de las pilas de combustible, se tiene varias metodologías e instrumentaciones, que se describen un poco más explícito en el libro de Dicks & Rand, los cuales aquí solo las mencionaremos para tener referencia, estos son importantes para poder dar un seguimiento más comprometido y tener certeza al momento de diseñar o comprobar el funcionamiento de una celda de combustible. Se ha comprobado los distintos comportamientos de pilas de funcionamiento a bajas y altas temperaturas, y que cada uno tiene sus taras correspondientes, lo cual implica prever las medidas correctivas o atenuantes para poder optimizar su desdolvimiento en las diferentes aplicaciones que se le puede dar (Dicks & Rand, 2018).

En las Pilas SOFC, se a notado que las perdidas mas imperantes son las caidas de tensión ohmicas que las perdidas por activación, y esto se ha podido comprobar por las

experimentaciones que se han hecho en laboratorio que consistiría básicamente por las siguientes pruebas (Dicks & Rand, 2018):

- ✓ **Voltametría cíclica (CV)**; se usa más para investigar las reacciones electroquímicas en los electrodos individuales, mediante electros estándar o de referencia y una solución de electrolito.
- ✓ **Espectroscopia de impedancia de AC**; esta técnica resalta porque se puede aplicar directamente a una pila de combustible de trabajo en funcionamiento estándar, consta esencialmente en inyectar una pequeña variable de frecuencia de corriente alterna da través de la pila de combustible y la medición de la tensión de CA resultante a través de la célula, para determinar la impedancia de la Célula de combustible.
- ✓ **Interrupción de corriente**; que permite tener resultados cuantitativos de las pérdidas internas en las pilas de combustible, a través de interrupciones de tensión – corriente, sincronizado para una visualización osciloscópica.

#### PRODUCCIÓN DE CALOR DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

Si, toda la entalpía de reacción de una célula de combustible de hidrógeno se convierte en energía eléctrica, la tensión de salida sería de entre 1,25 V - 1,48 V (Dicks & Rand, 2018). Pero no es así, puesto que una FC, produce también calor, donde “n” será el número de células, “I” la corriente, y el calor generado en Watts será (Dicks & Rand, 2018):

$$\text{Tasa de calentamiento} = n * I * (1.25 - V_c) \quad (4.36)$$

En términos de energía eléctrica, en watts, esto se convierte en:

$$\text{Tasa de calentamiento} = P_e * \left( \frac{1.25}{V_c} - 1 \right) \quad (4.37)$$

#### 4.2.4. PILA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEMFC)

Del inglés “The proton-exchange membrane fuel cell, PEMFC”, también llamado, sólidos de pila de combustible de electrolito de polímeros (SPEFC) y sólido de pilas de combustible de polímeros (SPFC). La practicidad de utilización de las pilas de combustible tipo PEMFC, son muy recomendables ya que vimos anteriormente que funciona a temperaturas ambiente, quiere decir que la reacción de las membranas son un poco más rápidas debido a que no demanda más altas temperaturas (Dicks & Rand, 2018).

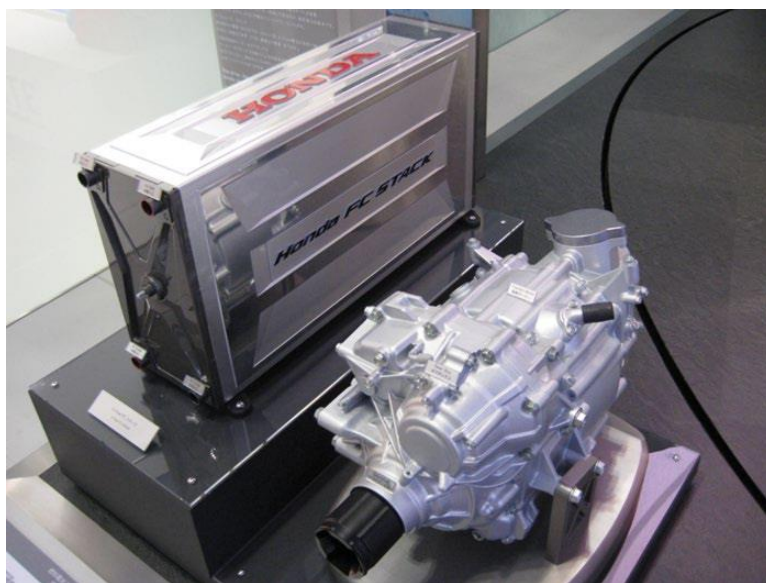


Estas a su vez han estado mejorando, dando una robustez a las PEMFC, adecuado para usos en vehículos, pequeñas y medianas fuentes de energía eléctrica, y sistemas portátiles, tanto domiciliarias e industriales. Los avances que en los últimos años están contribuyendo a una reducción de los costos de producción y reducción en el coste por Kw de potencia, dado el crédito a los pioneros de la Ballard Power Systems Of Vancouver de Canada, y a los de Alamos National Laboratory en los Estados Unidos, dejándose una base de rendimientos de  $650 \text{ W Kg}^{-1}$ , y  $650 \text{ W L}^{-1}$  (Dicks & Rand, 2018).

El departamento de energía de los Estados Unidos (US DOE), trabajó para alcanzar un pila de combustible de 80 Kw en una PEMFC en el 2006 con un Honda que llego con una pila de flujo vertical de hasta 100 Kw en el auto *FCX Clarity*, el cual se ve en la siguiente figura, tiene las características de tener una densidad de potencia volumétrica de casi  $2.0 \text{ KW L}^{-1}$ , y una potencia específica de  $1.6 \text{ Kw Kg}^{-1}$ , esto en la exposición en el 2008. Nissan también afirmo haber alcanzado  $1.9 \text{ Kw L}^{-1}$ , desde entonces Honda ha aumentado la densidad de potencia de más de  $3.0 \text{ Kw L}^{-1}$  (Dicks & Rand, 2018).

Las pilas tipo PEMFC, se están desarrollando para una amplia gama de aplicaciones y operaciones, no solo en el área automotriz, sino también en aplicaciones telefónicas móviles, unidades estacionarias, en telecomunicaciones y centros remotos entre otras muchas más; incluso ya está involucrándose como fuentes de alimentación para sistemas de cogeneración, utilización en calefacción doméstica, empero, su hegemonía en cuanto a todas sus aplicaciones está en la parte automotriz.

*Figura N° 4.5 Pila Honda FC y caja de cambios (exhibido en el Salón de Tokio 2007).*



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Cuando hablamos de mejorar la densidad de potencia, quizá podríamos decir que si subimos la densidad de corriente podríamos mejorar la densidad de potencia, pero esto



no es tanto así, dado que si subimos la densidad de corriente fuera de un diseño optimo, la vida útil de la pila de combustible será influenciada seriamente (Dicks & Rand, 2018).

Las características más distintivas de una PEMFC son (Dicks & Rand, 2018):

- El tipo de electrolito
- La estructura del electrodo
- El catalizador

De manera secundaria tenemos (Dicks & Rand, 2018):

- ❖ Gestión del agua
- ❖ El Método e refrigeración
- ❖ El método de conexión de células, el diseño de la serie de las placas bipolares, ya que cada uno tienen sus particularidades y métodos.
- ❖ La presión de trabajo
- ❖ Los reactivos de utilización, en caso ideal el hidrógeno y oxígeno puro.

Más allá de cuestiones técnicas, a nivel social se nota uno de los obstáculos de utilización, comercialización de esta tecnología, que vendría a ser el costo. Empero, desde su evolución o avance se ha tenido considerables reducciones, los primeros sistemas PEMFC comerciales están ahora en el mercado con precios de \$ 3000 por Kw, pero se quiere lograr y mejorar en que sea más accesible a disminuir el costo en aproximado de \$ 1000 una PEMFC estacionaria (Dicks & Rand, 2018).

### **El nafion, características y aplicación**

El nafion es un tipo particular de ácido sulfónico perfluorado (PFSA), que ha estado presente en la industria del electrolito de membrana estándar en las PEMFC; esta ofrece las siguientes características por las que se aplican (Dicks & Rand, 2018):

- ✓ Resistencia ala ataque químico y es estable en ambos ambientes ya sea en oxidantes y reductores.
- ✓ Mecánicamente fuerte, a causa de la columna vertebral de politetrafluoroetileno (PTFE) durable, y así se pueda hacer películas muy finas de hasta 50  $\mu\text{m}$ .
- ✓ Ácido.
- ✓ Tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de agua.
- ✓ Buenos conductores de protones cuando está bien hidratado, para permitir que los iones  $\text{H}^+$  puedan moverse libremente dentro del material.

La conductividad iónica de Nafión no sólo depende de la hidratación que está influenciada por la temperatura y presión de operación, sino también de la disponibilidad de los sitios ácidos sulfónicos, en el caso teórico considerando una humedad relativa al 100% la conductividad puede tomar valores variables entre 0.01 y 0.1 S cm<sup>-1</sup>, dependiendo de la caída de humedad gradual, variara la conductividad, en consecuente también el rendimiento de la pila de combustible. La disponibilidad de sitios ácidos sulfónicos, por lo general expresa como el peso equivalente de la membrana (EW), que se le considera relativamente poco importante, los valores de EW están entre 800 y 1100 (equivalente a las capacidades de ácido de entre 1,25 y ~0,90 mEq g<sup>-1</sup>) que son aceptables para la mayoría de membranas por que las investigaciones han demostrado que la conductividad máxima iónica se puede obtener en este rango (Dicks & Rand, 2018).

La conductividad de protones depende del contenido de agua y las variables estructurales tales como porosidad, tortuosidad, la distribución de protones y diferentes coeficientes de difusión para los procesos de conducción de protones. Por lo tanto, mientras que haciendo membranas más delgadas pueden mejorar la conductividad, otros factores deben ser tomados en consideración como el hecho de que los materiales delgados son inherentemente cantidades menos robustos y puede ocurrir que pequeños cruces de combustible puedan ocasionar una reducción en el voltaje de la célula observado. Por estas razones, los espesores de membrana estándar están de entre 80 y 150 micras que se han encontrado para ser óptimo para la mayoría de las PEMFC (Dicks & Rand, 2018).

Definitivamente se sigue investigando sobre obtener combinaciones, adhesión de sulfatos, entre varias cosas, donde la Ballard Power Systems, la compañía Danesa Serenergy entre muchas otras, están trabajado en cuanto a este tema entre otros que corresponden a las pilas de combustible que por ejemplo se presenta la siguiente figura (Dicks & Rand, 2018).

*Figura N° 4.6 Serenegy PEMFC de funcionamiento de alta temperatura refrigerado por líquido; una FC y su Sistema final.*

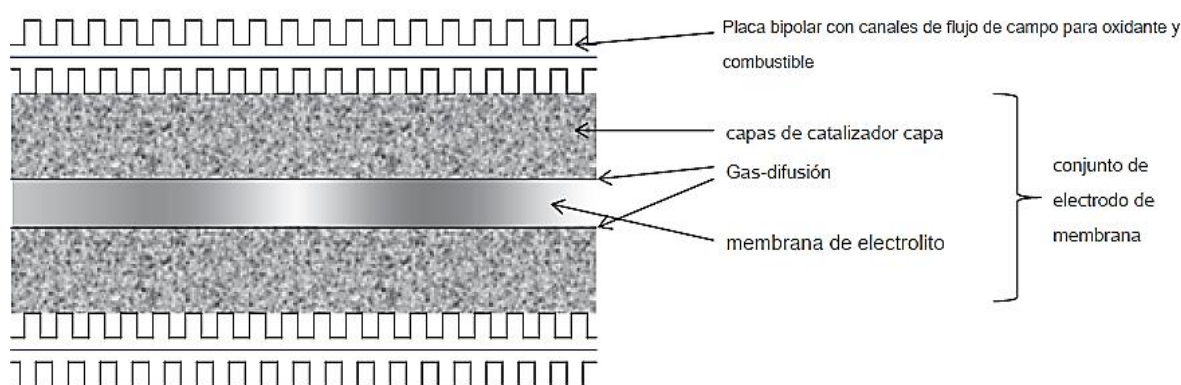


Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

## LOS ELECTRODOS Y LA ESTRUCTURA DE LOS ELECTRODOS

El platino es el metal con la mayor actividad catalítica para ambas reacciones de electrodo en la PEMFC. En los primeros días de desarrollo de esta pila de combustible, se requieren alrededor de 28 mg de platino por  $\text{cm}^2$  de área superficial del electrodo para cada electrodo. Esta alta tasa de uso condujo a la creencia, estando muy generalizada, que el platino es un factor importante en el costo de PEMFC y que la oferta mundial del metal no es suficiente para satisfacer el mercado de vehículos de pila de combustible en caso de ser adoptada ampliamente. Ambas observaciones son engañosas. La realidad es que el uso de platino se ha reducido hasta por debajo de  $0,2 \text{ mg cm}^{-2}$  (Dicks & Rand, 2018).

*Figura N° 4.7 Estructura básica de una PEMFC a baja temperatura con una simple configuración de la placa bipolar.*



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

### 4.2.5. GESTIÓN DEL AGUA

Será evidente que para la membrana de intercambio de protones en particular para las versiones PFSA, debe haber suficiente agua en el electrolito de polímero para mantener una alta conductividad de protones. Al mismo tiempo, el contenido de agua debe ser administrado eficientemente para evitar inundaciones, ya sea en la capa de catalizador o en la GDL (Dicks & Rand, 2018).

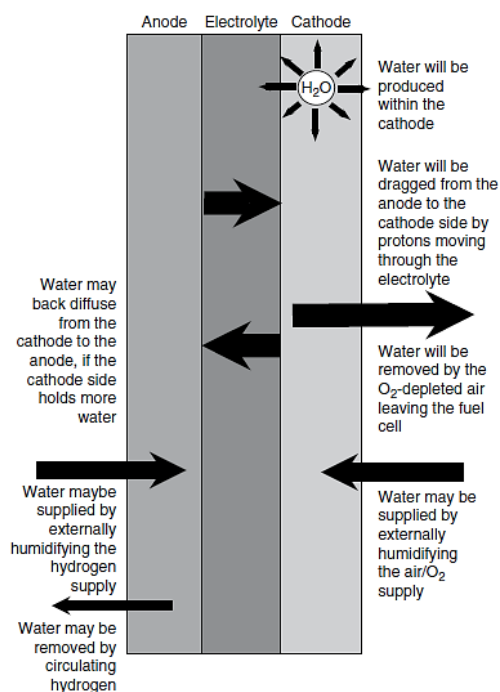
En una PEMFC ideal, se esperaría que el agua que se forma en el electrodo positivo para mantener el electrolito en el nivel correcto de hidratación. Aire sería soplado sobre el electrodo y, así como el suministro de oxígeno necesario, sería secar el exceso de agua. Debido a que el electrolito de membrana es tan delgada, el agua se difunde desde el lado positivo al negativo, y durante todo el electrolito un estado adecuado de hidratación se conseguiría sin ninguna dificultad especial (Dicks & Rand, 2018).

Se tendrá una interesante palabra conocido como “Arrastre electro-osmótico”, se conoce que la osmosis es un fenómeno que consiste en el paso recíproco de líquidos

de distintas densidades a través de una membrana semipermeable que los separa, en todo caso cuando se dice arrastre electro-osmótico, se refiere al arrastre que sufre los iones  $H^+$  que se mueven de lo negativo a las moléculas de agua del electrodo de tracción positiva con ellos, en experimentación se tiene típicamente entre 1 y 2.5 moléculas de agua que son transportados por cada protón (Dicks & Rand, 2018). Conlleva a deducir que cuando se tiene altas densidades de corriente, el lado negativo del electrolito se puede secar, anexo a que el lado positivo del electrolito está bien hidratado; eso nos lleva a plantear una solución, ya que esto ocasiona problemas de funcionamiento, rendimiento, entre otros.

Las membranas debes estar lo suficiente mente hidratadas o humidificadas para su correcto desempeño o funcionamiento en las pilas de combustible, y esto se podría alcanzar considerando humidificar el aire o el hidrógeno, que parece algo raro decir pero es un postulado teórico, ya que la meta cuando se habla de diseño o criterios de diseño en esta parte, es tener un grado de hidratación, humidificación estable y uniforme para todos los componentes que requieren en la pila de combustible (Dicks & Rand, 2018).

Figura N° 4.8 Ilustración esquemática de los diferentes movimientos del agua, dentro y desde el electrolito de una PEMFC.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Así como puede haber una falta de hidratación, también puede haber sobre hidratación, ambos casos son perjudiciales para la FC, pero cuando se tiene sobre hidratación se tendrá las siguientes consecuencias (Dicks & Rand, 2018):

- Se hinchará la membrana, habrá una distribución desigual en todo el electrolito, degradación de las capas de electrolito y el catalizador.
- Contaminación a través de elementos iónicos solubles en agua, en otras palabras acumulación de diferentes elementos en los diferentes componentes de la FC, ya sea de calcio, óxidos de hierro, magnesio, cobre y otros metales.
- Si una pequeña cantidad de agua líquida permanece presente en las capas de GDL o el catalizador, en el caso que la PEMFC se apague y la temperatura desciende por debajo del punto de congelación, causara un daño permanente a estas capas, por esto es que se debe purgar cualquier exceso de agua, o sobre hidratación del funcionamiento de las pilas de combustible.

## SELLOS

Los sellos se emplean para asegurar la estanqueidad de las celdas. Habitualmente se colocan entre la membrana y la placa colectora, si bien esto depende del diseño de la celda y del stack. En algunos casos, se integran junto con la MEA (Membrane Electrode Gasket Assembly, MEGA). Se realizan habitualmente en materiales como la silicona u otros polímeros elásticos con capacidad para soportar altas temperaturas e inertes químicamente (Almarza & Salueña, 2010).

Se han realizado estudios sobre la degradación de los sellos de silicona, ya que la durabilidad de los sellos repercute directamente en la del stack. La legislación referente a la seguridad no es permisiva con escapes de H<sub>2</sub> (Almarza & Salueña, 2010).

### 4.2.6. FLUJO DE AIRE, EVAPORIZACIÓN Y LA RELACIÓN DE HUMEDAD EN LAS FC

Para esta aparte se describirá las formulas correspondientes, considerando los términos como, aire seco, aire húmedo, masa de agua, etc., “ $\omega$ ” que será la humedad absoluta, humedad específica, o relación de humedad y se define en la siguiente ecuación (Cengel & Boles, 2012; Dicks & Rand, 2018):

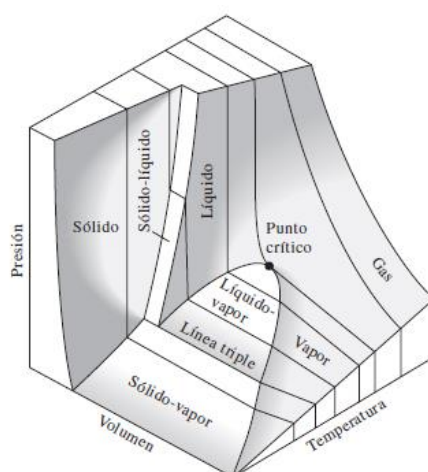
$$\omega = \frac{m_w}{m_a} \quad (4.38)$$

Donde, “ $m_w$ ” es la masa del agua presente en la mezcla y “ $m_a$ ” será la masa del aire seco, es decir, la masa total del aire presente en una reacción de FC será la suma de  $m_w + m_a$ . Los efectos de sentir un aire seco o húmedo son a veces un poco confusos, ya que se puede tener un aire caliente con un alto contenido de agua, pero se puede percibir o sentir un ambiente seco, como por ejemplo del sauna en vapor seco, o en el otro caso de tener aire frío con bajo contenido de agua y este se puede percibir un

ambiente húmedo. Estos efectos se dan gracias a los cambios de presión de saturación, como también al cambios en la temperatura de saturación (Dicks & Rand, 2018).

Para este tema se definirá a la presión de vapor saturado, como la presión parcial del agua cuando una mezcla de aire y agua líquida están en equilibrio, o una poco más técnico, cuando la tasa de evaporación del agua en el aire es igual a la velocidad de condensación; cuando el aire no puede sostener cualquier vapor + agua a una temperatura y presión dada, que se dice que está saturado (Dicks & Rand, 2018). En términos sencillo termodinámicos, a una determinada presión, la temperatura a la que una sustancia pura cambia de fase se llama temperatura de saturación, Del mismo modo, a una temperatura determinada, la presión a la que una sustancia pura cambia de fase se llama presión de saturación (Cengel & Boles, 2012).

Figura N° 4.9 Superficie P-V-T de una sustancia que se contrae al congelarse.



Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

La humedad relativa (RH) será:

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}} \quad (4.39)$$

Las humedades relativas típicas varían desde aproximadamente 30% - 70%, considerando en condiciones climáticas el primero en el desierto y la segunda en Nueva York. Como ya se dijo, es muy importante tener funcionando una pila de combustible en condiciones estables de humedad e hidratación, ya que, el efecto de sacado de aire, o la tasa de evaporación del agua; es directamente proporcional a la diferencia entre la presión parcial del agua  $P_w$  y la presión de vapor saturado  $P_{sat}$ . La complicación de las PEMFC está en que la presión de vapor saturado varía con la temperatura de una manera altamente no lineal, i.e., la  $P_{sat}$  aumenta más rápidamente a temperaturas más altas se ilustra en la siguiente tabla (Dicks & Rand, 2018).

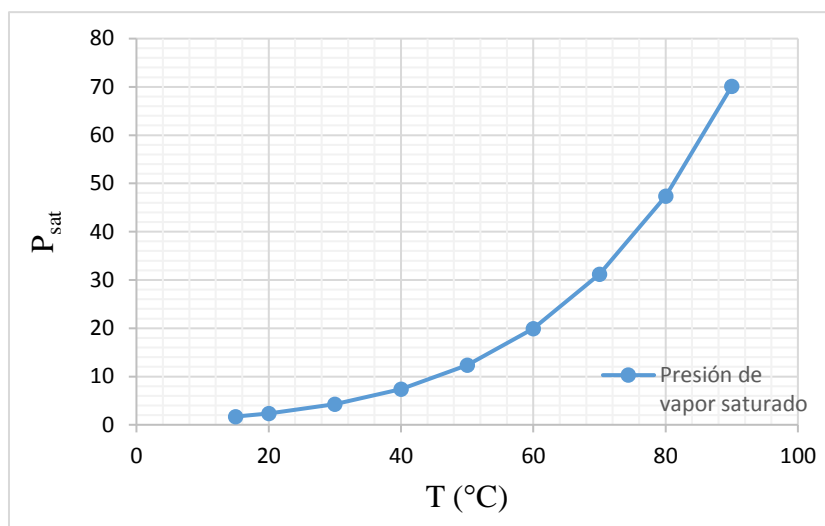
Tabla N° 4.6 Presión de vapor saturado de agua a temperaturas seleccionadas.

T (°C)	P <sub>sat</sub> (KPa)
15	1.705
20	2.388
30	4.246
40	7.383
50	12.35
60	19.94
70	31.19
80	47.39
90	70.13

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Elaboración propia

Gráfico N° 4.12 Comportamiento gráfico de la presión de vapor saturado.



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico N°4.12, se puede observar, como la presión aumenta rápidamente. Lo dicho anteriormente, la distancia entre puntos se dispersa cada vez más, y tendrá ese comportamiento según lo descrito, con los datos de la tabla N°4.5. Tendremos los siguientes ejemplos de aplicación simple de estas fórmulas para determinar la humedad relativa, considerando la tabla anterior.

1. Se considera una pila de combustible, que su funcionamiento inicial es a una temperatura de 20°C con una humedad relativa del 70%, hallar la presión del agua en ese punto, usando la tabla N°4.6 reemplazar la presión de saturación cuando el funcionamiento de la pila está a una temperatura de 60°C. hallar la humedad relativa en la que se encuentra la pila de combustible en estado de funcionamiento (Dicks & Rand, 2018).



$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}}, P_w = \phi * P_{sat}$$

$$P_w = \phi * P_{sat} = 0.70 * 2.338 = 1.637 \text{ KPa}$$

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}} = \frac{1.637}{19.94} * 100\% = \mathbf{8.21\%}$$

2. Se considera una pila de combustible, que su funcionamiento inicial es a una temperatura de 20°C con una humedad relativa del 90%, hallar la presión del agua en ese punto, usando la tabla N°4.6 remplazar la presión de saturación cuando el funcionamiento de la pila está a una temperatura de 60°C. hallar la humedad relativa en la que se encuentra la pila de combustible en estado de funcionamiento

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}}, P_w = \phi * P_{sat}$$

$$P_w = \phi * P_{sat} = 0.90 * 2.338 = 2.104 \text{ KPa}$$

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}} = \frac{2.104}{19.94} * 100\% = \mathbf{10.55\%}$$

De modo práctico se puede sentir que cuando inicia a temperatura ambiente una pila de combustible no hay problema, y puede considerarse como ínfimo; empero, cuando toma su funcionamiento a una temperatura de 60°C, ahí es donde la humedad relativa en el funcionamiento de la FC, desciende agresivamente, del ejercicio 1 y 2 las humedades relativas de funcionamiento, o sea por dentro de la pila están en un 8.21% y 10.55%, lo que es demasiado bajo y esto traerá problemas a los distintos elementos que constituyen la FC (Dicks & Rand, 2018).

