



Universidad del Azuay

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Mecánica

**FACTIBILIDAD DEL USO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE A
BASE DE HIDRÓGENO COMO ENERGÍA ALTERNATIVA
PARA BUSES DE TRANSPORTE URBANO EN LA CIUDAD DE
CUENCA**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
Ingeniero en Mecánica Automotriz**

**Autores: Andrea Paola D'vries Toral
 Marco Esteban Vélez Jarrín**

Director: Ing. Miguel Andrés López H.

Cuenca, Ecuador

2011

Dedicatoria

Andrea D'vries Toral

Este trabajo de grado está dedicado a mi madre, Doris Toral, por su constante apoyo y esfuerzo para hacerme la mejor persona que puedo ser.

Marco Esteban Vélez Jarrín

Este Trabajo va dirigido a mis padres Marco Vélez C. y Susana Jarrín O, por todo el apoyo incondicional que recibí de su parte y por todos los sacrificios que realizaron para darme esta oportunidad de superación.

Agradecimientos

Agradecemos principalmente a nuestros padres por su apoyo constante durante este proceso, a nuestros profesores, quienes nos guiaron durante el transcurso nuestra carrera y de quienes hemos aprendido valiosas lecciones de vida, a nuestros compañeros con quienes hemos compartido hermosos momentos y a la Universidad del Azuay por formarnos de manera íntegra para poder desempeñarnos como excelentes profesionales.

Resumen

El presente trabajo está enfocado en analizar la implementación del sistema de celdas de combustible en los buses tipo de transporte urbano que circulan en la ciudad de Cuenca, para lo que se realizó un estudio comparativo de las diferentes celdas de combustible de las que se obtiene hidrógeno, aquí se expone las características generales de las mismas, ventajas e inconvenientes.

El objetivo principal es un estudio de emisión de gases contaminantes que generan los autobuses dentro de la ciudad, gases que cada año aumentan debido a la demanda de transporte, se realizó una comparación con las tecnologías existentes a nivel internacional. Hemos tomado como referencia datos proporcionados por Cuenca Aire sobre los niveles de contaminación que genera el parque automotor en Cuenca.

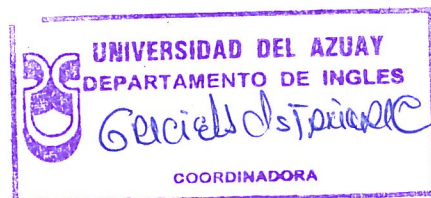
Finalmente se realiza un análisis económico-social con las principales compañías de transporte, determinando así la viabilidad del proyecto.

ABSTRACT

This work is focused on implementing a system of fuel cells in urban transit buses that circulate in the city of Cuenca. In order to do this a comparative study of the different fuel cells from which hydrogen is obtained was done; the general characteristics of each, along with their advantages and disadvantages, are shown.

The main objective is a study of the emissions of polluting gases that buses generate within the city; gases that increase every year due to the demand for transport. Information provided by CuencaAire about the levels of pollution generated by the automotive park in Cuenca have been taken as a reference.

Finally, a socioeconomic analysis was done with the main transport companies was done to determine the viability of the project.



A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized letters and a large loop at the end.

Índice de contenidos

Dedicatoria	II
Agradecimientos.....	III
Resumen	IV
Abstract	V
Índice de Contenidos.....	VI
Índice de Ilustraciones y Cuadros	IX
INTRODUCCION	1

CAPITULO 1: GENERALIDADES

Introducción	2
1.2 Fuentes de producción de Hidrógeno	5
1.2.1 Métodos de producción de Hidrógeno.....	5
1.2.1.1 Reformado de petróleo	5
1.2.1.2 Oxidación parcial de los hidrocarburos	7
1.2.1.3 Electrólisis del agua	7
1.3 Tipos de celdas de combustible	9
1.3.1 Celdas de combustible de ácido fosfórico (CCAF).....	11
1.3.2 Celdas de combustible de electrolito polimérico sólido (CCEPS).....	13
1.3.3 Celdas de combustible para la oxidación directa de metanol (CODM).....	14
1.3.4 Celdas de combustible alcalinas(CCA)	16
1.3.5 Celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)	17
1.3.6 Celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC)	21
1.4 Construcción de celdas de combustible	23
1.4.1 Materiales y métodos utilizados en la producción de catalizadores y electrodos de difusión de gas para celdas de baja temperatura	23
1.4.2 Electro catalizadores	24
1.4.3 Construcción de celdas unitarias.....	25

1.4.4 Construcción de módulos multicelda	27
--	----

1.5 Conclusiones	29
------------------------	----

CAPITULO 2: APLICACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

2.1 Aplicación del hidrógeno en el transporte.....	31
2.2 Elementos del vehículo de hidrógeno	37
2.2.1 Procesador de combustible.....	37
2.2.2 Pila de Combustible	37
2.2.3 Motor Eléctrico	38
2.2.4 Control Electrónico.....	38
2.2.5 Acumulador de energía.....	38
2.2.6 Depósito de combustible.....	39
2.2.7 Sistema de frenos regenerativo	40
2.3 Experiencias internacionales en vehículos y prototipos	40
2.4 Conclusiones	44

CAPITULO 3: ESTUDIO DE APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE CUENCA

3.1 Estudio sustentable	46
3.1.1 Impacto social.....	46
3.1.2 Impacto Económico.....	51
3.1.2.1 Tecnología para Transporte.....	51
3.1.2.2 Tecnología de producción de hidrógeno.....	57
3.1.3 Impacto Ambiental	59
3.1.3.1 Resultados de la estimación de emisiones atmosféricas de Cuenca, año 2008.....	62
3.1.3.1.1 Partículas sedimentables totales (PST).....	62
3.1.3.1.2 Material particulado menor a 10 micras (PM ₁₀)	62
3.1.3.1.3 Dióxido de azufre (SO ₂)	62

3.1.3.1.4 Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	63
3.1.3.1.5 Ozono (O ₃).....	63
3.1.3.1.6 Estimaciones de gases de efecto invernadero, año 2007	64
3.2 Fuentes de generación de Hidrógeno en la provincia del Azuay	64
3.3 Conclusiones	67
CONCLUSIONES GENERALES	70
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	74

Índice de ilustraciones y Cuadros

Figura 1.1:	Esquema de una celda de combustible	4
Figura 1.2:	Esquema de una planta de celda de combustible formada por un sistema indirecto	10
Figura 1.3:	Esquema del proceso de oxidación de hidrógeno	12
Figura 1.4:	Diagrama esquemático de una celda de combustible de metanol directo.....	15
Figura 1.5:	Configuración de una celda de combustible alcalina típica	19
Figura 1.6:	Configuración básica de una celda de combustible de carbonato fundido	17
Figura 1.7:	Sistemas de reforma de combustible en celdas de alta temperatura	20
Figura 1.8:	Configuración tubular y monolítica de las celdas de combustible de óxidos sólidos	23
Figura 1.9	Celda de combustible de electrolito polimérico sólido unitaria	26
Figura 1.10	Representación de un módulo multicelda	27
Figura 2.5.	Esquema de un bus de celdas de combustible.	40
Figura 3.1	Pregunta 1.....	47
Figura 3.2	Pregunta 2.....	48
Figura 3.3	Pregunta 3.....	48
Figura 3.4	Pregunta 4.....	49
Figura 3.5	Pregunta 5.....	50
Figura 3.6	Pregunta 6.....	50
Tabla 1.	Características de las celdas de combustible	30
Tabla 2.	Evolución de los vehículos de celdas de combustible	33
Tabla 3.	Datos generales del proyecto Hyfleet-Cute	42
Tabla 4.	Generalidades de los autobuses.....	43
Tabla 5.	Tipos de abasto.....	44
Tabla 6.	Comparación de costos entre buses de combustión y celdas de combustible.....	53
Tabla 7.	Comparación de modificaciones en el tren motriz y carrocería	

	entre buses de celdas de combustible y buses de combustión interna.....	56
Tabla 8.	Porcentaje de vehículos a diesel que circulan en Cuenca, año 2007	61
Tabla 9.	Descomposición de biogás	66
Imagen 2.1:	Austin A 40	34
Imagen 2.2:	NECAR 3.....	34
Imagen 2.3:	Honda FCX.....	34
Imagen 2.4:	Primer bus desarrollado por la compañía Ballard Power Systems a principios de la década de los 90's.....	37

D'vries Toral Andrea Paola

Vélez Jarrín Marco Esteban

Trabajo de graduación

Ing. Miguel Andrés López H.

Enero 2011

FACTIBILIDAD DEL USO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE A BASE DE HIDRÓGENO COMO ENERGÍA ALTERNATIVA PARA BUSES DE TRANSPORTE URBANO EN LA CIUDAD DE CUENCA

Introducción

El estudio de las celdas de combustible busca generar alternativas para el transporte que sean viables económicamente y amigables con el medio ambiente, con estos sistemas se ha logrado reducir las emisiones contaminantes notablemente y por sus diferentes configuraciones existen innumerables usos no solo en el ámbito automotriz, convirtiéndose en una excelente tendencia aplicable a proyectos de transporte en nuestro país.

En la actualidad las normativas de regulación de gases contaminantes se han vuelto cada vez más estrictas a nivel mundial, lo que nos obliga a buscar nuevas formas de generación de energía que sean limpias o que en su defecto reduzcan los gases de efecto invernadero al mínimo. Los avances tecnológicos nos proporcionan herramientas pro ambiente que revolucionan los mercados y nuestra concepción del transporte. Con la crisis petrolera nos vemos obligados a buscar alternativas que nos permitan subsistir en armonía con el planeta, y por este motivo las celdas de combustible pueden convertirse en la opción que nos ayude a contrarrestar y corregir los daños causados al medio ambiente.

Las grandes potencias han resuelto invertir en estas iniciativas, generando investigación y proyectos muy ambiciosos que ya han dado resultados positivos.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1. Introducción

El principio de funcionamiento de las celdas de combustible está basado en un dispositivo que transforma la energía química en eléctrica, su ventaja con respecto a las baterías es que las celdas no contienen materiales activos (Acido de Plomo, Ion litio, etc.). El funcionamiento de la celda se da a medida que se le suministra los reactantes, de esta manera produce electricidad.

Los elementos básicos que constituyen una celda de combustible son el ánodo, electrodo negativo en el que se lleva a cabo la reacción de oxidación que absorbe los electrones producidos en la reacción electroquímica, y el cátodo, electrodo positivo en el que se lleva a cabo la reacción de reducción ¹. Esta reacción puede ser completada ya que los electrones circulan a través de un circuito externo y de esta manera realizan el trabajo eléctrico. Por lo que podemos decir que el producto de ésta reacción no posee componentes contaminantes.

En la utilización de celdas de combustible uno de los puntos que se destacan es que éstas utilizan pocos dispositivos móviles (motor eléctrico, procesador de combustible) lo que nos ayuda a reducir notablemente los niveles de ruido generados en las operaciones; y, adicionalmente es poco probable que se produzca una parada brusca en su funcionamiento lo cual las pone en gran ventaja con respecto a las máquinas térmicas.

En la actualidad existe un gran interés por la producción de celdas de combustible para la aplicación terrestre como sistemas autónomos de producción de energía

¹ Aguer Hortal, Mario y Miranda Barreras, Ángel, El Hidrógeno, p 105.

eléctrica, considerando de manera importante el factor económico ya que es una tecnología en desarrollo que no se produce en serie en la actualidad, lo que encarece el costo de producción de las celdas de combustible.

Dentro del desarrollo de las celdas se han construido sistemas portátiles de (100W a 1KW) los que funcionan a base de metanol como combustible, de igual manera empleando el mismo combustible se puede aplicar en hospitales, centros comerciales y vehículos de transporte, con una capacidad de generación de electricidad de (40KW-250KW), y con una generación mayor entre (250KW-20MW) aplicadas en niveladores de carga.

Para explicar por qué las celdas de combustible han atraído tanto la atención desde el punto de vista de la eficiencia es necesario considerar algunos aspectos termodinámicos simples. Por ser sistemas electroquímicos, la variación de energía de Gibbs generada en la reacción de la celda ΔG puede, en principio, ser convertida totalmente en trabajo. Como variación de energía total de la reacción corresponde a la variación de entalpía ΔH , la eficiencia termodinámica estará dada por:

$$\varepsilon_t(\%) = 100 \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (1)$$

En la mayoría de las celdas, la reacción que se considera es la oxidación del hidrógeno. Para esta reacción a temperatura ambiente, y considerando la formación de agua líquida, $\Delta G^\circ = 237,3 \text{ kJ/mol}$ y $\Delta H^\circ = 286 \text{ kJ mol}^{-1}$, la eficiencia termodinámica es de 83%. Cabe destacar que, a diferencia de las máquinas térmicas cuya eficiencia está limitada al ciclo de Carnot, (30% de eficiencia) la eficiencia de las celdas disminuye con la temperatura, debido a que la variación de entropía para la reacción es negativa.²

². Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatálisis Vol. 1b*, p 30-40.

Una fuel cell o célula de combustible, es un convertidor electroquímico directo de energía, el que transforma la energía química de algunos compuestos en energía eléctrica. Las células de combustible presentan un inconveniente; generan muy baja tensión, alrededor de 1V; para poder conseguir tensiones más elevadas deben unirse varias de éstas células en serie, gracias a esto se constituye una unidad de orden superior llamada STACK. El stack debe resolver problemas de ecuación de gases inertes, de agua, refrigeración, aporte de combustible, estanqueidad entre otros.

Los elementos básicos que conforman una célula de combustible son; el ánodo el que es un electrodo negativo en el que se realiza la reacción de oxidación, la misma que absorbe los electrones producidos en la reacción electroquímica, el cátodo, que es un electrodo positivo en el que se produce la reacción de reducción, y, un electrolito el que es una sustancia que facilita el paso de los iones.

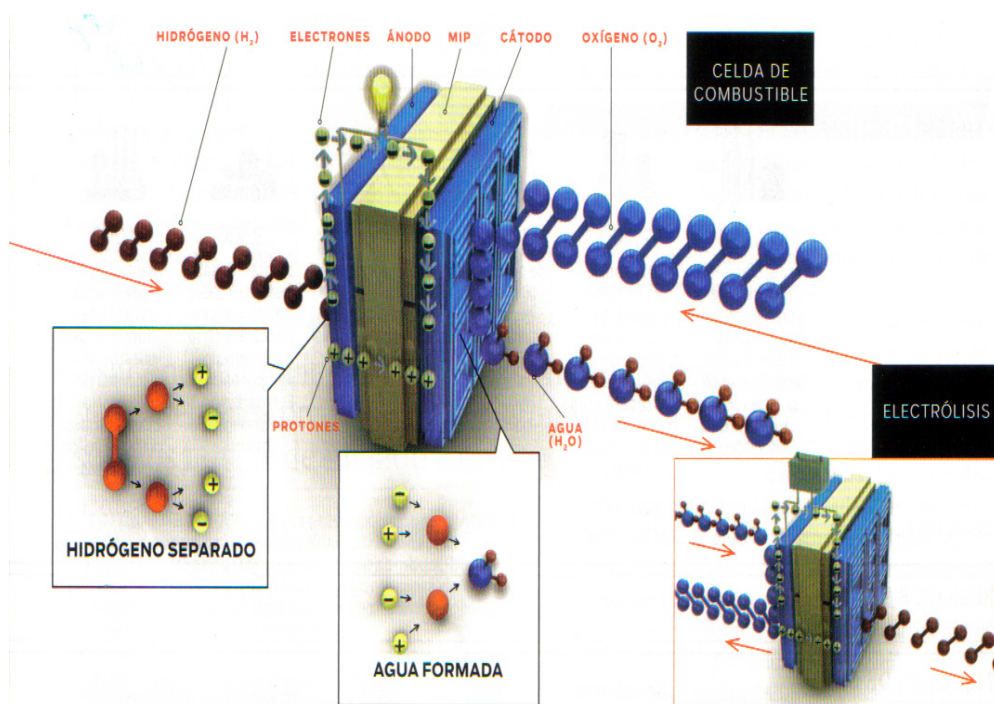


Figura 1.1. Esquema de una celda de combustible.

Fuente: HUTCHINSON, Alex. 2006. *La Verdad acerca del hidrógeno*. Mecánica Popular. Editorial Televisa. México.

1.2 Fuentes de producción de hidrógeno

Existen diferentes métodos para producir hidrógeno, estos métodos se diferencian por la materia prima utilizada para la extracción del hidrógeno, puede obtenerse de: derivados de petróleo, gas natural, entre otros.