Los ejercicios anteriores son básicos; como se había mencionado anteriormente, para menguar este inconveniente, se debe añadir una humedad extra, para el interior de las celdas, como vimos y analizamos así se tenga una humedad relativa de ingreso de 100% en pleno funcionamiento tendrá una humedad relativa de 11.72%, complementando con los ejercicios anteriores 1 y 2, que tenían humedades relativas de ingreso de 70% y 90%, que también son mucho más inferiores. Para poder dirimir se calculara la humedad que debe tener en el interior de la pila de combustible, partiendo la siguiente ecuación (Dicks & Rand, 2018).

$$\omega = \frac{m_w}{m_a} = \frac{18.016}{28.97} * \frac{P_w}{P_a} = 0.622 * \frac{P_w}{P_a}$$

La presión total será la suma de las presiones tanto del aire seco y la presión de vapor de agua (Dicks & Rand, 2018).

$$P = P_a + P_w \rightarrow P_a = P - P_w$$

Entonces la masa del agua que debe estar presente en la mezcla será (Dicks & Rand, 2018):

$$m_w = 0.622 \times \frac{P_w}{P - P_w} \times m_a \quad (4.40)$$

Donde  $P_w$  se tomará los valores de la tabla N°4.6, y la  $m_a$  se considera de la siguiente ecuación, utilización del aire a un ritmo (Dicks & Rand, 2018):

$$m_a = \text{Uso de Aire} = \frac{3.58 \times 10^{-7} \times \lambda \times P_e}{V_c} \text{ Kg s}^{-1} \quad (4.41)$$

Se considerará esta ecuación cuando sale de la celda, y lógicamente el oxígeno será mucho menor, que la ecuación por ello difiere de  $3.58 \times 10^{-7}$  a  $3.58 \times 10^{-17}$  (Dicks & Rand, 2018).

$$m_a = \text{Uso de Aire} = \frac{3.58 \times 10^{-17} \times \lambda \times P_e}{V_c} \text{ Kg s}^{-1}$$

Donde “ $\lambda$ ” será estequiometria, y que la masa del agua necesaria es inversamente proporcional a la presión del aire (Dicks & Rand, 2018).

La presión de vapor del agua a la salida del cátodo sólo depende de la estequiometria de aire y la presión del aire en la salida, y como se dijo, cualquier vapor de agua en el aire de entrada o humedad ha sido ignorado, entonces la presión de vapor de agua de salida representara la siguiente ecuación (Dicks & Rand, 2018).

$$P_w = \frac{0.42}{\lambda + 0.21} \times P_{exit} \quad (4.42)$$

Usualmente “ $\lambda$ ” tendrá el valor de 2, y  $P_{exit}$  será la presión del aire de salida. Para ver un contraste con los ejercicios que se desarrolló anteriormente, veremos el siguiente ejercicio cuya mejora será mejor de la que obtuvimos anteriormente (Dicks & Rand, 2018).

1. Se tiene una pila de combustible en funcionamiento con una presión de aire de salida de 110 KPa, una temperatura de 70 °C y una estequiometria de 2, si la humedad de entrada es baja, hallar la humedad relativa de la pila de combustible en funcionamiento, considerando la tabla N°4.6 para la presión de saturación (Dicks & Rand, 2018).

$$P_w = \frac{0.42 \times 110}{2 + 0.21} = 20.905 \text{ KPa}$$

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}} = \frac{20.905}{31.19} * 100\% = 67.02\%$$

Que siendo críticos, aún sigue siendo bajo, por lo que ahora se disenterá la idea que la humedad de ingreso es irrelevante, por lo que la humedad de salida de la FC, puede ser direccionado para influir en la humedad de ingreso de la entrada, pese a que esto involucraría un mayor costo, pero este costo sería justificable al obtener resultados más óptimos. Si el contenido de agua de la entrada no es despreciable, se puede demostrar que la presión del vapor de agua de salida está dada por la fórmula ligeramente más complejo (Dicks & Rand, 2018, p. 98).

$$P_w = \frac{(0.42 + \psi\lambda) * P_{exit}}{(1 + \psi) * \lambda + 0.21} \quad (4.43)$$

Donde " $\psi$ " será un coeficiente, que depende de los siguientes valores (Dicks & Rand, 2018).

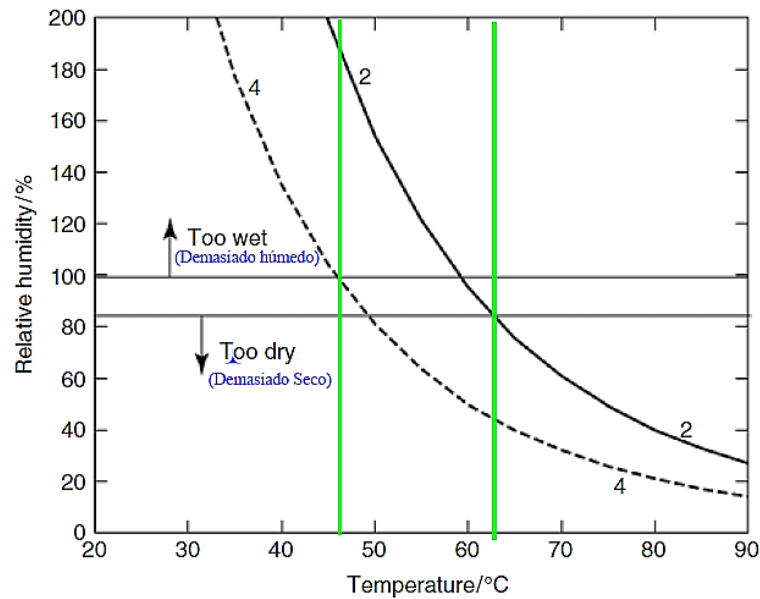
$$\psi = \frac{P_{W in}}{P_{in} + P_{W in}} \quad (4.44)$$

Donde, " $P_{in}$ " será la presión del aire de entrada total, por lo general será mayor que " $P_{exit}$ " presión de salida del aire y " $P_{W in}$ " será la presión de agua de entrada. Estas ecuaciones garantizaran que haya humedad adecuada en una PEMFC operativo (Dicks & Rand, 2018).

#### 4.2.7. AUTO-HUMIDIFICACIÓN DE LAS CÉLULAS DE COMBUSTIBLE

Es un término bastante interesante y lógico, la auto-humidificación es una solución práctica para poder mantener el nivel de humedad para el funcionamiento de las pilas de combustible en funcionamiento óptimo, o por lo menos que mantenga la eficiencia que se quiere según el diseño. Para poder tener un estándar de funcionamiento considerar el siguiente gráfico, que estima valores de humedad relativa promedio que debe tener una FC, a presión total de 100 KPa. Con valores de estequiometría de 2 y 4, considerando áreas o valores demasiado secos o demasiado húmedos (Dicks & Rand, 2018).

Gráfico N° 4.13 Gráfica de la humedad relativa frente a la temperatura para el aire de salida de una PEMFC con una estequiometría de aire de 2 y 4. El aire de entrada se supone que es seco, y la presión total es de 100 kPa.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

En la siguiente tabla se visualiza las humedades relativas del aire de salida teórica a temperaturas y estequiometrías seleccionadas. El aire de entrada se supone que es a 20 ° C y 70% de humedad relativa; la presión del aire de salida se supone que es a 100 kPa. Los espacios en blanco en la tabla son donde la humedad relativa es demasiado alto o demasiado bajo (Dicks & Rand, 2018).

Figura N° 4.10 Valores de Estequiometria seleccionadas con presión de salida del aire a 100 KPa.

Temperature (°C)	$\lambda = 1.5$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$	$\lambda = 6$	$\lambda = 12$	$\lambda = 24$
20					213	142
30				194	117	78
40		273	195	112	68	45
50	208	164	118	67	40	26
60	129	101	72	41		
70	82	65	46			
80	54	43	30			
90	37	28				

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Una conclusión importante de la figura 4.18 y la Tabla 4.4 es que a temperaturas por encima de aproximadamente 60 ° C (a presión atmosférica) la RH del aire de salida está por debajo, o bien por debajo de, 100% de los valores en absoluto razonables de estequiometria del aire. En otras palabras, la auto-humidificación se puede lograr para una célula que funciona a o por debajo de 60 ° C, pero para hacer funcionar un PMEFC

encima de esta temperatura, por lo general esencial la humidificación adicional. Esta característica hace que las dificultades en la elección de la temperatura de funcionamiento óptima para una PEMFC. Cuanto mayor sea la temperatura, mejor será el rendimiento se debe principalmente debido a una reducción en el sobrepotencial en el electrodo positivo. Una vez por encima de 60 ° C, empero, el peso adicional y el coste del equipo adicional necesario para humidificar la célula puede superar los beneficios de un sistema simple como se requiere (Dicks & Rand, 2018); por ello es que se debe tener criterio cuando aplicar este método.

Para poder visualizar matemáticamente volveremos tocar el primer ejercicio pero involucrando las anteriores fórmulas de presión de salida del agua, para poder tener la idea completa de cómo puede influir la temperatura y la humedad de entrada en la FC (Dicks & Rand, 2018).

1. Se considera una pila de combustible, que su funcionamiento inicial es a una temperatura de 20°C con una humedad relativa del 70%, hallar la presión del agua en ese punto, usando la tabla N°4.6 reemplazar la presión de saturación cuando el funcionamiento de la pila está a una temperatura de 90°C, con una presión de entrada de 220 KPa, y una presión de salida de 200 KPa, considerando un valor de 2 para la estequiometría. hallar:
  - a. Presión del vapor de agua a la entrada
  - b. El valor de  $\psi$
  - c. La presión del vapor del agua a la salida
  - d. La humedad relativa del aire de salida

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}}, P_w = \phi * P_{sat}$$

$$P_{w_{entrada}} = \phi * P_{sat} = 0.70 * 2.338 = 1.64 \text{ KPa}$$

$$\psi = \frac{P_{W_{in}}}{P_{in} + P_{W_{in}}} = \frac{1.64}{220 - 1.64} = 0.00751$$

$$P_{w_{salida}} = \frac{(0.42 + \psi\lambda) * P_{exit}}{(1 + \psi) * \lambda + 0.21} = \frac{(0.42 + (0.00751 * 2)) * (200)}{(1 + 0.00751 * 2) + 0.21} = 39.10 \text{ KPa}$$

$$\phi_{aire \ de \ salida} = \frac{P_w}{P_{sat}} = \frac{39.10}{70.13} * 100\% = 55.76\%$$

Una humedad de salida de 55.76% sigue siendo bajo. Empero, si consideramos la entrada de aire a condiciones establecidas como 80 °C de ingreso y una humedad de

90% de entrada, se obtendrá un valor más aceptable de la siguiente manera. Considerando que las condiciones faltantes se tomara los datos del anterior ejercicio.

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}}, P_w = \phi * P_{sat}$$

$$P_{w_{entrada}} = \phi * P_{sat} = 0.90 * 47.39 = 42.651 \text{ KPa}$$

$$\psi = \frac{P_{W_{in}}}{P_{in} + P_{W_{in}}} = \frac{42.651}{220 - 42.651} = 0.2405$$

$$P_{w_{salida}} = \frac{(0.42 + \psi\lambda) * P_{exit}}{(1 + \psi) * \lambda + 0.21} = \frac{(0.42 + (0.2405 * 2)) * (200)}{(1 + 0.2405 * 2) + 0.21} = 66.96 \text{ KPa}$$

$$\phi_{aire \ de \ salida} = \frac{P_w}{P_{sat}} = \frac{66.96}{70.13} * 100\% = \mathbf{95.48\%}$$

Como se puede observar, cuando se establece condiciones iniciales de ingreso para el aire, cambia y mejora la humedad de salida de una FC, de tener una humedad relativa de salida de 55.76% paso a tener 95.48%, cuando la temperatura del aire ingresa a 80 °C con una humedad de 90%. La cantidad de agua que debe añadirse aire de entrada para poder alcanzar la humedad que establecimos que fue de 95% se puede determinar con la siguiente ecuación que anteriormente describimos, considerando que la FC opera a una presión de 220 KPa, y una presión de salida de 200 KPa, con estequiometria de 2.0, una potencia  $P_e = 10KW$ , y se debe asumir  $V_c = 0.65 \text{ V}$ .

$$m_a = \text{Uso de Aire} = \frac{3.58 \times 10^{-7} \times \lambda \times P_e}{V_c} = \frac{3.58 \times 10^{-7} \times 2 \times 10,000}{0.65} = 0.011 \text{ Kg s}^{-1}$$

La presión de agua deseado para este caso será de 42.7 KPa

$$m_w = 0.622 \times \frac{P_w}{P - P_w} \times m_a = 0.622 \times \frac{42.7}{220 - 42.7} \times 0.011 = 0.0016 \text{ Kg s}^{-1}$$

Uno de los productos de la reacción de las FC, es agua, para hallar teóricamente la salida de agua, o el agua que produce después de las reacciones químicas las FC se da de la siguiente manera, tomando que la masa molecular del agua es  $18.02 \times 10^{-3} \text{ Kg mol}^{-1}$ :

$$\text{Prod. de agua de una FC}_H = \frac{9.34 \times 10^{-8} \times P_e}{V_c} = \frac{9.34 \times 10^{-8} \times 10,000}{0.65} = 0.0014 \text{ Kg s}^{-1}$$

Teóricamente se predice una producción de agua de  $0.0014 \text{ Kg s}^{-1}$ ; por lo tanto, el flujo total de agua en los gases de escape del cátodo, será la suma de los dos datos hallados, i.e.  $0.0016 + 0.0014 = 0.0030 \text{ Kg s}^{-1}$  (Dicks & Rand, 2018, p. 101), ya que el

agua se expulsa como vapor y este puede ser reciclado para poder utilizarlo en influir las condiciones iniciales de entrada del aire, o sea humidificarlo, asegurando colateralmente una pureza del agua en circulación (Dicks & Rand, 2018).

#### **MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN EXTERNA** (Dicks & Rand, 2018).

- Burbujeo de los gases a través del agua a una temperatura controlada.
- Inyección pulverizado de agua directo en al gas de alimentación o ingreso.
- Inyección pulverizada de agua a través de una espuma de metal.
- Inyección directa de agua líquida en la celda de combustible a través de un flujo de campo de las placas bipolares.
- El agua en el gas de salida del cátodo se utiliza sin condensación a líquido. Conocido también como rueda de entalpia. tales como los sistemas de aire acondicionado. El agua en el gas de escape se absorbe en el material, que gira luego de modo que se introduce en el camino de la entrada de cátodo seco. El proceso es continuo - que entrega constantemente agua desde la salida a la entrada de gases y las transferencias de calor de la corriente de escape a la corriente de entrada. El método adolece de las desventajas de ser bastante voluminoso y requiere potencia y sistema de control para su funcionamiento.
- Un sistema más sofisticado, se da a conocer primero por el Instituto Paul Scherrer en Suiza, también utiliza el agua de salida sin condensación. En este caso, una membrana se coloca entre la salida del cátodo y las corrientes de entrada de cátodo. El vapor de agua en la corriente de salida se condensa sobre la membrana y a continuación, pasa a través de él al lado de entrada seco. La membrana puede ser del mismo material que el electrolito PEMFC, y algunos fabricantes han empleado esta técnica para cada célula dentro de una pila.
- Muchos desarrolladores han tratado de modificar la membrana PEMFC para mejorar el agua retención. Un método consiste en generar agua en el lugar. La membrana se modifica, no sólo para retener el agua, sino también para producir agua. Retención está habilitada por impregnación del electrolito con partículas de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y / o de óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), junto con nanocristales de platino. Si la membrana es suficientemente delgada, el platino cataliza la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno entrante para generar agua. La reacción de curso usa un poco de gas hidrógeno valioso, pero se afirma que el rendimiento mejorado del electrolito justifica la pérdida parásita de combustible (Dicks & Rand, 2018).

#### **REFRIGERACIÓN DE UNA FC POR AGUA.**

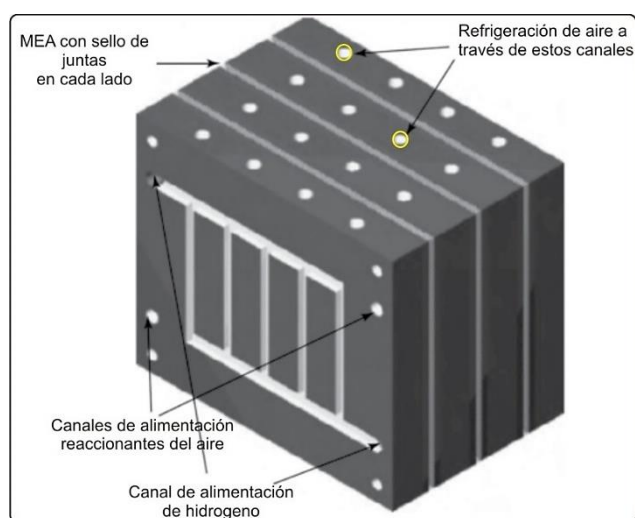


La refrigeración con aire es la opción más sencilla para pilas PEMFC y generalmente se adopta para los de menos de 2 kW. Por encima de aproximadamente 5 kW, la preferencia común es emplear la refrigeración por agua dada su ventaja de no requerir grandes canales para el medio de refrigeración - 1 kg de agua puede ser bombeada a través de un canal mucho más pequeño que 1 kg de aire, y el efecto de enfriamiento de agua es mucho mayor (Dicks & Rand, 2018).

Por lo tanto, las pilas refrigerados por agua pueden ser más compacto para un tamaño determinado según el uso y diseño, además, lleva la ventaja de ser capaz de emplear el calor generado por la pila de combustible, por ejemplo, en un sistema CHP doméstica. Con un sistema refrigerado por aire, el calor se pierde en la atmósfera, mientras que el calor de un sistema refrigerado por agua se puede poner en uso práctico (Dicks & Rand, 2018).

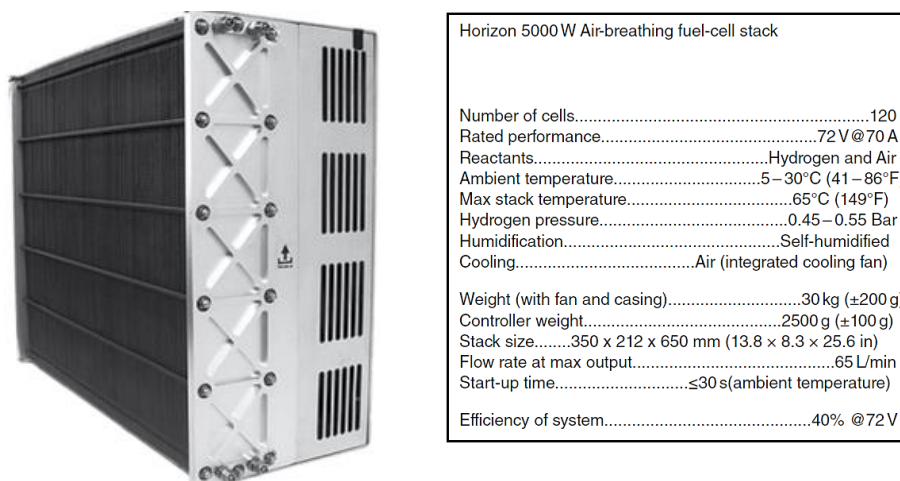
El método de la agua de refrigeración de una célula de combustible es esencialmente el mismo que para el aire en la figura 4.21, con la excepción de que el agua se bombea a través de los canales de refrigeración. En la práctica, estos canales no son siempre necesarias o proporcionado en cada placa bipolar. La siguiente sección considera enfriamiento en más detalle para sistemas fabricados (Dicks & Rand, 2018).

Figura N° 4.11 Tres células tipo PEMFC, pila con placas bipolares con reactivo separado y canales de aire de refrigeración.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Figura N° 4.12 Ejemplo de una pila refrigerada por aire, fabricado por células Horizon Fuel.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

### SELECCIÓN DE TIPO DE PLACAS PARA LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

La mayoría de las pilas PEMFC se construyen a lo largo de las líneas generales de múltiples celdas conectadas en serie con placas bipolares, y estas deben recoger y conducir la corriente desde el ánodo hasta cátodo siguiente; mientras que la distribución del gas del combustible se desarrolla sobre la superficie del ánodo, y la mezcla del oxígeno o aire sobre la superficie del cátodo. Cabe resaltar que la placa usualmente tiene que llevar un fluido de refrigeración. Las placas bipolares contribuir una alta proporción del coste de una pila PEMFC y tienen que satisfacer varios requisitos como los siguientes (Dicks & Rand, 2018).

- ✓ Buena conductividad eléctrica ( $S > 100 \text{ cm}^{-1}$ ).
- ✓ Alta conductividad térmica, esto debe exceder de  $20 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para fluidos de refrigeración integrado normales o debe ser superior a  $100 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  Si el calor se va a retirar sólo desde el borde de la placa.
- ✓ Alta resistencia al ataque químico y la corrosión.
- ✓ Alta estabilidad mecánica, especialmente bajo (resistencia a la flexión  $> 25 \text{ MPa}$ ) de compresión.
- ✓ baja permeabilidad de gas ( $< 10^{-5} \text{ Pa L s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ).
- ✓ Baja densidad para reducir al mínimo tanto el peso y el volumen de la pila.

#### Placas de carbono bipolares.

Las primeras PEMFC, se considera que tenían grafito, el grafito tiene alta conductividad eléctrica y también térmica, con una densidad baja, y una buena resistencia química. Pero tiene que ser manipulado de una manera cuidadosa, ya que

es frágil, y al ser frágil, cuando se le debe hacer trabajos mecánicos con fresado, pues es más complicado por lo que es más costoso hacer trabajos con el grafito, ya que también es porosa y este debe tener un recubrimiento extra para llegar a las exigencias que se le demandará (Dicks & Rand, 2018).

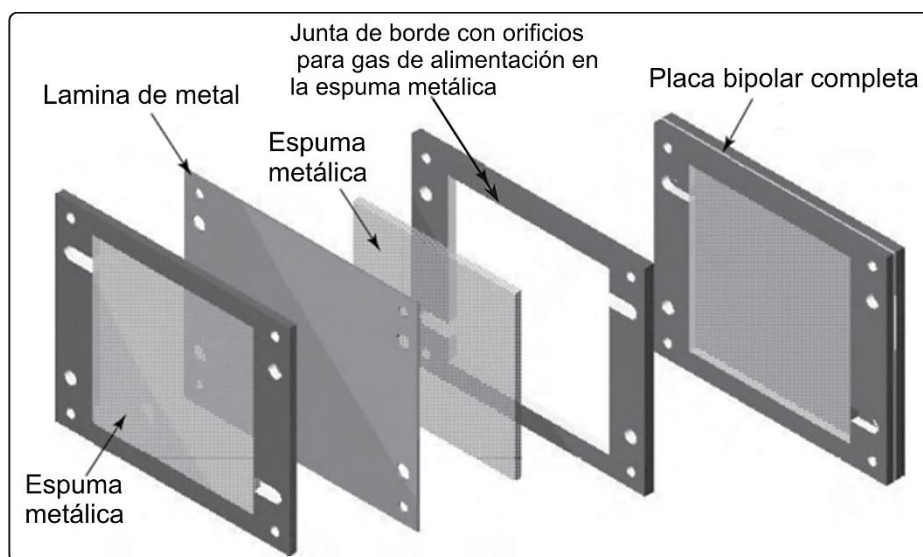
### **Placas metálicas bipolares.**

En contraste de las placas bipolares, o el grafito, las placas metálicas son resistentes, buenos conductores de calor y de electricidad, se puede mecanizar fácilmente y no son porosas, por lo que se considera como un buen material cuando se habla de exigencias; empero, al ser metal tiene una desventaja considerable, pues es propenso a la corrosión, peor aun cuando está expuesto al oxígeno, vapor de agua y temperaturas mayores que la del ambiente; pero esto puede solucionarse a través de recubrimientos con diferentes aleaciones para poder contrarrestar esa desventaja. Las planchas de acero inoxidable, aluminio, titanio, recubrimientos con molibdeno, vanadio, niobio o uno de los metal más nobles que vendría a ser con Oro, claro siempre y cuando la exigencia sea muy extravagante (Dicks & Rand, 2018).

En la evolución de las placas y también en la búsqueda de alternativas más económicas entre otras necesidades, un método interesante surgió y describió Murphy et al. Que trata de metal perforado o más conocido como espuma de metal para formar campos de flujo; donde el titanio era la constitución de esta espuma de metal, pese a tener una conductividad eléctrica relativamente baja, es un candidato potencial ante el grafito; con un recubrimiento de nitruro de titanio se puede hacer suficientemente resistente ante la corrosión (Dicks & Rand, 2018).