1.2.1 Métodos de producción de Hidrógeno

Los principales procesos para la obtención de hidrógeno son:

1.2.1.1 Reformado de petróleo

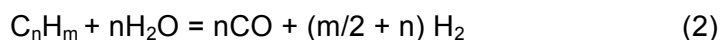
“ El petróleo en estado puro está conformado por varios hidrocarburos, líquidos, saturados, insaturados, de cadena abierta o cadena cerrada ”.³ Mediante diferentes procesos de destilación podemos obtener hidrógeno de cualquier hidrocarburo.

El primer proceso utilizado es el de destilación fraccionada, en la que se produce una serie de fracciones tales que sus componentes tienen el punto de ebullición dentro de un intervalo determinado y característico, de este proceso obtenemos la gasolina, el queroseno, la nafta, entre otros. Todos estos hidrocarburos ya se encontraban en la composición del crudo, este proceso lo que hace es agruparlos.

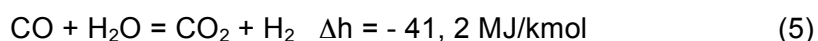
Se le conoce como proceso de reformado a la reacción catalítica de una mezcla de vapor de agua e hidrocarburos a una temperatura más o menos alta para lograr la conformación de hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono.

³ Aguer Hortal, Mario y Miranda Barreras, Ángel, El Hidrógeno, p 92.

Las reacciones básicas son:



Como una aplicación al gas natural tenemos dos reacciones llevadas a cabo en equipos diferentes, se detallan a continuación,



La primera de las reacciones toma lugar a una temperatura aproximada de 900°C y es endotérmica, la segunda de las reacciones es exotérmica y tiene la particularidad de que no puede aportar la energía suficiente que requiere la primera reacción por lo que debe utilizar metano como reactivo y como combustible para aportar la energía faltante.

El gas resultante de la reacción es rico en hidrógeno, el agua se condensa y la mezcla obtenida se purifica en un sistema de membranas separadoras PSA (Preassure Swing Adsorption), de donde se obtiene un hidrógeno de gran pureza. Los hidrocarburos ligeros como el gas natural, el propano y el butano son los que mejor responden a la reacción de reformado.⁴

Las celdas de combustible utilizadas para el reformado funcionan mediante un método de reformado catalítico, el mismo que puede usar como combustibles el metano, propano, gasolinas de bajo octanaje, alcoholes y combustibles derivados del carbón. El reformador catalítico consta de una unidad de limpieza y desulfuración del combustible si es necesario, una unidad de vaporización, la unidad de reformado catalítico, una unidad de recuperación del calor que se utiliza en la vaporización del combustible, y una unidad de reducción de monóxido de carbono.

⁴ Aguer Hortal, Mario y Miranda Barreras, Ángel, El Hidrógeno, p 92-93.

1.2.1.2 Oxidación parcial de los hidrocarburos

El proceso se denomina POX y consiste en oxidar el CH₄ de forma parcial, según la reacción tenemos;



Esta reacción se produce a una temperatura aproximada de 800°C y entrega una eficiencia de al rededor del 70%. La presencia del CO no es conveniente y puede eliminarse oxidándolo a CO₂ o tratándolo con vapor de agua y de esta forma se puede generar más hidrógeno. Ya que la oxidación parcial es una reacción exotérmica no hace falta utilizar quemadores para mantenerla.⁵

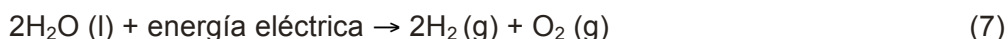
Es un proceso adecuado para la obtención de hidrógeno en vehículos equipados con una pila de combustión, solo se necesita un depósito de gas natural. Uno de los inconvenientes es que el hidrógeno debe ser bastante puro para esta aplicación.

1.2.1.3 Electrólisis del agua

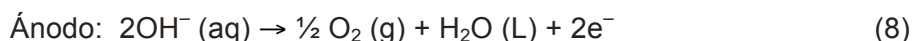
La electrólisis del agua es uno de los procedimientos más limpios utilizados para obtener hidrógeno, consiste en descomponer el agua en sus elementos constituyentes, hidrógeno y oxígeno. Para poder descomponer el agua es necesario invertir cierta cantidad de energía, la misma que puede ser eléctrica o calórica, pero se debe tener en cuenta que la cantidad de energía obtenida no puede ser mayor a la cantidad de energía invertida, por lo que estaríamos contradiciendo el primer principio de la termodinámica (Conservación de la energía). La energía eléctrica que se emplee en la electrólisis debe ser renovable, de otra manera el proceso sería excesivamente caro.

⁵ Aguer Hortal, Mario y Miranda Barreras, Ángel, El Hidrógeno, p 93-94.

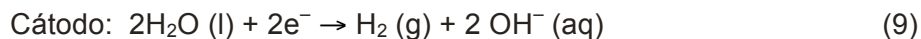
De los diferentes métodos de producción de H_2 a partir de energías alternativas se ha seleccionado a la electrólisis, con la hidroelectricidad como fuente primaria. Básicamente, la electrólisis es un proceso electroquímico que consiste en la ruptura de la molécula de agua en sus componentes mediante la aplicación de una corriente eléctrica continua. La ecuación química general que gobierna esta ruptura molecular es:



Físicamente la electrólisis tiene lugar en una celda electrolítica, que en su versión más sencilla está compuesta por dos electrodos en los cuales ocurren las reacciones de oxidación (ánodo) y reducción (cátodo), y por un electrolito conductor que los separa. En una escala industrial, la electrólisis ocurre en los electrolizadores, equipos conformados por el arreglo en serie o en paralelo de una cantidad variable de celdas electrolíticas según los requerimientos de producción de H_2 . Los electrolizadores más usados para la producción de H_2 son los Alcalinos y de Intercambio Protónico, diferenciándose en el tipo de electrolito. En los primeros, el electrolito es una solución acuosa de KOH, con las siguientes las reacciones de óxido/reducción:



$$E_0 = -0,401 \text{ v}$$



$$E_0 = -0,828 \text{ v.}$$

Para que estas reacciones ocurran, el voltaje mínimo, o potencial ideal de equilibrio, a aplicarse a la celda electrolítica es de 1,229 v, valor obtenido a partir de consideraciones termodinámicas relacionadas con el cambio en la Energía Libre de Gibbs de la reacción global. Sin embargo, el voltaje real de

operación es más alto que el potencial ideal y su relación determina la eficiencia del proceso, usualmente superior al 60%.⁶

1.3 Tipos de celdas de combustible

“ Existen varios tipos de celdas de combustible los que se clasifican en, sistemas directos, indirectos y regenerativos ”⁷. En los sistemas directos el suministro del combustible a la celda de combustible se da de la misma forma en la que es almacenado por ejemplo: hidrógeno gaseoso, o metanol líquido, y el residuo de la reacción es desechado.

En los sistemas indirectos el combustible que es suministrado (gas natural, etanol, propano, metano) es transformado en hidrógeno por un proceso de reforma antes de ser utilizado.

⁶ POSSO, Fausto. Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno.: I: Producción de hidrógeno electrolítico. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. [online]. dic. 2007, vol.30, no. 3, p.201-208. Disponible en la World Wide Web: <http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702007000300001&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0254-0770. Acceso: 17 de Junio de 2009.

⁷ Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatalisis Vol. 1b*, p 42.

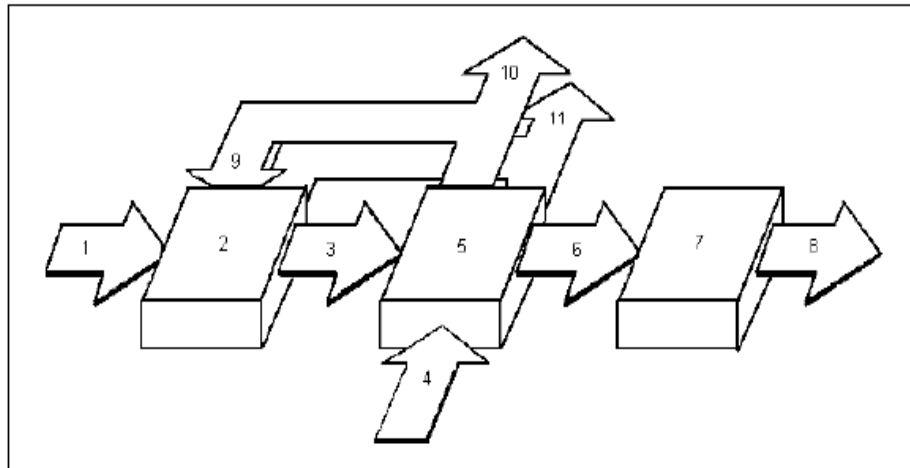


Figura 1.2 Esquema de una planta de celda de combustible formada por un sistema indirecto, 1) entrada de combustible, 2) reformador, 3) entrada para hidrógeno, 4) entrada para oxígeno (aire), 5) módulo de celda de combustible, 6) salida de corriente continua, 7) convertidor de corriente (DC/AC), 8) salida de corriente alterna, 9) retorno de calor y vapor, 10 y 11) descarga de gases no reactivos. Los sistemas directos no utilizan reformador y los sistemas regenerativos utilizan el vapor de agua que es reconvertido en hidrógeno.

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*. Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

Los sistemas regenerativos tienen un funcionamiento similar a los sistemas directos que utilizan hidrógeno, con la diferencia que el residuo de la reacción de la celda de combustible (agua) es reutilizado (como fuente de hidrógeno ó devuelto al medio ambiente) luego de ser reconvertido en hidrógeno por métodos de transformación térmicos, electrolíticos y fotoquímicos.

Para la implementación de cualquiera de los tres tipos se debe considerar la necesidad de acoplar un convertidor de corriente para que esta sea transformada (como ejemplo de corriente continua a corriente alterna), con la ayuda de la tecnología este tipo de conversión es realizada con eficiencia elevada.

Por principio de funcionamiento las celdas de combustible de sistemas directos son los más convenientes ya que no requieren adicionar sistemas auxiliares para procesar el combustible suministrado.

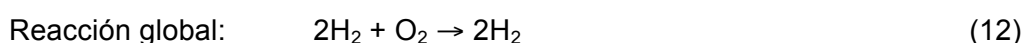
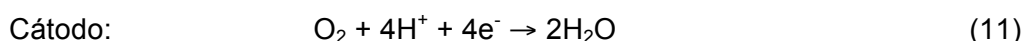
A continuación se indicaran las diferentes clases de celdas de combustible, estas son clasificadas según el electrolito que usen ya que éste es el que determina la temperatura de operación de la celdas:

1.3.1 Celdas de combustible de ácido fosfórico (CCAF)

En este tipo de celdas es empleado un electrolito de ácido fosfórico concentrado (90-100%) y con una temperatura de operación de 160 y 200 °C. El electrodo es inmovilizado entre los electrodos humedecidos en una matriz, hecha generalmente de carburo de silicio aglutinado con una pequeña cantidad (1-2%) de polímero de tetrafluoro etileno, por ejemplo, por impresión de barrido sobre el ánodo. Materiales alternativos como, por ejemplo, mezclas de carburo de silicio con carburo de niobio o silicato de circonio, también han sido considerados.

Estas matrices modificadas presentan mejor comportamiento por que las partículas más esféricas del carburo de niobio o del silicato de circonio llenan los espacios vacíos dejados por las partículas de forma de agujas de carburo de silicio.

Las reacciones que ocurren pueden ser representadas como:



El hidrógeno gaseoso (combustible) difunde a través de la estructura porosa del ánodo, se disuelve en el electrolito y difunde en la solución hasta los sitios activos del catalizador donde es absorbido y se produce la reacción (2). Los iones del H^+ formados son transportados hasta el cátodo donde reaccionan con los iones OH^- , formados en la reducción del oxígeno en la reacción (3), para formar agua como

producto residual. Los electrones dejados por la oxidación del hidrógeno recorren el circuito externo y llegan al cátodo, donde participan en la reducción del oxígeno.

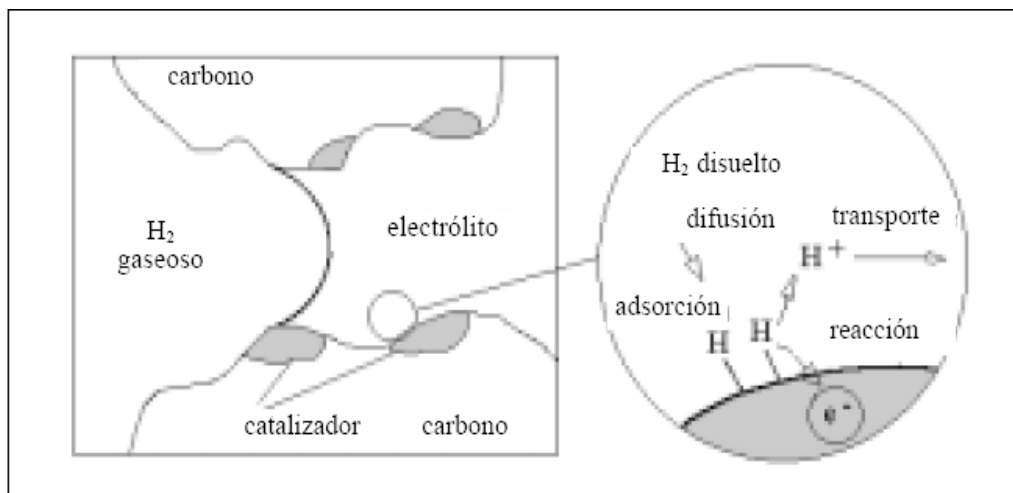


Figura 1.3. Esquema del proceso de oxidación de hidrógeno

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*.

Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

El electro catalizador empleado en el ánodo y cátodo, es platino soportado sobre una matriz hidrofóbica de carbono. Las cantidades de platino utilizadas son relativamente pequeñas (del orden de $0,1$ y $0,5 \text{ mg cm}^{-2}$) para que puedan considerarse aceptables dentro del costo total del sistema. El electrolito no es afectado por el CO_2 , esto es importante cuando se usa hidrógeno obtenido por reforma y que contiene una cantidad considerable de CO_2 (18% aproximadamente) y, debido a la alta temperatura de operación de la celda, el desempeño del ánodo prácticamente no se altera por la presencia de pequeñas cantidades de CO ($<1\%$) y otras impurezas. Por tanto la celda puede operar utilizando directamente aire atmosférico como agente oxidante e hidrógeno impuro producido, por ejemplo, por reforma de otros combustibles.⁸

⁸ Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatalisis Vol. 1b*, p 44.

En comparación con celdas de otros tipos, las celdas de ácido fosfórico son las que tienen mayor desarrollo alcanzando una meta de comercialización a mediana escala, de igual manera los primeros ensayos de las celdas de ácido fosfórico para generación de electricidad fueron iniciados en 1977, siendo montados en una planta de demostración de 1MW por la Corporación de Unidades Tecnológicas.

1.3.2 Celdas de combustible de electrolito polimérico sólido (CCEPS)

Estas celdas emplean un electrolito que consiste en una membrana conductora de iones humedecida con agua y con temperaturas de operación aproximadas de 80°C, el tipo de reacciones que se dan en este tipo de celdas de combustible son iguales a las celdas de ácido fosfórico y utilizan el mismo catalizador.

Debido a su baja temperatura de funcionamiento, en estas celdas debe utilizarse hidrógeno con muy bajo contenido de CO para evitar el envenenamiento de los electrodos, el aire que se encuentra en la atmósfera puede ser usado como agente oxidante.

Con el uso de los mejores métodos de reforma (electrólisis) se logra producir un gas combustible que contiene un valor semejante al 1% de CO y este contenido puede ser reducido hasta obtener 10ppm a través de una oxidación selectiva utilizando como catalizador de Pt/alúmina, con un riesgo de que estas pequeñas partículas afecten a un ánodo de platino.

Catalizadores alternativos basados en aleaciones de materiales como Pt, Ru y otros con capacidad de formar especies oxigenadas en la superficie a bajos potenciales pueden incrementar su tolerancia al CO, y en otros casos podría aumentar a 20 ppm en el hidrógeno.⁹

⁹ Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatálisis Vol. 1b*, p 47.

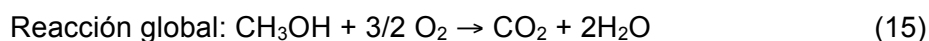
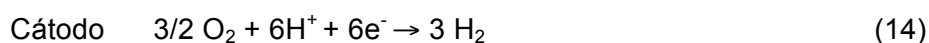
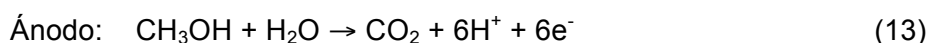
La aplicación de estos tipos de celda se da principalmente en los años sesenta, siendo empleada en vuelos espaciales Gémini como fuente auxiliar de energía eléctrica y de agua potable como producto de reacción de las celdas y de esta manera hacer uso los astronautas.