El método consiste en emplear dos hojas de espuma de metal con una capa delgada de metal sólido entre ellos; donde Los poros o huecos en las láminas de espuma sirven como vías para la difusión de gas a los electrodos. Los gases reactantes se alimentan a los bordes de las láminas de espuma a través de las juntas de plástico poroso que están selladas a la periferia de la placa, donde también esta espuma u orificios contribuyen a un enfriamiento de la pila (Dicks & Rand, 2018). En la siguiente figura se aprecia la espuma de metal.

Figura N° 4.13 Diagrama que muestra la construcción de la placa bipolar de espuma de metal.



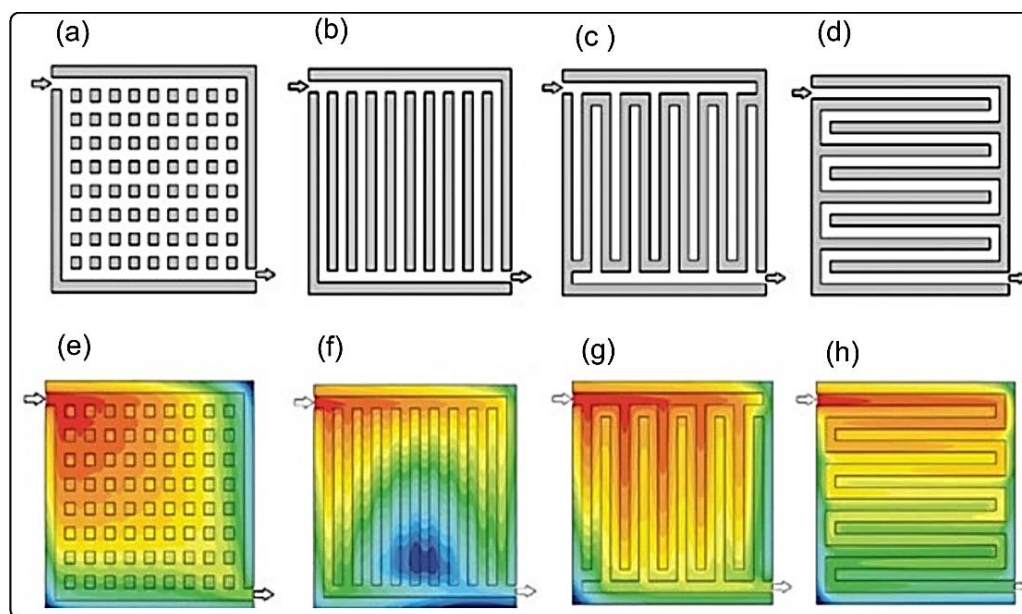
Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

En resumen, las placas bipolares de metal recubierto o espuma metálica se han aplicado con éxito para vehículos pilas de células de combustible donde la estabilidad a la corrosión no es tan exigente como para la generación de energía estacionaria. Para los vehículos, se requiere un tiempo de vida de la pila mínimo de 2 000 h, mientras que para los sistemas estacionarios se espera 40 000 h y ahora se logra de forma rutinaria con placas bipolares de carbono (Dicks & Rand, 2018, p. 110). Tras la novedad de las impresoras 3D, se pretende virar hacia diseños más complejos para mejorar las placas entre varios elementos que constituyen la FC, pero aún se está tomado solo para prototipos, ya que la producción en masa aún tiene carencias de precisión.

### Patrones de flujo de campo

Los gases reactivos se alimentan sobre el electrodo en un patrón simple de ranuras paralelas. Los otros tres tipos básicos de patrón del flujo de campo elegidos para placas bipolares son los 'pin (o de rejilla)', 'interdigitados' y las variedades de los serpentina; las cuatro alternativas se ilustran en la figura 4.24a-d. El diseño de campo de flujo está influenciada tanto por el material de la placa en sí y por la contigua GDL. El objetivo con cualquier diseño de flujo de campo es garantizar que la humedad se equilibra a lo largo de la celda y que los gases pueden fluir fácilmente hacia y desde cada GDL. También es deseable minimizar la caída de presión del campo de flujo (Dicks & Rand, 2018).

Figura N° 4.14 Los patrones de flujo de campo utilizados en PEMFC placas bipolares.



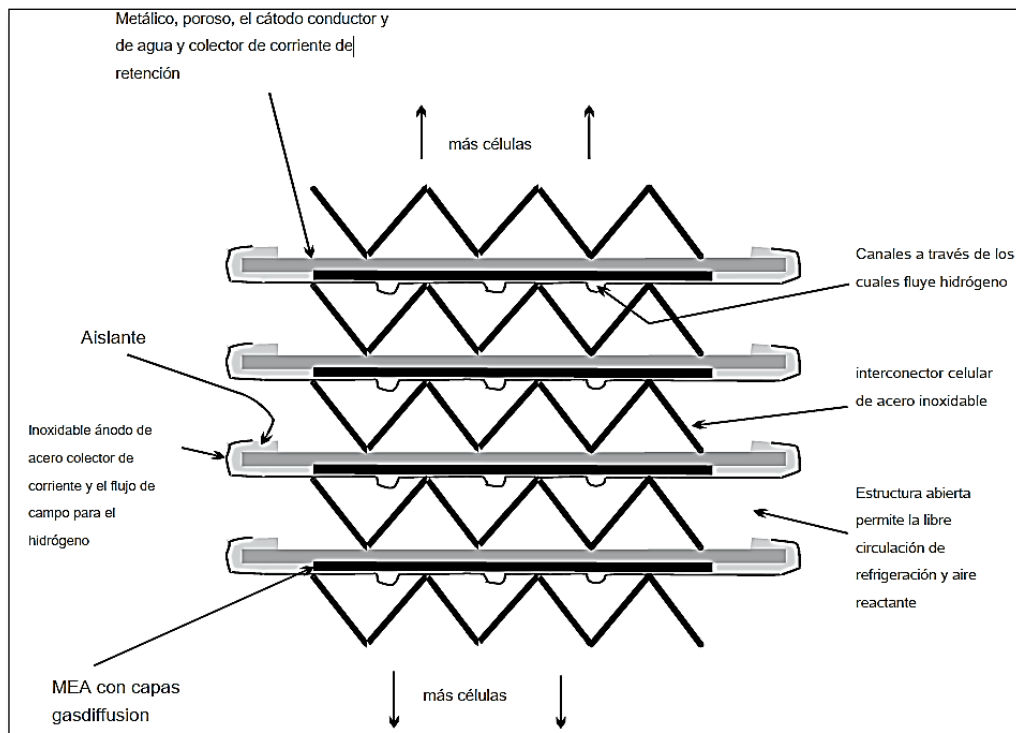
Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

La descripción de esta figura en orden tenemos (a) tipo pin o rejilla, (b) canales paralelos, (c) interdigitados, (d) canal de serpentina única (e-h) la concentración de oxígeno en el GDL cátodo para cada uno de los patrones de flujo de campo (esquemáticas). La alta concentración de oxígeno representa el color rojo; y azul, representa la baja concentración de oxígeno (Dicks & Rand, 2018).

Para considerar el tipo de rejilla que se optara para el diseño, los investigadores realizan diferentes estudios para poder considerar la mejor alternativa según a la aplicación que se le va a dar, por ello es que aún se siguen estudiando diferentes diversidades de diseño de patrones de flujo (Dicks & Rand, 2018).

Un término nuevo se instauro, cuando se pretendía aumentar la densidad de potencia de las pilas de combustible, y es la Energía Inteligente, que se trata del diseño de una pila de respiración de aire en la que cada célula se construyó a partir de un ánodo de acero inoxidable de corriente de colector con flujo de campos para el hidrógeno en la parte superior de los cuales se asienta el MEA. Un metal colector de corriente poroso se encuentra en la parte superior del cátodo, el hidrógeno se canaliza a través de un tubo de plástico delgado para cada ánodo. La estructura abierta de la célula permite la libre circulación del aire, aunque esto puede ser asistido por ventilador (Dicks & Rand, 2018).

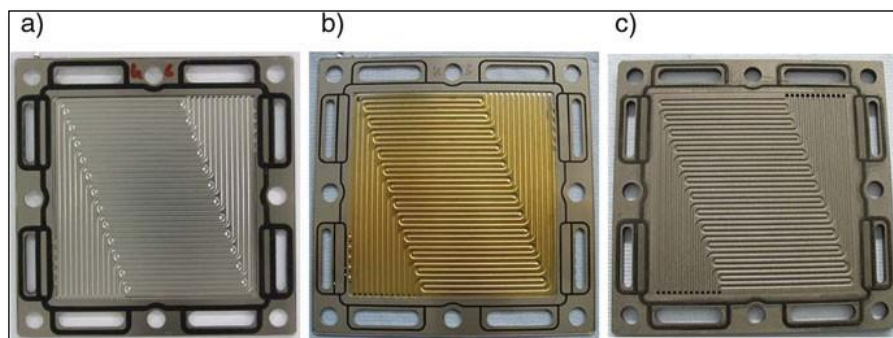
Figura N° 4.15 PEMFC estructura demostrada por Energía Inteligente.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Por cuestiones de estudios, se puede apreciar, en las siguientes placas bipolares, un mismo diseño o patrones pero con recubrimientos diferentes. El diseño de las placas bipolares que tiene un área activa de 100 cm<sup>2</sup>, con 12 canales paralelos de 290 mm cada uno. Las placas se fabrican y se integran en 5 de células cortas pilas por Reinz Dichtungs GmbH, una parte de la corporación DANA. El rendimiento se investigó en 1000 h de pruebas. Un total de 20 pilas se han construido y operado (Töpler & Lehmann, 2017).

Figura N° 4.16 Placas bipolares con mismo siseño pero diferentes recubrimientos.



Fuente: (Töpler & Lehmann, 2017)

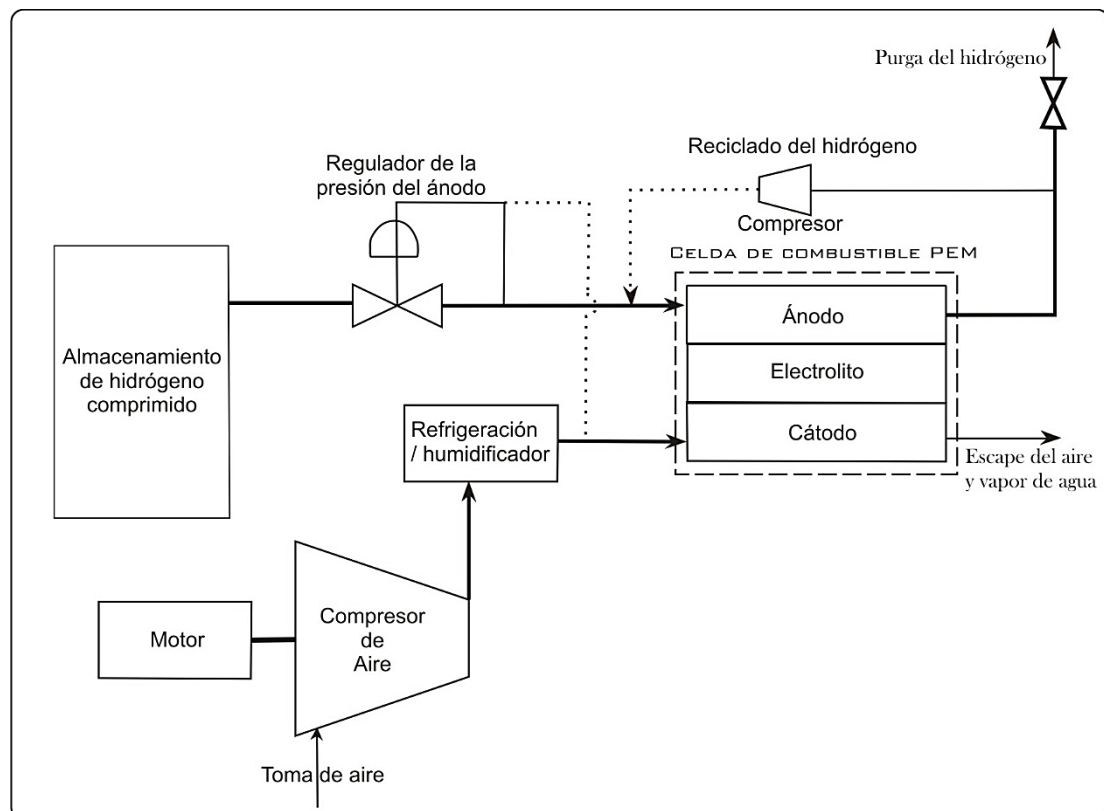
Donde (a) sin recubrimiento metálico placa bipolar (0,1 mm SS 316 L), (b) el oro recubierto placa bipolar metálica (200 nm, Au en 0,1 mm SS 316 L), (c) placa bipolar compuesta de grafito molido (Töpler & Lehmann, 2017).



### Presión de operación de FC para más de 10 KW

Cuando se trabaja con pequeños sistemas de pilas de combustible, no hay muchos inconvenientes con la presión de funcionamiento, pero cuando se trabaja con PEMFC, con potencias de más de 10 KW, entonces sí se debe considerar, porque ya no se trabaja con condiciones estándar. Se tiene referencia que el suministro de hidrógeno viene predeterminado, ya que está comprimido, y se alimenta desde un tanque o cilindro de alta presión, para el caso del aire es donde tendría que haber la diferencia, puesto que para poder abastecer un sistema con más robustez, se requiere de un flujo mayor de aire, por esta razón es que el aire debe ser comprimido e inyectado al sistema, y este compresor representaría a la vez, un gasto de la energía producida por la Pila de combustible, pero sería justificado si mantiene o se mejora la eficiencia de la FC (Dicks & Rand, 2018).

Figura N° 4.17 Representación esquemática de un sistema simple de PEMFC, como se emplea en los módulos de células de combustible Hydrogenics.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Elaboración propia

Nótese que para el sistema descrito en la Figura 25, la presión del hidrógeno en el lado del ánodo de la pila puede ser controlada como una función de la presión en el lado del cátodo que, a su vez, está determinada por la potencia suministrada al compresor de aire. En consecuencia, la presión diferencial desarrollada entre los dos lados de la



pila puede ser mantenida a un nivel bajo constante para reducir al mínimo el riesgo de cruce gas. Como una referencia se tiene que para un sistema de 100 KW, el consumo de energía típico por el compresor de aire será de aproximadamente del 20% de la potencia de célula de combustible (Dicks & Rand, 2018, p. 412).

Para cuantificar el aumento de la tensión para cada celda en una pila de combustible, y para cuantificar la ganancia de potencia considerando “I” como la corriente que fluye a través de una pila de “n” células serán las siguientes formulas (Dicks & Rand, 2018):

$$\Delta V_{gain} = \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = C \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (4.45)$$

$$Potencia\ ganada = C \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) * I * n \quad (4.46)$$

La potencia consumida por el compresor considerando como “ $\eta_c$ ” la eficiencia del compresor, tendremos la siguiente ecuación (Dicks & Rand, 2018):

$$Potencia\ del\ compresor = C_p * \frac{T_1}{\eta_c} \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) * \dot{m} \quad (4.47)$$

Donde “ $\dot{m}$ ” será la tasa de flujo de aire, en Kg s<sup>-1</sup>. Esta potencia solo es la potencia requerida por el rotor del compresor, más no del motor, por lo que la siguiente ecuación se considera la eficiencia de motor, y el parámetro “ $\dot{m}$ ” está relacionado con la salida de energía eléctrica, constante de presión “ $c_p$ ” tomara el valor de 1004 J Kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> y la estequiometría del aire  $\gamma = 1.4$  (Dicks & Rand, 2018):

$$Potencia\ requerida\ por\ el\ compresor = C_p * \frac{T_1}{\eta_m * \eta_c} \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) * \dot{m} \quad (4.48)$$

$$\dot{m} = 3.58 * 10^{-7} * \lambda * \frac{P_e}{P_c} \quad (4.49)$$

$$Energia\ electrica = P_e = nIV_c$$

$$Potencia\ del\ compresor = 3.58 * 10^{-4} * \frac{T_1}{\eta_m * \eta_c} \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0.286} - 1 \right) * \lambda \ln \quad (4.50)$$

Para poder cuantificar la pérdida de tensión que significa el compresor para la pila de combustible, se dividirá la ecuación anterior entre  $\ln$ , donde tendremos (Dicks & Rand, 2018):

$$\Delta V_{pérdida\ por\ el\ compresor} = 3.58 * 10^{-4} * \frac{T_1}{\eta_m * \eta_c} \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0.286} - 1 \right) * \lambda \quad (4.51)$$

La siguiente ecuación proporcionará la estimación si un aumento de presión mejorará el rendimiento neto del sistema de la pila de combustible, y será la resta de la tensión ganada menos la tensión perdida (Dicks & Rand, 2018).

$$\text{Tension neta } \Delta V = \Delta V_{\text{gain}} - \Delta V_{\text{pérdida por el compresor}} \quad (4.52)$$

Posibles alternativas de combustible o reactivo para las PEMFC son metanol y, en menor medida, etanol; ambos son ampliamente disponibles en el mercado. El metanol reacciona en el ánodo de una PEMFC.

### **Sistemas de control para las Pilas de Combustible**

Como se ha podido apreciar, la complejidad de todo el sistema exige sistemas de control muy rigurosos, por lo que la opción más desarrollada, para temas académicos, industriales, mecatrónicos, entre otros, resalta el uso del sistema de control lógico programable, técnicamente conocido como PLCs, que se puede utilizar para leer, grabar datos en tiempo real, analizar los voltajes en respuesta a cambios en la demanda por la carga, y no solo brinda datos sino también se puede introducir parámetros para que pueda accionar válvulas y otros dispositivos, incluso cambiar los parámetros de funcionamiento tales como los flujos de gas, la temperatura del humidificador y las presiones del sistema, también puede controlar la estequiometría correcta para el sistema, para que mantenga las tensiones constantes en las celdas, dentro de límites definidos de una célula de combustible (Dicks & Rand, 2018).

También se puede programar una situación de alarma que pondrá en enunciado para indicar algún tipo de acción correctiva que puede ser necesaria para evitar que una célula cause una reducción en el voltaje de toda la pila entera por lo que acelerará la degradación de la pila de combustible. Disposiciones similares están incorporadas en los sistemas de gestión de la batería de baterías avanzadas de iones de litio. Si el sistema emplea varias pilas PEMFC en módulos, el PLC supervisará el funcionamiento de todo el sistema para asegurar que cada módulo está funcionando de manera cohesiva (Dicks & Rand, 2018).

Por ejemplo, cuando el sistema de célula de combustible recibe una señal de puesta en marcha de un operador, el controlador da instrucciones para que el sistema siga un procedimiento de arranque pre-establecido que comienza cada módulo en un momento apropiado. La fuerza de la utilización de un PLC en este papel es que, mediante la programación de algoritmos adecuados, que se puede emplear para detectar fallos de funcionamiento de la pila, tales como variaciones inusuales en voltaje de la celda debido

a las tasas fluctuantes de flujo de gas causada por los canales bloqueados en las placas bipolares (Dicks & Rand, 2018).

Simulación de las operaciones de mecanizado (CAM): el programa de CAM, MODELA Player 4, un software sencillo que, sin embargo, nos permite realizar todas las operaciones necesarias para la fabricación de las placas bipolares de una pila de combustible (Almarza & Salueña, 2010).

#### 4.3. BOSQUEJO DE DISEÑO DE UNA PEQUEÑA PILA DE COMBUSTIBLE

Para el diseño de una de pila de combustible, se requiere varios instrumentos especializados, tanto para el diseño teórico, para el ensamblaje físico, construcción, puesto en funcionamiento y protocolo de mediciones o pruebas. Empero, ya tenemos una idea básica de los elementos que componen una FC, por lo que se desarrollara teóricamente en referencia de Almarza, 2010; un pequeño ejemplo de dimensionamiento de una pequeña pila de combustible tipo PEM.

Para ello se determinara los parámetros iniciales, o los datos de diseño que se quiere alcanzar, los cuales son los siguientes:

- ✓ Potencial nominal : 4 W
- ✓ Tensión a circuito abierto : 4 V
- ✓ Intensidad de corriente máxima : 1 A

Considerando estos datos de diseño, se recordara que la tensión de entrega de una celda de combustible teórica era de 1.25 V, que en la práctica es menor, debido a las pérdidas, lo cual por cuestiones de practicidad se considerará una tensión de 0.9 V como máximo para el valor de la tensión de la celda. Para determinar el número de celdas "N",  $V_{cell}$  será la tensión de la celda y  $V_0$  será la tensión a circuito abierto:

$$N = \frac{V_0}{V_{cell}} \quad (4.53)$$

$$N = \frac{4}{0.9} = 4.44 \approx 5 \text{ celdas}$$

Siempre se redondea al número mayor entero siguiente, en caso de tener un resultado con decimales. Se requiere de 5 celdas para disponer de una tensión de 4 V, ahora se calculará la intensidad de corriente "I",  $W_0$  será la potencia nominal,  $V_0$  será la tensión a circuito abierto.

$$W_0 = V_0 * I \rightarrow I = \frac{W_0}{V_0} \quad (4.54)$$

$$I = \frac{4}{4} = 1 A$$

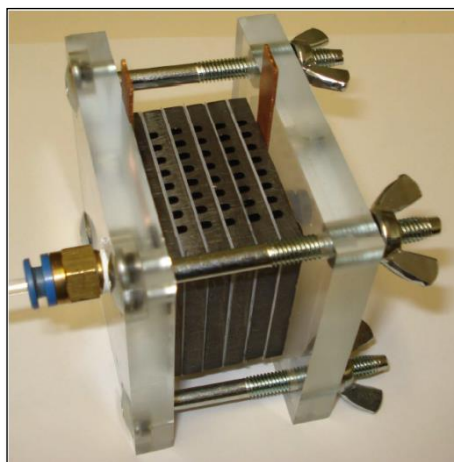
La intensidad de corriente necesaria en la pila de combustible será de 1 A, luego se calculará la superficie activa total " $S_{tot}$ ", considerando que la densidad de corriente " $i_0$ " para los catalizadores de las MEAs será de  $0.02 A cm^{-2}$ .

$$i_0 = \frac{I}{S_{tot}} \rightarrow S_{tot} = \frac{I}{i_0} \quad (4.55)$$

$$S_{tot} = \frac{1}{0.02} = 50 cm^2$$

Quiere decir que el total de superficie activa necesaria para la pila es de  $50 cm^2$ , entonces, la superficie de la membrana de cada celda, deberá ser como mínimo de  $10 cm^2$  (Almarza & Salueña, 2010). Una vez obtenidos estos datos se puede resumir: que se necesita 5 celdas, una corriente de circulación de 1 A, una superficie activa de membrana de  $10 cm^2$ , para tener una pila de combustible de potencia de 4W y 4 voltios y 1 Amperio.

Figura N° 4.18 Pila de combustible tipo PEMFC, ensamblado.



Fuente: (Almarza & Salueña, 2010)

#### 4.4. APLICACIONES PRÁCTICAS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

##### 4.4.1. PEQUEÑOS SISTEMAS PRÁCTICOS CON PILAS DE COMBUSTIBLE

Así como se ha llegado a desarrollar pilas de combustibles robustos, con diferentes aplicaciones desde generación eléctrica estacionaria, e inicialmente para proyectos de la Nasa, programas aeroespaciales, aplicaciones para la industria automotriz, telecomunicaciones, sistemas independientes, entre otros, también se tiene pequeños sistemas con pilas de combustible, y siendo un poco más precisos pues PEMFC; que

como ya lo describimos, estos funcionan con temperatura ambiente estándar, y se puede tener una versatilidad de aplicaciones, como por ejemplo.

- ✓ Cargadores de baterías para equipos electrónicos portátiles, como celulares, ordenadores portátiles, entre otros.
- ✓ Aplicaciones militares, como fuente de energía portátiles.
- ✓ Como energía de reserva, fuentes estacionarias

Horizon Energy Systems de Singapore, ha defendido a los pequeños sistemas, propulsados por hidrógeno PEMFC durante varios años y ahora comercializa una gama de pilas que respiran aire con salidas de 12 W a 1,0 kW para sistemas portátiles y de educación; ejemplos se muestran en la Figura 41. La compañía también produce el 'mini-pak'

Figura N° 4.19 Productos Horizon Fuel Cell



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

El primer sistema produce 12 W es de la serie H, el segundo produce 1KW, el tercero es un cargador de teléfono conocido como “Mini-Pak” que es una pila de combustible para la carga de dispositivos electrónicos; que utiliza una pila de respiración de aire y un cartucho que contiene hidrógeno almacenado como un hidruro. Después de la introducción de la 'mini-pak' en el camping de Estados Unidos y mercados al aire libre en los Estados Unidos y Europa, Horizon Fuel Cells se asoció con Brunton para producir el “Brunton Hydrogen Reactor” para cargar la mayoría de los dispositivos de bolsillo,

tales como teléfonos inteligentes, iPads, baterías de la cámara, purificadores de agua, luces UV recargables y unidades GPS (Dicks & Rand, 2018).

Un producto similar, conocido como el 'UPP', de Energía Inteligente en el Reino Unido se presenta en la figura N° 4.20. Ambos productos usan pequeñas pilas de células de combustible que respiran aire. El dispositivo UPP emplea un cartucho de hidruro de (90,5 mm x 40 mm x 48 mm, peso 385 g) que puede entregar 25 Wh de energía. La pila es una 5-W PEMFC que es capaz de producir hasta 1000 mA a 5 V. Un cartucho de combustible, por tanto, proporcionará un Smartphone con aproximadamente cinco cargas completas, y está aprobado para su transporte a bordo de aeronaves. Cada cartucho tiene una vida útil de 9 años y por lo tanto está listo para satisfacer cualquier pozo de emergencia dentro de la vida útil esperada del teléfono inteligente (Dicks & Rand, 2018, p. 123).

*Figura N° 4.20 Cargador de teléfono móvil de energía inteligente (la UPP).*



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Otro temas nuevo de reciente estudio son, las micro celdas de combustible, aún no están disponibles a cualquier cliente en la actualidad en la investigación y el desarrollo; algunos enfoques interesantes han sido publicados. Una innovación importante sería el suministro de energía para los circuitos electrónicos integrados directamente siendo en chips electrónicos. Para la realización de micro celdas de combustible sobre la base de materiales de soporte de silicio principalmente procesos compatibles CMOS se combinan con los procesos de MEMS está bien establecido en las industrias de semiconductores (Frank et al., 2010).

En primeros conceptos, las células de combustible plana sobre un chip de silicio se han dispuesto por encima de una capa de almacenamiento de hidrógeno Palladium (Frank et al., 2010). La funcionalidad de este dispositivo es una fuente de alimentación a un sensor de temperatura y humedad autárquica que se ha probado



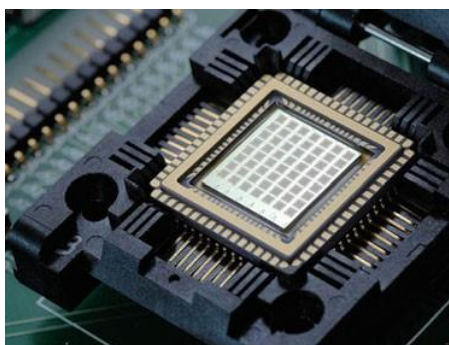
experimentalmente, véase la fig. N° 43 Con esta configuración, las tensiones son superiores a 6 V y una densidad de potencia de 450 mW/cm<sup>2</sup> se ha logrado sistemas micro electrónicos autárquica que son un posible futuro mercado para este tipo de pilas de combustible.

*Figura N° 4.21 Micro pila de combustible desarrollado por IMTEK.*

Fuente: (Frank et al., 2010)

#### 4.4.2. MEDIANOS SISTEMAS PRÁCTICOS CON PILAS DE COMBUSTIBLE

Varias compañías están comercializando sistemas PEMFC para los sistemas de copia de seguridad o de energía estacionaria, por ejemplo, para las torres de telecomunicaciones y centros de datos remotos. Sistemas por debajo de aproximadamente 5 kW, tales como los producidos por PlugPower / Relion y Alteryg



emplean pilas refrigerados por aire. Por las razones dadas en la Sección 4.5.3, los sistemas por encima de 5 kW, tales como los producidos por Ballard / Dantherm, Hydrogenics y M-Field se enfrían agua (Dicks & Rand, 2018).

La siguiente descripción es de un módulo de potencia de célula de combustible Hydrogenics (Figura N° 4.22) se da como una ilustración de un producto PEMFC diseñado para aplicaciones estacionarias como para centros de datos. El módulo emplea una pila refrigerado por agua de diseño bastante convencional y se compone de 60 células, cada una con un área activa de 500 cm<sup>2</sup>, y placas bipolares fabrican a partir de un material compuesto de polímero de carbono moldeado por compresión (Dicks & Rand, 2018).

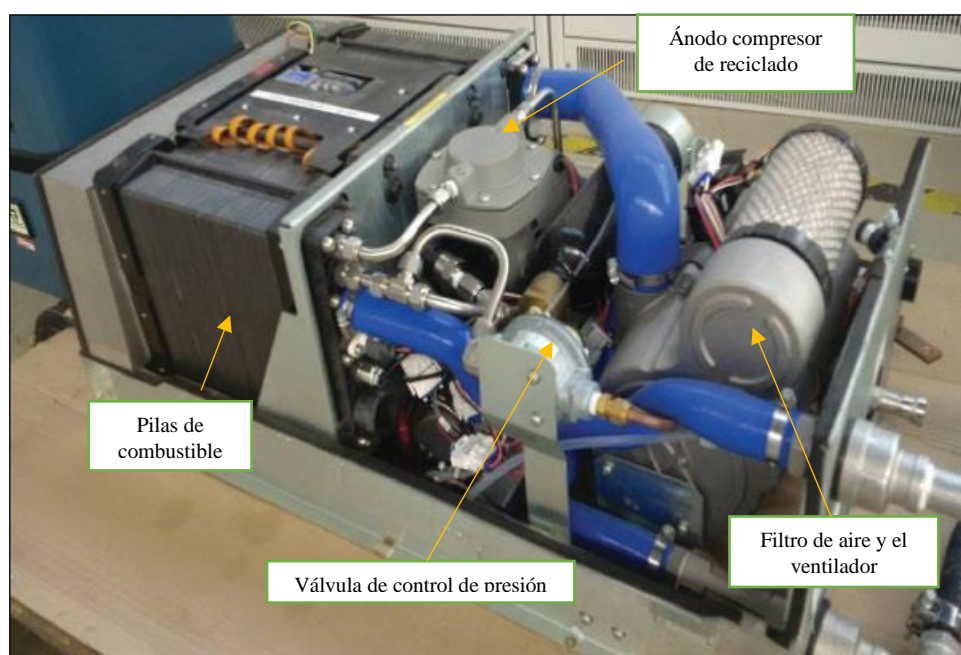
La pila produce alrededor de 12 kW a una corriente de 350 A y una tensión nominal de 35-58 V. Es auto humidificado, es decir, no hay humidificación externa ya sea del combustible o las corrientes de aire. Los elementos esenciales de la balanza de planta (BOP). El control cuidadoso de los caudales de gas y la temperatura de la pila (es decir, a través del flujo de agua de refrigeración) mantiene la pila en humedad óptima. La recirculación de los gases de escape del ánodo ayuda a mantener la humedad, incluso en el lado del ánodo de la pila. Una válvula de control de presión diferencial, asegura



que la presión en el lado de aire de la pila sigue de cerca que en el lado de combustible (Dicks & Rand, 2018).

Hay una bomba que hace circular el hidrógeno a través de los ánodos de la pila, y el bucle de combustible es 'de composición muerto'. Una válvula de alivio purga esta línea a intervalos para evitar una acumulación de contaminantes dentro de los ánodos. El aire se suministra a través de un ventilador, que está regulado para proporcionar la estequiometría correcta sobre el régimen de funcionamiento total del sistema. Cuando el módulo está apagado, el aire y los suministros de combustible se desconectan por electroválvulas. Un recipiente de tampón pequeña contiene suficiente hidrógeno de modo que cualquier cantidad de oxígeno que queda en el aire del cátodo se auto consume por el sistema, y por lo tanto sólo el gas inerte se mantiene en el estado de cierre. Este procedimiento se demanda para limitar la degradación y prolongar la vida de la pila (Dicks & Rand, 2018).

*Figura N° 4.22 Hydrogenics, montado en bastidor, módulo de 'HYPM', cubiertas retiradas para mostrar la pila y artículos de balanza de planta.*



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Un sistema de control de procesos está acoplado al módulo de potencia Hydrogenics y está integrado con software tanto para supervisar el rendimiento de la pila y para ajustar los parámetros, tales como el hidrógeno y el flujo de aire, en respuesta a la demanda eléctrica impuesta. Otros parámetros del proceso que son alimentadas al controlador incluyen la temperatura de la chimenea, tensiones de celda y la presión en el lado del combustible de la pila (Dicks & Rand, 2018).

#### 4.4.3. APLICACIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE EN EL PARQUE AUTOMOTRIZ

Programas de demostración apoyados por el gobierno de los autobuses con pilas de combustible están en su lugar en todo el mundo desarrollado con los fabricantes en Europa, Japón y América del Norte. Más recientemente, China e India se han involucrado en esta actividad a través del desarrollo de su propia tecnología PEMFC. Muchos de los autobuses de pila de combustible en la carretera son los vehículos híbridos y el último modelo de Mercedes-Benz, el Citaro FuelCELL-híbrido, incorpora baterías de litio junto con el PEMFC pilas; uno de los autobuses se muestra en la Figura 44 (Dicks & Rand, 2018).

Al igual que con los autobuses anteriores Mercedes-Benz, el hidrógeno para las pilas de células de combustible se almacena a presión en los cilindros en el casco de techo del vehículo. El número de cilindros requeridos se ha reducido de 9 a 7 (Figura N° 4.23) a causa de la mejora de la eficiencia del sistema y el uso de las baterías de iones de litio. Estas baterías (que al igual que las pilas PEMFC son refrigerados por agua) tienen una capacidad de 27 kWh que es suficiente para alimentar los motores eléctricos de cubo de rueda en una constante de 120 kW (165 CV). El consumo de combustible es 11-33 kg de hidrógeno por cada 100 km - es decir, 50% menos en comparación con su predecesora, la Citaro F-CELL - y la gama del vehículo es de 250 km (Dicks & Rand, 2018).

Figura N° 4.23 Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid bus con sus Tanques de hidrógeno.

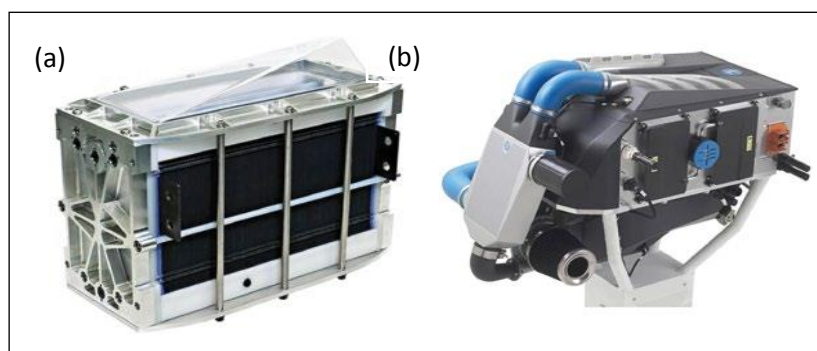


Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

El Toyota Mirai, lanzado en 2015, emplea una pila de 115 kW que suministra potencia a un único motor eléctrico 114-kW. El hidrógeno está contenido a presión en dos tanques con un volumen combinado de 122,4 L, y el fabricante afirma que este almacenamiento dará un rango de hasta 650 km. el Hyundai ix35 coche de pila de combustible está equipado con una pila de 100 kW y promete un rango de 594 km de una carga de hidrógeno a 70 MPa (Yoshida & Kojima, 2015).

En el Reino Unido, Intelligent Energy está desarrollando celdas de combustible con diversas empresas, que incluyen el Suzuki fabricante de la moto, y ha anunciado su propio sistema refrigerado por agua de 100 kW innovador para vehículos; véase la figura 4.38. Como se explica por la empresa, la plataforma de 100 kW aprovecha al máximo la tecnología de pila de Energía Inteligente que ofrece una densidad de potencia de 3,5 kW L<sup>-1</sup> y una potencia específica de 3,0 kW kg<sup>-1</sup>, mientras se dirigen para el bajo costo, la producción en serie de gran volumen. La clave de este rendimiento se dice que es el enfriado por evaporación tecnología patentada, (CE) (Dicks & Rand, 2018).

Figura N° 4.24 Sistema inteligente de energía de 100 kW de células de combustible para vehículos: (a) pila refrigerada por agua y (b) Sistema de envasado.



Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

## ELEMENTOS PRINCIPALES DEL DE TOYOTA MIRAI

### Pila de combustible Mirai

La pila de FC comprende cientos de componentes apilados llamados celdas. Cada celda consiste en un conjunto de electrodo de membrana (MEA), que es una membrana de electrolito de polímero sólido recubierta con catalizador en ambos lados (electrodos), intercalada entre separadores. El voltaje de una sola celda es inferior a 1 V y, en consecuencia, el voltaje se incrementa al apilar cientos de celdas en serie. Las celdas se apilan de esta manera para crear una única pila de FC.

Las innovaciones en la estructura del canal de flujo de células y los electrodos de la pila Mirai FC producen una densidad de potencia de 3.1 kW / L, que se encuentra en el nivel más alto de ese mundo. Esto permitió la miniaturización de la pila FC, lo que hace posible instalar la pila FC debajo del piso de un sedán y crear un espacioso interior del vehículo.

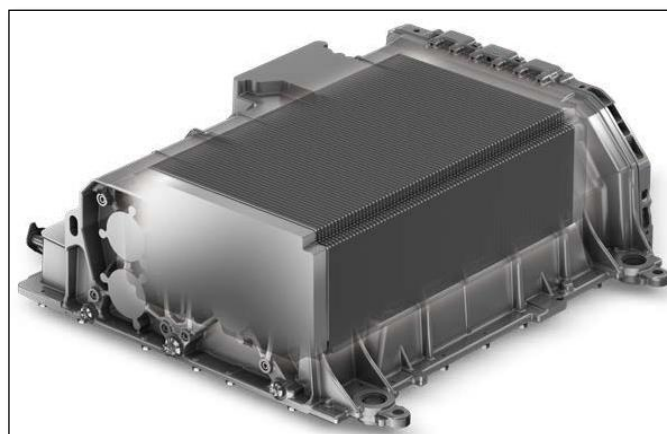
Tabla N° 4.7 Principales especificaciones de la pila Mirai FC

Máxima salida	114 kW (155PS)
---------------	----------------

<b>Densidad de potencia de volumen</b>	3.1 kW / L (nivel superior global)
<b>Número de celdas en una pila</b>	370 celdas (apilamiento de línea única)

Fuente: Toyota

Figura N° 4.25 Pila de Combustible del Toyota Mirai.

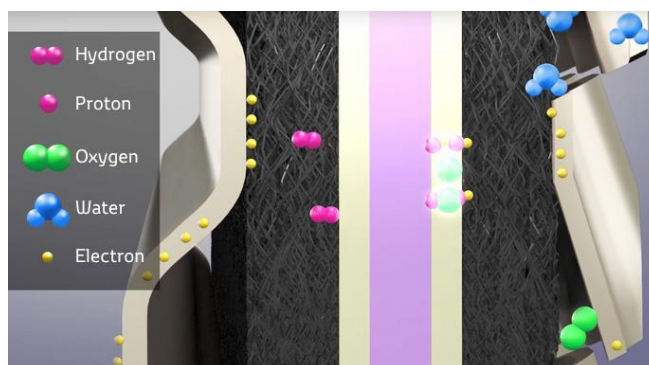


Fuente: Toyota

### Células

La energía eléctrica se genera a partir de la reacción química de hidrógeno y aire (oxígeno). Las células generalmente están hechas de membrana de electrolito, un par de electrodos (un electrodo negativo y un electrodo positivo), separadores y otros componentes. El voltaje de una sola celda es menor a 1 V, pero el voltaje se incrementa al apilar cientos de celdas en serie, generando la sustancial energía eléctrica necesaria para operar un vehículo de motor.

Figura N° 4.26 Medelado de una célula de combustible del Toyota Mirai.



Fuente: Toyota

Una estructura en zigzag tridimensional mejora el drenaje de fluidos y aumenta la eficiencia de generación. El campo de flujo de malla fina 3D emplea un campo de flujo en el electrodo positivo (aire) de la celda. La primera estructura de malla fina en 3D del

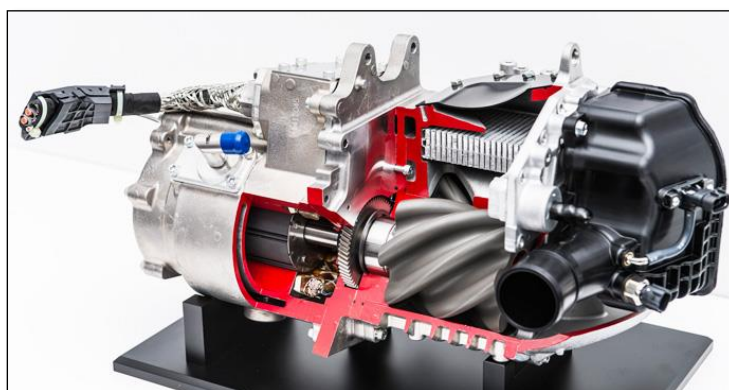


mundo aumenta el drenaje de agua y proporciona un suministro uniforme de aire a la superficie de la celda. Como resultado, el Mirai logra 2.4 veces la densidad actual de vehículos anteriores. Esto contribuye sustancialmente a generar eficiencia en el nivel más alto del mundo.

### **Compresor de aire**

Se extraen grandes cantidades de aire y se bombean a la chimenea FC. El compresor de aire (rotor tipo helicoidal de seis lóbulos) comprime el aire necesario para la generación de energía eléctrica y lo bombea a la chimenea FC. La cantidad de aire que necesita la pila FC varía desde un flujo extremadamente pequeño cuando el vehículo está en ralentí a un flujo muy grande al acelerar. El Mirai utiliza un rotor tipo raíz de seis hélices patentado, el primero en el mundo, para atraer y comprimir el aire de manera eficiente de acuerdo con el volumen de aire que fluye hacia adentro. Esto contribuye a mejorar la poderosa aceleración y el rango de crucero.

*Figura N° 4.27 Compresor de aire del Toyota Mirai.*

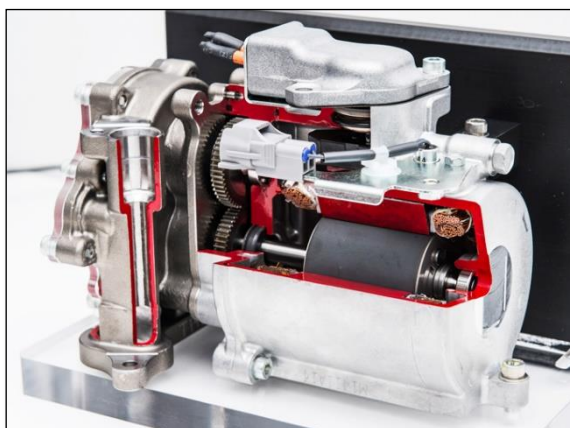


Fuente: Toyota

### **Bomba de circulación de hidrógeno**

El hidrógeno se utiliza como una fuente de energía preciosa sin sobrantes. La bomba de circulación de hidrógeno recircula cualquier hidrógeno que no reaccionó durante la generación de energía eléctrica, utilizando efectivamente el hidrógeno. Además, el flujo de gas en el lado del hidrógeno en las células transporta agua hacia abajo, humidificando la entrada en el lado del aire, que es susceptible de secado. Esto hace posible eliminar el humidificador externo. Además, la integración de la bomba de circulación de hidrógeno con la pila de FC mejora la disipación de calor y la hace más compacta y ligera.

*Figura N° 4.28 Bomba de circulación de hidrógeno del Toyota Mirai.*

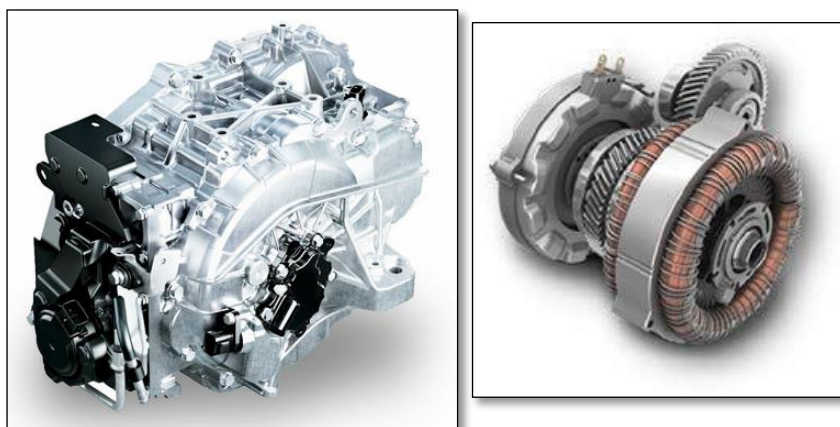


Fuente: Toyota

### **Motor eléctrico**

Un motor más evolucionado para un mayor placer de conducción. Al igual que los vehículos híbridos de Toyota, el Mirai usa un motor de CA sincrónico. Este motor de CA sincrónico genera eficientemente una gran cantidad de par de operación de baja a alta velocidad. La velocidad y el par del motor son libremente controlables. Esto produce una conducción potente y suave. El motor de alta velocidad utiliza un nuevo método de bobinado de bobina, produciendo una mayor densidad de salida en un motor más compacto y liviano. Junto con la estructura de doble eje, este diseño compacto aporta más libertad de integración de componentes.

*Figura N° 4.29 Motor eléctrico Toyota Mirai.*



Fuente: Toyota

### **Unidad de control de potencia**

El cerebro del vehículo de pila de combustible, controlando la electricidad de forma experta. La unidad de control de potencia convierte la alimentación de CA / CC y ajusta apropiadamente la tensión eléctrica. La unidad de control de potencia Mirai se compone

de un inversor, un convertidor elevador y un convertidor DC / DC. La unidad controla con precisión la salida de la pila de FC y la carga y descarga de la batería en todas las condiciones de funcionamiento.

*Figura N° 4.30 Unidad de control de potencia del Toyota Mirai.*



Fuente: Toyota

### **Inversor**

Convirtiendo electricidad y suministrándola de la pila FC y la batería al motor. Los motores no se pueden operar conectándolos directamente a la batería. El inversor convierte la corriente continua suministrada de la batería a CA para encender los motores eléctricos. Por el contrario, convierte la corriente alterna generada por los motores eléctricos durante la desaceleración en corriente continua para recargar la batería. El enfriamiento de doble lado, que enfría directamente los elementos de potencia, mejora la eficiencia de refrigeración y permite reducir el tamaño y reducir el peso del inversor.

### **Convertidor de carga**

Controlar el voltaje y aumentar los bajos voltajes. El convertidor elevador controla la carga y la descarga de electricidad ajustando el voltaje de la batería. Aumenta progresivamente la tensión de alimentación normal de aproximadamente 250 V CC a un máximo de 650 V CC, según sea necesario. Esto significa que se puede generar más potencia a partir de una pequeña corriente para obtener un alto rendimiento de los motores de alta potencia, mejorando la eficiencia general de la unidad de control de potencia.

### **Convertidor DC / DC**

Reduce el voltaje de forma precisa, lo que permite que la electricidad se use para aplicaciones distintas de la conducción. El convertidor CC / CC baja la tensión de

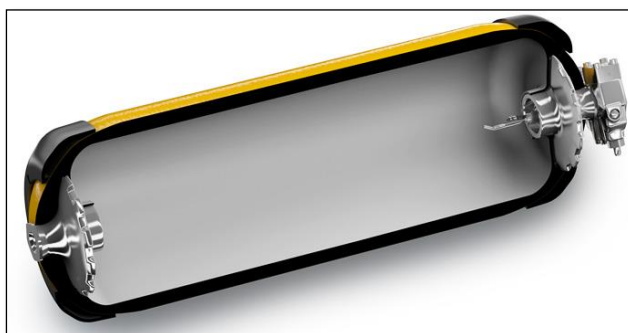


alimentación de la batería de alto voltaje. Reduce el voltaje de aproximadamente 250 V DC de la batería a 12 V DC, para ser utilizado por sistemas auxiliares del motor que ayudan con el funcionamiento del sistema FC y dispositivos electrónicos como faros.

### Tanques de hidrógeno a alta presión

La estructura patentada de tres capas aumenta la resistencia y la durabilidad. Los tanques de hidrógeno a alta presión almacenan el hidrógeno que se usa como combustible a una presión alta de aproximadamente 70 MPa. Toyota adoptó una estructura de tres capas (un revestimiento de plástico que sella en hidrógeno, una capa de plástico reforzado con fibra de carbono que proporciona resistencia a la presión y una capa de plástico reforzado con fibra de vidrio que protege la superficie exterior) para mejorar el rendimiento y la seguridad del almacenamiento. El plástico reforzado con fibra de carbono en particular es tan fuerte que se usa en los últimos componentes de aviones. Además, las mejoras innovadoras realizadas en el patrón de estratificación permitieron que el tanque fuera más compacto y liviano, logrando uno de los mejores rendimientos de almacenamiento en tanques del mundo al 5,7% en peso.