1.3.3 Celdas de combustible para la oxidación directa de metanol (CODM)

La distribución y almacenamiento del hidrógeno como combustible es uno de los problemas principales, por lo que se sigue buscando combustibles alternativos que faciliten su uso en la aplicación de las celdas de combustible en los vehículos.

De los diferentes tipos de combustibles que pueden ser oxidados en el ánodo, el que ha despertado un mayor interés es el metanol. Las celdas que trabajan con este combustible tienen como principio de funcionamiento la oxidación directa del metanol en el ánodo, que puede ser introducido de manera directa a la celda como líquido o gas.

Si bien el electrolito puede ser una solución ácida, la mayoría de los desarrollos actuales se basan en la tecnología de la celda electrolito polimérico sólido.



Como muestran estas reacciones, la oxidación del metanol involucra seis electrones que no pueden ser transferidos en una etapa única.

El proceso de oxidación produce la formación de intermediarios, alguno de ellos perjudiciales como el CO, que se pueden adsorber en la superficie bloqueando los sitios catalíticos. Por este motivo es necesario utilizar en el ánodo electro catalizadores que no solamente sea efectivos para el proceso de oxidación, si no también resistentes al envenenamiento con los intermediarios.¹⁰

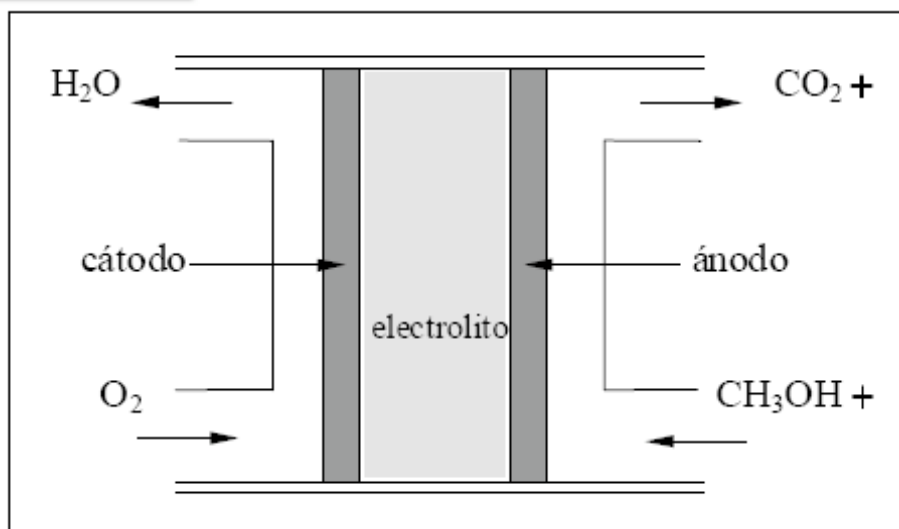


Figura 1.4. Diagrama esquemático de una celda de combustible de metanol directo.

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*.

Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

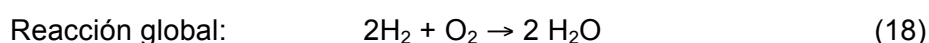
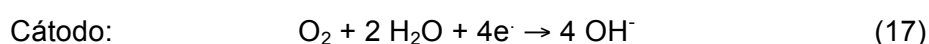
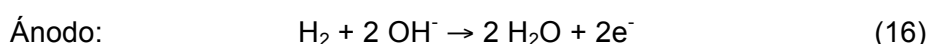
En las celdas de oxidación directa de metanol y las celdas de combustible de electrolito polimérico sólido que emplean el hidrogeno como combustible, han sido considerados diversos tipos de materiales con el propósito de conseguir ánodos resistentes al CO, encontrando estas aleaciones como las más resistentes: platino con Sn, Mo, Ru, etc. siendo la aleación Pt- Ru la más utilizada.

¹⁰ Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatálisis Vol. 1b*, p 51-52.

El progreso de las celdas de combustible para la oxidación directa con metanol ha sido notable en los últimos diez años, ya que en un inicio el desempeño de estas celdas era tan pobre que no podían ser puestas en práctica, con su desarrollo se han logrado obtener densidades de corrientes de 400mA cm⁻² con voltajes de 0.5 Volt con oxígeno y de 0.4 Volt con aire, los que nos da una pauta que en un futuro no muy lejano podrá ser aplicado este sistema.

1.3.4 Celdas de combustible alcalinas(CCA)

El tipo de celdas de combustible alcalinas emplean como electrolito una solución acuosa de hidrógeno de potasio (30 - 50% de potasio) y con una temperatura de funcionamiento próxima a los 80 °C



Los catalizadores con mayor frecuencia ocupados para este tipo de reacciones son de platino, la mayor velocidad de la reacción de reducción de oxígeno en este electrolito y con menor agresividad del mismo en un proceso de corrosión permitiendo el uso de metales menos nobles e inclusive no nobles en los electrodos.

Una gran desventaja que presenta este sistema es que el hidrógeno y el agente oxidante deben disponer de una elevada pureza, ya que el electrolito podría reaccionar con gases ácidos como CO₂, SO₂, etc., formando especies insolubles que terminan dañando el sistema de precipitación de productos sólidos. Esto determina una vida útil de las celdas de combustible haciéndolas limitadas en un tiempo de funcionamiento de 3000 a 4000 horas, no resultando convenientes para grandes instalaciones.

En estos casos es empleado electrolitos circulantes, los que facilitan la purificación externa en casos de contaminación con CO_2 y la remoción de agua formada en la celda disuelva las mismas.¹¹

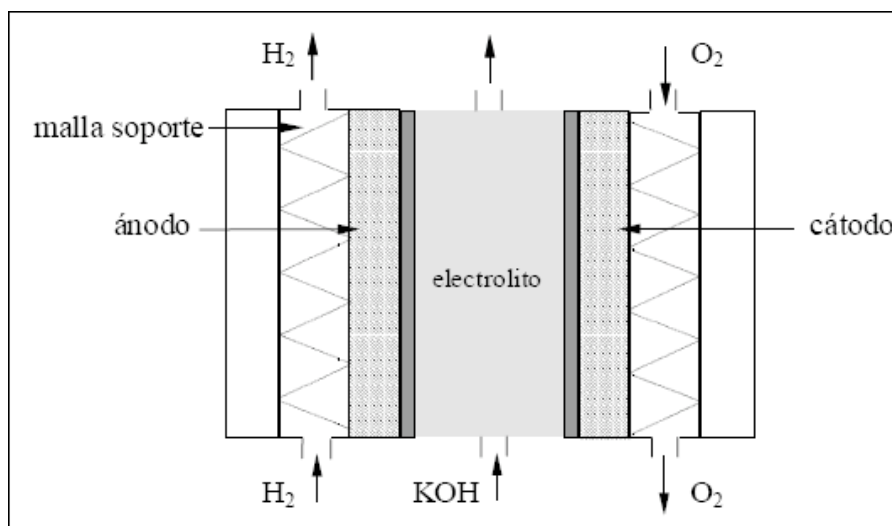


Figura 1.5. Configuración de una celda de combustible alcalina típica.

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*.

Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

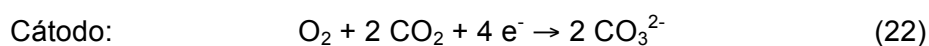
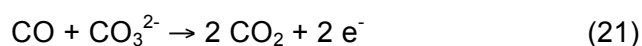
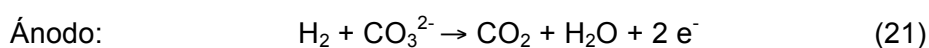
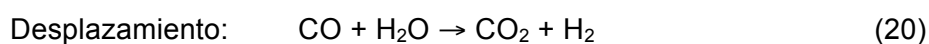
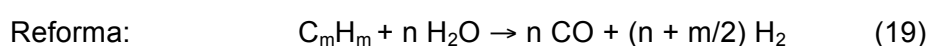
1.3.5 Celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)

Las celdas de carbonatos fundidos (molten carbonate fuel cells MCFC) son consideradas como celdas de segunda generación ya que estas operan mucho después de las celdas de ácido fosfórico. En este tipo de celdas, el electrolito consiste en una mezcla de carbonatos de sodio, litio y potasio, funcionan a una temperatura que varía dependiendo de las proporciones empleadas en la mezcla de carbonatos y generalmente el rango de temperatura se encuentra entre los 600 y 700 °C.

¹¹ Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatalisis Vol. 1b*, p 53.

Ya que trabajan a temperaturas tan altas, el combustible que alimenta la celda puede ser el gas natural o los productos de la gasificación del carbón que son reformados internamente. El cátodo es alimentado por aire enriquecido con CO_2 .

Cuando el combustible es gas natural, las reacciones que ocurren dentro de la celda son:



En esta celda, el CO es un combustible, pero la reacción de oxidación es muy lenta comparada con la reacción de oxidación del hidrógeno y por esto predomina la reacción de desplazamiento. Por causa de esta reacción, la utilización del combustible en la celda de carbonatos fundidos puede exceder la correspondiente al hidrógeno introducido (relación hidrógeno consumido/hidrógeno introducido mayor que 1).¹²

¹². Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatálisis Vol. 1b*, p 55-56.

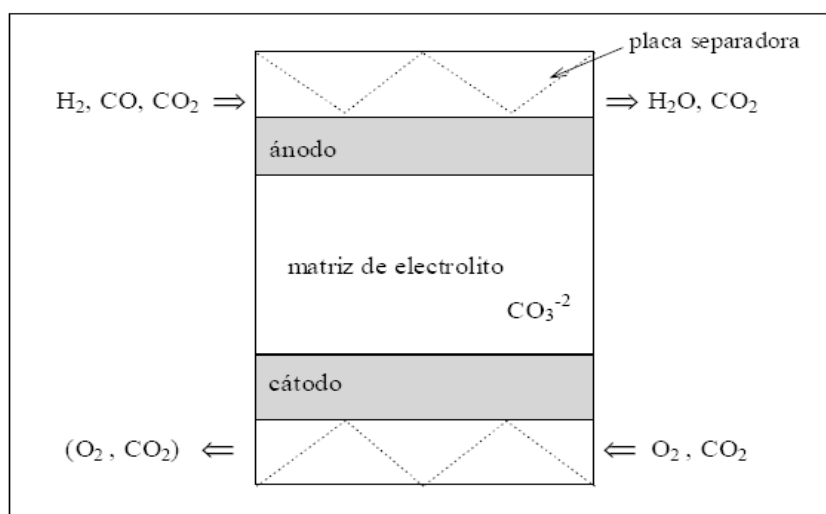


Figura 1.6. Configuración básica de una celda de combustible de carbonato fundido.

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*.

Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

Una de las ventajas de la celda de carbonatos fundidos es la posibilidad de realizar una forma interna del combustible, esto elimina la necesidad de un reformador separada y puede trabajar de forma directa o indirecta.

En el caso de la reforma directa el reformador está separado del ánodo pero se mantiene física y térmicamente integrado a la celda, de esta manera el calor generado en la celda se usa para facilitar la reacción endotérmica de reforma. En la reforma indirecta, se utiliza el hecho del que el consumo de hidrógeno en el ánodo desplaza el equilibrio de la reacción de reforma hacia la formación de hidrógeno.

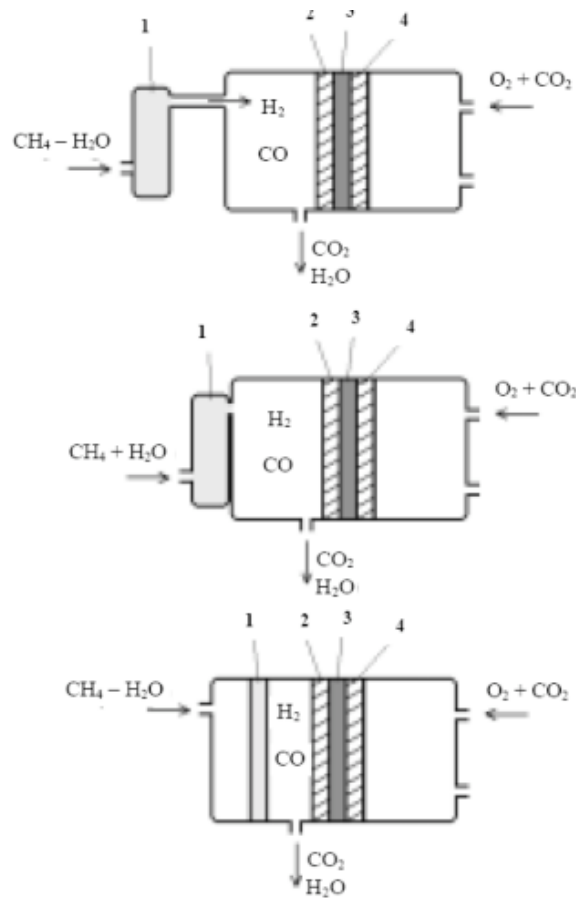


Figura 1.7. Sistemas de reforma de combustible en celdas de alta temperatura: Arriba, reforma externa con aprovechamiento del calor generado por la celda, Centro, reforma con aprovechamiento directo del calor, Abajo, reforma interna (1) reformador, (2) y (4) electrodos, (3) electrolito.

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*. Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

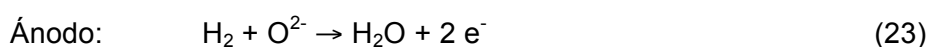
A pesar de que las celdas de carbonatos fundidos son bajas de densidad de corriente, la alta calidad del calor producido permite una elevada eficiencia además de la posibilidad de reformar internamente casi cualquier combustible, por lo que estas celdas son perfectas para aplicaciones estacionarias.

1.3.6 Celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC)

Las celdas de combustible de óxidos sólidos (solid oxide fuel cells SOFC) tiene características que las distingue de las otras celdas, ya que no contienen un electrolito móvil, lo que permite libertad para el diseño de la celda y evita la corrosión de los materiales.

El electrolito que usan está compuesto por óxidos refractarios dopados que exhiben una considerable conductividad iónica a altas temperaturas. Su temperatura de funcionamiento se encuentra en un rango que varía desde los 800 a los 1000 °C. El electrolito más usado consiste en una lámina de circonia (ZrO_2) de un espesor de $40\mu\text{m}$ dopada con un 10% de moles de ítria (Y_2O_3) que a altas temperaturas se torna conductora iónica, siendo el ión móvil el O^{2-} .

Como en el caso de la celda de carbonatos fundidos, el combustible que alimenta el módulo puede ser directamente gas natural o los productos de la gasificación del carbón que son reformados internamente, las reacciones de la celda son:



El material que se usa en el ánodo es una hoja porosa de un espesor de $150 \mu\text{m}$ y un 30% de porosidad, la misma que puede ser de Níquel o Cobalto impregnado con un electrolito Ni-ZrO_2 ó Co-ZrO_2 (circonio). El Cátodo está compuesto por manganita de lantano (LaMnO_3) dopada con

estroncio, y cuenta con un espesor de 1mm y una porosidad cercana al 30%, y solo utiliza oxígeno, no siendo necesario introducir CO_2 .¹³

Una de las ventajas que valen ser mencionadas es que estas celdas son capaces de generar potencias elevadas 2 W por centímetro cuadrado aproximadamente.

Estas celdas trabajan a altas temperaturas por lo que utilizan materiales nobles y permite la reforma interna de combustibles, como el gas natural sin el empleo de catalizadores, simplemente el material del ánodo funciona como catalizador. El calor producido en este tipo de celdas es de muy buena calidad para la cogeneración.

Las celdas de óxidos sólidos se vienen desarrollando desde hace ya algunos años, el primero en desarrollar este tipo de celda es la marca Westinghouse Electric, y posteriormente las marcas Allied Signal Co., Ceramatec y Z-Tek continuaron los cuales han presentado sus diseños, cabe resaltar que la Westinghouse desarrolló un tipo de celda de forma tubular, en la que el cátodo es depositado en la parte interna de un tubo de circonia/ítria mientras que el ánodo se deposita de manera de revestir la parte externa, para un módulo de varias celdas untarías estas deben ser conectadas en paralelo. La marca Alligned Signal presentó una celda de configuración monolítica en la que los electrodos y el electrolito forman una estructura corrugada. Z-Tek y Ceramatec desarrollaron una celda diferente en la que se una estructura plana.

En la figura 1.8 a continuación se puede observar la configuración de la celda tubular y monolítica de las celdas de combustibles de óxidos sólidos.

¹³ Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatálisis Vol. 1b*, p 60-61.