Figura N° 4.31 Tanques de hidrógeno de alta presión del Toyota Mirai.



Fuente: Toyota

El Tanque de hidrógeno a alta presión tiene una resistencia y durabilidad segura.

Tabla N° 4.8 Estructura de tres capas de los tanques de alta presión del Toyota Mirai.

<b>Capa superficial</b>	Plástico reforzado con fibra de vidrio
<b>Capa de en medio</b>	Plástico reforzado con fibra de carbono
<b>Capa interior</b>	Forro de plástico

Fuente: Toyota

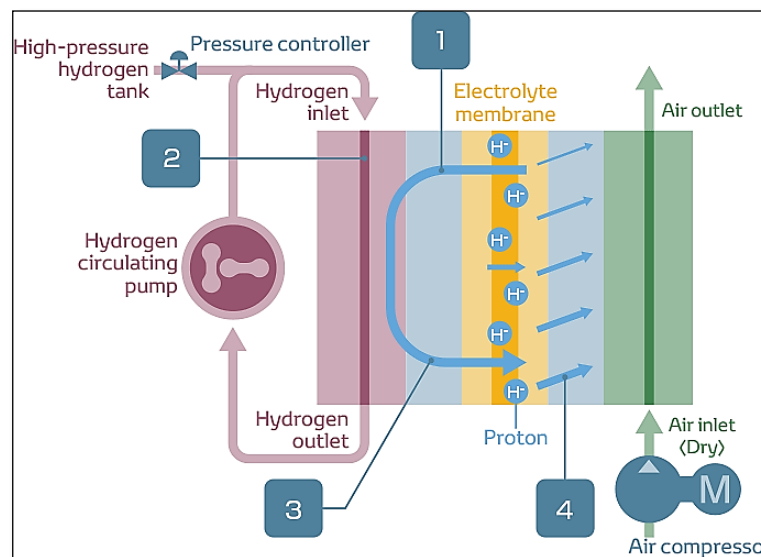
### Medidas para detectar y detener fugas

Los detectores de hidrógeno están instalados para detectar fugas. Si se detecta una fuga de hidrógeno o una colisión, la válvula del tanque se apaga (si la concentración es baja, se emite una advertencia). Pantalla de advertencia de fugas de hidrógeno (en el tablero de instrumentos)

### Humidificación interna (sin humidificador externo)

El agua producida en la chimenea no solo se elimina, sino que se usa de manera efectiva. Para que una pila de combustible genere electricidad, es necesario que la membrana del electrolito esté adecuadamente mojada de modo que los iones de hidrógeno en la membrana del electrolito puedan moverse suavemente. El enfoque general para lograr esto fue recuperar el agua en los gases de escape de la celda de combustible y suministrar el agua al aire de admisión mediante un humidificador externo, pero el Mirai hace circular el agua producida por la generación de energía eléctrica dentro de la chimenea. El agua se usa efectivamente a través de dicha autohumectación. Esto hizo posible que Toyota creara la primera celda de combustible del mundo sin un humidificador externo, haciendo que el sistema de celdas de combustible sea más compacto y liviano.

Gráfico N° 4.14 diagrama de funcionamiento de Humidificación interna del Toyota Mirai.



Fuente: Toyota

1. Membrana de electrolito más delgada. Promueve la retrodifusión del agua generada.
2. Aumento del volumen de circulación de hidrógeno > Aumento del suministro de vapor de agua desde el ánodo aguas arriba y aguas abajo.

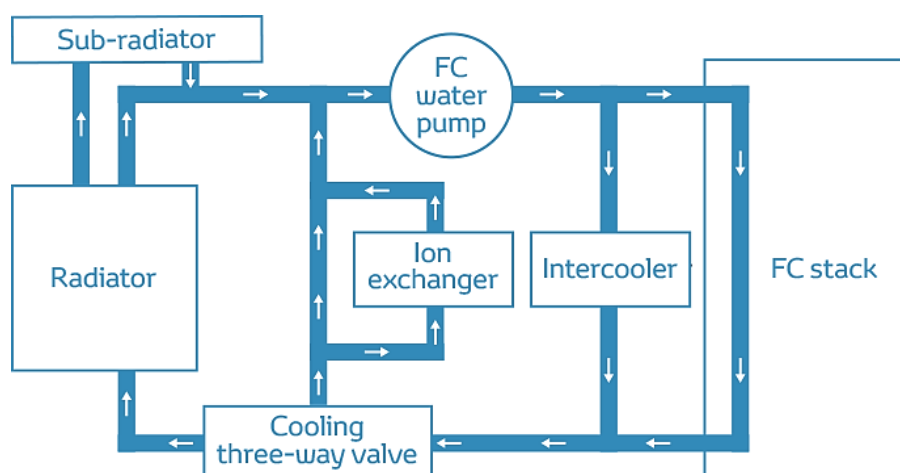
3. Humidificación del ánodo. El aire y el hidrógeno fluyen en direcciones opuestas, humidificando el flujo de aire aguas arriba, que tiende a secarse.
4. Supresión de la evapotranspiración. Aumenta el volumen de agua refrigerante en el aire aguas arriba y suprime el aumento de la temperatura y también suprime la evapotranspiración del agua generada

### Sistema de refrigeración

El diseño enfría inteligentemente el sistema y promueve el flujo de aire. Se utilizan dos sistemas de refrigeración independientes: un sistema de refrigeración FC que utiliza fluido de refrigeración solo para que el FC enfríe la pila de FC y un sistema de refrigeración EV que refrigera el inversor y el sistema del motor.

El sistema de refrigeración FC utiliza una bomba para hacer circular el fluido refrigerante entre un radiador y la pila de combustible, similar al sistema de refrigeración de un automóvil convencional, para evitar que la temperatura de la pila FC aumente demasiado a partir del calor producido cuando la pila de combustible genera electricidad. Con el fin de evitar cortocircuitos desde la pila de FC a través del fluido de refrigeración, también se utiliza un intercambiador de iones para garantizar que el fluido de refrigeración no sea conductor.

Figura N° 4.32 Sistema de refrigeración del Toyota Mirai.



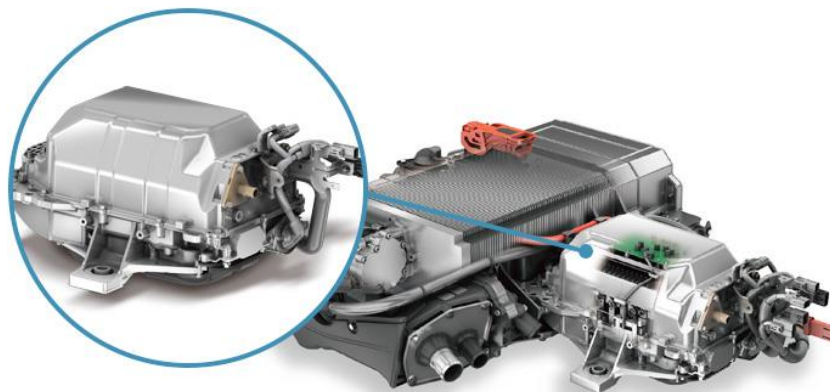
Fuente: Toyota

### Convertidor FC Boost

El convertidor elevador FC es un dispositivo para aumentar la potencia eléctrica generada por la pila de combustible a mayor voltaje (aproximadamente 650 V). Toyota desarrolló un convertidor elevador FC de alta capacidad. Esto permitió reducir el número de celdas en la pila FC mientras se usaban los mismos motores, inversores y otros

componentes utilizados en las unidades híbridas de producción en masa actuales, lo que reduce significativamente los costos y aumenta la confiabilidad. Además, las innovaciones en el control de aumento de voltaje y la estructura de la carcasa proporcionan un funcionamiento excepcionalmente silencioso.

*Figura N° 4.33 Convertidor FC Boost del Toyota Mirai.*

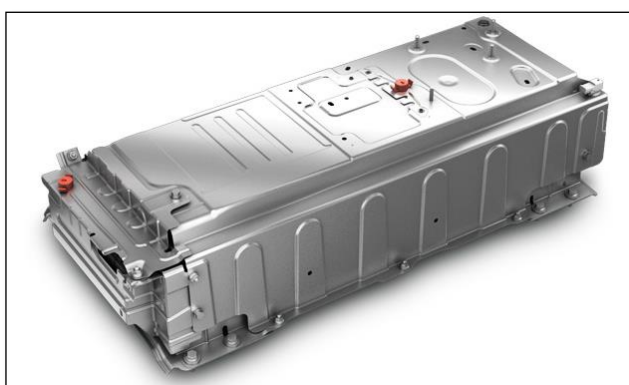


Fuente: Toyota

### **Batería (hidruro de níquel-metal)**

La batería proporciona la energía necesaria para la aceleración y resiste el frío. La batería almacena energía recuperada durante la desaceleración y ayuda a la salida de la pila FC durante la aceleración. El Mirai está equipado con una batería de hidruro de níquel-metal que está madura tanto tecnológicamente como como producto. La batería presenta un rendimiento excepcional en términos de usabilidad y durabilidad a temperaturas extremadamente bajas.

*Figura N° 4.34 Batería (hidruro de níquel-metal) del Toyota Mirai.*



Fuente: Toyota

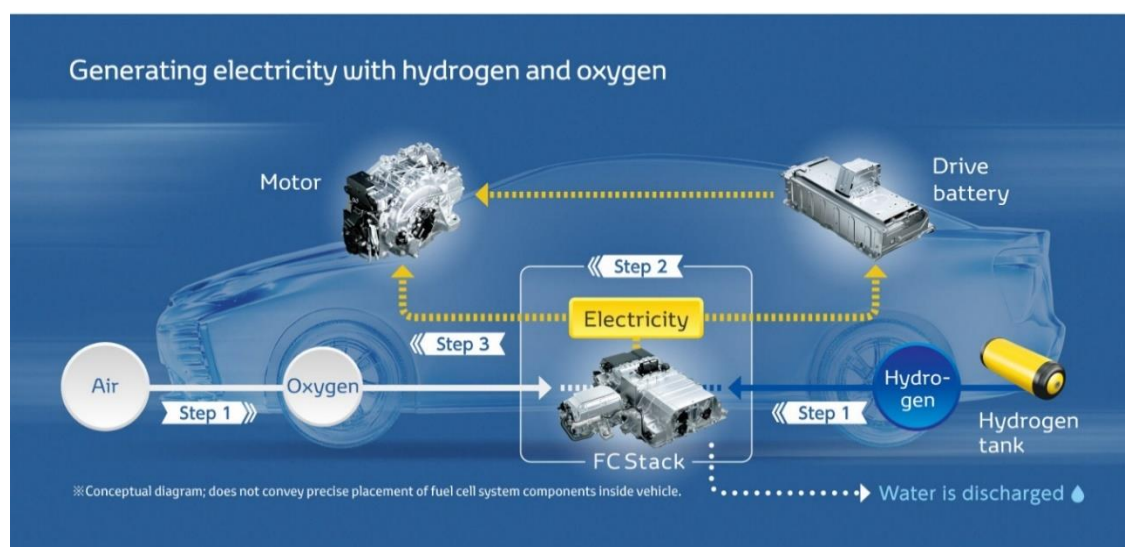
### **Combustible de hidrógeno**

El abastecimiento rápido de hidrógeno permite unidades largas sin detenerse. El abastecimiento de hidrógeno se realiza en estaciones de hidrógeno, que se están extendiendo a diversas regiones. Se tarda unos tres minutos en repostar, y un tanque

lleno proporciona aproximadamente el mismo alcance que un vehículo de gasolina. El Mirai es compatible con los nuevos estándares comunes de abastecimiento de combustible en Japón, Estados Unidos y Europa.

1. Medición Toyota según los estándares SAEJ2601 (temperatura ambiente: 20 ° C, presión del tanque de hidrógeno cuando se alimenta con combustible: 10 MPa). El tiempo de repostaje varía según la presión de combustible de hidrógeno y la temperatura ambiente.
2. Equipo de abastecimiento de combustible: ISO 17268: Dispositivos de conexión de reabastecimiento de combustible de vehículos terrestres de hidrógeno gaseoso: SAE J2601: Protocolos de abastecimiento de combustible para vehículos de superficie de hidrógeno gaseoso ligero. Comunicaciones de abastecimiento de combustible: SAE J2799: Dispositivo de conexión de combustible de vehículo de hidrógeno comprimido de 70 MPa y comunicaciones opcionales de vehículo a estación.

Figura N° 4.35 El sistema de funcionamiento en general del Toyota Mirai.



Fuente: [https://www.toyota-global.com/innovation/environmental\\_technology/technology\\_file/fuel\\_cell\\_hybrid.html#h301](https://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/technology_file/fuel_cell_hybrid.html#h301)

#### 4.4.4. APLICACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE RESIDENCIALES

Las celdas de combustible, también tiene la influencia de ingresar a los hogares para proporcionar electricidad y calor que puede aprovecharse para el servicio de agua caliente, para una determinada demanda, como se ve en la siguiente figura.

*Figura N° 4.36 Varios tipos de unidades de pila de combustible ENE-FARM para uso residencial.*



Fuente: (Sasaki et al., 2016)

Las que se muestran aquí están instalados en Ito Campus de la Universidad de Kyushu. El primero fue lanzado en 2009, y el número acumulado de 150,000 unidades vendidas superó en diciembre de 2015, con el apoyo de las medidas de subvención gubernamentales de Japón, Este alto nivel de adopción también fue impulsada por las medidas de reducción de costos por parte de las empresas interesadas. La Estrategia Nacional de Revitalización de Japón tiene medidas específicos para lograr la popularización de 5,3 millones de unidades ENE-FARM por alrededor del 2030 (Sasaki et al., 2016).

#### **4.4.5. APLICACIÓN DE LOS FC EN LOS SISTEMAS DE COGENERACIÓN**

Las pilas de combustible, tienen una interesante perspectiva cuando se le considera también, un sistema de trigeneración; ya que genera electricidad, calor y agua, esos son los tres productos que genera. Y por esta razón es que su eficiencia puede llegar hasta valores teóricos de 100% y en casos prácticos del 70-90%, no solo tiene aplicaciones directamente eléctricas, sino como vemos en esta sección, también este calor puede ser utilizado para incorporar a un sistema de generación térmica.

Los que estudiamos ingeniería mecánica eléctrica y aquellos que estudiaron otras carreras referidas a energía, se tiene conocimientos básicos en cuanto a la generación de energía eléctrica a través de la energía térmica, geotérmica. Conceptos como, turbina de vapor, sistemas en cascada, ciclo combinado, ciclo Rankin, cogeneración, entre varios términos de ingeniería. Las pilas de combustible, son una alternativa altamente confiables, dado que la producción de calor es estable. Para poder tener criterio de cuál debe ser el tipo de pila de combustible idóneo se tiene referencia la siguiente tabla.



Tabla N° 4.9 Comparación de tipos seleccionados de células de combustible por tipo.

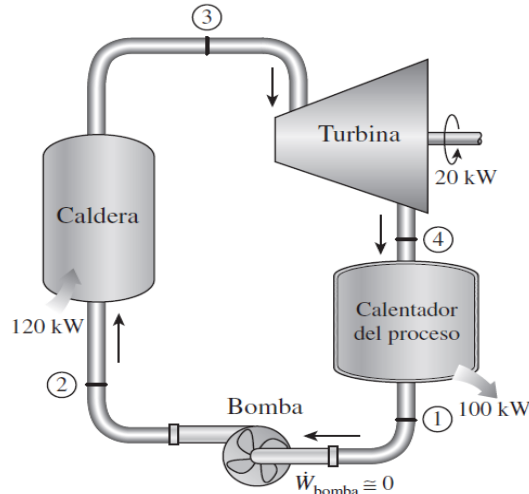
Tipo de pila de combustible	Temperatura de funcionamiento (° C)	Tipo de Electrolito	Ion de transferencia de carga	Material catalítico	Rango de potencia típica	Eficiencia eléctrica (%)
Pilas de combustible de electrolito de polímero PEFC	40-80	Membrana de transferencia de iones	H <sup>+</sup>	Platino	20 W- 2 MW	hasta 52
Alta temperatura PEFC HT pila de combustible de electrolito de polímero	120-180	Membrana de transferencia de iones	H <sup>+</sup>	Platino	5-100 kW	37-38
Pilas de combustible de ácido fosfórico PAFC	150-210	Solución de ácidos fosfóricos	H <sup>+</sup>	Platino	100 kW- 11 MW	37-45
Pila de combustible AFC-alcaina	100-250	Solución acuosa de KOH (30-75% en peso).	OH <sup>-</sup>	Platino	5-500 kW	Hasta 60
MCFC- células de combustible de carbonato fundido	620-670	Litio fundido, sodio o carbonato de potasio con matriz porosa	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Níquel	1.4- 59 MW	Hasta 48
LT-SOFC la célula de combustible de óxido sólido (low temperatura)	450-550	Cerámica / cerámica conductora de protones	O <sup>2-</sup> (En convencional SOFC) H <sup>+</sup> (En la realización de protones SOFC)	De tipo perovskita cerámica / níquel	100-1000 W	60-70
Células de combustible de óxido sólido SOFC	680-1000	Circonio estabilizado con itrio	O <sup>2-</sup>	De tipo perovskita cerámica / níquel	400 W- 200 kW	25-62

Fuente: (Gamboa et al., 2011)



Analizando la tabla de comparación de los tipos de FC, resalta las diferentes temperaturas, que cada uno desarrolla, y este potencial de temperatura puede ser aprovechado, para poder ingresarse a un sistema de cogeneración. Y cogeneración es la producción de más de una forma útil de energía (como calor de proceso y energía eléctrica) a partir de la misma fuente de energía (Cengel & Boles, 2012).

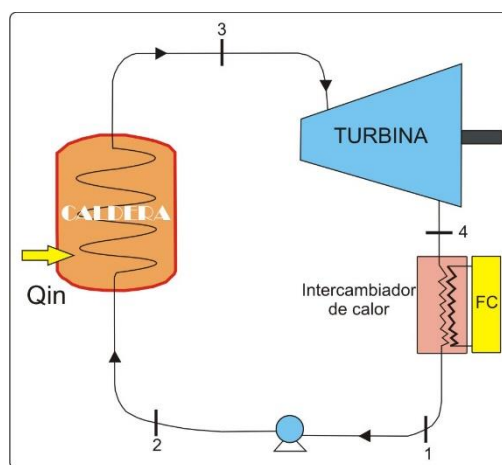
Figura N° 4.37 Sistema de cogeneración simple.



Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

Donde se puede remplazar en los puntos 4 y 1 del calentador del proceso por un intercambiador de calor con una pila de combustible, esto aumentará la eficiencia del sistema, ya que disminuirá el ingreso del combustible a la caldera, porque la temperatura de ingreso a la caldera será mayor, por ende se disminuirá un porcentaje del combustible de ingreso, haciendo que la eficiencia aumente, no solo del sistema sino también de la pila de combustible.

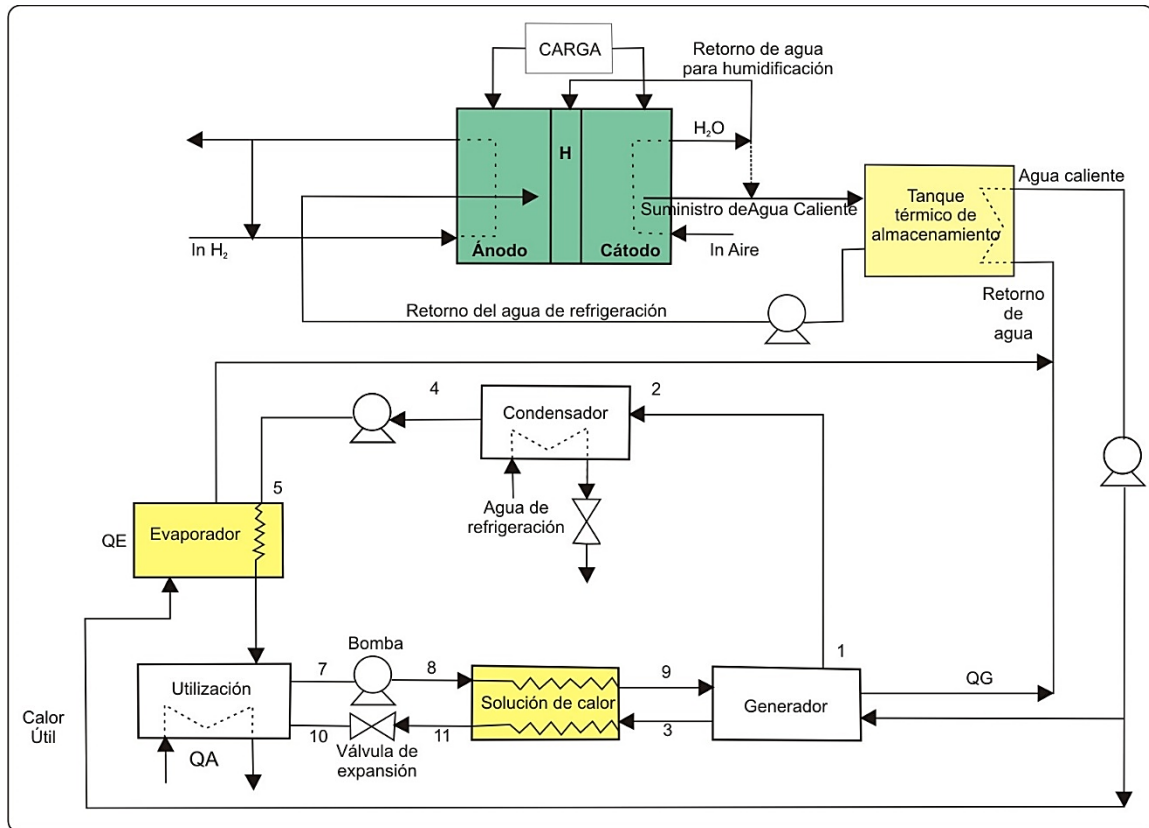
Figura N° 4.38 Sistema de cogeneración con una Pila de combustible FC.



Fuente: elaboración propia

Se han realizado investigaciones experimentales para estimar relación que tienen la energía eléctrica y térmica que desarrolla una pila de combustible tipo PEM, y se ha llegado a probar en un caso experimental que una PEMFC de hasta 5KW de potencia nominal, se puede obtener una potencia térmica de hasta 4.5 KW, es decir, una relación de 10:9 (Gamboa et al., 2011). El diagrama de una pila de combustible PEMFC y su acoplamiento con una instalación de absorción se muestra en la siguiente figura.

Figura N° 4.39 Celda de combustible PEM, junto con un sistema de refrigeración por absorción.



Fuente: (Gamboa et al., 2011)

Elaboración propia

En el diagrama de funcionamiento anterior, el sistema de refrigeración absorbe el calor que expide la pila de combustible, para utilizarlo para calefacción. Iniciando primeramente con los conceptos de eficiencia, el acoplamiento de la pila de combustible proporcionará una mayor eficiencia al sistema de absorción, y para poder cuantificar este beneficio, se tiene que determinar la relación entre la energía útil y la energía suministrada al sistema, el coeficiente de performance (COP), es una buena ecuación para cuantificar la eficiencia, y será la sumatoria de las energías útiles entre la sumatoria de energías de entrada (Gamboa et al., 2011).

$$COP = \frac{\sum Q_u}{\sum Q_{in}} \quad (4.56)$$

El coeficiente de performance, o coeficiente de operación, para el aire acondicionado será (Gamboa et al., 2011):

$$COP_{AC} = \frac{Q_{EV}}{Q_T} \quad (4.57)$$

Donde " $Q_{EV}$ " será la potencia del evaporador, y " $Q_T$ " será la energía térmica suministrada al generador. En el caso teórico que el COP sea igual a 1, quiere decir que la capacidad de refrigeración, será prácticamente similar a la cantidad de energía térmica que se introduce en el sistema (Gamboa et al., 2011), i.e. que la energía que entra se utiliza en su totalidad. La energía eléctrica producida por la célula de combustible es conocido a través de la eficiencia de conversión. La eficiencia de la célula de combustible se define:

$$\Delta H = \frac{W_{elect,max}}{\eta_{elect}} \quad (4.58)$$

De esta manera que es posible determinar la cantidad de energía que la célula de combustible puede transferir a la Bomba de absorción de calor (AHP), que se produce a la temperatura más baja que en la reacción del hidrógeno. Sin embargo, la diferencia de temperatura no disminuye la potencia intercambiada, porque el proceso de intercambio de calor tiene lugar sin cambio de fase. Un circuito de líquido se utiliza con el fin de disipar el calor para el correcto funcionamiento de la célula de combustible. Un fluido entra a la temperatura inicial  $T_i$  y sale a una temperatura superior  $T_F$ . Esta diferencia es proporcional a la potencia que se transfiere entre la célula de combustible y el AHP. Este poder se ha determinado como (Gamboa et al., 2011):

$$Q_T = (m_a)(C_p)(T_F - T_i) \quad (4.59)$$

La energía eléctrica " $P_e$ " producida por la célula de combustible, asumiendo una eficiencia de 1, estimando la potencia disponible para el sistema AHP, teniendo en cuenta un comportamiento no lineal será (Gamboa et al., 2011):

$$P_e = \frac{(3.8819)(1000P_T)^{0.8584}}{1000} \quad (4.60)$$

La potencia de refrigeración será (Gamboa et al., 2011):

$$Q_{EV} = COP_{AC} * Q_T \quad (4.61)$$

Para los sistemas de cogeneración, se utiliza un nuevo concepto de la eficiencia, que relaciona la energía eléctrica y térmica obtenida con la energía total suministrada. La eficiencia global del sistema, llamado eficiencia de la cogeneración (EOC), es la relación entre la suma de la energía útil y la energía de entrada utilizada por la célula de combustible (Gamboa et al., 2011):

$$EOC = \frac{P_e + P_T}{P_{H_2}} = \frac{Q_{EV} + P_e}{(P_e)(\eta_{elect})} \quad (4.62)$$

De esta manera, el valor de la eficiencia de trigeneración EOT se puede definir como:

$$EOC = \frac{COP_{T1}Q_1 + COP_{T2} + P_e}{P_e \eta_{elect}} \quad (4.63)$$

El primer COP, hace referencia al evaporador, el segundo a la calefacción. El uso de células de combustible en sistemas de cogeneración ha abierto la posibilidad de obtener eficiencias de energía alrededor de 100% (Gamboa et al., 2011).

El sistema combinado de calor y energía (CHP), permiten la producción de calor y electricidad útil de la misma fuente se utiliza. El uso de sistemas de cogeneración no es un concepto nuevo, pero es una manera excelente para tomar ventaja de la utilización de una parte importante de la energía total obtenida a partir de las células de combustible estacionarias u otro tipo (calor y electricidad principalmente), para ser convertida en energía útil, para generar energía eléctrica constante y al mismo tiempo produce aire caliente y el agua del calor residual (Gamboa et al., 2011).

Otro tipo son los sistemas estacionarios PAFC, pilas de combustible de ácido fosfórico se han desarrollado en un grado tecnológico de su comercialización es posible. Tunkey 200 kW estas plantas están disponibles y cientos han sido instalados en Estados Unidos, Europa y Japón. La temperatura de funcionamiento es de alrededor de 200 ° C, y han demostrado la capacidad de suministro de agua caliente así como la electricidad, dependiendo del diseño específico de las plantas (Gamboa et al., 2011).

#### 4.4.6. APLICACIÓN EN GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA HÍBRIDA

Los tipos más populares para Generación eléctrica de mediana a gran escala son las pilas SOFC. El primero ha sido desarrollado sobre todo por Siemens Westinghouse, Toto, Mitsubishi Heavy Industries, Adelán y Accumentrics. La eficiencia de los SOFC es usualmente por encima 40% en los sistemas pequeños. Con el potencial de ir más allá de 50%, y en la cogeneración SOFC pueden lograr eficiencia en exceso de 90% (Kupecki, 2018).

Los principales usos de SOFC son: generación estacionaria, cogeneración, y poligeneración, mientras que algunas aplicaciones móviles tales como vehículos tripulados y no tripulados, el transporte por carretera, aviación y el espacio están en desarrollo (Kupecki, 2018). Lógicamente las investigaciones siguen madurando para poder tomar un mayor mercado en el área de generación estacionaria eléctrica, ya que

los sistemas convencionales tales como la termoeléctrica, consumen combustibles fósiles, gas natural, carbón, etc. que son contaminantes ambientales, en referencia de los las centrales hidroeléctricas que son la base en el país, este sistema es también complejo, ya que se tiene que tener un caudal fijo, túneles de conducción, energía potencial entre otros temas, por no decir que ocupan una gran área de trabajo. Capacidad cd (Kupecki, 2018).

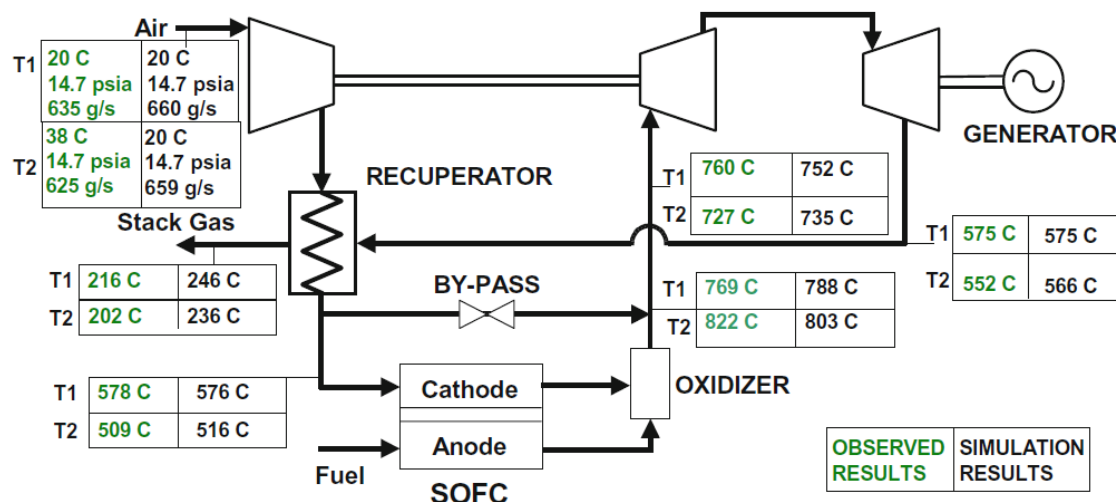
Tabla N° 4.10 Tecnologías de generación de energía eléctrica de pequeña y mediana capacidad ,típicos.

Tecnología	Motores de pistón	Turbinas	La energía fotovoltaica	Turbina s de
Capacidad	500 kW-50 MW	500 kW-5 MW	1 kW-1 MW	10 kW-2 MW
Eficiencia (%)	35	29-42	6-19	25
Costo capital (\$ / KW)	200-350	450-870	6600	1000
O & M costo (\$ / kW)	0.005-0.015	0.005-0.0065	0.001-0.004	0.01

Fuente: (Kupecki, 2018)

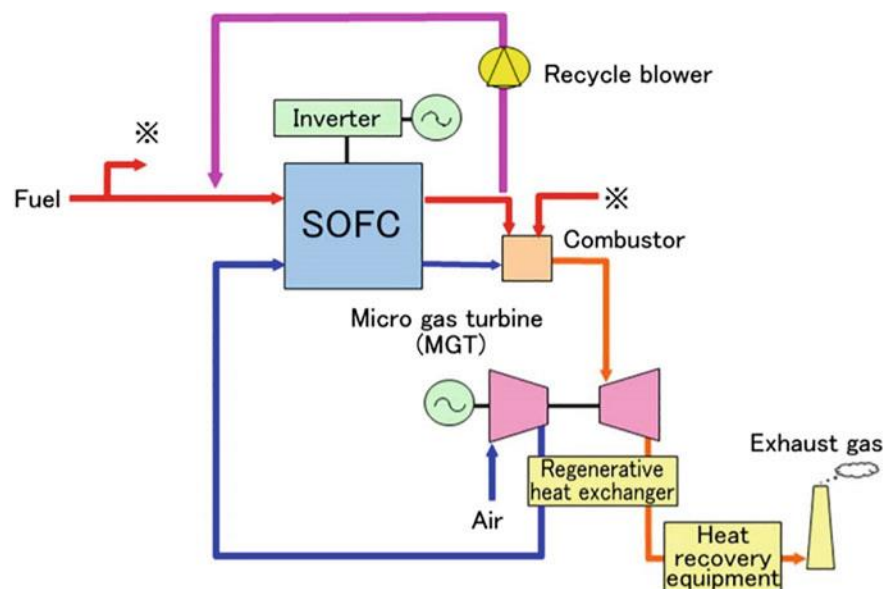
Es por esto, que las pilas de combustible tipo SOFC, tienen un gran potencial y cabida, para poder tomar un porcentaje de la producción de energía eléctrica. Se había visto un poco en el punto 4.4.5. Sobre la cogeneración, en este caso es similar el comportamiento que tiene para cogeneración, con la diferencia que tanto la electricidad y el calor se aprovechan directamente para la producción o generación eléctrica.

Figura N° 4.40 Comparación de los estados de temperatura en el sistema híbrido SOFC para las condiciones inicial y final.



Fuente: (Kupecki, 2018)

Figura N° 4.41 Disposición interna del sistema híbrido 250 kWe SOFC-MGT.



Fuente: (Kupecki, 2018)

En esta figura se puede apreciar, como la SOFC, alimenta a dos generadores, el primero directamente y el segundo a través de un sistema de ciclo brayton, este tipo de diagrama es solo para generación, se aprovecha la electricidad y la temperatura de la Pila de combustible (Kupecki, 2018).

Figura N° 4.42 Módulo del primer Convion C50 SOFC iniciado en Turín.



Fuente: (Kupecki, 2018)

## 4.5. ANÁLISIS Y GRÁFICOS COMPLEMENTARIOS

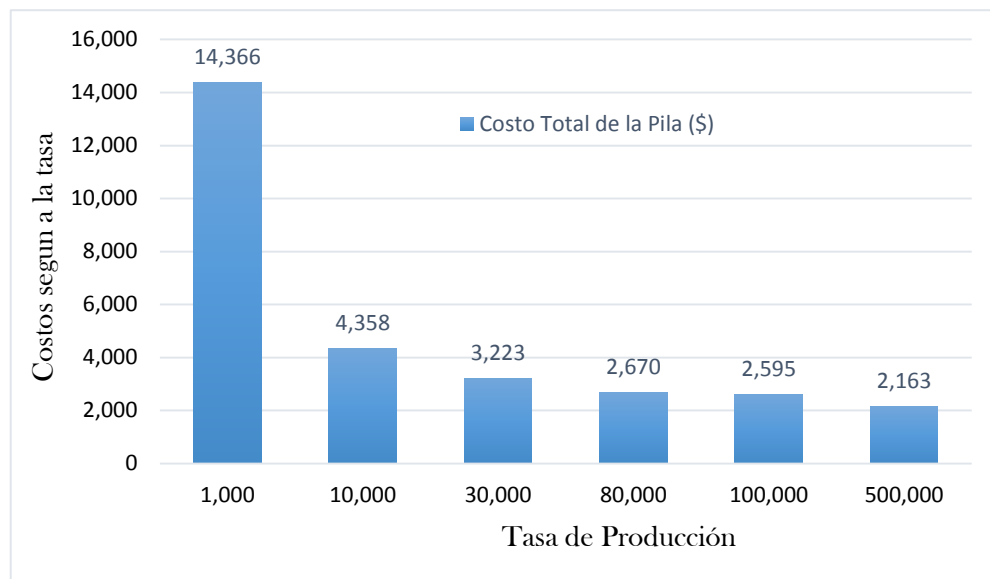
### 4.5.1. ANÁLISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

Si cuando iniciaron las investigaciones sobre las pilas de combustible, se toparon con muchos inconvenientes económicos, para poder mejorar tanto la calidad de los



electrodos, las membranas, los electrolitos, en si diferentes piezas. Pero esto no detuvo a los investigadores a seguir enriqueciendo sus conocimientos en conceptos de optimización. Si bien es cierto que aún sigue siendo caro este tipo de tecnología, a través de los años, de la producción en masa o serie y de la competencia de otras manufacturas, el precio ha ido menguando de manera considerable, para visualizar este efecto de disminución de costos mediante la producción en masa, se observa la siguiente gráfica.

Gráfico N° 4.15 Costo total de las Pilas de combustible según a la tasa de producción.



Fuente: Elaboración propia

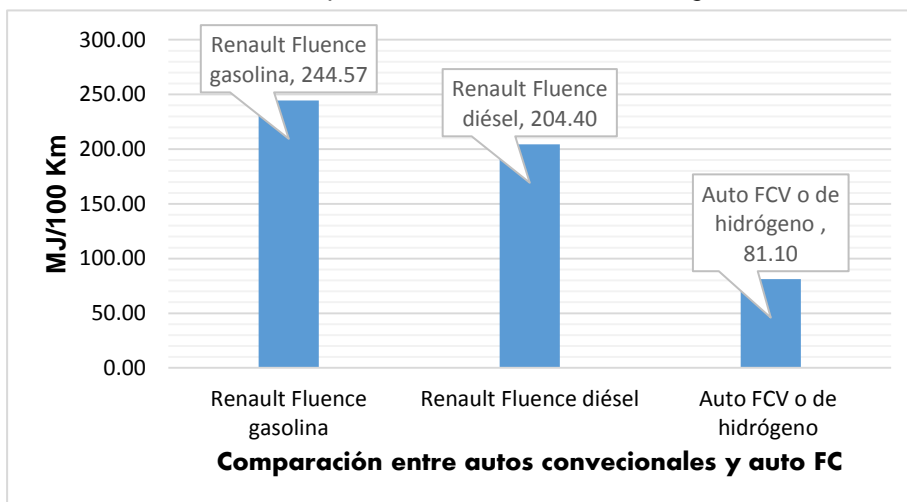
Los datos de los costos son un aproximado según las cotizaciones Europeas.

Cuando la producción es tan solo de 1000 unidades de pila de combustible (upc), entonces el costo por esos mil sería de \$ 14366; pero cuando la producción es de 10000 upc; entonces el costo se reduce en un 70%, es a partir de ahí es que la producción en masa de las pilas de combustible se reducen considerablemente, y esto no debe sorprendernos, que cada vez hay más empresas trabajando en la elaboración de pilas de combustible, la lista se dará, en el anexo, donde se apreciara las empresas manufactureras y distribuidoras de todo el mundo.

#### 4.5.2. COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS DE AUTOS

Para poder observar y discernir mejor en cuanto a quien usa, menos energía para una distancia de 100 Km, el siguiente gráfico, muestra cómo es que un Automóvil de Pilas de Combustión (FCV), usa menos cantidad de energía, en recorrer una determinada distancia, demostrando una mayor eficiencia del uso del combustible o energía.

Gráfico N° 4.16 Comparación de utilización de energía en 100 Km.

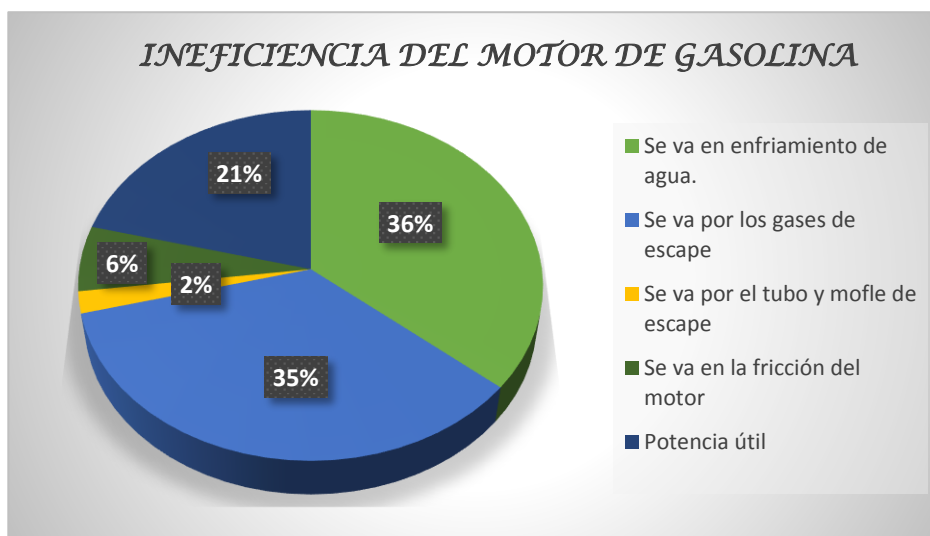


Fuente: Elaboración propia

### 4.5.3. COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DE UN MOTOR CONVENCIONAL CON UNA PILA DE COMBUSTIBLE.

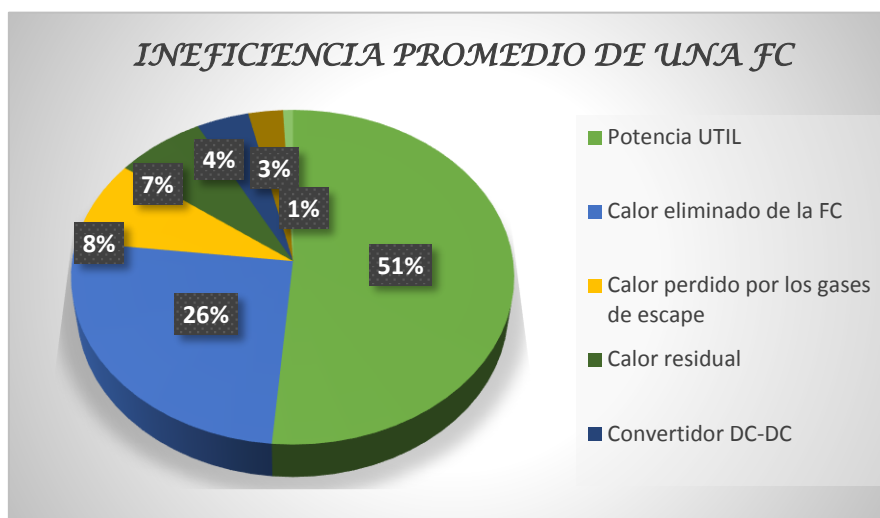
Gráficamente se compara entre un motor convencional y una Pila de combustible, estos datos son aproximados, para fines ilustrativos.

Gráfico N° 4.17 Desgloce de utilización de energía de un motor convencional.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.18 Desglose de utilización de energía de una Pila de combustible.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.6. SEGURIDAD DE MANEJO DEL HIDRÓGENO

Los Vehículos de pila de combustible (FCV), se están comercializando recientemente, y las estaciones de hidrógeno están siendo construidas gradualmente en los países que ya se está aplicando esa tecnología, un ejemplo, Japón, EEUU entre otros. Para garantizar un uso seguro y confiable de materiales metálicos en un ambiente de hidrógeno, los materiales y sistemas de hidrógeno tolerantes se deben emplear para evitar accidentes debido a la fragilización del hidrógeno (HE) (Sasaki et al., 2016).

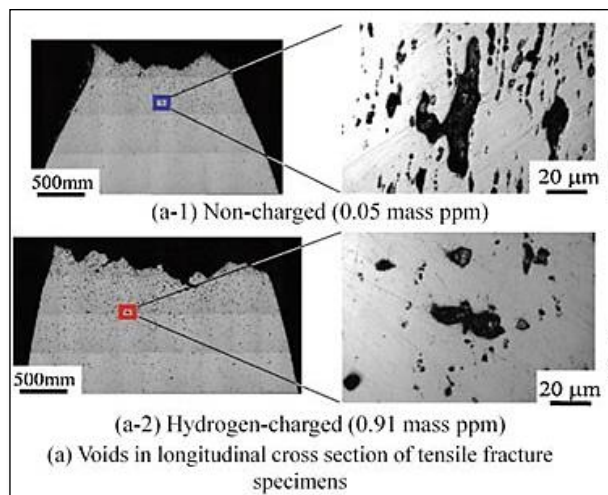
En Japón se construyeron 35 estaciones de hidrógeno desde el año 2000, y desde el año 2010 se construyeron 70 estaciones de hidrógeno de alta presión, esto debía comenzar con estándares moderados inicialmente tales como (Sasaki et al., 2016):

- (1) el rendimiento y la tracción fortalezas, elongación y reducción de área (RA) para la prueba de velocidad de deformación lenta (SSRT) en hidrógeno gaseoso deben ser iguales a o mayores que los que en el aire.
- (2) la vida de fatiga del material en hidrógeno gaseoso debe ser casi igual a la de aire, y
- (3) el crecimiento de grietas por fatiga (FCG) en hidrógeno gaseoso debe ser casi igual a la de aire. Para satisfacer estos requisitos, de acero inoxidable tipo 316L y aleación de aluminio A6061-T6 se utilizan principalmente para los componentes de hidrógeno.

Las partículas de hidrógeno son las más pequeñas a diferencia de las partículas de otros combustibles, es por esto que al ser más pequeñas, pueden ocasionar daños a las

paredes de los recipientes que lo contengan, los daños más visibles son las picaduras, en la siguiente figura se aprecia este efecto.

Figura N° 4.43 Desarrollo de huecos en una prueba de resistencia a la tracción de una muestra de acero tubería de hidrógeno-cargada, JIS-SGP (0,078% C).



Fuente: (Sasaki et al., 2016)

Cuando tratamos de hidrógeno gaseoso de alta presión, los componentes operados a alta presión deben estar diseñados en base a la Ley de Seguridad de gas de alta presión, que son las normas japonesas para gas de alta presión (Sasaki et al., 2016). En si se debe tener diferentes protocolos de seguridad, desde detectores, señalización, sistemas de extracción o circulación de aire, y el cumplimiento de las diferentes normas internaciones tales como los estándares SAEJ2601, ISO 17268, SAE J2601, SAE J2799, entre otros.

Figura N° 4.44 Detector de gas de hidrógeno instalado en un laboratorio.



Fuente: (Sasaki et al., 2016)

## ENTIDADES NORMALIZADORAS

Respecto a la normalización, ha avanzado según a los inconvenientes y los criterios de seguridad que cada entidad ha considerado, lógicamente las importantes entidades u organizaciones de cada país tienen sus propias normas, de influencia local o nacional, como también se han ido estandarizando asintiendo con las normas de otras entidades,

las más importantes tenemos a La Organización Internacional de Normalización (ISO), la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), la Organización Española de Normalización y Certificación (AENOR); la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR); el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) (Sanz, 2010).

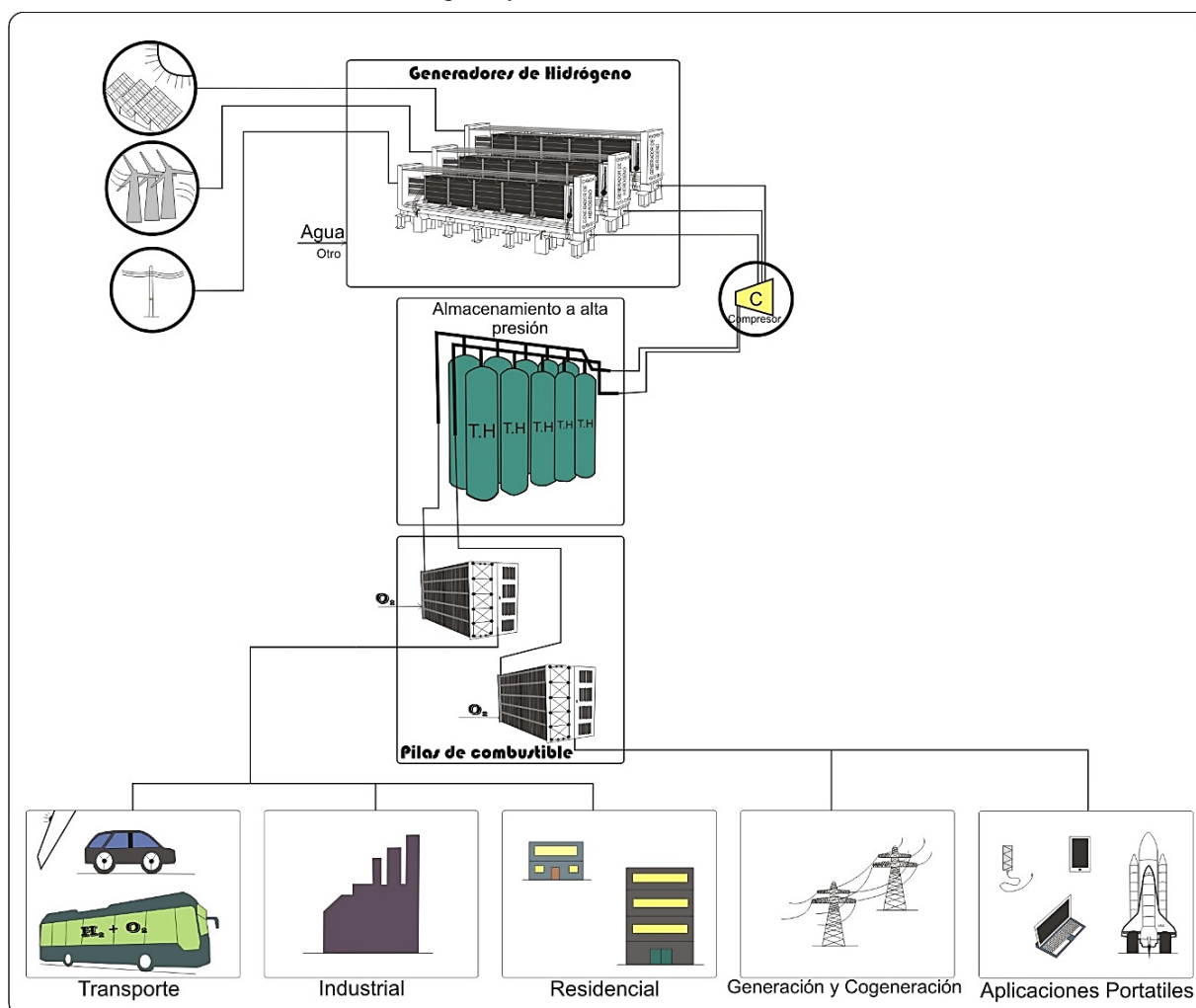
En Alemania el Instituto alemán de Normalización (Germany Deutsches Institut für Normung – DIN); entre otros, como ejemplo mencionaremos las siguientes (Sanz, 2010, p. 272).