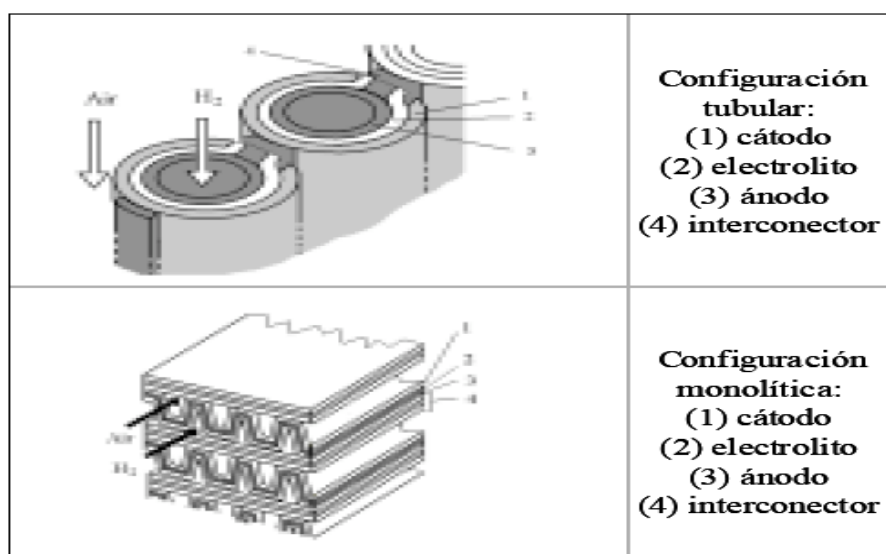


Figura 1.8. Configuración tubular y monolítica de las celdas de combustible de óxidos sólidos.

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*.

Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

1.4 Construcción de celdas de combustible

A continuación se describe el proceso de construcción de celdas de combustible unitarias y múlticelda.

1.4.1 Materiales y métodos utilizados en la producción de catalizadores y electrodos de difusión de gas para celdas de baja temperatura

Las limitaciones de la eficiencia en las celdas de combustible son consecuencia de diversos factores, pero tal vez el más fundamental es la cinética desfavorable de la reducción de oxígeno. En las celdas de combustible de baja temperatura, esta cinética lenta de la reacción de la reducción de oxígeno requiere catalizadores muy eficientes. El catalizador más utilizado es el de platino, el mismo que cuenta con una geometría no favorable y un elevado costo, por lo que es utilizado en forma de partículas de 5nm aproximadamente de diámetro, las que se encontrarían dispersas en un soporte adecuado. El objetivo es proporcionar un área efectiva de catalizador

tan alta como sea posible. El soporte más adecuado para las partículas de platino es el polvo de grafito de alta área superficial.

1.4.2 Electro catalizadores

Los materiales utilizados en los electro catalizadores, dependen del tipo de celda en que van a ser utilizados y también del funcionamiento de catalizador, por lo que se debe tener en cuenta que el catalizador del cátodo tiene que ser eficiente para acelerar la reducción del oxígeno y el ánodo debe ser resistente a las impurezas que pueden llegar con el hidrógeno.

En las celdas de combustible de electrolito polimérico sólido y en las de ácido fosfórico, el catalizador que se usa es uno de platino disperso en polvo de grafito, las celdas alcalinas utilizan materiales nobles como plata y níquel, pero este tipo de celdas no tiene mucha aplicación ya que son muy inestables, éstas funcionan en atmósferas controladas lo que las hace convenientes para vehículos espaciales.

La preparación del platino disperso comienza por una suspensión en agua de un polvo de grafito (Vulcan XC-72), a la suspensión se le agrega una solución de ácido cloroplatínico y después un agente reductor adecuado (ditiocarbato de sodio ó hidrosulfito de sodio). El platino es reducido y fijado sobre las partículas de grafito.¹⁴

El diámetro de las partículas de platino debe estar en un rango de 2 a 5nm, pero este diámetro depende de la proporción de platino a carbono del producto resultante, esto es de gran importancia ya que la actividad del platino disperso depende del tamaño de las partículas.

¹⁴ Alonso-Vante, Nicolás, *Electroquímica y Electrocatálisis Vol. 1b*, p 73.

Los catalizadores más utilizados son los preparados en la proporción 20% Pt/C, pero también pueden utilizarse siempre y cuando sean preparados entre las proporciones desde el 10 al 80% Pt/C.

Una vez seco el catalizador se somete a un tratamiento térmico a una temperatura de 500 °C en atmósfera inerte.

Las celdas de combustible que trabajan a altas temperaturas tienen como ventaja que se usa su misma temperatura para acelerar las reacciones, no necesitan materiales nobles como catalizadores.

1.4.3 Construcción de celdas unitarias

Los electrodos, electrolitos y materiales separadores utilizados en celdas de combustible son, en general, evaluados en las llamadas celdas unitarias, las mismas que son unas pequeñas celdas que miden de 5 a 50 cm² aproximadamente de área efectiva, estos contienen solamente un par de electrodos y un electrolito.

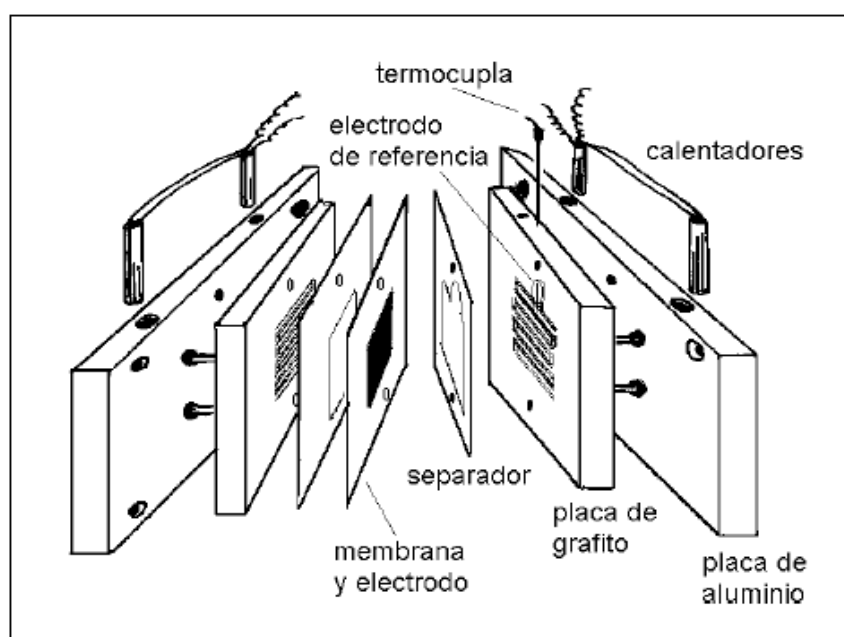


Figura 1.9 Celda de combustible de electrolito polimérico sólido unitaria.

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*.

Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

Como se muestra en la figura 1.9 el conjunto membrana/electrodos es colocado entre dos bloques de grafito los mismos que cuentan con canales para la circulación de gases reactantes. Se debe incluir necesariamente espaciadores los cuales impidan una compresión indebida del sistema membrana/electrodos cuando el conjunto es comprimido entre dos bloques de aluminio.

Estos bloques tienen entradas para elementos calefactores que regulan la temperatura de la celda, éstos son necesarios ya que las celdas unitarias no generan suficiente calor como para poder mantener una temperatura óptima de operación. Las celdas unitarias son alimentadas con hidrógeno y oxígeno (aire).

La celda unitaria y más específicamente en el caso de la celda CCEPS presenta como inconveniente un grado deficiente de hidratación de la membrana, en general,

el agua producida en la reacción no es la suficiente para mantener a la membrana correctamente hidratada, esto se logra pasando los gases reactantes a través de agua pura contenida en recipientes (metálicos) antes de que ingresen a la celda. Para mantener el equilibrio, y la hidratación adecuada de la membrana, los recipientes deben estar a una temperatura igual o mayor a la temperatura de funcionamiento de la celda, de esta manera la temperatura de saturación de los gases reactantes resulta ser uno de los parámetros de los cuales depende el rendimiento.

1.4.4 Construcción de módulos múlticelda

La construcción de los módulos múlticelda también conocidos como stacks, requiere de algunas consideraciones fundamentales ya que es un sistema más complejo que las celdas unitarias. Los módulos múlticelda pueden ser construidos con igual tecnologías semejantes que las celdas unitarias.

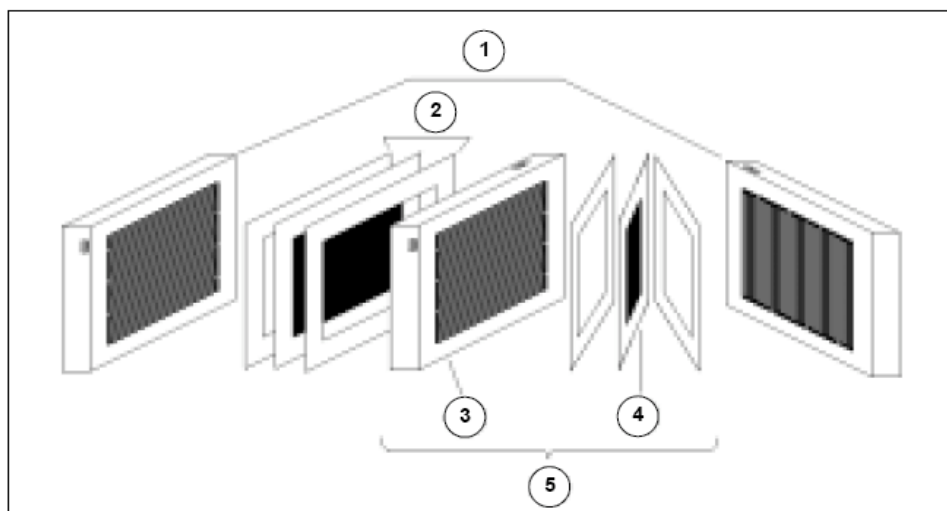


Figura 1.10 Representación de un módulo múlticelda. 1) Placas unipolares, 2) espaciadores, 3)placa bipolar, 4)membrana y electrodos y 5) unidad que se repite.

Fuente: ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*.

Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.

Para la construcción de los módulos múlticelda el primer punto a considerar es si las celdas unitarias serán conectadas en serie o paralelo, para realizar la conexión en paralelo es necesario que los electrodos posean un alta conductividad electrónica, éste es el caso para algunas celdas de combustible alcalinas que emplean mallas metálicas, generalmente de níquel como soporte.

En las celdas de combustible de ácido fosfórico y las celdas de combustible de electrolito polimérico sólido que utilizan grafito no disponen de una conductividad suficientemente elevada que permita una conexión de las celdas en paralelo, haciéndolas una conexión en serie, dando un concepto fundamental al separador, ya que por medio de este circula el gas reactante.

Al realizar la conexión en serie la colocación del separador debe ser la siguiente: por un lado debe tener los canales por los que circulara el hidrogeno, y del otro lado los canales por los que circulara el oxígeno o el aire.

Las características constructivas del separador tendrán que constar con las siguientes características: este debe ser lo más fino posible de esta manera se disminuirá la resistencia entra las celdas y al mismo tiempo actúa como impermeabilizante a los gases para evitar una reacción química directa entre el hidrogeno y el oxígeno.

Adicionalmente se disminuye la eficiencia de conversión reactante, ya que al reaccionar de manera directa produce un incremento de temperatura, también los separadores deberán proveer de un sistema que les permita tener una adecuada entrada y salida de los gases, y esta estar en comunicación con el ingreso y salida de la múlticelda.

A diferencia de las celdas unitarias que disponen de un sistema para calentar el sistema, este requiere un sistema para enfriar ya que el calor que genera excede las temperaturas de funcionamiento.

Celdas de combustible que disponen de un electrolito circulante puede ser regulada su temperatura al hacerlo pasar un radiador disminuyendo de esta manera su temperatura externamente, en el caso de las celdas de combustible de ácido fosfórico existe la necesidad de hacer que circule un refrigerante ya sea gaseoso o líquido, esto se puede realizar colocando en la múlticelda placas de grafito, por el cual circule líquido refrigerante, estas deben estar intercaladas entre 3 y 4 celdas de combustible.

En el caso de las celdas de combustible de electrolito polimérico sólido posee un problema particular que es el de mantener la membrana húmeda la cual complica su funcionamiento en comparación a las otras celdas, ya que al saturar los gases con agua al ingreso puede no ser suficiente en el caso de las múlticeldas puede ser necesario el emplear soluciones particulares que estarán relacionadas al tamaño y su temperatura de funcionamiento de las múlticeldas, en algunos casos se emplea agua como líquido refrigerante y a su vez también se utiliza para hidratar la membrana.

1.5 Conclusiones

Dentro de los principales puntos que se destacan en la utilización de las celdas de combustible es la implementación de pocos elementos móviles, es por eso su gran interés de desarrollar y producir para aplicaciones terrestres, siendo este un sistema autónomo de producción de energía, teniendo en cuenta que una fuel cell es un convertidor electroquímico directo de energía, sin olvidar la baja tensión que éstas generan.

Para producir hidrógeno tenemos una variedad de tipos de celdas de combustible, dentro de estos sistemas encontramos la celda de electrolito polimérico sólido, siendo este sistema el más apropiado para realizar la extracción del hidrógeno, porque emplean un electrolito que consiste en una membrana conductora de iones humedecida con agua por lo que su temperatura de funcionamiento que oscila entre los 80 °C en relación a las temperaturas de funcionamiento del resto de sistemas, es por eso que el hidrógeno obtenido en estas celdas de combustible contienen un bajo nivel de CO, siendo esto muy importante ya que se evita en gran porcentaje el envenenamiento de los electrodos.

Para realizar la selección del tipo de celda de combustible más viable, se tomará como referencia un cuadro sinóptico donde se analizan las características constructivas y operacionales de las diferentes celdas de combustible, a pesar que existen otros tipos de celdas de mayor generación de potencia, la celda de electrolito polimérico sólido ha sido aplicada en vehículos, dando muy buenos resultados.

Para nuestro medio y según el estudio realizado, el mejor método para obtener hidrógeno es mediante la electrólisis del agua.

Tabla 1. Características de las celdas de combustible

	CCA	CODM	MCFC	CCAF	CCEPS	SOFC
Electrolito	Hidróxido potásico	Membrana de polímero	Carbonato fundido de potasio-litio	Acido fosfórico	Membrana de polímero	Dioxido de circonio
Rango de temperatura	90-120	20-110	650	160-200	60-110	800-1000
Combustible	H_2	CH_3OH	$H_2/CO/HC$ reformados	H_2/HC reformados	H_2/HC reformados	$H_2/CO/HC$ reformados
Oxidante	O_2	O_2	CO_2/O_2 /aire	O_2 /aire	O_2 /aire	O_2 /aire
Potencia en KW	1-100	0,001 a 10	250 a 3000	200 a 1000	20 a 250	300 a 3×10^5
Aplicaciones	Puntuales	Portátiles en equipos electrónicos	Propulsión naval, ciclo combinado	Sector terciario	Vehículos, portátiles	Aplicaciones estacionarias

Fuente: Aguer Hortal, Mario y Miranda Barreras, Ángel, El Hidrógeno, P 117.

CAPITULO 2

APLICACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

2.1 Aplicación del hidrógeno en el transporte

La contaminación ambiental generada por las emisiones de gases de los vehículos que operan con diesel en los centros urbanos es uno de los principales problemas socio económicos que tienen que ser enfrentados en este siglo. El notable interés en el desarrollo de las celdas de combustible para generar energía en los vehículos eléctricos está motivada por las distintas ventajas que ofrecen las células de combustible en comparación de las máquinas de generación térmica comúnmente empleadas.

El interés en la aplicación de las celdas de combustible en vehículos eléctricos está motivado por las grandes ventajas que éstas presentan en comparación con las máquinas térmicas convencionales a las que estamos acostumbrados;

- Contaminación ambiental insignificante
- Utilización de combustibles provenientes de fuentes renovables (etanol, biogás, hidrógeno)
- Mejor aprovechamiento del combustible, lo que se traduce en mayor eficiencia (las celdas no están limitadas por el ciclo de Carnot)
- Bajo nivel de ruido
- Ausencia de partes móviles

Para que las celdas de combustible puedan ser utilizadas en vehículos eléctricos se debe cumplir con ciertos requisitos;

Se necesita que la celda de combustible sea compacta en tamaño y lo suficientemente liviana, debe soportar las vibraciones y tensiones mecánicas a las que va a estar expuesta.

Un aspecto que es de mucha importancia es el almacenamiento del combustible, si el combustible a almacenar se encuentra en estado líquido, no existirían diferencias sustanciales con las instalaciones y depósito de los sistemas de combustible de los vehículos convencionales. Pero si se utiliza hidrógeno en estado gaseoso, los problemas asociados al manejo, almacenamiento y peso del depósito, sí son factores que influirán negativamente en el desarrollo del vehículo, estos problemas no son insuperables pero mientras esta tecnología se encuentra en desarrollo, se recomienda que se utilicen combustibles líquidos (metanol) de los cuales se pueda extraer el hidrógeno mediante un reformador que esté instalado en el vehículo.

La densidad de potencia es un factor crítico en el desarrollo de las aplicaciones de las celdas de combustible en cuanto a los vehículos por los que podemos comparar con las máquinas térmicas convencionales: una máquina térmica puede lograr una densidad de potencia de entre 0,67 a 1,13hp/kg (500 a 1000W/kg), cifra que puede ser alcanzada por los módulos de celda de electrolito polimérico. Para poder realizar un cálculo acertado de la densidad de potencia se debe considerar el peso total de todos los componentes, o sea se debe calcular el peso del módulo principal, el reformador, los compresores, el motor eléctrico, etc. Los sistemas más desarrollados logran alcanzar una densidad de potencia de 0,13hp/kg (200W/kg), lo que convierte el sistema en viable para el uso en vehículos.

Las primeras aplicaciones del hidrógeno en vehículos tienen origen en 1967 cuando la casa General Motors incursiona con la furgoneta Electrovan, con un peso de 3.400 kg, para dos pasajeros, una pila de combustión de la Unión Carbide de 5 kW con hidrógeno líquido, este vehículo podía desarrollar hasta 105 km/h con una autonomía de 300km.

Entre los años 1967 y 1990 aparecen diversos modelos de vehículos que utilizan el hidrógeno en motores de combustión y pilas de combustible, a continuación indicamos como se ha desarrollado la tecnología del hidrógeno a través de los años.

Tabla 2. Evolución de los vehículos de celdas de combustible.

Modelo	Fabricación	Año	Peso	Tipo de Celda	Autonomía	Velocidad
Austin 40	Austin	1970	950 kg	6 KW por Union Carbide	-----	80 km/h
VW Trucks	VW Trucks	1989	2880 kg	17.5 KW por Siemens	120 km	70km/h
Necar 1	Mercedes benz	1994	3500 kg	50 KW por Ballard	100 km	90km/h
Necar 2	Mercedes benz	1996	2600 kg	25 KW por Ballard	250 km	110km/h
Necar 3	Mercedes benz	1997	1750 kg	50 KW por Ballard	450km	120km/h
Necar 4	Mercedes benz	1999	1750 kg	70 KW por Ballard	450 km	145km/h
Necar 5	Mercedes benz	2000	1750 kg	75 KW por Ballard	450 km	150km/h
Honda FCX	Honda	2003	1645 kg	80 KW por Honda	395 km	150km/h
Sprinter UPS	Mercedes benz	2003	-----	55 KW por Ballard	150 km	130km/h
Seicento	Fiat	2003	810 kg	40 KW por Nuvera	220km	130km/h
Fine - N	Toyota	2003	-----	Toyota Híbrido	500km	-----
.....	Ballard Power Systems	1995	-----	205 KW por Ballard	560km	75 km/h
Clase B F-Cell	Mercedes Benz	2009	-----		400km	

Este último prototipo fue probado en el año 1997 en la ciudad de Chicago, mientras que tres unidades más formaron parte del tránsito en Vancouver, tan solo en dos años estos vehículos recorrieron más de 118.000km transportando a más de 200.000 pasajeros, ésta experiencia proporcionó gran información para posteriores prototipos, mejorando las celdas y disminuyendo el peso en casi un 50% en vehículos de las siguientes generaciones.



Imagen 2.1. Austin A 40



Imagen 2.2 NECAR 3



Imagen 2.3, Honda FCX

La evolución de las celdas de combustible como instrumentos de generación eléctrica para propósitos automotrices viene dándose desde mediados del siglo XX. Su evolución ha sido lenta y poco significativa con casi veinte años entre el lanzamiento de prototipos al mercado, desde aquellos años podemos ver que los

adelantos tecnológicos aplicables han sido retrasados gracias a los costos elevados y problemas de generación de hidrógeno.

Las innovaciones que han dado paso a que sean tecnologías aplicables vienen desarrollándose con mayor velocidad a partir de la década de los años 90, como respuesta a la necesidad de reemplazar al los derivados del petróleo como fuentes de energía primarias para aplicaciones automotrices.

A mediados de la década de los 90 se lanzan finalmente la línea de vehículos NECAR pertenecientes a Mercedes Benz, quien unió esfuerzos con Ballard Power Systems logrando desarrollar para el año 2000 desde el NECAR 1 inicialmente con una celda de combustible de 50KW de capacidad hasta el NECAR 5 que llegó a evolucionar con una celda de 75KW de capacidad.

A partir de esto, varios fabricantes hacen el lanzamiento de sus diferentes prototipos en el año 2003 basándose en evoluciones anteriores, para este entonces los modelos más sobresalientes, en el caso de Honda fue el Honda FCX previsto con una celda de combustible de 80KW, la misma que no se distancia mayormente en su capacidad a las celdas producidas para los modelos de Mercedes Benz. Otras marcas como Fiat y Toyota lanzaron sus modelos, Seicento y Fine-N respectivamente.

Para el año 2009 Mercedes Benz lanza al mercado el Clase B F-Cell, un vehículo de última tecnología que tiene las mismas prestaciones que un automotor a gasolina de 2.0 litros. Lo que lo hace tan especial es su sistema de pilas de hidrógeno, el mismo que se produce a bordo extrayendo el gas del oxígeno del aire a 700 atmósferas de presión. Entre sus ventajas principales es la emisión nula de gases de efecto invernadero con un consumo de 3,3 litros por cada 100km. La prestigiosa fábrica anunció que serán manufacturadas una pequeña flota de 200 vehículos que serán distribuidos en Europa y Estados Unidos para que sea demostrada su fiabilidad en condiciones normales de uso.

Todos los vehículos livianos desarrollados han sido prototipos no llegando a producirse en serie, quienes tuvieron una aplicación más importante fueron los autobuses, siendo estos, los que en la actualidad forman parte de programas de desarrollo, mejoras y futuras evoluciones para las celdas de combustible.

La utilización del metanol como fuente de combustible es una propuesta muy interesante ya que es más fácil de producir y suministrar hidrógeno, sin embargo este hidrógeno puede obtenerse del gas natural o de derivados de petróleo lo que nos lleva al mismo problema de los motores de combustión interna, los derivados del petróleo no son combustibles limpios ya que siempre existirán cantidades de CO₂ como emisiones al medio ambiente pero estas serán menores que las que emiten los motores convencionales.

Dados los avances tecnológicos que se suscitaron en la década de los 80, se logró desarrollar sistemas que fueron aplicados en buses de transporte urbano. Entre los años 1987 y 1995 participaron en el desarrollo de estos sistemas la Universidad de Georgetown, ERC, Booz-Allen & Hamilton, Ballard Power Systems, entre otros, algunos buses de transporte fueron concebidos como proyecto, desarrollados, y probados como parte del sistema de transporte urbano, cuatro de estos buses fueron híbridos de batería/celda de ácido fosfórico y los restantes utilizaron celdas de electrolito polimérico sólido. El combustible que se utilizó fue el hidrógeno comprimido o metanol reformado a hidrógeno a bordo del vehículo.

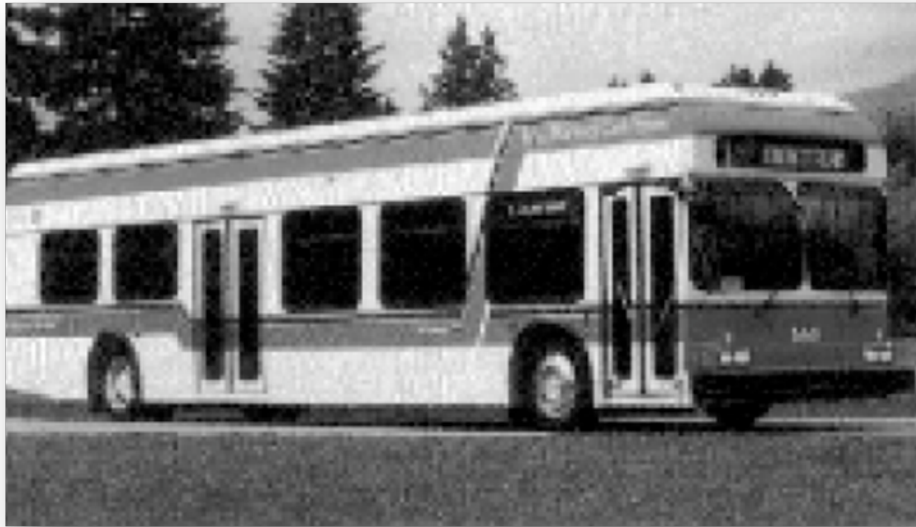


Imagen 2.4. Primer bus desarrollado por la compañía Ballard Power Systems a principios de la década de los 90's.

2.2 Elementos del vehículo de hidrógeno

Los elementos esenciales para que un vehículo híbrido funcione son los siguientes:

2.2.1 Procesador de combustible

También llamado reformador, el procesador es un dispositivo que permite la obtención del hidrógeno del gas, o cualquier derivado del petróleo. El reformador no produce un hidrógeno puro por lo que se debe eliminar los componentes que producen contaminación así como también los que pueden perjudicar los componentes catalíticos de una celda de combustible.

2.2.2 Pila de Combustible

Encargada de generar la corriente eléctrica necesaria para poder alimentar el motor eléctrico, las pilas que se utilizan generalmente en el ámbito automotriz son las de

tipo de membrana intercambiadora de protones o PEM alimentadas por hidrógeno y oxígeno.

2.2.3 Motor Eléctrico

Este motor eléctrico es el encargado de convertir la energía generada por las celdas de combustible en energía mecánica capaz de proporcionar la motricidad del vehículo.

Estos motores generalmente son motores síncronos en los que el inductor está constituido por imanes permanentes que se llaman brushless.

2.2.4 Control Electrónico

Este es un sistema de regulación del motor y se basa en procedimientos electrónicos de alto rendimiento, necesita un convertidor de corriente continua a corriente alterna.

2.2.5 Acumulador de energía

Estos acumuladores pueden ser de diferentes tipos, a continuación se detallan:

- **Baterías.** Son dispositivos electroquímicos que funcionan igual a la pila de combustión, con la diferencia en que las características de los reactivos deben ser distintas, por esta razón su estructura y características son diferentes.
- **Supercondensadores.** Son sistemas de acumulación de energía electroestática.
- **Acumuladores cinéticos de energía eléctrica.** Es un sistema de acumulación de energía electromecánica, en algunos casos estos sistemas acumulan su energía, recuperando la energía que se produce al efectuarse una frenada.

2.2.6 Depósito de combustible

El hidrógeno puede ser almacenado en estado gaseoso o en estado líquido, también es almacenado en forma de hidruros y después se extrae el hidrógeno.

Los cilindros con capacidad para hidrógeno comprimido a 5,000 o 10,000 psi son los más adecuados técnicamente, pero la autonomía es un problema en vehículos pequeños y ligeros. Un kilogramo de hidrógeno tiene aproximadamente el mismo contenido energético que 3.78 litros de gasolina, pero incluso a 10,000 psi, un kilogramo de hidrógeno consume aproximadamente un pie cúbico de espacio, lo mismo que 28 litros de gasolina. Un kilogramo de hidrógeno líquido ocupa sólo medio pie cúbico, pero se debe mantener a -250° centígrados en un tanque súper aislado. Incluso en el mejor tanque, el hidrógeno se evapora a una tasa de tres por ciento diarios. Los tanques aislados de alta presión tienden a ser difíciles de acomodar, además de que deben tener forma cilíndrica o de rosquilla.

Algunos metales se conjuntan y liberan hidrógeno a baja presión y con densidad relativamente alta en tanques fáciles de usar, pero estos metales son pesados, requieren de mucho calor para liberar hidrógeno y son lentos para recargar y/o requieren de mucha energía de enfriamiento durante la recarga. El borohidrato de sodio se puede añadir a un tanque convencional para resolver algunos de estos problemas, pero una vez que se acaba el hidrógeno del tanque, el metaborato de sodio residual se debe almacenar y regresar a la refinería para reciclarlo¹⁵.

¹⁵ REYNOLDS, Kim, MARKUS, Frank, et al. El Hidrógeno, Las Celdas de Combustible y La Realidad, Motor Trend en español, Agosto 2004. Disponible en la World Wide Web: http://www.motortrendenespanol.com/articulos/consumidor/e12_0408_hidrogeno/index2.html. Acceso: 24 de junio de 2009.

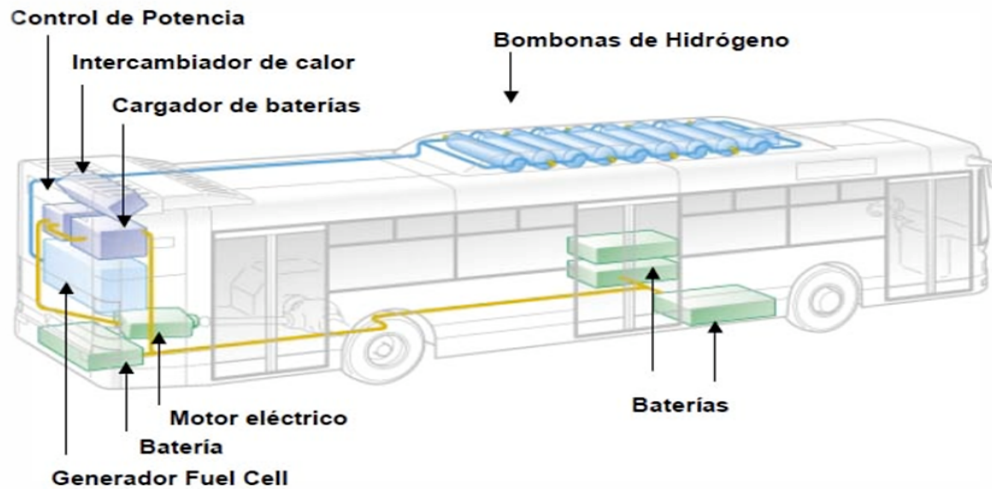


Figura 2.5. Esquema de un bus de celdas de combustible.

2.2.7 Sistema de frenos regenerativo

Al desacelerar o frenar, el motor eléctrico actúa como generador, recuperando la energía cinética desde las ruedas, convirtiéndola en electricidad que puede ser guardada en la batería. Frenos de fricción tradicionales son requeridos, así como un sistema de control electrónico que permita maximizar la recuperación de energía y pueda operar el sistema dual de frenos. Sistemas comerciales en uso permiten recuperar alrededor de un 30% de la energía cinética típicamente perdida como calor en frenos de fricción. La energía recuperada al freno puede reducir el consumo energético en 15% en conducción en ciudad.

2.3 Experiencias internacionales en vehículos y prototipos

A principio de siglo los países de primer mundo han tomado conciencia del desgaste que ha sufrido el planeta en los últimos 30 años, se han realizado programas los que tienen como objetivo principal revertir los daños a la capa de ozono y disminuir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Uno de los programas con mayores progresos fue implementado a principios del año 2006 en Europa, se denomina HyFLEET- CUTE, el mismo que finalizó en diciembre de 2009.

Las siglas CUTE significan Clean Urban Transport for Europe (transporte urbano limpio para Europa) y su objetivo es probar y estudiar autobuses de hidrógeno en diez ciudades de Europa, Asia y Australia (Ámsterdam, Berlín, Barcelona, Beijing, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid, Perth, y Reykjavik, con el fin de reducir emisiones contaminantes de CO₂.¹⁶

Este proyecto recolecta la información proporcionada por tres proyectos, CUTE, ECTOS (Sistema ecológico de transporte para ciudades) y STEP (Proyecto de energía sostenible para el transporte).

Para la realización de este proyecto fueron probados 47 buses que funcionan a base de hidrógeno, 33 de los cuales utilizaron celdas de combustible y 14 que contaron con motores de combustión interna pero operados con hidrógeno. Para los ambos tipos de tecnología, durante la duración del programa, los buses fueron desarrollados y probados dando excelentes resultados, a continuación detallamos algunos de ellos.