- ISO 13985:2006. Liquid hydrogen - Land vehicle fuel tanks.
- ISO 14687:1999. (ISO 14687:1999/Cor 1:2001, ISO 14687:1999/CD Cor 2). Hydrogen fuel, Product specification.
- ISO/PRF TS 14687-2. Hydrogen fuel - Product specification - Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles.
- ISO 16110-1:2007. Hydrogen generators using fuel processing technologies - Part 1: Safety.
- ISO/DIS 16111. Transportable gas storage devices - Hydrogen absorbed in reversible metal hydride.
- ASTM G142 -98 (2004). Método de prueba estándar para la determinación de la susceptibilidad de los metales a fragilización del hidrógeno contenido en ambientes a alta presión, alta temperatura, o ambos.
- ANSI / CSA América FC 1-2004. Células de combustible estacionarias.
- SAE J 2574-2002 (SAE J2574 - 2002). Tecnología de celdas de combustible de vehículos.

## **PERSPECTIVA DE LA APLICACIÓN DEL HIDRÓGENO Y LAS PILAS DE HIDRÓGENO**

A través del desarrollo de las pilas de combustible se ha previsto mejorar la eficiencia de producción del hidrógeno, ya que a través de los años se ha empleado diferentes metodologías, donde Siemens ha sido pionero con su modelo Silyzer 200 la ficha técnica se encuentra en el anexo N° 4, donde también propone la utilización de energías renovables. Siendo así la siguiente figura una perspectiva general de su uso.

Gráfico N° 4.19 Perspectiva de Generación, almacenamiento, distribución y utilización del Hidrógeno y las Pilas de Combustible..



Fuente: elaboración propia.

Según la perspectiva de aplicación para el Perú aprovechando las energías renovables, la alternativa de generación de hidrógeno a través de electrolizador de siemens podría darse en las siguientes centrales.

- CENTRAL SOLAR RUBÍ - MOQUEGUA (144,48 MW).
- CENTRAL SOLAR MOQUEGUA FV (16 MW).
- CENTRAL PANAMERICANA SOLAR – MOQUEGUA (20 MW).
- CENTRAL MAJES SOLAR 20T – AREQUIPA (20 MW).
- CENTRAL SOLAR REPARTICIÓN 20T – AREQUIPA (20 MW).
- CENTRAL TACNA SOLAR (20 MW).
- PARQUE EÓLICO TRES HERMANAS - ICA (97,15 MW).
- CENTRAL EÓLICA CUPISNIQUE - LA LIBERTAD (80 MW).
- CENTRAL EÓLICA TALARA – PIURA (30 MW).
- CENTRAL EÓLICA PARQUE EÓLICO MARCONA – ICA (32 MW).



El electrolizador de Siemens no utilizaría ni el 5% de la potencia que generan estas centrales, obteniéndose una generación limpia de un combustible limpio, para poder consolidar la utilización de las pilas de combustible.

En cuanto a la cogeneración el tipo de pilas SOFC, podría contribuir a un aumento de las eficiencias de las centrales termoeléctricas de 5 a 20% por ejemplo en las siguientes centrales termoeléctricas.

- CENTRAL TERMOELÉCTRICA CICLO COMBINADO CHILCA 2 – LIMA (112,8 MW).
- CENTRAL TERMOELÉCTRICA ILO 4-NODO ENERGÉTICO DEL SUR ILO (720 MW).
- CENTRAL TERMOELÉCTRICA PLANTA PUCALLPA - RESERVA FRÍA (45,6 MW).
- CENTRAL TERMOELÉCTRICA PUERTO BRAVO-NODO ENERGÉTICO DEL SUR MOLLENDO – AREQUIPA (788,8 MW).
- CENTRAL TERMOELÉCTRICA PUERTO CALLAO (13,2 MW).
- CENTRAL TERMOELÉCTRICA CICLO COMBINADO CHILCA (FÉNIX) (534,3 MW).

### **ANÁLISIS DE DISCUSIÓN**

Según la tesis de (Montagne, 2016), con el título: “DISEÑO DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE PARA LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN DE CICLO OTTO EN LA REGIÓN PUNO”, expone que la mejor manera de poder utilizar el hidrógeno es inyectándolo directamente en el motor de combustión interna o de ciclo Otto para poder aprovechar su mayor poder calorífico, acoplado un generador de hidrógeno, que pueda suministrar de manera continua al motor.

Empero, se sabe que el hidrógeno es una partícula la más pequeña de todos los elementos, y al tener esa propiedad, ocasiona un efecto llamado fragilización en metales por hidrógeno (Gámez, 2010; Sasaki et al., 2016; Töpler & Lehmann, 2017); es decir, ocasiona en un caso extremo picaduras en los motores o contenedores de diferentes elementos, metales etc., como se ve en la figura N°4.43, por ende ésta presente tesis, propone la utilización del hidrógeno pero en una pila de combustible para una reacción directa de producción eléctrica, que alimentará a un motor eléctrico del automóvil.

También se disiente de la aplicación directa del hidrógeno a un motor Otto ya que aún existiría contaminación por reacción del hidrógeno con un motor Otto que describe el autor de la siguiente manera: “Por otra parte que el hidrógeno combustione con el oxígeno, solo producirá agua. ... Por lo que en la combustión del hidrógeno con el aire, emitirá pequeñas cantidades de monóxido de nitrógeno NO y dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> (Montagne, 2016, p. 117)”. Empero, una pila de combustible no emite ningún gas

contaminante o de efecto invernadero, solo produce energía eléctrica, calor que puede ser reutilizado, y vapor de agua que esta purificado.

#### 4.7. EXPERIMENTACIÓN CON EL MÓDULO LUCAS-NÜLLE LABSOFT PILA DE COMBUSTIBLE DE LA E.P.I.M.E. – U.N.A.P.

Se desarrolló mediciones experimentales, en el laboratorio de energías renovables de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, obteniéndose datos del módulo de las pilas de combustible de marca LUCAS-NÜLLE LabSoft, que compone de un electrolizador o generador de hidrógeno conectado a 2 celdas de combustible tipo PEM, conectados a un sistema de control y simulación de cargas de código SO4203-4L, esta misma conectado a la través de un cable de datos a una computadora con un software de control y experimentación que se aprecia en la siguiente figura.

*Figura N° 4.45 Componentes del modulo de laboratorio LUCAS-NÜLLE LabSoft.*



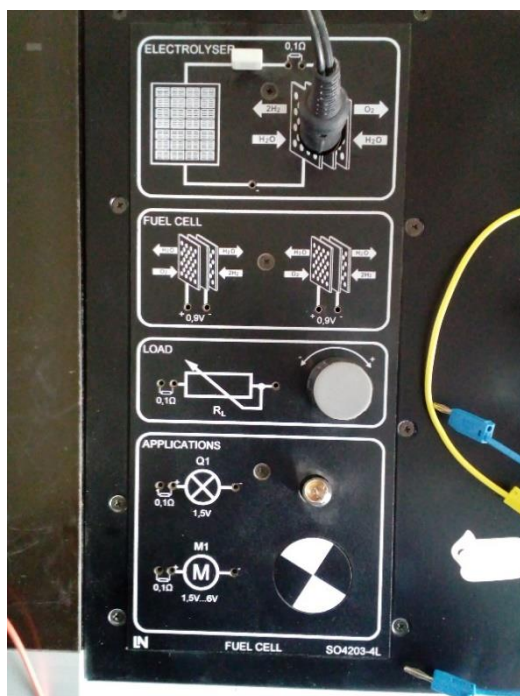
Fuente: Elaboración Propia

Considerando los datos técnicos del módulo, se procedió a hacer pruebas de funcionamiento desde la generación de hidrógeno, hasta la obtención de tensiones de prueba de funcionamiento en vacío o OCV, y también con cargas en funcionamiento CCV para poder demostrar las pérdidas que puede presentar una Pila de combustible en funcionamiento. Los datos técnicos característicos del módulo son los siguientes.

- Célula de combustible tipo PEM 1 de 0.9 V.
- Célula de combustible tipo PEM 2 de 0.9 V.
- Resistencia variable
- Un foco de 1.5 V.
- Un motor de 1.5 V.

En la siguiente figura se muestra los datos referidos.

Figura N° 4.46 Panel de pruebas y datos del módulo LUCAS-NÜLLE LabSoft.



Fuente: Elaboración propia.

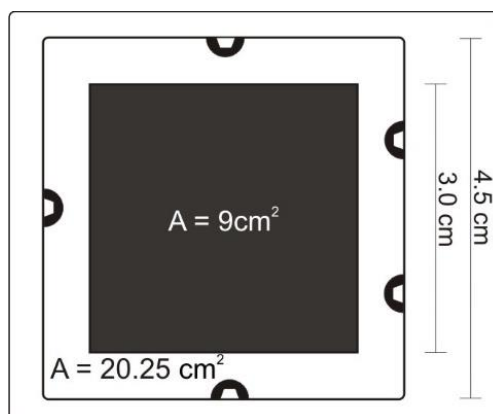
La primera prueba que se realizó a las células de combustible, fue la de medir su tensión de salida en un circuito sin carga o circuito abierto OCV, obteniéndose las siguientes tablas.

Tabla N° 4.11 Tensión nominal vs. Tensión medida en laboratorio.

TENSIÓN	VALORES
Tensión nominal de las pilas	$0.9 + 0.9 = 1.80 \text{ V}$
Tensión medida	1.74 V.

Fuente: elaboración propia.

Figura N° 4.47 Dimensiones de una célula de combustible del modulo FC.



Fuente: Elaboración propia

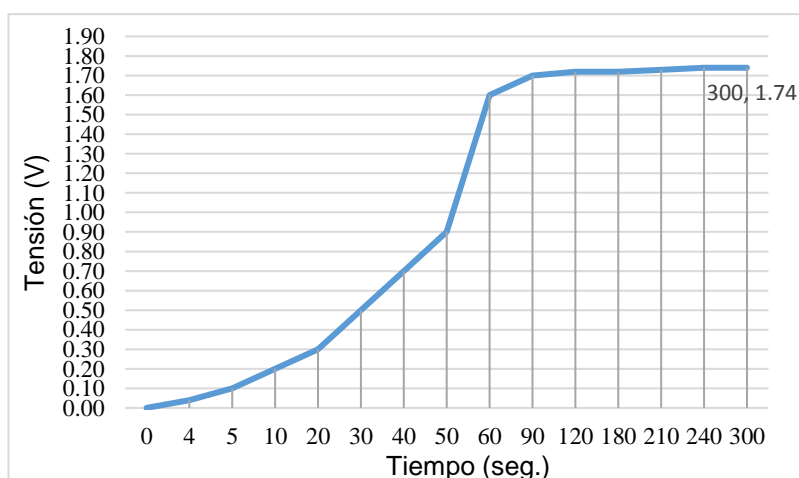
El área de la membrana es de  $9 \text{ cm}^2$ , mientras que el área del ánodo y el cátodo es aproximadamente  $20.25 \text{ cm}^2$ , esto nos puede dar una idea teórica que la intensidad de corriente de la célula es de aproximadamente 0.18 Amperios. Considerando el área de la membrana, la conductividad protónica de esta PEM debe ser mayor a  $1 \text{ mS/cm}$  (R. Hernández, 2012, p. 22), y una conductividad considerablemente buena es de  $0.083 \text{ S/cm}$  (Almarza & Salueña, 2010), que esto dependerá de la humedad que tenga la membrana de intercambio de protones.

Según la tabla N° 4.11 se puede dirimir que la tensión medida en laboratorio es menor que la tensión de referencia o tensión nominal, y esto es por causas de un funcionamiento inicial de prueba, es decir, que la pila de combustible estaba realizando un proceso electroquímico después de un tiempo de desuso, por lo que la humedad interna de la pila era mínima, lo que se habló en el punto 4.2.7., donde se refiere que la membrana debe tener una cierta humedad predeterminada. Pero, esta tensión mejoró en las siguientes pruebas en un uso continuo donde, la tensión de medida pudo llegar y superar a su tensión nominal, que pasó de 1.74 V, 1.80 V, hasta un máximo de 1.97 V.

Según Dicks & Rand dice: “Cabe señalar que, cuando es nueva, una pila de combustible puede ser capaz de proporcionar más de la potencia nominal, por ejemplo, hasta un 25% extra...” (Dicks & Rand, 2018). Según este criterio tiene sentido el que se haya lecturado tensiones mayores a la de la tensión nominal.

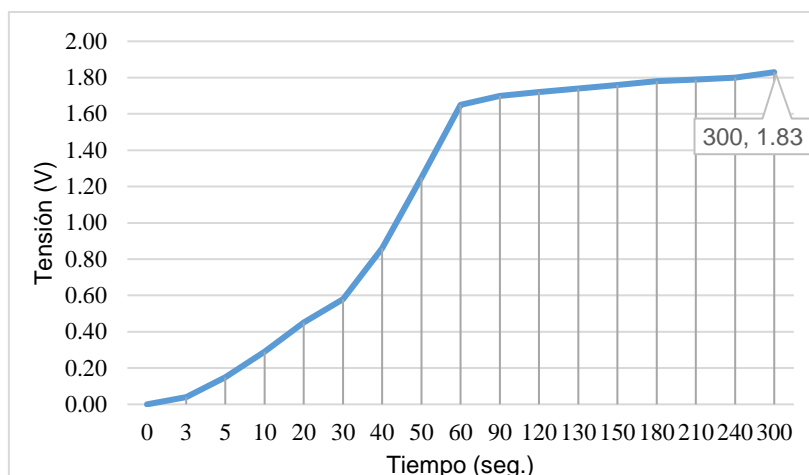
El comportamiento de esta primera prueba, se pudo registrar a una temperatura ambiente de  $16 \text{ °C}$ , con un suministro de hidrógeno de  $4 \text{ mL/min}$ , con una tasa de fuga de  $0.4 \text{ mL/min}$  con una corriente suministrada al electrolizador de 1 A.

Gráfico N° 4.20 Comportamiento de la tensión vs tiempo prueba 01.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 4.21 Comportamiento de la tensión vs tiempo prueba 02.



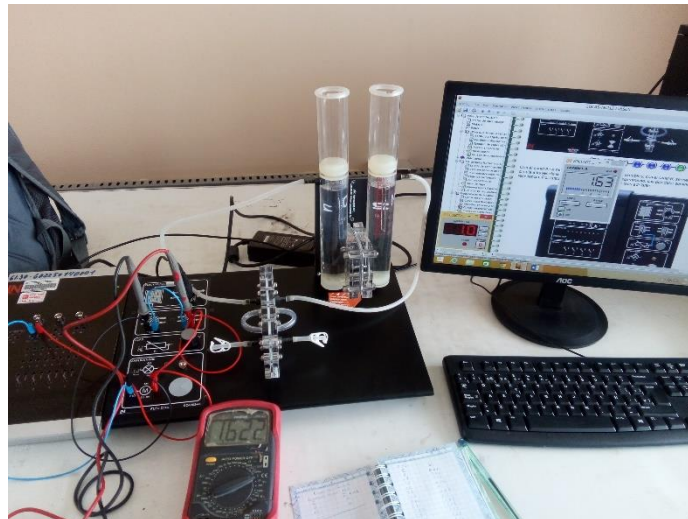
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar la diferencia entre los gráficos N° 4.20 y 4.21; primero, que la tensión alcanzada en el gráfico N°4.21 es mayor, puesto que de 1.74 V paso a 1.83 V, y es porque en la segunda prueba la membrana de intercambio de protones estaba más húmeda en diferencia del funcionamiento inicial o prueba 1, por lo que se confirma experimentalmente la importancia de la humidificación de las membranas, para una mayor eficiencia en el tipo PEMFC.

Segundo, el tiempo de reacción en las células de combustible de la prueba 02, es más rápido que el tiempo de reacción en la prueba 1, eso depende de la entalpía de hidrógeno y del ingreso de oxígeno; lo interesante es que el electrolizador, proporciona hidrógeno y oxígeno con un nivel mínimo de impurezas, i.e. oxígeno puro; ya que esta sellado, es por eso que se ha podido alcanzar niveles de tensión y corriente un poco más favorables; si fuera el caso de ingreso de aire, influiría en la eficiencia de las pilas de combustible.

La otra prueba que se realizó, es poder medir las tensiones pero puesta en funcionamiento con las cargas que tiene el módulo, que este caso vendría a ser con el foquito y el motorcito, que representarían las cargas que puede tener para simular el comportamiento de las pilas de combustible en circuito cerrado o CCV, para poder visualizar la caída de tensión que tendrá en cada uno, para esto se presenta la siguiente imagen y las siguientes tablas de pruebas.

Figura N° 4.48 Pruebas de medición de las FCs con cargas específicas.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.12 Medición de tensión y corriente cuando las PEMFCs tienen diferentes Cargas, P 01.

Componentes	DT	V	I (mA)	% de caída de tensión
Células de combustible	1.8 V	1.830		
Foco	1.5 V	1.426	0.29	22.08%
Motor	1.5 V	1.697	0.02	7.27%
Foto + motor		1.415	0.35	22.68%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.13 Medición de tensión y corriente cuando las PEMFCs tienen diferentes Cargas, P 02.

Componentes	DT	V	I (mA)	% de caída de tensión
Células de combustible	1.8 V	1.830		
Foco	1.5 V	1.420	0.30	22.40%
Motor	1.5 V	1.700	0.01	7.10%
Foto + motor		1.410	0.38	22.95%

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia total de la pila de combustible y el electrolizador será:

$$\eta = \frac{W_{\text{electrico}}}{W_{\text{quimico}}} = \frac{V_{\text{tension}} * I * t}{H_{\text{pot.cal.h2}} * V} = \frac{0.99V * 1A * 180 \text{ seg}}{11.92J/ml * 20mlH_2} = 74.75\%$$

Lo anterior vendría a ser los datos sacados de las diferentes experimentaciones que se le hizo a las pilas de combustible. Ahora desarrollaremos teóricamente su capacidad, eficiencia, energía libre de Gibbs y exclusivamente de una de las células y de las dos células en conjunto, siendo el desarrollo de la siguiente manera.



Para determinar la energía libre de gibbs, usaremos la tabla N°4.1, al no tener datos de entalpia se procedió a extrapolar para poder obtener el dato a una temperatura de trabajo en la ciudad de Puno, en las instalaciones del laboratorio de la escuela profesional de ingeniería mecánica eléctrica de la UNA Puno, de 16 °C, obteniéndose.

$$\Delta \bar{g}_f = -238.6727 \text{ KJ mol}^{-1}$$

Ahora con la fórmula considerando los datos de la máxima tensión en una célula.

$$\Delta \bar{g}_f = -2FV_r = -2 * 96485 * 0.99 = -191.0403 \text{ KJ mol}^{-1}$$

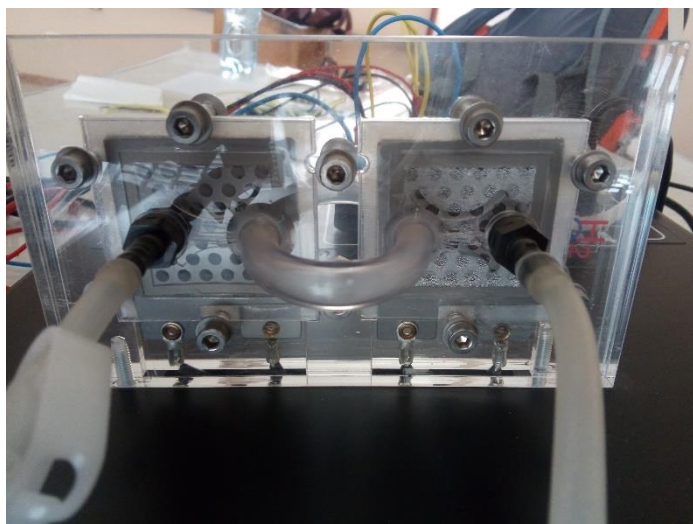
Según en un circuito abierto, tendremos la utilización del combustible, que tenemos como datos del módulo que administra el generador de hidrógeno con un suministro de hidrógeno de 4 mL/min con una tasa de fuga de 0.4 mL/min, tendremos la siguiente ecuación.

$$\mu_f = \frac{\text{masa de combustible reaccionado en la celda}}{\text{masa de entrada de combustible a la celda}}$$

$$\mu_f = \frac{3.6}{4} = 0.9$$

Para hallar la eficiencia de una célula de combustible tendremos lo siguiente, ya que el conjunto de las pilas de combustible no está en paralelo sino en serie, como se aprecia en la siguiente figura, se tendrá que hacer una por una o luego en conjunto.

Figura N° 4.49 Modulo Pila de combustible LUCAS-NÜLLE LabSoft UniTrain



Fuente: Elaboración propia

Son solo dos células de combustible por un lado está el ingreso del hidrógeno por el otro del oxígeno, este caso es particular ya que la producción de hidrógeno y oxígeno son es estado puro, es por ello que los datos son casi ideales, y las eficiencias son altas.

$$\eta = \mu_f \frac{V_{md}}{V_{mx}} * 100\% = 0.9 \frac{0.9}{0.99} * 100\% = 81.81\%$$

Y para toda la pila de combustible será:

$$\eta = \mu_f \frac{V_{md}}{V_{mx}} * 100\% = 0.9 \frac{1.83}{2.01} * 100\% = 81.94\%$$

Como podemos apreciar, la célula de combustible de la derecha está más empañada que la de la izquierda, de eso se refería que los productos de la reacción también es vapor de agua, uno de los inconvenientes es que la siguiente segunda célula se alimenta después de la primera célula, a través de una manguera, lógicamente ahí también se consideraría pérdidas por distribución del oxidante y el combustible.

Se dijo que se había alcanzado una tensión máxima de la pila de combustible de 1.97 V, y esto se dio justamente cuando las membranas tenían una humedad notoria visiblemente como se aprecia en la figura anterior, también cabe señalar que si esta seguía por más tiempo el empañamiento pasaría a una inundación de agua, lo que sería contraproducente a la pila de combustible, es por ello que se debe considerar los cálculos que se describió anteriormente en cuando a la humidificación de las membranas.

### UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO Y PRODUCCIÓN DE TENSIÓN

Para poder ver la utilización del hidrógeno con respecto al aprovechamiento de este primero veremos que con un flujo de 4 mL/min se puede obtener una tensión de 1.83 V constantemente en funcionamiento de la pila de combustible del laboratorio LUCAS-NÜLLE LabSoft UniTrain, quiere decir que  $4 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$  de hidrógeno puede producir una tensión de 1.83 V en una pila de un área de membrana de  $18 \text{ cm}^2$ .

El petróleo o gasolina No puede producir directamente electricidad, solo mediante un dispositivo o maquina que pueda producir energía rotacional a través de un generador, produce electricidad. Empero el Toyota Mirai tiene una densidad de potencia de 3.1 KW / L según la tabla N° 4.7, con 370 celdas apiladas, es decir que 1 litro de hidrógeno tiene la capacidad de sostener una potencia de 3.1 KW.

## CONCLUSIONES

1. Al describir el funcionamiento teórico y real de una pila de combustible, se analizó que la tensión general teórica de una célula de combustible es aproximadamente 1.2 V en condiciones ideales dependiendo del tipo de célula, tipo de electrolito, pureza de los reactivos y las pérdidas. En condiciones prácticas, este valor disminuye a 0.97 V en promedio; donde se puede apreciar una caída de tensión del 19.17%, que es aceptable para la aplicación en diferentes industrias.
2. El apilamiento de cada celda de combustible, permite obtener mayores tensiones según sea su demanda; tras observar las diferentes aplicaciones que tienen las pilas de combustible según su tipo de funcionamiento o composición, influye a un cambio de paradigma tecnoambiental. Los autos de hidrógeno o FCV son muy prometedores, y de cero emisiones de gases de efecto invernadero; en sistemas de generación o cogeneración son plausibles las FC, ya que se puede utilizar la electricidad, el calor y el agua que son sus productos después de la reacción electroquímica. Aumentado la eficiencia de diferentes sistemas dentro del rango de 10-30% aproximadamente.
3. La información que se tiene aún no es tan explícita para poder diseñar efectivamente una pila de combustible. Pero como es en el caso de los transformadores, lo que se necesita es solo la potencia de demanda para poder elegir las FCs que hay en el mercado. También se requiere de más investigaciones experimentales en el departamento de Puno, ya que cuenta aún con un aire poco contaminado a diferencia de Lima, lo que por teoría, la eficiencia de las pilas de combustible en Puno, deben ser un poco mayor.
4. Al realizar las pruebas de medición a las pilas de combustible del módulo LUCAS-NÜLLE LabSoft, se concluye primero, que la humidificación de las membranas debe ser eficiente, el mismo hecho de que se realice las reacciones electroquímicas beneficia a que la humedad en las membranas sean un poco estables que se visualiza en los gráficos 24 y 25; segundo, el comportamiento de las pilas cuando es conectado a las cargas, presenta un desbalance que es aceptable pese a una caída de 22% de tensión en dispositivos más sofisticados es mucho menor y ofrecen mayor control, y la eficiencia del módulo es de 74.75%, la eficiencia de la Pila de 81.94 %y es bueno para su categoría.

## SUGERENCIAS

1. Se ha detallado hasta donde se ha podido tener información para el modelamiento de una pila de combustible; Empero, se debe prestar atención al momento de aplicar las fórmulas en cuanto a las temperaturas y presión en donde se van a aplicar, puesto que el comportamiento en Puno y en Europa o Japón serán muy diferentes, cuando se quiera hacer un diseño se debe incorporar ciertos factores de corrección.
2. Los sistemas híbridos es un tema también interesante, entre la eléctrica EV y los FCV, pero ambos ya son sistemas eficientes y limpios, porque solo sería una alternativa de practicidad, lo otro interesante es la generación de hidrógeno a través de las energías alternativas tales como la solar y la eólica, este sistema híbrido proporciona un sistema robusto de eficiencia en generación de hidrógeno, lo que contribuiría bastante para el desarrollo de la pilas de combustible en el país.
3. El tema de las pilas de combustible, es parte de un paquete completo que inicia desde la generación de Hidrógeno, su almacenamiento, su transporte, su distribución y Utilización, algo parecido al Esquema general del sistema eléctrico del Perú; donde el tema de las pilas de combustible pertenece a la utilización del Hidrógeno del paquete de fuente de energías Limpias o verdes, lo que tiene mucho por investigarse cada uno de ellas.
4. Así como motores de combustión interna es un curso académico según a la especialidad en una universidad, también se sugiere que debe ampliarse el curso de pilas de combustible, llevando desde lo básico, calculo, tipos, mercado internacional y las diferentes aplicaciones, para poder consolidar de manera más eficaz y para que pueda ser una realidad en nuestro país y región.

## BIBLIOGRAFÍA

- Almarza, J., & Salueña, X. (2010). *Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Annual Energy Outlook, E. (2018). Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050. *Energy Information Administration*, 147.
- Arauzo, J. (2016). *ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA ACERCA DEL HIDRÓGENO ( H<sub>2</sub> ) COMO FUTURO VECTOR ENERGÉTICO EN EL AUTOMÓVIL*. (UNIVERSIDAD DE CANTABRIA).
- Asensio, P. (2012). Hidrógeno y Pila de Combustible. *Energías Renovables para Todos*, 20.
- Bernhart, W., & Zollenkop, M. (2011). Geschäftsmodellwandel in der Automobilindustrie – Determinanten, zukünftige Optionen, Implikationen, in: Bieger, T./zu Knyphausen Aufseß, D./Krys, C. (Hrsg.). *Innovative Geschäftsmodelle*, 277-298.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (Séptima Ed). New York: McGraw-Hill Companies.
- Chamon, M., Mauro, P., & Okawa, Y. (2008). Mass car ownership in the emerging market giants. *Economic Policy*, vol.23, 243-296.
- Correa, G., Mathé, L., Moschen, E., & Muñoz, P. (2014, marzo). Dimensionamiento y Modelado de un Vehículo Eléctrico Propulsado por Pilas de Combustible. Análisis Económico y de Factibilidad. *REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES*, 1(1), 59-66.
- Dicks, A. L., & Rand, D. A. (2018). *Fuel Cell Systems Explained* (Third Edit). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118706992>
- Eichelseder, H., & Klell, M. (2008). *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, Vieweg+ Teubner. GWV Fachverlage, Wiesbaden.
- Energy Information Administration, I. (2017). International Energy Outlook 2017. *International Energy Outlook 2017*, 1(Energy Inf. Adm.), 76.
- Frank, M., Kuhl, M., Erdler, G., Freund, I., Manoli, Y., Müller, C., & Reinecke, H. (2010). An integrated power supply system for low power 3.3 V electronics using on-chip polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells. *IEEE J. Solid State Circuits*, 45, 205.
- Gamboa, S., Pilatowsky, I., Romero, R., Sebastian, P., Isaza, C., & Rivera, W. (2011). *Cogeneration Fuel Cell- Sorption Air Conditioning Systems*. México: Springer-Verlag London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-028-1>
- Gámez, D. (2010). *EL HIDRÓGENO Y SUS APLICACIONES ENERGÉTICAS*. INS LA FERRERÍA (MONTCADA I REIXAC).
- Gerl, B. (2002). *Innovative Automobilantriebe: Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen*. Alemania: Verlag Moderne Industrie.
- Golloch, R. (2005). Downsizing bei Verbrennungsmotoren. Ein wirkungvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchsreduzierung.
- Gonzales, G. (2014). LA SALUD AMBIENTAL EN EL PERÚ. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, Vol. 31(2), 398-399. <https://doi.org/10.3201/eid1610.100399.5>.

- Gutiérrez, M. (2015). *Estudio de factibilidad de una celda de combustible en la aplicación de autobuses urbanos*. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Unidad de Culhuacan.
- Hernández, A., & Díaz, D. (2017). Contaminación ambiental y repositorios de datos históricos de contaminantes atmosféricos en Perú. *Salud Pública de México*, Vol. 59(5), 507-508. <https://doi.org/https://doi.org/10.21149/8476> Referencias
- Hernández, R. (2012). *DESARROLLO DE MEMBRANAS DE INTERCAMBIO PROTÓNICO DE ABPBI-LI CON APLICACIÓN EN CELDAS DE COMBUSTIBLE*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- Hüttenrauch, M., & Baum, M. (2008). *Effiziente Vielfalt: die dritte Revolution der Automobilindustrie*. Berlin: Springer.
- Ísmodes, E. (2006). *Países sin futuro ¿Qué puede hacer la Universidad?* (Primera ed). Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Jyotheeswara, K., & Sudhakar, N. (2018). High Voltage Gain Interleaved Boost Converter With Neural Network Based MPPT Controller for Fuel Cell Based Electric Vehicle Applications. *IEEE Access*, 6, 3899-3908.
- Kabza, A. (2015). Fuel Cell Formulary. Alexander Kabza. Recuperado a partir de [www.kabza.de](http://www.kabza.de)
- Knappe, M. (2014). *Kooperation als Strategie technologischen Paradigmenwechsels*. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09992-3>
- Kupeci, J. (2018). *Modeling, Design, Generators with Solid Operation of Power Construction, and Oxide Fuel Cells*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75602-8>
- Montagne, R. (2016). "DISEÑO DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE PARA LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN DE CICLO OTTO EN LA REGIÓN PUNO - 2015". UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.
- Moore, C., Lessard, J., Maillard, J. G., Hardman, S., & Chandan, A. S. (2015). Fuel Cell Industry & Patent Overview 2015. *Blue Vine Consultants*, 38.
- Osinergmin, G. (2016). *REPORTE SEMESTRAL DE MONITOREO DEL MERCADO DE HIDROCARBUROS PRIMER SEMESTRE DEL 2016*. Lima.
- Osinergmin, G. (2017). *REPORTE SEMESTRAL DEL MERCADO DE HIDROCARBUROS PRIMER SEMESTRE DEL 2017*. Lima.
- Popper, K. (1962). *La lógica de la investigación científica*. Discovery (Vol. 29).
- Reichhuber, A. (2010). Strategische und organisatorische Programme zur Handhabung automobilwirtschaftlicher Herausforderungen, Gabler. *Strategie und Struktur in der Automobilindustrie*, 94.
- Rodríguez, K., & Seiner, L. (2000). *Proyecto HISTORIA UNI*. (V. Lopez, Ed.) (Primera ed). Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.
- Sanz, R. (2010). *Estudio tecnológico sobre el vector hidrógeno y sus aplicaciones en el siglo XXI*. Universidad de Zaragoza.
- Sasaki, K., Wen Li, H., Hayashi, A., Yamabe, J., & Ogura, T. (2016). *Hydrogen Energy Engineering*. (S. Lyth, Ed.). Springer Japan.
- Schwab, K. (2018). *The Global Competitiveness Report 2017 - 2018*.



- Siemens. (2017). SILYZER 200 High-pressure efficiency in the megawatt range. *SIEMENS Ingenuity for life*, 8.
- Solomon, B., & Banerjee, A. (2006). *A global survey of hydrogen energy research, development and policy*.
- Töpler, J., & Lehmann, J. (2016). *Hydrogen and Fuel Cell*. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44972-1>
- Töpler, J., & Lehmann, J. (2017). *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. (Springer, Ed.) (2. Auflage). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53360-4> ISBN
- Uribe, I., Velosa, A., & Zabala, L. (2011). *Fundamentos del daño por hidrógeno en los aceros* (enero-junio No. 36). *El Hombre y la Máquina*. Cali, Colombia. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47821598012>
- VDA. (2013). *Verband der Automobilindustrie: Jahresbericht 2013*. Recuperado a partir de [www.vda.de/de/downloads/1182](http://www.vda.de/de/downloads/1182)
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., & Olschewski, I. (2010). *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges -Technologien, Märkte und Implikationen*. GWV Fachverlage, Wiesbaden.
- World Energy Resources, W. (2016). World Energy Resources | 2016, 1, 1028.
- Yoshida, T., & Kojima, K. (2015). Toyota MIRAI Fuel Cell Vehicle and Progress Toward a Future Hydrogen Society. *The Electrochemical Society*, 45-49.

## ANEXOS

Anexo N° 1 Las aplicaciones que emplean almacenamiento de hidrógeno.

Aplicación	Método de almacenamiento de hidrógeno.	Ejemplo del sistema
Coche de pila de combustible.	Gas comprimido a 70MPa	Toyota <i>Mirai</i> , 2015
Coche de combustión interna de hidrógeno	Hidrógeno líquido, -252 ° C	serie BMW 7 sedán
Autobuses con pilas de combustible.	Gas comprimido, 70MPa	Mercedes-Benz Citaro
Pilas de combustible en motocicleta	Gas comprimido	Palcan, Intelligent Energy
Locomotora o tren	Hidruro a bajas temperaturas	Anglo-American Platinum, mining locomotive, Dishaba Mine, South Africa
Avión	Hidrógeno líquido	Boeing Phantom-Eye
Cargador de batería de pilas de combustible	hidruro de baja temperatura	Intelligent Energy, Upp, y Horizon MiniPak cargadores portátiles
Almacenamiento de energía renovable	hidruro de baja temperatura	Sir Samuel Griffith Centro de (30 MWh), Australia
	Gas comprimido, 70MPa	Proyecto INGRID de red (39 MWh), Italia
Mezcla de gas natural + hidrógeno	Gas comprimido	ENEA, Region de Emilia Romagna, Italia, Hydrogeno-Gas Natural Comprimido (HCNG) ensayos de autobús
Distribución de gas industrial	hidruro de Mediano temperatura	Hydrexia, Ni–Mg hydride McPhy, Mg hydrogen
Astronave	Hidrógeno líquido	Agencias espaciales gubernamentales de China, Europa, India, Rusia y los Estados Unidos

Fuente: (Töpler & Lehmann, 2016)

Anexo N° 2 Valores de conversión del combustible con respecto al hidrógeno.

	Mass of store and fuel (kg)	Index	Volume of store (L)	Index
Gasoline (45 L)	41	1	45	1
Compressed H <sub>2</sub> (20 MPa) conventional steel cylinder	~1150	28	~1080	24
Compressed H <sub>2</sub> (70 MPa) composite cylinder	~200	4.9	~170	3.8
LH <sub>2</sub> in cryostat	~100	2.4	~350	7.8
Ti-Fe hydride bed	~1050	25.6	~275	~6.1
Methanol and reformer	~1140	27.7	~294	~6.5
NaBH <sub>4</sub> solution	~553	13.5	192	~4.3

Fuente: (Dicks & Rand, 2018)

Anexo N° 3 Datos Técnicos del electrolizador de Seimens - Silyzer 200.

Datos técnicos principales - SILYZER 200	
Tipo de electrolisis / principio	PEM
Calificación de pila de energía	1,25 MW
dimensión Skid	6,3 x 3,1 x 3,0 m
Tiempo de arranque (de stand-by) <Presión de salida	
10 sec	Hasta 35 bar
Pureza H <sub>2</sub> (Depende de la operación) H <sub>2</sub> 5.0	99,5% - 99,9%
calidad	opción desoxo-secadora
Calificación H <sub>2</sub> producción	225 Nm <sup>3</sup> / h
La eficiencia global (sistema)	65 - El 70%
Diseño Tiempo de Vida	> 80.000 h
Peso por Skid	17 t
Conformidad CE	sí
Requisito agua del grifo	1,5 l / Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>

Fuente: (Siemens, 2017)

Anexo N° 4 Lista Global de Industrias manufactureras de las Pilas de combustible.

Name	Country	Fuel cell type	Company Sector
ACAL energy Ltd	UK	PEFC	Fuel Cells
Acumetrics	USA (HQ)	SOFC	Portable power
AFC Energy	UK	AFC	Fuel Cells
Altery Systems	USA	PEFC	Fuel Cells
AMI (Ultraelectronics)	USA (HQ), UK, Canada, Australia	SOFC	Defence, aerospace, security, transport, energy
Aquafairy (partnered with Rohm)	Japan	PEFC	Fuel cells (Rohm are electronics)
Areva (Helion Fuel cells are subsidiary)	France	PEFC	Energy Storage
Asahi Glass	Japan	SOFC	Glass & Ceramics
Asian Pacific Fuel Cell Technologies Ltd	Taiwan(HQ), USA	PEFC	Fuel Cells
Axane (Air liquid subsidiary)	France	PEFC	Fuel Cells
Ballard Power Systems	Canada	PEFC & DMFC	Fuel Cells
BalticFuelCells GmbH	Germany	PEFC & DMFC	Fuel Cells
Bloom Energy	USA	SOFC	Fuel Cells
CEKAtec AG	Switzerland	PEFC	Fuel Cells
CellEra	Israel	PEFC	Fuel Cells
Cellkraft AB	Sweden	PEFC	Fuel Cells
Cera-FC	South Korea	SOFC	Fuel Cells
Ceres power	UK (HQ), Japan	SOFC	Fuel Cells
Comm Energie Atomique	France	PEFC	Energy Research
Daimler AG	Germany/USA	PEFC	Automotive
Delphi	UK (HQ), USA	SOFC	Automotive
Doosan Heavy Industry (Doosan Fuel Cells America inc. and Fuel Cell Power)	South Korea (HQ), America	PEFC & PAFC	Heavy industries, engineering and constructions
Elcogen Oy	Finland	SOFC	Fuel Cells
Elcore	Germany	PEFC	Fuel Cells
Electro Power System	Italy (HQ), USA	PEFC	Fuel Cells
Elring Klinger AG	Germany	SOFC, PEFC, DMFC	Automotive
Enymotion GmbH	Germany	DMFC	Fuel Cells
eZelleron GmbH	Germany	SOFC	Fuel Cells
First Element Energy	USA	DMFC	Fuel Cells
Ford Motor Company	USA	PEFC	Automotive
Foresight Energy co. ltd	China	PEFC	Fuel Cells
Forschungszentrum Jülich GmbH	Germany	SOFC & HT-PEFC	R & D Institute
Fraunhofer-Institute	Germany	PEFC & HT-PEFC	R & D Institute

Fronius GmbH	Austria	PEFC	Energy, Batteries, Welding
Fuel Cell Energy	USA (HQ), Korea(POSCO)	MCFC	Fuel Cells
Fuji Electric	Japan	PAFC	Electronics
Fujikura	Japan	DMFC	Electronics
GE (General Electric) Fuel cells	USA (HQ), International	SOFC	Conglomerate (energy, electric, healthcare etc)
GenCell	Israel	PEFC	Fuel Cells
General Motors	USA	PEFC	Automotive
GenPORT	Italy	PEFC (possibly DMFC)	Fuel Cells
GS Caltex (GS Fuel Cell is subsidiary)	South Korea	PEFC	Oil
Hexis AG (Sulzer)	Switzerland (HQ), Germany	SOFC	Fuel Cells
HIAT GmbH,	Germany	PEFC & DMFC	R & D Institute
Hitachi	Japan	DMFC, PEFC	Electronics
Honda Motors Co., Ltd.	Japan	PEFC	Automotive
Horizon fuel cells	Singapore	PEFC	Fuel Cells
Hydrogen South Africa Systems (HySA Systems)	South Africa	PEFC	R & D Institute
Hydrogenics	Canada	PEFC	Fuel Cells
Hyosung Power & Industrial Systems	South Korea	PEFC	Power and industrial systems
Hyteon	Canada	PEFC	Domestic heating
Hyundai Motor Company	South Korea	PEFC	Automotive
Infinitium Fuel Cell Systems, Inc.	USA	PEFC	Fuel Cells
Intelligent energy	UK	PEFC	Fuel Cells
IRD A/S	Denmark (HQ), USA	PEFC & DMFC	Fuel Cells
Johnson Matthey	UK	PEFC	Specialty Chemicals
JX Nippon	Japan	PEFC	Energy
Kia Motors	South Korea	PEFC	Automotive
Kyocera	Japan	SOFC	Ceramics
LG Fuel cell systems?	South Korea (HQ), USA, UK	SOFC	Electronics
Materials & System Research	USA	SOFC	Fuel Cells
M-Field	Taiwan	PEFC	Fuel Cells
Mico (KoMiCo)	South Korea	SOFC	Ceramics
Mitsubishi Heavy power systems	Japan	SOFC, MOLB, PEFC	Heavy industries, engineering and constructions

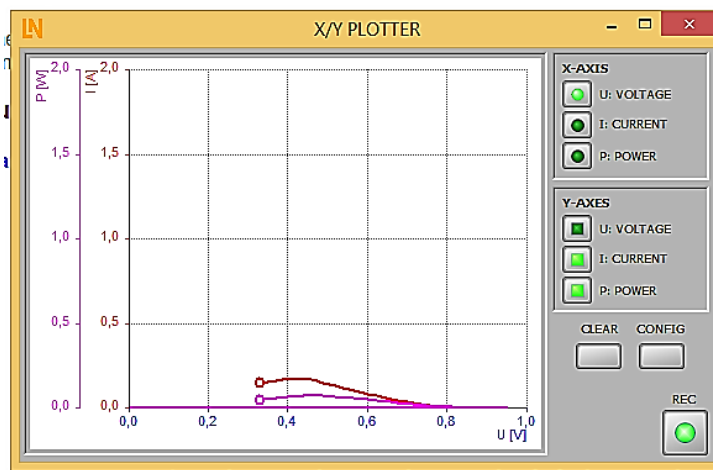
Murata Manufacturing	Japan	SOFC	electronics
myFC AB	Sweden	PEFC	Fuel Cells
Neah Power Systems	USA	PEFC	Fuel Cells
Nedstack	Netherlands	PEFC	Fuel Cells
New Enerday	Germany	SOFC	Fuel Cells
NEXT ENERGY EWE	Germany	PEFC (possibly also AFC)	Fuel Cells
Nextech Materials	USA	SOFC	Fuel Cells
Nissan Motors Co., Ltd.	Japan	PEFC	Automotive
NMITE Ningbo Materials Institute of Technology and Engineering	China	SOFC	I R & D Institute
Nuvera fuel cells	USA (HQ), Italy	PEFC	Fuel Cells
Oorja Fuel cells	USA	DMFC	Fuel Cells
Panasonic	Japan	PEFC, DMFC	Electronics
Paxitech	France	PEFC	Fuel Cells
Pearl Hydrogen Technology Co. Ltd	China	PEFC	Fuel Cells
Powercell AB	Sweden	PEFC	Fuel Cells
Proton Motor Fuel Cell GmbH	Germany	PEFC	Fuel Cells
Protonex	USA	PEFC & SOFC	Fuel Cells
Redox Power Systems	USA	SOFC	Fuel Cells
ReliOn Inc (part of Plug Power Inc)	USA	PEFC	Fuel Cells
Riesaer Brennstoffzellentechnik RBZ GmbH	Germany	PEFC	Institute
Saint-Gobain Corporation	France (HQ)	SOFC	Ceramics
Samsung	South Korea	DMFC, PEFC, HT-PEFC	Electronics
Serenergy A/S	Denmark	HT-PEFC	Fuel Cells
SFC Energy AG	Germany	DMFC	Fuel Cells
Shanghai Shen-Li High Tech Co. Ltd	China	PEFC & HT-PEFC	Fuel Cells
Siemens	Germany	SOFC, MCFC	Electronics
Société Bic	France	PEFC	Consumer Products
SOFCpower	Italy	SOFC	Fuel Cells
SolidCell	USA	SOFC	Fuel Cells
Sony	Japan	DMFC	Electronics
Sumitomo Precision Products	Japan	SOFC	Aerospace
Sunfire GmbH	Germany	SOFC	Fuel Cells
Sunrise Power	China	PEFC	Fuel Cells
Suzuki Motor Corporation	Japan	PEFC	Automotive
SymbioFCcell	France	PEFC	Fuel Cells
The Institute of Engineering Thermodynamics at the German Aerospace Centre (DLR)	Germany	PEFC & SOFC	Institute
TMI	USA	SOFC	Fuel Cells
Toshiba Fuel Cell Power Systems	Japan	PEFC	Electronics



TOTO	Japan	SOFC	Ceramics
Toyota	Japan	PEFC	Automotive
Truma Gerätetechnik GmbH & Co. KG	Germany	HT-PEFC	Recreational vehicle products
Ulmer Brennstoffzellen Manufaktur GmbH	Germany	PEFC	Fuel Cells
Ultracell (Brentronics)	USA	PEFC	Military equipment
Versa Power (and Owners)	Canada	SOFC	Fuel Cells
Watt Fuel Cell	USA	SOFC	Fuel Cells
ZSW (Centre for solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg )	Germany	PEFC & DMFC	R & D Institute

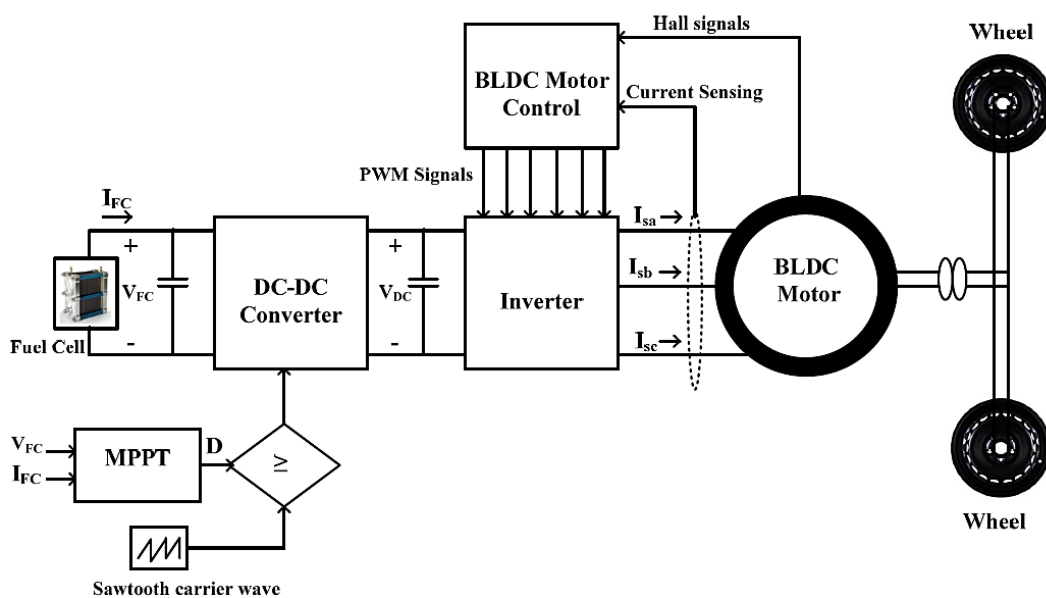
Fuente: (Moore et al., 2015)

Anexo N° 5 Gráfico corriente vs. tensión en el software del módulo LUCAS-NÜLLE LabSoft.



Fuente: LUCAS-NÜLLE LabSoft.

Anexo N° 6 Configuración convencional de una pila de combustible en un automóvil



Fuente: (Jyotheeswara & Sudhakar, 2018)