¹⁶ Work Package Leaders within the HyFLEET:CUTE project. *Hydrogen Transports, Bus technology and fuel for today and for sustainable future*. P- 7

Tabla 3. Datos generales del proyecto Hyfleet-Cute

DATOS GENERALES	
Duración del proyecto	Enero 2006 - Diciembre 2009
Numero de ciudades europeas/paises	8 Ciudades / 6 Paises
Numero de ciudades fuera de europa	2 Ciudades / 2 Paises
Inversión total	43 millones de euros / 57,5 millones de USD
Operación buses de Hidrógeno	
Numero de buses de Hidrogeno	33 Buses de celdas de combustible
	14 buses de combustión interna
Kilómetros recorridos	
Buses de celdas de combustible	2,1 millones de km / 140.000 horas
Buses de combustión interna	415.000 km / 29.000 horas
Pasajeros transportados	más de 8,5 millones
Infraestructura	
Unidades de servicio de Hidrógeno	10
Estaciones de servicio con hidrógeno disponible	89,80%
Hidrógeno cargado	más de 555.000kg

Fuente: Work Package Leaders within the HyFLEET:CUTE project. 2009. *Hydrogen Transports, Bus thechnology and fuel for today and for sustainable future*. P-9

Los autobuses que fueron utilizados fueron fabricados por la casa Mercedes Benz y a continuación se detallan las especificaciones técnicas.

Tabla 4. Generalidades de los autobuses

VEHICULO	BUS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	BUS HIBRIDO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE
Marca	Mercedes Benz	Mercedes Benz
Modelo	Citaro	Citaro
Largo	12m	12m
Altura	3,67 m	3,40 m
Peso Max.	19 toneladas	18 toneladas
Peso Neto	14,2 toneladas	13,2 toneladas
Capacidad	70 pasajeros	76 pasajeros
Potencia vs. Tiempo	205kW de 15 a 20 segundos	220 kW de 15 a 20 segundos

Fuente: Work Package Leaders within the HyFLEET:CUTE project. 2009. *Hydrogen Transports, Bus thechnology and fuel for today and for sustainable future*. P - 17

La ciudad de Berlín cuenta con la mejor infraestructura de apoyo para la flota de buses de hidrógeno. La estación de Berlín será capaz de alimentar de hidrógeno a 20 autobuses o 200 automóviles.

El hidrógeno utilizado para el programa se obtuvo de diferentes fuentes, renovables y no renovables, el hidrógeno a partir de fuentes renovables fue extraído mayormente gracias a los avances de la energía eólica, solar y geotérmica. Entre las fuentes no renovables de las cuales el hidrógeno fue extraído se incluyen, el hidrógeno a partir del gas natural y gas licuado de petróleo entre otros. En la tabla 5 a continuación se detallan los métodos utilizados en las diferentes ciudades participantes del proyecto.

Tabla 5. Tipos de abasto

CIUDAD	Amsterdam	Barcelona	Beijing	Berlin	Hamburgo	Londres	Luxemburgo	Madrid	Perth	Reykjavik
Suministro externo de H2			X	X		X	X	X	X	
Electrólisis in situ	X	X			X					X
Reformado de gas natural in situ								X		
Reformado de GLP in situ				X						
Suministro externo de H2 de emergencia		X		X	X				X	
Integrados a las estaciones de servicio publicas				X						X

Fuente: Work Package Leaders within the HyFLEET:CUTE project. 2009. *Hydrogen Transports, Bus thechnology and fuel for today and for sustainable future*. P-12.

2.4 Conclusiones

Los proyectos ejecutados (ECTOS, HyFLEET-CUTE y STEP) que comprenden buses de celdas de combustible han sido aplicados en ciudades europeas y estadounidenses, estas iniciativas han tenido por objeto probar los sistemas de celdas de combustible en sus redes de transporte urbano, los resultados se han traducido en tiempos de uso y en mejoras de los vehículos, mas no se ha verificado si es rentable mantener estos vehículos en circulación.

El proyecto HyFLEET-CUTE desarrollado en Europa se ha centrado en el mejoramiento de los autobuses, y sus pruebas han consistido en medir las emisiones contaminantes, desempeño de los vehículos y la generación de energía internamente, estos vehículos obtienen su energía de la electrólisis del agua en un 5% y el 95% restante de las redes de abasto de la ciudad, y el objetivo ha sido mejorar el porcentaje de energía limpia necesaria para que el autobús funcione normalmente.

Los programas ECTOS y STEP entre otros forman parte del programa HyFLEET-CUTE y han utilizado la información recolectada para mejorar los sistemas de abasto en las ciudades donde se desarrollan. Como conclusión se puede decir que para que este sistema de transporte sea viable es necesario disminuir notablemente los costos de los autobuses mientras se mejoran los rendimientos obtenidos por los mismos.

En Latinoamérica todavía no se ha podido introducir este tipo de programas, y ya que la tecnología de celdas de combustible todavía se encuentra en desarrollo, es difícil predecir cuándo podremos tener estos autobuses circulando por nuestras ciudades. Se estima que dentro de 10 años esta tecnología será una realidad en los países europeos, lo que nos deja en la duda, cuánto tiempo tendremos que esperar para formar parte de la solución.

CAPITULO 3

ESTUDIO DE APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE CUENCA

3.1 Estudio sustentable

El estudio sustentable tiene como objetivo analizar si la tecnología de las celdas de combustible puede ser aplicada en la ciudad de Cuenca, como una implementación al sistema de transporte urbano.

3.1.1 Impacto social

Para poder implementar un sistema de transporte nuevo, es imprescindible la opinión de los ciudadanos y usuarios que dependerían del mismo. Una negativa de la gente puede ser un grave obstáculo para el desarrollo y la tecnología en la ciudad de Cuenca, lo que se puede contrarrestar informando a la ciudadanía de las ventajas que se obtendrían gracias al uso este nuevo vehículo de transporte.

El uso de celdas de combustible al estar en etapa de desarrollo y todavía fuera del mercado nos permite contar con 10 años aproximadamente para poder concientizar a la ciudadanía sobre la importancia de mejorar nuestro sistema de transporte a favor del medio ambiente.

A continuación presentamos los datos obtenidos gracias a un estudio de campo realizado a los propietarios de unidades de transporte urbanos como Trigales, Uncovía, Ricaurte que circulan en la ciudad de Cuenca.

1. ¿Ha escuchado sobre la tecnología de celdas de combustible para vehículos de transporte?

SI	NO
7	23
23%	77%

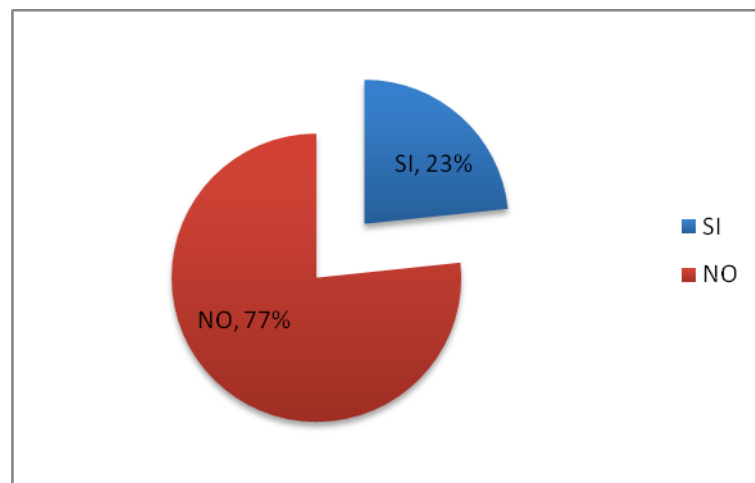


Figura 3.1

2 ¿Conoce sobre las ventajas ambientales que ofrecen las celdas de combustible a base de hidrógeno aplicadas al transporte?

SI	NO
10	20
33%	67%

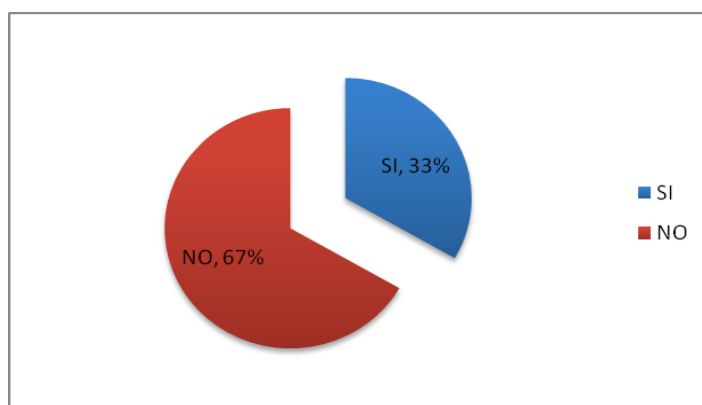


Figura 3.2

- 3 ¿Usted estaría dispuesto a implementar las celdas de combustible en su vehículo de transporte teniendo en cuenta que para esto es necesario que el vehículo esté equipado con una caja de cambios automática y motor posterior?**

SI	NO
12	18
40%	60%

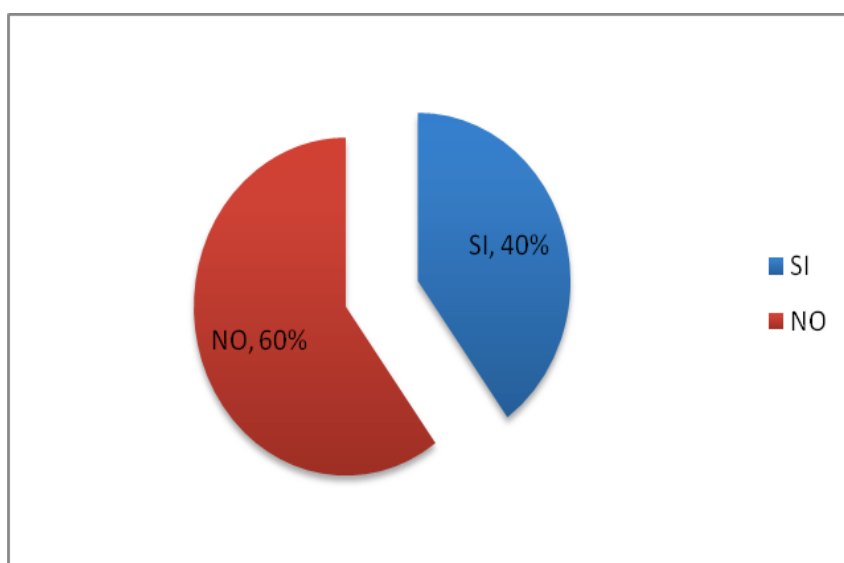


Figura 3.

- 4 Si la pregunta 3 fue positiva; ¿Cuánto estaría dispuesto a invertir para cambiar la tecnología de su vehículo?

MENOS DE \$100.000	\$500.000	MAS DE \$1'000.000	COSTO EXCESIVO
11	1	0	18

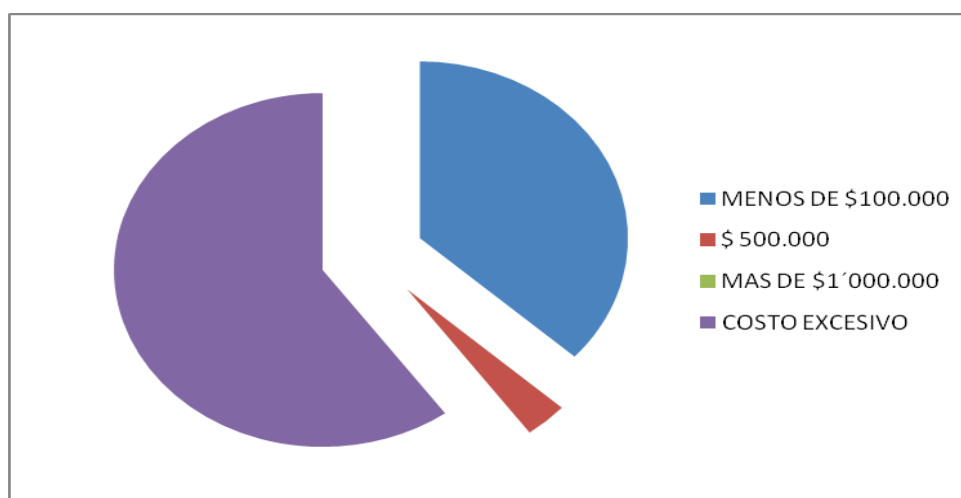


Figura 3.4

- 5 ¿En qué tiempo usted cumple al plazo autorizado de circulación para renovar su vehículo?

TIEMPO PLANIFICADO DE RENOVACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIO	PORCENTAJE
1 AÑO	5	17%
4 AÑOS	6	20%
5 AÑOS	5	17%
6 AÑOS	8	27%
10 AÑOS	2	6%
12 AÑOS	1	3%
BLANCO	3	10%

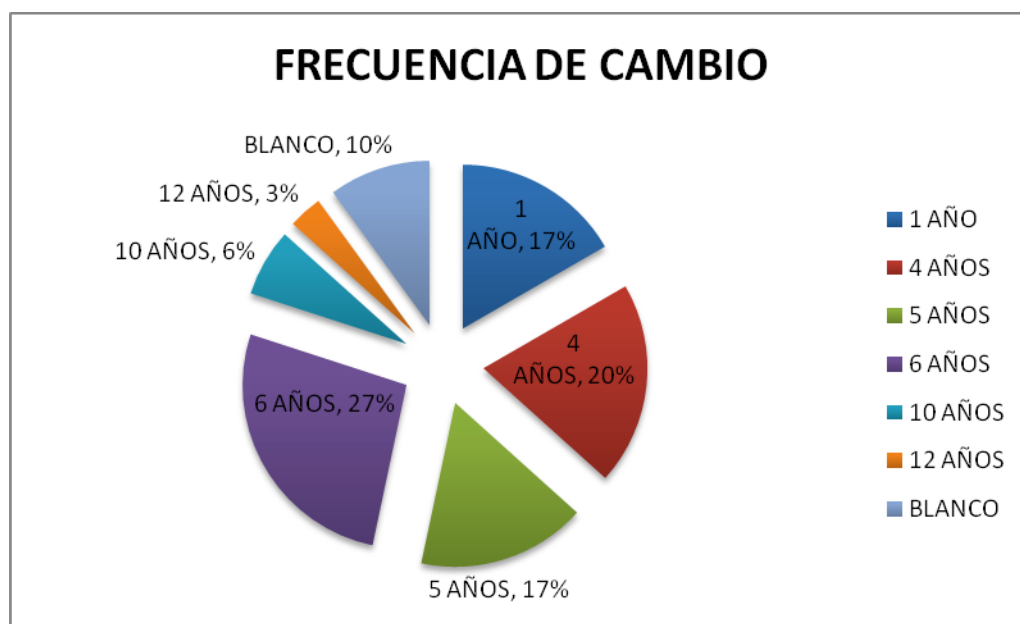


Figura 3.5

- 6 ¿Ha planificado a largo plazo renovar su vehículo por uno de una tecnología híbrida tomando en cuenta que se prevé la escasez de petróleo a un plazo de 20 años aproximadamente?

SI	NO
10	20
33%	67%

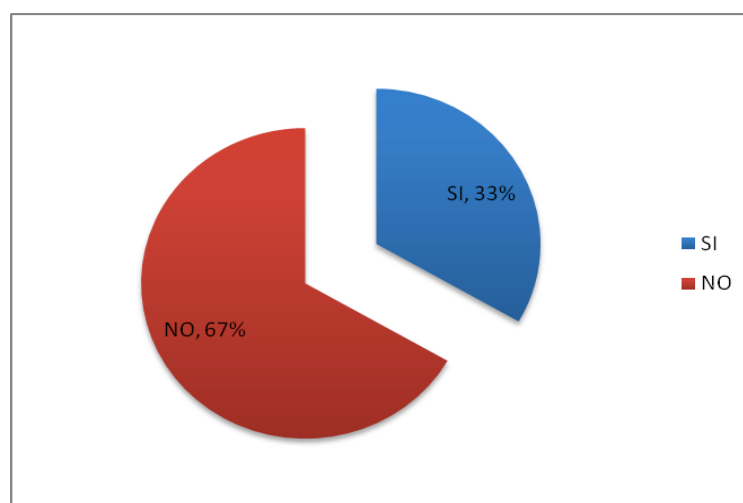


Figura 3.6

Total de personas encuestadas

TOTAL	PERSONAS NO QUIEREN SER ENCUESTADAS	PERSONAS ENCUESTADAS
33	3	30
100%	9,1%	90,9%

Podemos concluir que implementar vehículos de transporte híbrido no es factible; por el costo aproximado de \$1'000.000 que representaría adquirir la unidad y la poca aceptación de los elementos mecánicos (caja automática, chasis cama baja, etc.) necesarios para la construcción de estos vehículos.

La gran mayoría de dueños de vehículos de transporte masivo que circulan en la ciudad desconocen acerca de este tipo de tecnología, lo que representa un gran obstáculo; para ellos es preferible mantener la tecnología que ya conocen, que experimentar con tecnologías nuevas.

3.1.2 Impacto Económico**3.1.2.1 Tecnología para Transporte**

Debido a que las celdas de combustible todavía se encuentran en desarrollo, las evaluaciones de costos están sujetas a cambios. Los buses de celdas que existen en la actualidad son prototipos y sus costos son extremadamente altos.

Los buses de celdas de combustible tienen el potencial de hacerse rentables respecto de los buses diesel sobre la base de un ciclo de vida (de 5 a 8 años): "comparaciones detalladas de los costos de ciclo de vida totales muestran que los buses de celdas de combustible a hidrógeno, una vez que han logrado sus objetivos de costos de producción en serie y durabilidad, serán más baratos que los

trolebuses y dentro de un 30% de los costos de los buses diesel"¹⁷. Este éxito en bajar los costos, sin embargo, dependerá de una serie de avances técnicos que en estos momentos están lejos de ser ciertos.

La International Energy Agency (IEA) da la siguiente comparación de costos actuales:

¹⁷ Bus de celdas de combustible, Iniciativa del Aire Limpio, Acceso: 23 de Junio de 2008, Disponible en Web: http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17736.html

Tabla 6. Comparación de costos entre buses de combustión y celdas de combustible

CATEGORÍA	COSTOS DE BUS DÓLARES	OTROS COSTOS
Bus diesel nuevo fabricado en países en desarrollo por compañías de buses internacionales que cumplen Euro II	Rango US\$ 30.000 a US\$ 150.000	Algunos costos de capacitación y posiblemente costos de repuestos más altos
Bus diesel estándar OECD Euro II*	Rango US\$ 180.000 US\$ 350.000	
Diesel con controles de emisiones avanzados	Rango US\$ 5.000 US\$ 10.000 más que el bus diesel comparable	Si se trata de diesel de azufre bajo, hasta 10 centavos por litro costo de combustible mayor (para pequeños lotes importados)
Buses de celdas de combustible (sobre una base de producción limitada)	US\$ 1'000.000 más que los buses diesel comparable, incluso en los países en desarrollo líderes en esta época	Hasta US\$ 5 millones por ciudad para infraestructura que provea combustible y otros costos de sistemas de apoyos**

- **Fuente:** Bus de celdas de combustible, Infopool Iniciativa del Aire Limpio, Disponible en Web: www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17736.html. Acceso: 23 de Junio de 2009.

Según los datos registrados anteriormente, para poder hacer una implementación de buses de celdas de combustible en el sistema de transporte de la ciudad de Cuenca, se debería cambiar la totalidad de la estructura de abastecimiento para el transporte urbano, ya que se debería invertir en nuevas estaciones de servicio que sean capaces de proveer hidrógeno a la totalidad de buses, estas estructuras pueden ser desde un sistema de gas subterráneo, hasta un mejoramiento en las bombas de abasto convencionales para que sean capaces de almacenar hidrógeno líquido, el mismo que es muy difícil de manipular.

Para lograr cambiar una flota completa de buses que funcionen a diesel por una de buses de celdas de combustible, la inversión es considerable, según la tabla 2, el costo de un bus de tecnología verde supera el millón de dólares, mientras que un bus convencional tiene un costo que varía desde los 100.000 hasta los 200.000 dólares en nuestro país. La inversión sería de cinco a diez veces superior en la actualidad por lo que no es rentable.

La adecuación de los buses tipo que transitan por la ciudad a buses que funcionen con celdas de combustible no sería viable ya que se debe sustituir el motor de combustión en su totalidad para ser reemplazado por un motor eléctrico y el generador de celdas de combustible, aparte de las adecuaciones necesarias para que éste funcione con los elementos de un bus convencional, como por ejemplo, es imprescindible que la estructura del chasis sea modificada para albergar la configuración básica de un bus híbrido, dentro de las características constructivas estructurales es necesario contar con un chasis cama baja con perfiles de acero, dándole de esta manera al chasis el concepto de Low Entry (regulación de altura del peldaño de ingreso para pasajeros permitiendo mayor facilidad de embarque y desembarque), este tipo de chasis permite absorber deformaciones y regular el nivel del autobús, lo que facilita la accesibilidad de los pasajeros. Además es necesario que el motor esté dispuesto en la parte posterior del autobús, adosado a una caja de cambios automática. El sistema de frenos tendría que ser modificado por completo ya que esta tecnología requiere ser equipado con un sistema de

frenos regenerativos que almacene y suministre la energía producida al momento del frenado del automotor y de esta manera poder cargar las baterías, por estos motivos esta opción quedaría descartada.

Para la ciudad de Cuenca fue presentado en el mes de Noviembre de 2009 por la casa Mercedes Benz (Star Motors) el chasis de bus O500-U, el mismo que cuenta con un motor posterior, la opción de elegir una caja de cambios manual o automática por una diferencia de \$30.000 USD en el costo de la unidad, una suspensión neumática regulable que varía hasta una altura máxima de 30 cm, su chasis tiene como característica principal la flexibilidad, siendo un impedimento la fabricación de la carrocería ya que en nuestro medio no se dispone con la tecnología para poder equipar un chasis de estas características.

El problema principal de este bus parte de que el costo es de \$105.000 dólares con transmisión manual y \$135.000 dólares con transmisión automática, adicional a este costo se debe agregar el valor de la carrocería el que sería aproximadamente de \$60.000 dólares, esto sin contar con el sistema de celdas de combustible, las mismas que tienen un valor aproximado de \$6.000 dólares por KW, siendo necesario una potencia de 193,1KW (260HP) promedio, obteniendo como resultado una inversión de \$1158.600 dólares, faltando para finalizar su configuración el sistema de transmisión y frenado regenerativos.

Tabla 7. Comparación de modificaciones en el tren motriz y carrocería entre buses de celdas de combustible y buses de combustión interna.

Especificaciones Técnicas	Bus de configuración a diesel	Bus de configuración de celda de combustible
Transmisión Manual	\$64.000 USD	No aplica
Transmisión Automática	\$135.000 USD	\$135.000 USD
Potencia	260 HP ~ 193,1 KW de \$12.000 a \$14.000 UDS	193,1 KW a \$6.000 USD x KW \$1'158.600 USD
Sistema de freno regenerativo	No aplica	\$45.000 USD aproximadamente
Carrocería	\$28.000 USD	\$64.000 USD
Total	\$92.000 USD transmisión manual \$163.000 USD transmisión automática	\$1'402.600 USD aproximadamente

Según la configuración anterior, tendríamos que invertir un aproximado de \$1'400.000 dólares por cada unidad.

3.1.2.2 Tecnología de producción de hidrógeno

En cuanto a la producción de hidrógeno los costos dependerán del tipo de tecnología aplicada (Capítulo 1.2.1 Métodos de producción de Hidrógeno). Una de las aplicaciones es producir el hidrógeno fuera del vehículo y almacenarlo para el uso de la celda de combustible, lo que nos lleva al problema del almacenamiento ya que se necesitan grandes depósitos en orden de abastecer un autobús para su funcionamiento. Otra aplicación es reformar el combustible para proveer a la pila a bordo, de esta manera el autobús tendría un propio sistema de producción de hidrógeno lo que nos beneficiaría al no tener que invertir en estaciones de abasto.

En la actualidad los costos han disminuido significativamente, estudios realizados por la Academia Nacional de Ingeniería de EEUU, presentaron un informe con los precios tentativos para la producción y distribución de hidrógeno. Las industrias que lo producen a partir del carbón o gas natural y lo almacenan de forma comprimida, cobran un valor de US\$2 por kilogramo, lo que equivaldría económicamente a dos galones de diesel, estos valores se incrementarían US\$1,50 para hidrógeno líquido. Actualmente se cobra US\$3,50 por kilogramo de hidrógeno obtenido del gas natural y US\$6,50 por electrólisis, y se considera que estos precios descenderán a US\$2,30 y US\$3,90 respectivamente a futuro.

Aunque los costos del hidrógeno tienen la tendencia de bajar todavía son muy superiores a los precios del diesel en Ecuador, casi triplicando el valor actual de este combustible que es de US\$1,05.

Analizando la densidad de energía por masas que tiene los dos combustible que son empleados, tenemos que el hidrógeno posee 143 MJ/Kg, y el diesel (gasóleo) 45,8 MJ/Kg, lo que nos demuestra que 1 litro de hidrógeno líquido es igual a 0,26 litros de gasóleo. Los datos anteriores fueron obtenidos de la siguiente manera:

Hidrógeno

Diesel

$$\rho_{H_2} = 71 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{diesel}} = 850 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{específica}} = 143 \text{ MJ/kg}$$

$$\rho_{\text{específica}} = 45,8 \text{ MJ/kg}$$

- Relación en masa del hidrógeno y diesel.

$$R_m H_2 / R_m \text{ Diesel} = 143/45,8$$

$$R_m H_2 / \text{Diesel} = 3,12$$

- Relación en volumen del hidrógeno y diesel.

$$H_2 = 0,071 \text{ Kg} \quad \text{lo que equivale a un litro}$$

$$\text{Diesel} = 0,085 \text{ kg} \quad \text{lo que equivale a un litro}$$

- 1kg de hidrógeno equivale a 10,153 MJ/litro
- 1 kg de diesel equivale a 38,93 MJ/litro
- Relación de Volumen H_2 / Diesel

$$H_2 / \text{Diesel} = 10,15 / 38,93 = 0,26$$

En el Ecuador no se produce hidrógeno para transporte, sin embargo el costo actual de comercialización del hidrógeno varía desde los \$170 USD a \$200 USD el tanque de aplicación industrial (6m^3), estos datos han sido proporcionados por AGA Soldadura. Por lo tanto se tomará como referencia los precios de Estados Unidos para la comparación en este trabajo. De estos valores podemos deducir que:

Costo \$200 por cada tanque de 6m^3

\$33, 3 por cada m^3

Cada litro de hidrógeno tendría un valor de \$0,033. Por un litro de hidrógeno obtenemos 0,071 kg del mismo.

\$0,033 → 0,071kg

\$1 → X

Lo que nos da un valor de "X" = \$2,15 por cada kg de hidrógeno gaseoso, a este valor se le aumentaría el costo de convertirlo a hidrógeno líquido (\$1,5) y por cada kg de hidrógeno líquido tendríamos un valor de \$3,65.

Para el bus O500-U se necesitan 55 galones de diesel, lo que se traduce a \$60 dólares aproximadamente, este combustible abastecería al vehículo para un funcionamiento de 42 horas. Para el mismo tiempo de funcionamiento empleando el sistema de celdas de combustible necesitaríamos \$193 dólares para abastecer el vehículo, lo que triplicaría el costo de horas operables, teniendo en cuenta que el poder calorífico de gasóleo es de 10.325 Kcal/Kg y del Hidrógeno es de 28.700 Kcal/Kg lo que demuestra claramente una diferencia del poder calorífico de 2,7 veces mayor del hidrógeno con respecto al gasóleo.

3.1.3 Impacto Ambiental

Los buses impulsados por celdas de combustible tienen la ventaja de emitir vapor de agua, por lo que pueden ser considerados como vehículos de cero emisiones, por otra parte la eficiencia de estos buses será claramente mayor que la de los buses que funcionan con diesel, gracias a esto, los automotores impulsados por celdas de combustible reducirá el consumo de carburante, tomado en cuenta la densidad de energía por masa liberada.

Sin embargo, ya que la producción, compresión, enfriamiento y transporte del hidrógeno requieren de energía, el impacto global del uso de celdas de combustibles depende mucho de los métodos y materias primas usadas. Si los carburantes fósiles se usan como una fuente de hidrógeno, y, además, la energía requerida para generar gas de hidrógeno también se obtiene de los combustibles fósiles (ejemplo gas natural), entonces se generará dióxido de carbono en el lugar de producción - en cantidades similares, o incluso mayores, que si los combustibles fósiles fueran usados directamente en el auto.

Si por otro lado, las fuentes de energía renovables (ejemplo, energía hidroeléctrica, solar o del viento) se usan para la generación de hidrógeno, manejo y transporte, entonces las celdas de combustible ahorran montos significativos de gases de invernadero en comparación a la combustión de combustibles fósiles ya que el residuo de un proceso electrolítico es agua pura y calor lo que reduciría a cero las emisiones contaminantes.

En la ciudad de Cuenca se desarrolla el proyecto Calidad del Aire, este proyecto está destinado a determinar el aporte de los contaminantes del aire, los datos provienen de diferentes puntos de medición, ubicados a lo largo de la ciudad.

Nos centraremos mayormente en las emisiones generadas por los vehículos de transporte que circulan en la ciudad de Cuenca, y nos basaremos en los datos obtenidos por Cuencaire.¹⁸

¹⁸ Fundación Natura-CUENCAIRE-CGA, Resumen del inventario de emisiones del cantón Cuenca, año base 2007. Cuenca Ecuador, 2009.

A continuación mencionaremos algunos puntos importantes a considerar:

- En el año 2007 fueron consumidos alrededor de 77729.220 galones de combustibles fósiles líquidos (gasolina, diesel y bunker). De este total se puede diferenciar que 30827.979 galones fueron de gasolina extra, 600.929 galones de gasolina súper y 29'034.562 galones de diesel.¹⁹
- En el año 2007 la tasa de motorización en la ciudad de Cuenca fue de 5 habitantes por vehículo, según datos de Cuencaire, el parque automotor de la Provincia del Azuay ha llegado a un total de 97.812 vehículos, de los cuales 88.710 vehículos son unidades de cuatro ruedas y 9.102 son motocicletas. En la tabla 4 podemos diferenciar la composición del parque automotor de Cuenca en el año 2007.

Tabla 8. Porcentaje de vehículos a diesel que circulan en Cuenca, año 2007.

VEHÍCULOS A DIESEL	PORCENTAJE
AUTOMÓVIL	0%
TAXI	0%
JEEP	2%
BUS	9%
CAMIONETA Y FURGONETA	18%
PESADO	71%

¹⁹ Fundación Natura-CUENCAIRE-CGA, Resumen del inventario de emisiones del cantón Cuenca, año base 2007. Cuenca Ecuador, 2009, p 8.

3.1.3.1 Resultados de la estimación de emisiones atmosféricas de Cuenca, año 2008

A continuación se presenta los datos recolectados en el año 2008 por Cuencaire sobre emisiones contaminantes en la ciudad de Cuenca.

3.1.3.1.1. Partículas sedimentables totales (PST)

Para realizar este conteo se tomaron 175 muestras en 15 puntos de la ciudad.

El valor más alto registrado en el año 2008 se ubicó en el centro de la ciudad en la estación de bomberos, durante el año en este punto las mediciones fueron superiores a lo permitido de $1\text{mg}/\text{cm}^2$, en un 75% y con un valor de $9,2\text{mg}/\text{cm}^2$ en el mes de enero.

3.1.3.1.2 Material particulado menor a 10 micras (PM_{10})

Por muestreo se tomaron 151 muestras en tres puntos de vigilancia con una validez del 84% considerándose como bueno.

Las concentraciones se mantuvieron en valores inferiores a los $50\text{ug}/\text{m}^3$ que es el valor máximo tolerable como promedio anual. Las concentraciones más altas registradas fueron tomadas en un punto a 300m del parque industrial.

3.1.3.1.3 Dióxido de azufre (SO_2)

Para registrar las emisiones de dióxido de azufre se instalaron 17 puntos en la ciudad, y fueron recolectadas 186 muestras durante el año.

Se puede diferenciar que en el mes de octubre se registraron los valores máximos mensuales con un valor de $51,2\text{ug}/\text{m}^3$, fue obtenido en el punto de vigilancia El Arenal gracias a la gran afluencia de vehículos diesel que circulan por este importante punto de la ciudad.

El promedio obtenido anual fue de $30,80\text{ug}/\text{m}^3$ el mismo que es muy inferior a los $80\text{ug}/\text{m}^3$ permitidos como límite máximo anual.

3.1.3.1.4 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Con 17 puntos de vigilancia de monitoreo pasivo se recolectaron 408 muestras durante el año 2008.

Los valores obtenidos durante el año no sobrepasaron $100\text{ug}/\text{m}^3$ establecidos como límite máximo permitido anual.

La concentración máxima mensual fue registrada en el mes de noviembre en el punto de medición Estación de Bomberos en el centro de la ciudad. El valor obtenido fue de $59,1\text{ug}/\text{m}^3$.

“El promedio de concentraciones máximo mensual obtenido fue de $47,90\text{ug}/\text{m}^3$ y el promedio anual registrado fue de $19,3\text{ug}/\text{m}^3$, mientras que el valor máximo de concentración anual que se obtuvo fue de $47,2\text{ug}/\text{m}^3$ en el centro de la ciudad²⁰.

3.1.3.1.5 Ozono (O_3)

Se mantuvieron 15 puntos de monitoreo de ozono recolectando 360 muestras durante el período 2008.

El promedio de las concentraciones máximas mensuales fue de $44,72\text{ug}/\text{m}^3$ y el promedio anual de todos los valores recolectados durante el año fue de $33,5\text{ug}/\text{m}^3$,

²⁰ MUNICIPALIDAD DE CUENCA-CUENCAIRE. Informe de la calidad del aire de Cuenca año 2008. Cuenca, Ecuador. 2009. P-21

mientras que la mayor concentración promedio registrada fue de $37,9\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenida en el punto de vigilancia ubicada en las Antenas de Ictocruz.

La máxima contaminación mensual fue de $98,4\mu\text{g}/\text{m}^3$ del mes de mayo en el punto de vigilancia de Machángara.

3.1.3.1.6 Estimaciones de gases de efecto invernadero, año 2007

Las emisiones de dióxido de carbono registradas en la ciudad de Cuenca en el año 2007 alcanzaron las $9'363.000 \text{ t a}^{-1}$. De este total el 59,3% ($570.886,9 \text{ t a}^{-1}$) se le atribuye al tránsito vehicular, el 19,5% a las industrias, el 15% al uso del gas licuados de petróleo (gas de consumo doméstico). Del porcentaje de CO_2 emitido por los vehículos de la ciudad de Cuenca, el 4,3% ($24.548,1 \text{ t a}^{-1}$) se le atribuye a los buses de transporte urbano que transitan por la ciudad²¹.

3.2 Fuentes de generación de Hidrógeno en la provincia del Azuay.

Dentro de las Fuentes de extracción de hidrógeno en la ciudad de Cuenca se considera la más viable el gas natural o Biogás, el mismo que es proveniente del botadero de basura de la ciudad, se han realizado varios proyectos a cerca del gas que es emitido en este lugar.

El relleno se encuentra localizado a 13 km al sur de la ciudad de Cuenca, ocupando un área de 4 hectáreas, este sitio es de propiedad de la Municipalidad de Cuenca y actualmente se encuentra administrado por la EMAC.

²¹ Fundación Natura-CUENCAIRE-OGA. Resumen de inventario de emisiones del cantón Cuenca, año base 2007. Cuenca-Ecuador. 2009. P-15.

Uno de estos estudios está siendo realizado por las empresas Eastern Research Group, Inc.(ERG) y Carbon Trade, Ltd. (Carbon Trade), las cuales están encargadas de hacer el análisis completo de extracción del gas natural.

Para la recolección del gas generado por la descomposición de la basura han sido instaladas 10 chimeneas aproximadamente, levantadas desde la base del relleno, estas se encuentran construidas con gaviones de malla rellenos con piedra bola, conteniendo filtros de acero perforado que soportan los quemadores de incendio manual que permiten la incineración del gas emitido.

Durante el primer ensayo realizado con la perforación del pozo # 1 fue quemado un total de 16.241m³ de biogás, de este volumen quemado el 50,54% es metano, este valor fue estabilizado en un 51% y el oxígeno en un 1% por volumen, estos valores fueron semejantes a las perforaciones realizadas en dos posos más.

Como resultado de estas pruebas de perforación se llegó a determinar un valor de disponibilidad específica de gas siendo este de 52,2m³/hr en un área total de 2.120m², teniendo un área para la extracción del biogás de 2,05H aproximadamente.

Para poder medir la cantidad de biogás emitido por el relleno fue realizado un ensayo de bombeo que tiene como propósito determinar la cantidad y la calidad del biogás disponible y recolectable para la generación de energía, estos ensayos simulan a gran escala un sistema de extracción de gas y nos dan una idea de la capacidad que tiene el sitio para poder realizar la generación de energía.

Tomando en cuenta esta gran posibilidad de efectuar la extracción del biogás fueron instalados tres nuevos pozos, los mismos que permitieron realizar pruebas de la cantidad de biogás disponible en el lugar, obteniendo un resultado satisfactorio en los ensayos ya que los valores obtenidos revelan una disponibilidad

de 50,0m³/h de biogás aproximadamente lo que se traduce en 4,48m³/hora de hidrógeno. A continuación detallamos la deducción del dato anterior.

Tabla 9. Descomposición del Biogás ²²

BIOGAS	CH ₄	CO ₂	SH ₂ – H ₂	OTROS
%volumen	55-70%	27 – 44%	1%	3%
g/l (densidad)	0.7	1.9	0.08	-
% volumen de H ₂	7.13 – 9.08%	-	0.86%	-

- CH₄:
44g 100%
4g X x = 9,09% en peso de H₂

Para transformar este peso a volumen, $v = m/d$

$$V = 9,09/0,7 = 12,98\% \text{ volumen}$$

- Porcentaje de metano es hidrogeno:
55 x 12,98% = 7,13%
70 x 12,98% = 9,08%
El promedio de los porcentajes es = 8,1%

- SH₂:
34g 100%
2g x x = 5,88% en peso de H₂

Para transformar este peso a volumen, $v = m/d$

$$V = 5,88/0,08 = 73,5\% \text{ volumen}$$

²²Composición del biogás, disponible en web en: <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas>. Acceso 11 de agosto de 2010.

- H₂: del hidrógeno se tomaría el valor como el 100%, y se contabiliza junto con el SH₂, y promediado nos da el siguiente valor :

73,5%

86,75% de H₂

100%

$$1 \times 86,75\% = 0,86\% \text{ de H}_2$$

Sumando los porcentajes de H₂, de los distintos componentes: 8,1% + 0,86% = 8,96% de H₂

El valor obtenido ya está en unidades de volumen por lo que se multiplica por los 50m³/h y se obtiene como resultado:

$$50\text{m}^3/\text{hora} \times 8,96\% = 4,48\text{m}^3/\text{hora}$$

Una de las grandes ventajas de este proceso sería la disminución de los gases que producen el efecto invernadero, puesto que el metano tiene un potencial de calentamiento global de 21 veces más que el CO₂.²³

3.3 Conclusiones

La implementación del hidrógeno al transporte genera obstáculos tales como; la producción, el almacenamiento y la distribución. En el caso de la producción existen varias formas de obtención; mediante combustibles fósiles (gas natural) que sería la

²³ El metano en rellenos sanitarios, Forniels, Juan, Disponible en WEB: http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/JTs/JT9/JT9_ppt_JAntonio%20Forniele s.pdf. Acceso: 9 de septiembre de 2010.

principal fuente de extracción de hidrógeno en nuestra ciudad obteniéndolo del relleno sanitario, este tipo de gas nos lleva a usar energía proveniente de desechos para producir una energía limpia y de esta manera no resolver el problema de contaminación y emisiones de CO₂; mediante la electrólisis, la misma que tiene un costo alto de producción.

Para la compresión se necesitan tanques que mantengan el hidrógeno comprimido a 10.000 psi, pero el problema es el gran volumen que deben tener los tanques casi cinco veces más grandes a los que ocupa el gas natural, pero ya que el vehículo no cuenta con partes mecánicas el espacio puede ser utilizado para el abasto.

En el caso de la obtención de hidrógeno en estado sólido, se necesitan compuestos que puedan atrapar el hidrógeno a presión y a temperatura ambiente, de esta manera a medida de las necesidades del vehículo el hidrógeno es liberado, en la actualidad las investigaciones se centran en los hidruros metálicos, los mismos que son estables pero muy pesados. La problemática principal es el peso de los tanques que almacenarían el hidrógeno, para lo que la solución provisional es su acumulación en tanques presurizados hasta encontrar nuevos materiales que alberguen el combustible en estado sólido.

En la actualidad la mayor parte de la producción de hidrógeno es transportada por las vías del tren y por carreteras en estado líquido, por ejemplo un vehículo de carga con capacidad de abasto para 800 automóviles a gasolina sólo transportaría el hidrógeno suficiente para abastecer a 80 vehículos de las mismas características. Una opción de transporte es la implementación de ductos subterráneos que estén interconectados hacia las refinerías, el costo de construcción y protección de los tubos de los gasoductos es de un millón de dólares por cada 1.6 kilómetro, lo que significa un costo extremadamente alto.

Producir hidrógeno localmente es una opción viable, ya que puede ser extraído a base de electrólisis o del gas natural, de esta forma se suprime el problema del transporte.

Muchos automotores como el Necar 3 producen el combustible a bordo, combinando agua ordinaria con reagentes tales como el boro o el aluminio, oxígeno y residuos de óxido metálico, esta tecnología debe ser mejorada y desarrollada para conseguir la eficiencia necesaria.

Con la ejecución del proyecto de celdas de combustible en la ciudad de Cuenca, sólo se reduciría un porcentaje muy bajo de emisiones de dióxido de carbono, un valor de 4,3%²⁴ de las emisiones totales en la ciudad no amerita un cambio tan drástico en el sistema de transporte urbano. Para poder obtener un cambio tangible en los estudios de emisiones se debería aplicar ésta tecnología a los automotores de maquinaria pesada y vehículos a gasolina, los que son los mayores contribuyentes de gases de efecto invernadero.

En general el estudio de emisiones en Cuenca nos mostró valores aceptables y siempre por debajo de los límites máximos permitidos por la Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire (NECAA), y si bien estos valores no advierten cambios drásticos en el sistema de transporte de la ciudad, se recomienda realizar estudios a mediano y largo plazo para implementar nuevas tecnologías como las celdas de combustible, vehículos híbridos, biodiesel, entre otros, dentro del área automotriz, con esto las emisiones contaminantes se reducirían notablemente y contribuiríamos con la recuperación del medio ambiente.

²⁴ Fundación Natura-CUENCAIRE-CGA. Resumen del inventario de emisiones del cantón Cuenca, año base 2007. Cuenca-Ecuador. 2009.

3.4 Conclusiones generales

Podemos concluir que la aplicación de las celdas de combustible en la ciudad de Cuenca sería un proyecto que demandaría una inversión monetaria significativa en términos de infraestructura y tecnología, la misma que se justificaría con la reducción de emisiones contaminantes.

Este proyecto sería viable siempre y cuando los buses utilizados para el transporte urbano vengan ya equipados con esta tecnología, y no adaptar los buses convencionales de combustión a buses de celdas de combustible ya que la inversión sería prácticamente la misma sin tener en cuenta los cambios estructurales y técnicos a los que se sometería las unidades convencionales.

Por otra parte el aporte de las celdas de combustible a la conservación del medio ambiente sería un de los puntos claves para la implementación del sistema, de igual forma se debe tomar en cuenta la salud de la Ciudadanía y la conservación de recursos naturales no renovables como el Petróleo.

BIBLIOGRAFIA

Referencias Bibliográficas

- AGUER, M y MIRANDA, A. 2007. *El hidrógeno, Fundamento de un futuro equilibrado*. Segunda Edición. Ediciones Diaz de Santos S.A. España.
- ALONSO-VANTE, Nicolás. 2003. *Electrocatalisis Vol 2b*. Primera edición virtual. E-Libro. Argentina.
- BOGO J, HUTCHINSON A, SCOOTBERG E, STEWART B, SVODA E. 2008. *Los combustibles que vienen*. Mecánica Popular. Editorial Televisa. Mexico.
- COOK, Brian. 2001. *An introduction to fuel cells and hydrogen technology*. Heliocentris. Estados Unidos.
- GUPTA, Ram. 2009. *Hydrogen fuel production, transport and storage*. Primera Edición. Estados Unidos.
- HUTCHINSON, Alex. 2006. *La Verdad acerca del hidrógeno*. Mecánica Popular. Editorial Televisa. Mexico.
- LARMAINE, J y DICKS, A. Fuel cells Systems explained. Inglaterra. 2003.
- LENO, Jay. 2008. *¿El hidrógeno es el combustible del futuro?*. Mecánica Popular. Editorial Televisa. Mexico.
- THOMAS, S Y ZALBOWITZ, M. 2005. *Fuel cells green power*. Los Alamos National Laboratory, Estados Unidos.
- *Estudio de Prefactibilidad del Potencial del Biogás: Relleno Pichacay*, Eastern Research Group, Inc. And Carbon Trade, Ltd, 20 de Agosto, 2007.
- Fundación Natura-CUENCAIRE-CGA. 2009. *Resumen del inventario de emisiones del cantón Cuenca, año base 2007*. Ecuador.
- MUNICIPALIDAD DE CUENCA-CUENCAIRE. 2009. *Informe de la calidad del aire de Cuenca, año 2008*.
- Work Package Leaders within the HyFLEET:CUTE project. 2009. *Hydrogen Transports, Bus thechnology and fuel for today and for sustainable future*. Editorial PE International GMBH, Alemania.

Referencias electrónicas

- REYNOLDS, Kim, MARKUS, Frank, et al. 2004. *El Hidrógeno, Las Celdas de Combustible y La Realidad*, Motor Trend en español, Estados Unidos. Disponible en Web:
www.motortrendenespanol.com/articulos/consumidor/e12_0408_hidrogeno/index2.html. Acceso: 24 de junio de 2009.
- POSSO, Fausto. 2007. *Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno.*: I: Producción de hidrógeno electrolítico. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. [online]. vol.30, no. 3, p.201-208. Disponible en WEB:
<http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702007000300001&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0254-0770. Acceso: 17 de Junio de 2009.
- KENNETH, Kelly, MOTTA, Robert y NORTON, Paul. *Bus de celdas de combustible*, Infopool Iniciativa del Aire Limpio, Disponible en Web:
www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17736.html. Acceso: 23 de Junio de 2009.
- FERNANDEZ ROJEL, Daniel. *Las celdas de combustible, una alternativa ecoeficiente en la generación de energía eléctrica*. Disponible en Web:
www2.ing.puc.cl/~iing/ed433/anales/celdasCombustible.htm. Acceso: 23 de Junio de 2009.
- ENGEL, Richard. *Principio de funcionamiento de celdas de combustible*. Hidrógeno y celdas de combustible. Centro de Investigación de Energía Schat. Universidad de Chile. Chile. Disponible en Web:
www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo05.htm. Acceso: 14 de Marzo de 2009.

- OTERO, Claudio. *Pilas de combustible. Historia de la celda de combustible*. Chile. Disponible en Web: www.claudio-otero.cl/fuel_cells/. Acceso: 14 de Marzo de 2009.
- FORNIELS, Juan. *El metano en rellenos sanitarios*, Disponible en WEB: www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/JTs/JT9/JT9_ppt_JAntonio%20Fornieles.pdf. Acceso: 9 de septiembre de 2010.
- Ballard sells auto fuel cell assets to Ford and Daimler.(GLOBAL ECONOMY)(Brief article). 2008. *Advanced Materials & Processes: Academic OneFile*. Gale. Universidad San Francisco de Quito. 24 June 2009
<<http://find.galegroup.com/ips/start.do?prodId=IPS>>.
- "Materials for the hydrogen economy: ninety papers presented over three days from Sept. 26 to 28 will cover hydrogen production, hydrogen storage, fuel cell materials, and the many research programs at commercial manufacturers, universities, and government labs." *Advanced Materials & Processes* 163.8 (August 2005): 52(4). *Academic OneFile*. Gale. Universidad San Francisco de Quito. 24 June 2009
<<http://find.galegroup.com/ips/start.do?prodId=IPS>>.

ANEXO 1: ENCUESTAS

UNIVERSIDAD DEL AZUAY ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Encuesta de viabilidad de la implementación de celdas de combustible para buses de transporte urbano en la ciudad de Cuenca.

1. Ha escuchado sobre la tecnología de celdas de combustible para vehículos de transporte?

Si _____ No _____

Comentarios:

2. Conoce sobre las ventajas ambientales que ofrecen las celdas de combustible a base de hidrógeno aplicadas al transporte?

Si _____ No _____

Comentarios:

3. Usted estaría dispuesto a implementar las celdas de combustible en su vehículo de transporte.

Si _____ No _____

Comentarios:

-
-
4. De estar dispuesto a cambiar su vehículo de transporte a la tecnología de celdas de combustible por un costo aproximado de \$

Si _____ No _____

Cómo lo financiaría?: _____

-
-
-
-
5. Usted cree que el costo del pasaje se incrementaría al implementar esta tecnología?

Si _____ No _____

A qué valor usted cree que ascendería? _____

6. En que tiempo usted cumple el plazo autorizado de circulación para renovar su unidad?

-
7. Para la implementación de las celdas de combustible es necesario que el vehículo esté equipado con una caja de cambios automática y motor posterior, está dispuesto a realizar este cambio?

Si _____ No _____

Comentarios:

-
-
-
-
8. Ha planificado a largo plazo renovar su flota por una de tecnología híbrida ya que se prevé la escasez de petróleo a un plazo de 20 años aproximadamente?

Si _____ No _____

Comentarios: