

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN INGENIERÍA



APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DELPHI PARA DETERMINAR LA  
VIABILIDAD DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM PARA EL  
SECTOR AUTOMOTRIZ

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN INGENIERÍA  
(S I S T E M A S)

PRESENTA:

ING. MIRIAM GUTIÉRREZ MACEDO

DIRECTOR DE TESIS: DR. SEBASTIÁN PATHIYAMATTON JOSEPH

SEDE: DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA,  
CAMPUS MORELOS.

JIUTEPEC, MORELOS, OCTUBRE 2005



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	i
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS .....	iii
RESUMEN.....	v
<b>I INTRODUCCIÓN A LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE</b>	
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Situación Actual.....	5
1.3 Situación en México.....	9
1.3.1 Clasificación de Contaminantes Atmosféricos en ZMVM.....	10
1.3.2 Características y Efectos a la Salud de los Contaminantes Atmosféricos en la ZMVM.....	11
1.3.3 Situación eléctrica y petrolera del país.....	13
1.4 Objetivo General.....	15
1.4.1 Objetivos Específicos.....	15
<b>II CELDA DE COMBUSTIBLE</b>	
2.1 Antecedente de la Celda de Combustible.....	17
2.2 Tipos de celdas de combustible que existen.....	19
2.2.1 Ácido Fosforico (PAFC).....	19
2.2.2 Membrana intercambiadora de protones (PEMFC).....	21
2.2.3 Carbono fundido (MCFC).....	22
2.2.4 Oxido sólido (SOFC).....	23
2.2.5 Alcalinas (AFC).....	24
2.3 Tipos de Celdas para automóvil .....	25

2.4 Características funcionales de las PEMFC.....	29
<b>III PROCEDIMIENTO DEL ESTUDIO</b>	
3.1 Técnicas empleadas en los pronósticos.....	32
3.2 Herramientas utilizadas en las técnicas de prospectiva .....	37
3.3 Selección de la técnica a emplear .....	40
3.4 Antecedentes del método DELPHI .....	41
3.4.1 Características del Método Delphi.....	43
3.4.2 Etapas del Método DELPHI.....	44
3.5 Metodología del estudio .....	46
3.5.1 Elaboración de la Encuesta Piloto.....	46
3.5.2 Características del panel.....	47
3.5.3 Desarrollo de la consulta.....	49
3.5.4 Primera consulta (respuestas libres).....	49
3.5.5 Segunda consulta .....	54
3.5.6 Tercera consulta .....	56
<b>CONCLUSIONES.</b>	59
Recomendaciones.....	60
<b>ANEXO A</b> Lista de encuestados .....	62
<b>ANEXO B</b> Cuestionario 1.....	64
<b>ANEXO C</b> Cuestionario 2.....	67
<b>REFERENCIAS.....</b>	71

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURA	1.1	Crecimiento de la población en el mundo.	4
FIGURA	1.2	El satélite Envisat detecta diferentes gases contaminantes en la atmósfera de la tierra.	5
FIGURA	1.3	Cantidad de vehículos en el mundo.	6
FIGURA	1.4	Clasificación de fuentes de contaminación de la atmósfera.	8
FIGURA	1.5	Demanda, producción y exportación del petróleo en los próximos años.	13
FIGURA	2.1	Esquema de funcionamiento de una celda de combustible.	18
FIGURA	2.2	Estación Generadora de Celda de combustible PAFC.	20
FIGURA	2.3	Estación Generadora de la celda de combustible MCFC	22
FIGURA	2.4	Esquema de Funcionamiento de una Celda de Combustible SOFC	23
FIGURA	2.5	Celda de Combustible AFC	24
FIGURA	2.6	Celda de combustible de un automóvil.	26
FIGURA	2.7	Representación de las Reacciones de una celda PEMFC	27
FIGURA	2.8	Esquema de las Diferentes Partes y Componentes de una Celda tipo PEM	30
GRAFICA	3.1	Composición del panel por disposición e interés.	47
GRAFICA	3.2	Composición del panel de la institución donde laboran.	48
GRAFICA	3.3	Composición del panel de doctorado por especialidad.	48
GRAFICA	3.4	Histograma de frecuencias.	50
GRAFICA	3.5	Histograma de frecuencias.	51

GRAFICA	3.6	Histograma de frecuencias.	52
GRAFICA	3.7	Celda apta para desarrollarse en el país PEM (DMFC).	52
GRAFICA	3.8	Celda apta para desarrollarse en el país PEM (H <sub>2</sub> ).	53
GRAFICA	3.9	Histograma de frecuencias.	53
TABLA	1.1	Cantidad de vehículos que transitan en la ZMVM.	9
TABLA	3.1	Clasificación de las técnicas de pronósticos.	33
TABLA	3.2	Instrumentos para utilizar en las técnicas de prospectiva.	37
TABLA	3.3	Selección de la técnica.	40
TABLA	3.4	Aspectos a desarrollar de acuerdo con la media y mediana.	55
TABLA	3.5	Aspectos a desarrollar de acuerdo con la puntuación definitiva y con la media y mediana.	57

## RESUMEN

Las investigaciones sobre fuentes de energía renovable actualmente se han tratado de adecuar en los automóviles, contribuyendo esto en una mejor eficiencia energética como es la celda de combustible, el cual es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de sus reactivos directamente en energía eléctrica. Características tales como, la baja emisión de desechos contaminantes, alta eficiencia y flexibilidad de aplicación, hacen que esta tecnología este emergiendo con grandes perspectivas para garantizar las demandas energéticas de forma sustentable.

En este estudio se utiliza el método Delphi para sintetizar la opinión de un conjunto de expertos, sobre el pronóstico y perspectivas del mercado futuro de las celdas de combustible en los próximos 25 años e identificando los aspectos a desarrollar en México.

Participaron como expertos investigadores de diversas instituciones que accedieron a responder a las preguntas de los cuestionarios.

Se exponen la situación actual y deterioro de la tierra, la clasificación de contaminantes vehiculares en el mundo, así como la cantidad de vehículos que transitan en la tierra, también se da a conocer la situación actual y petrolera e energética en la ciudad de México.

Se describe qué es una celda, cómo trabaja interna y externamente, también se dan a conocer sus elementos, partes y componentes. Asimismo se hace una clasificación de las celdas que existen, especificando a que tipo de celda se le realizara este estudio, por lo cual se dan a conocer sus ventajas, desventajas de la misma.

Se dan a conocer técnicas empleadas en los pronósticos cualitativas y cuantitativas, también las herramientas que utilizan cada una de las técnicas y su definición, determinando la técnica a emplear, así como sus antecedentes, características y etapas.

Posteriormente se determina el procedimiento que lleva a cabo en el estudio, como es la elaboración de la encuesta piloto, características del panel de expertos, desarrollo de la primera, segunda y tercer encuesta y el análisis de cada una de ellas.

Se presentan las conclusiones del estudio y recomendaciones.

# I. INTRODUCCIÓN A LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

## 1.1 Antecedentes.

En un inicio el hombre era nómada, pasaba recolectando fruta, semillas y vainas que necesitaba para alimentarse. También perseguía manadas de animales que podían proporcionarle comida y vestido.

En realidad no existía otro medio de transporte que no fueran las propias piernas de los individuos. Estas fueron épocas muy duras, incluso grupos de individuos que intentaban asentarse en algún sitio rico en alimentos se veían obligados a abandonarlos pues tenían que competir con otros seres vivos con mayores habilidades que ellos.

Con el paso del tiempo el hombre aprendió el cultivo de las plantas y paso de nómada a sedentario estableciéndose en comunidades que le permitieron, por otra parte, domesticar y alimentar animales.

En ese tiempo el hombre ya no quería desplazarse ni recorrer grandes distancias pues sus alimentos y insumos básicos los tenía a su alrededor. Una vez establecido en pequeñas comunidades tuvo tiempo libre que le permitió desarrollar sus habilidades y crear objetos complejos en su manufactura que inicio a comercializar.

El comercio y la incorporación de nuevos bienes de consumo y nuevas herramientas de trabajo fueron creciendo y creando una diversificación de las actividades del hombre hasta tal punto que algunos de ellos empezaron a dedicarse a actividades ajenas a la producción de víveres e insumos básicos y produjeron objetos más elaborados que intercambiaban por alimentos.

En este momento inicio la necesidad de transportar objetos desde su lugar de producción hasta los sitios donde podían comercializarse, los medios de transporte eran rudimentarios la fabricación de ruedas y carruajes eran costosos y los caminos no tenían la calidad actual.

Los mares, ríos y lagos empezaron hacer un medio natural de transporte que permitía mover gran cantidad de bienes en lanchas o embarcaciones, las urbes que se localizaban cerca de un río tuvieron gran florecimiento y desarrollo, pues sus áreas de cultivos y de explotación de recursos naturales eran mas grandes, extendiéndose río arriba y aprovechando la corriente en el traslado de sus productos.

En 1769 el escritor e inventor francés Nicholas Joseph Cugnot presentó el primer vehículo propulsado a vapor, era un triciclo de 4,5 toneladas, con ruedas de madera y llantas de hierro, cuyo motor estaba montado sobre los cigüeñales de las ruedas de un carro para transportar cañones. La creación de maquinas de vapor y la mecanización de tareas derivaron en el surgimiento del ferrocarril que intensificó el comercio en todas las regiones donde este llegaba y propicio la emigración de la gente. El transporte comercial de gran volumen se daba por barco o por ferrocarril, el transporte carretero seguía siendo limitado y no era posible trasladar grandes volúmenes de carga,

En el siglo XVIII llegó la revolución industrial y con ella una gran sobrepoblación de las ciudades. Mucha gente se especializó en trabajos específicos y las herramientas de trabajo se convirtieron en grandes maquinarias que no podían ser llevadas a casa, entonces surgieron los centros de trabajo y con ellos la necesidad de trasladar a miles de personas desde su hogar hasta su trabajo y viceversa.

A principios del siglo XVIII parecen los primeros taxis a vapor, en 1840 surge el primer carro de vapor con capacidad para 18 pasajeros y en 1860 el belga Etienne Lenoir, patentó el primer motor a explosión, pasaron un par de años hasta que el alemán Gottlieb Daimler construyó el primer automóvil propulsado por un motor de combustión interna en 1866. Comenzaría entonces una nueva industria y un nuevo mercado.

El transporte se volvió más complejo e indispensable en la vida del hombre, muchas ciudades no podrían subsistir sin el transporte, debido a que este representa el medio a través del cual se concreta el comercio, llegan víveres para los pobladores y se suministran recursos para las fábricas.

La llegada de la revolución tecnológica del siglo XX resolvió problemas de operación que incrementaron el nivel de confiabilidad del transporte marítimo aéreo y ferrocarrilero. Sin embargo; el transporte carretero y algunos sectores del ferrocarrilero permanecieron al margen.

Dicha revolución continúa hasta nuestros días con consecuencias que han derivado, entre otras cosas en la globalización económica del mundo, la electrónica, computación y telecomunicaciones han sido actores fundamentales de dicha revolución, la sobrepoblación del mundo en la figura 1.1 se muestra el incremento de la población y su proyección hasta el 2050 [1], la forma en que la sociedad se organiza y el intercambio de mundial de productos han provocado la saturación de los medios de transporte disponible, sobre todo en horas o días específicos.

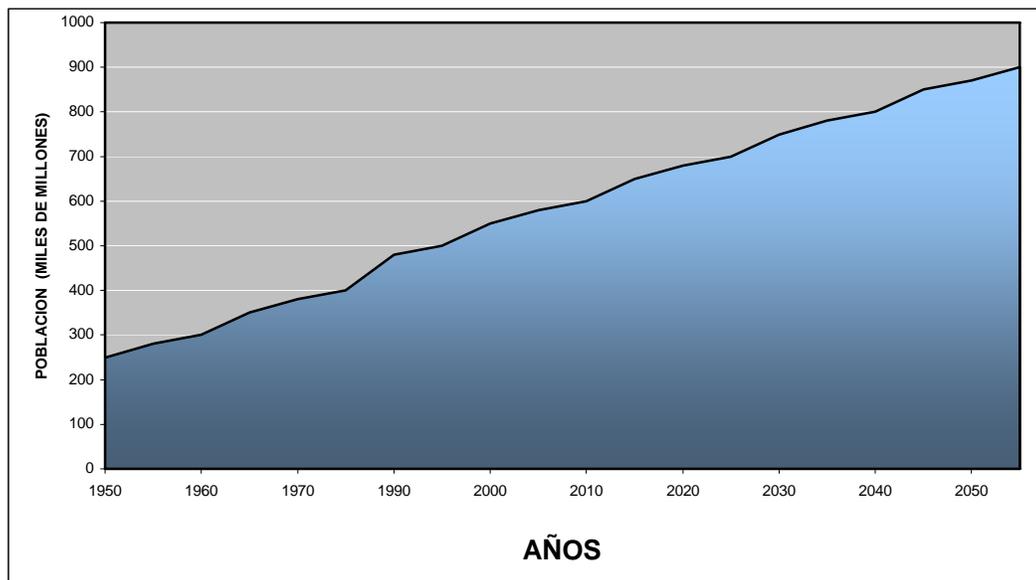


Figura 1.1 Crecimiento de la población en el mundo.

Las proyecciones del crecimiento de la población mundial muestran que se tendrá un significativo incremento especialmente en las regiones en desarrollo, implicando esto que las emisiones contaminantes generadas en el mundo aumentaran debido a que se tendrá mayor demanda de consumo energético.

## 1.2 Situación Actual.

Actualmente la tierra se encuentra al borde de una catástrofe ambiental, causada por la gran cantidad de productos contaminantes lanzadas a la atmósfera y causando estos efectos perjudiciales sobre el hombre y su entorno.

En la Figura 1.2 se muestran imagen captadas por el satélite Envisat de la Agencia Espacial Europea (ESA) es el satélite más avanzado, creado para el estudio de la atmósfera, tierra y mar donde se aprecian los componentes contaminantes detallados. Equipos de las Universidades de Bremen y Heidelberg en Alemania, del Instituto de Aeronomía Espacial Belga (BIRA-IASB) y del Real Instituto Meteorológico Holandés (KNMI) han procesado exitosamente los datos del satélite [2].

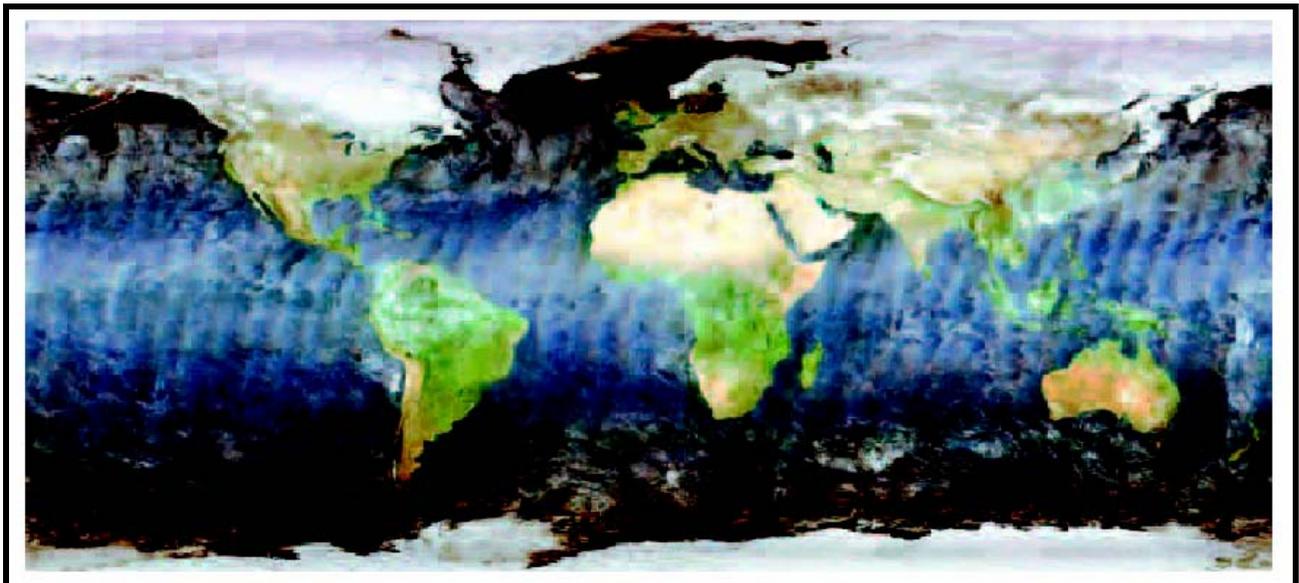


Figura 1.2 El Satélite Envisat detecta diferentes gases contaminantes en la atmósfera de la tierra.

Las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en esta imagen, proviene principalmente de la actividad de las plantas generadoras de energía, la industria pesada, los vehículos y la combustión de biomasa.

La distribución de dióxido de nitrógeno está asociada a las mayores ciudades de América del Norte y Europa, junto con otros sitios como México, D. F. en Centroamérica y en Sudáfrica. En el noreste de China se localiza una alta concentración, también al sur de Asia Oriental y en África.

Los efectos nocivos que provocan los agentes contaminantes en la salud, incluyendo energéticos, han obligado a los gobiernos e instituciones internacionales a regular los niveles de contaminación en la atmósfera aunque esta medida por si sola no es suficiente.

El transporte es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica datos oficiales revelan que el transporte público de pasajeros, de carga y particulares, generan el 80 % del total de los contaminantes en la atmósfera, el 3% lo representa la industria y el 10% restante el comercio y los servicios se consumen 43 millones de litros de combustible al día el 10% [1]. El uso intensivo del automóvil provoca un alto grado de contaminación. En la figura 1.3 se muestra la producción histórica de los vehículos a nivel global [3].

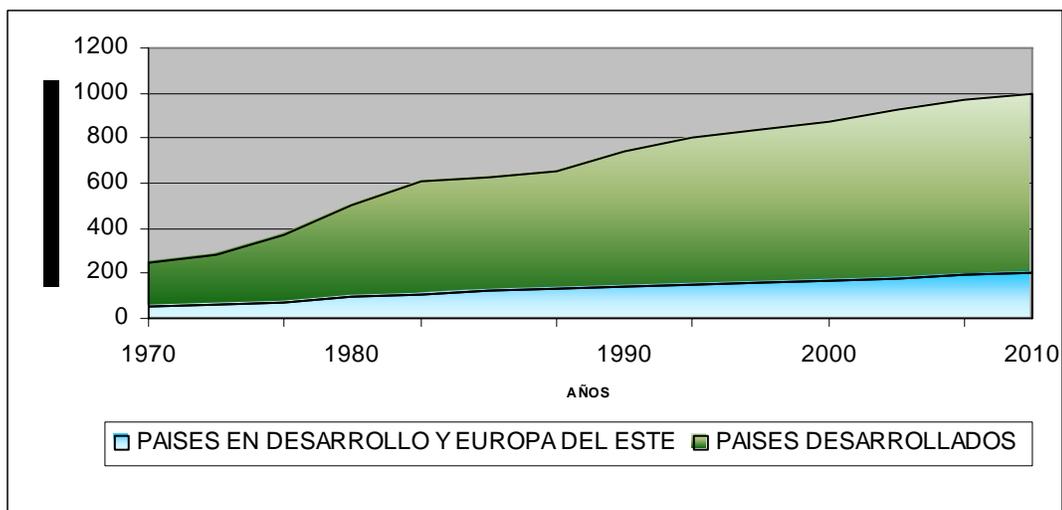


Figura 1.3 Cantidad de vehículos en el mundo

Las proyecciones del incremento en los automóviles a nivel mundial, en el 2010 se tendrán una alta flota de automóviles, en los países desarrollados y la contaminación generada, no causa problemas únicamente en la zona donde se genera, sino que también puede desplazarse por medio de corrientes de aire y producir contaminantes secundarios producto de reacciones químicas en la atmósfera.

La tierra depende en gran medida de la capa protectora del dióxido de carbono. Durante 150,000 años el contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera se ha mantenido en un valor constante de unas 270 partes por millón. El dióxido de carbono atrapa los rayos infrarrojos que salen de la Tierra y es el responsable de que la temperatura de la superficie terrestre sea unos  $31^\circ\text{C}$  más cálida que si no existiera [3].

Lo anterior ha tenido un efecto crucial en el desarrollo de la vida misma, ya que sin este efecto invernadero natural, la mayoría del agua terrestre sería hielo. Sin embargo el contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera se ha incrementado desde 1850 hasta alcanzar 360 ppm [3]. El mayor motivo de este aumento es el incremento progresivo de la combustión de carbón, petróleo y gas para obtener la energía necesaria a fin de mantener nuestro estilo de vida.

El departamento de energía de los estados unidos (DOE) afirma que para alcanzar la pretendida estabilización sería necesaria una reducción anual de al menos un 60% de las emisiones anuales de dióxido de carbono a partir de ahora [3].

A continuación en la figura 1.4 se muestran los contaminantes artificiales y naturales en el mundo [4].

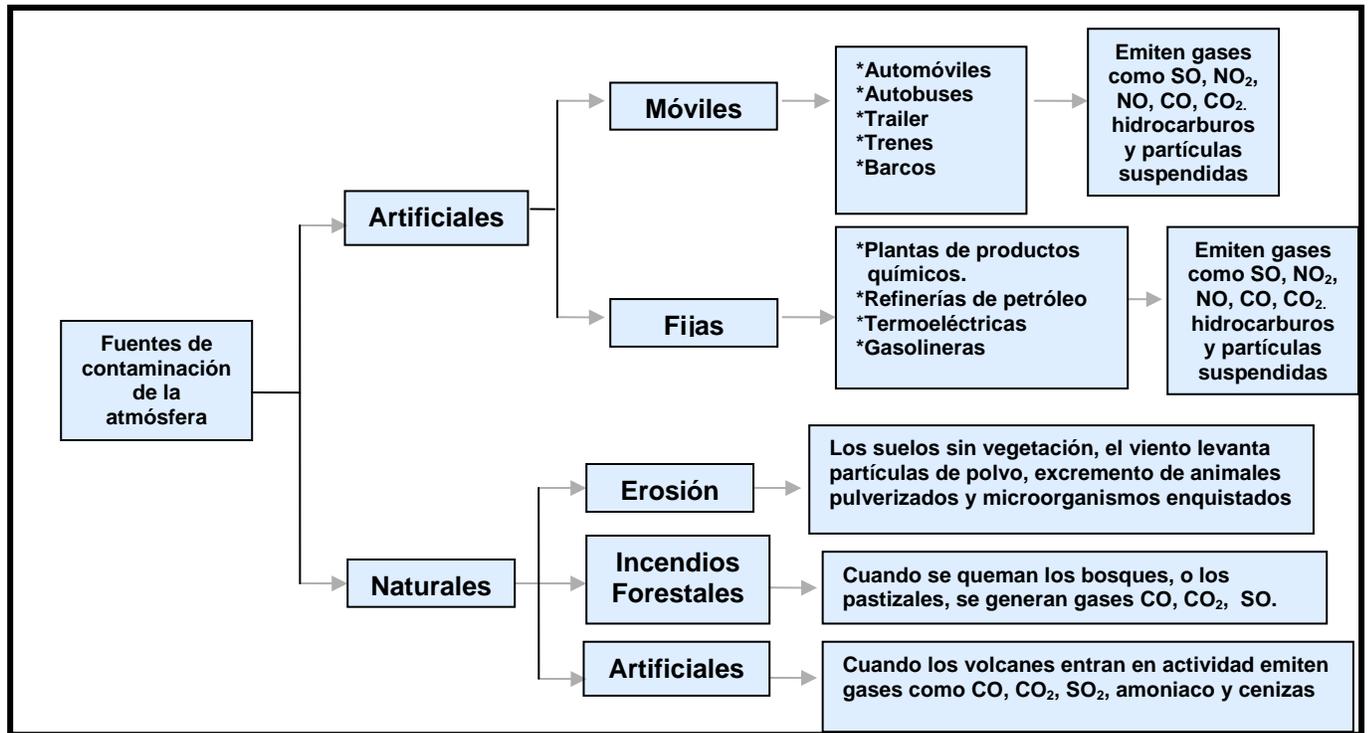


Figura 1.4 Clasificación de Fuentes de Contaminación de la Atmósfera.

La demanda de energía continúa creciendo año tras año. Las fuentes de energía tradicionales basadas en combustibles fósiles tales como el petróleo son limitadas, y en la búsqueda de tecnologías alternativas de generación de energía se ha puesto la atención en la tecnología de celdas de combustible que promete ser clave en los próximos años,

### 1.3 Situación en México.

El problema de la contaminación en la Ciudad de México ha alcanzado grandes dimensiones. El acelerado crecimiento de la población y su demanda de servicios ha incrementado enormemente las necesidades de energía y transporte en la gran metropolitana [4]. Esta última necesidad, a su vez, ha incrementado la circulación de taxis, transporte público, camiones de carga y vehículos particulares (ver tabla 1.1).

AÑO	VEHICULOS					Total
	Importados	Populares	Compactos	De lujo	Deportivos	
1995	15 617	45 826	48 077	5 204	2 819	117 543
1996	30 837	79 346	81 930	4 755	4 594	201 462
1997	45 898	130 449	123 609	4 708	2 578	307 242
1998	76 660	194 991	148 052	9 425	2 548	431 676
1999	133 146	195 639	121 028	11 349	2 257	463 419
2000	257 049	205 067	126 003	13 301	683	602 103
2001	322 182	237 295	106 922	12 204	48	678 651
2002	388 525	252 198	92 589	12 383	682	746 377
2003	377 621	211 113	92 686	9 063	152	690 635
2004	412 613	222 544	97 143	7 470	109	739 879
2005						
Enero 2005	27 961	20 989	5 548	1 304	25	55 827
Febrero 2005	32 539	19 033	5 152	938	17	57 679

FUENTE: Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, A.C.

Tabla 1.1 Cantidad de vehículos que transitan en la Zona Metropolitana del Valle de México

Estudios sobre emisiones [5]. Reportan que los vehículos contribuyen con aproximadamente el 85% de las emisiones de gases y partículas contaminantes de la atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

La calidad del aire depende tanto de factores climáticos como de la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera. El transporte es la fuente que contribuye con mayores volúmenes de contaminantes, las fuentes móviles en la zona metropolitana del Valle de México contribuyeron con el 84% de las emisiones totales, seguidas por las fuentes de área (12%) y las fuentes puntuales y naturales (4%).

Las fuentes móviles, principalmente los vehículos automotores, fueron responsables de 98% de las emisiones de monóxido de carbono (CO), 80% de los óxidos de nitrógeno (NOx), 40% de los hidrocarburos (HC) y 36% de las partículas (PM10). Las fuentes puntuales, de manera predominante las industrias química, del vestido, madera y derivados, así como la mineral no metálica, fueron las que emitieron más dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), mientras que el suelo, sobre todo el desprovisto de vegetación, fue responsable del 40% de las emisiones de partículas. Las emisiones de HC y NOx son importantes al representar cerca del 30% del total e intervenir directamente en la formación del ozono, principal contaminante de la ZMVM [5].

### **1.3.1 Clasificación de Contaminantes Atmosféricos en ZMVM.**

Los contaminantes que se liberan en la atmósfera pueden dividirse en tres grandes categorías según su fuente de emisión [5]:

1. Emisiones que proceden de fuentes móviles (sector del transporte). Las más importantes, junto al bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), son los óxidos de nitrógeno (NOx), el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos (HC), que pueden ser compuestos orgánicos volátiles y no volátiles, partículas de hollín y derivados de precursores de HC y NOx y como consecuencia de una fotooxidación, el ozono (O<sub>3</sub>).

2. Emisiones que proceden de fuentes fijas (industria, hogares, agricultura y vertederos). Las más importantes, junto con el  $\text{CO}_2$  son el bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), los  $\text{NO}_x$ , los HC, las partículas de hollín y los metales pesados, los clorofluorocarbonos (CFC) y el metano ( $\text{CH}_4$ ).

3. Emisiones que surgen de la producción de energía. Las más importantes, junto con el  $\text{CO}_2$  son el  $\text{SO}_2$  y las partículas de hollín. Las concentraciones elevadas de estos gases y de los contaminantes producidos por reacción química en la atmósfera o en el suelo son nocivas para la salud humana, producen corrosión en diferentes materiales y causan daños a la vegetación, así como perjuicios a la agricultura.

### **1.3.2 Características y Efectos a la Salud de los Contaminantes Atmosféricos en la ZMVM.**

Los efectos en la salud de los principales contaminantes atmosféricos son [5]:

- Bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). Contaminante producido durante el proceso de combustión de los combustibles con contenido de azufre. Las emisiones de este contaminante provienen principalmente de la industria. Los óxidos de azufre son solubles en agua y al hidratarse dan lugar a la formación de ácidos sumamente agresivos, éstos se hidratan con la humedad de las mucosas conjuntival y respiratoria y constituyen un riesgo para la salud al producir irritación e inflamación aguda o crónica y suelen absorberse en las partículas suspendidas, lo que da lugar a un riesgo superior, puesto que su acción conjunta es sinérgica.
- Bióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Contaminante generado cuando el nitrógeno contenido en los combustibles y en el aire es oxidado en un proceso de combustión. La acumulación de bióxido de nitrógeno en el cuerpo humano constituye un riesgo para las vías respiratorias ya que se ha comprobado que puede alterar la capacidad

de respuesta de las células en el proceso inflamatorio, siendo más frecuente en casos de bronquitis crónica.

- Monóxido de carbono (CO). Gas venenoso, incoloro e inodoro producido por la combustión incompleta de combustibles fósiles. La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos estableció como norma de calidad del aire para el monóxido de carbono, un valor de 9 partículas por millón (pm) para un promedio móvil de 8 horas. En un individuo promedio este nivel de exposición se traduce en niveles de carboxihemoglobina (COHb) cercanos al 2%. Estudios de laboratorio han demostrado efectos deletéreos (reducción del tiempo en el que se presenta ataque de angina) en sujetos enfermos de la arteria coronaria a niveles de COHb de 2% y 2.9%.
- Ozono (O<sub>3</sub>). Oxidante fotoquímico que se produce por la reacción entre hidrocarburos reactivos, óxidos de nitrógeno y la intensidad de la radiación solar. Resultados de numerosos estudios indican que la exposición al ozono puede ocasionar inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar.
- Partículas fracción respirable (PM10). Estándar para la medición de la concentración de partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera cuyo diámetro es igual o inferior a 10 micrómetros y que dictan el comportamiento de las partículas dentro de los pulmones: las partículas más pequeñas PM10 penetran a las partes más profundas del pulmón. Por estudios clínicos y epidemiológicos, se les ha identificado ser la causa que afecta a grupos de población sensibles, tales como niños e individuos con enfermedades respiratorias.
- Partículas suspendidas totales (PST). Cualquier material que existe en estado sólido o líquido en la atmósfera cuyo diámetro aerodinámico es mayor que las moléculas individuales pero inferior a 100 micromilímetros. La exposición a las partículas suspendidas totales puede causar reducción en las funciones

pulmonares, lo cual contribuye a aumentar la frecuencia de las enfermedades respiratorias. En concentraciones muy elevadas, ciertas partículas (como el asbesto) pueden provocar cáncer de pulmón y muerte prematura.

### 1.3.3 Situación Eléctrica y del Petróleo en el País.

La situación eléctrica en el país y el abastecimiento de petróleo son limitados de acuerdo con los programas de exploración petrolera, se tendrán una sustentabilidad satisfactoria energética en México, por lo menos hasta mediados del siglo XXI; en la figura 1.5, se muestra la proyección de la demanda, producción y exportación del petróleo en los últimos años [6].

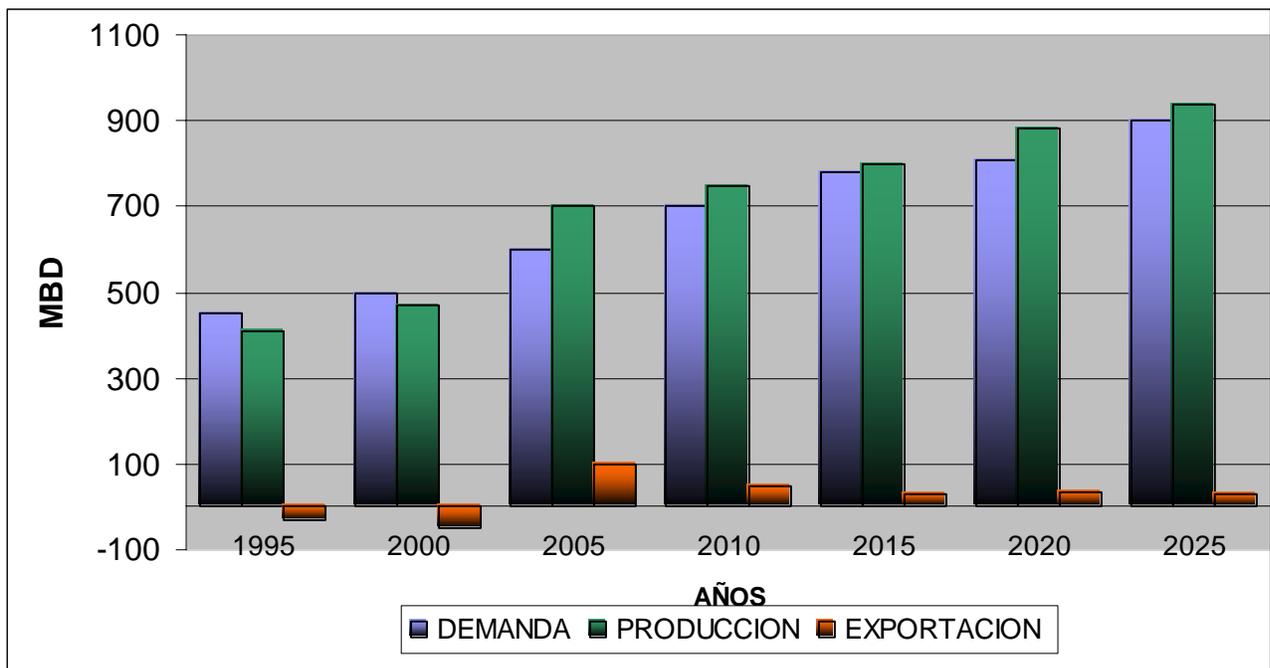


Figura 1.5 Demanda, Producción y Exportación del Petróleo en los Próximos Años.

El 1995 se tenía una demanda alta de petróleo y la producción de petróleo se satisfacía limitadamente, desafortunadamente la exportación estaba en números rojos, en la proyección de esta gráfica, se muestra la situación futura en el 2025, es poco prometedora debido a que se producirá justo lo que se demande y no se tendrán exportaciones, originando esto caos y altos costos [6].

Las alternativas para generar energía eléctrica limpia sin contaminación y de alta calidad en los automóviles, en los últimos años se han venido desarrollando vehículos propulsados por celdas de combustible y con diferentes combustibles (hidrogeno, metanol, gas natural etc.).

Hasta hace pocos años, la celda de combustible estaba limitada al uso experimental en laboratorios o en aplicaciones no convencionales como la industria aeroespacial, pero recientemente se ha desarrollado un creciente interés en las celdas de combustible y en el área automotriz. Especialmente en esta última sus posibles aplicaciones son muy llamativas, por ser una fuente de energía 100% limpia, lo que desplazaría a los motores de combustión interna. Las características que hacen a la celda tan importante son [7]:

- La combustión de combustible fósil produce una cantidad de gases tóxicos para la salud, las celdas de combustible no producen emisiones contaminantes.
- La producción de petróleo será en el futuro cada vez más escasa a escala mundial.
- La celda puede usar distintos combustibles, como hidrógeno, metano, etano, gas natural así como gas licuado. La energía también podría ser provista a partir de biomasa, sistema eólico o bien solar.
- Al terminar la reacción química de la celda se genera vapor de agua.
- Silenciosas.

El mercado y fabricación de las celdas de combustible en México, constituye una gran oportunidad para un nuevo desarrollo empresarial y de negocios en nuestro país, además de generar una importante fuente de empleos y de desarrollos tecnológico, las celdas de combustible pueden garantizar un desarrollo sustentable en México.

En esta investigación se desarrolla una perspectiva de un grupo de investigadores del área de celdas de combustible, con base en sus conocimientos, experiencia y criterio presentan un consenso del mercado en México.

#### **1.4 Objetivo General.**

Pronosticar las perspectivas del mercado futuro de las celdas de combustible en los próximos 20 años e identificar los aspectos a desarrollar en México.

##### **1.4.1 Objetivos Específicos.**

1. Determinar con la encuesta los elementos comunes y esenciales en las valoraciones de los expertos.
2. Determinar las cuestiones generales más comunes en cada pregunta.
3. Determinar la concordancia entre los expertos.
4. Identificar las situación futura en México de la en celdas de combustible.

## II. CELDA DE COMBUSTIBLE

En este capítulo se describe qué es una celda, cómo trabaja interna y externamente, también se dan a conocer sus elementos, partes y componentes. Asimismo se hace una clasificación de las celdas que existen, especificando a que tipo de celda se le realizara este estudio, por lo cual se dan a conocer sus ventajas, desventajas de la misma.

### 2.1 Antecedentes de la Celda de Combustible.

La demanda de petróleo para combustible vehicular aumenta año con año, por ende también la contaminación producida por el transporte ha aumentando, ocasionando graves consecuencias en todo el mundo para lo cual se han encontrado nuevas alternativas energéticas como son las celdas de combustible que operan como una batería, es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de un combustible directamente en energía eléctrica y calor mientras se le provee de combustible, son limpias, eficientes y ecológicas.

La primera Celda de Combustible fue construida en 1893 por Sir William Grove, un juez galés y honorable científico [7]. El verdadero interés en las celdas de combustible, como un generador práctico, no vino sino hasta comienzos de la década de los 60's cuando el programa espacial de los Estados Unidos seleccionó las celdas de combustible en lugar del riesgoso generador nuclear y de la costosa energía solar.

La estructura básica de una celda de combustible consiste en una capa de electrolito en contacto con un ánodo y un cátodo poroso a los lados tal como se muestra en la siguiente Figura 2.1.

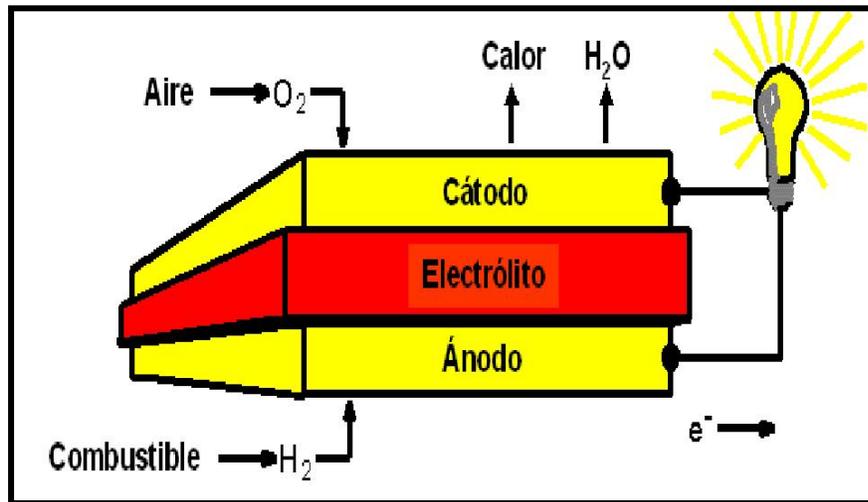


Figura 2.1 Esquema de Funcionamiento de una Celda de Combustible.

El combustible que se inyecta puede ser (metanol, hidrogeno, biogás, propano o etanol), con un oxidante que debe ser oxígeno, dentro de la celda se separa el combustible y el oxígeno por dos membranas porosas con un electrolito en medio.

Las membranas porosas tienen un elemento conductor, generalmente metálico, para recoger la corriente eléctrica que se puede originar por la diferencia de potencial que se presenta entre las dos membranas, debido a la reacción química básica:



Todas las celdas de combustible se basan en este principio, pero varían en el contenido del electrolito, en los materiales de las membranas, electrodos, además en su construcción, y por lo tanto, también en las reacciones químicas dentro de la celda de combustible [7].

## 2.2 Tipos de Celdas de Combustible que Existen

Como se dijo anteriormente existen varios tipos de celdas de combustibles, que se clasifican de acuerdo a diferentes electrolitos, combustible, temperatura y aplicaciones.

**2.2.1 Ácido Fosfórico (PAFC):** Este tipo de celda requieren una temperatura de operación: 150 y 220°C este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas, hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. Las celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración [7], comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna.

Este tipo de celdas puede ser usado en vehículos grandes como autobuses y locomotoras.

Desde 1994 ha estado funcionando una PAFC de 50 Kw de la Fuji Electric adaptada a un autobús por el U.S. Departamento of Energy [10]. EN 1998 Georgetown, Nova Bus, and the U.S. Departamento of Transportacion introdujeron un autobús de 100 kw de potencia fabricada por International Fuel Cells Corporation [11]. En el mundo existen unas 200 plantas eléctricas en

funcionamiento, Japón por ejemplo tiene una capacidad instalada de 8000 Kw en mas de 50 unidades. Plantas de mas de 200 Kw están en operación comercial y unidades de 11 MW de capacidad han sido evaluadas con buenos resultados [7], Figura 2.2.



Figura 2.2 Estación Generadora de Celda de Combustible PAFC.

#### VENTAJAS:

- Son las que más se han aplicado (cerca de 300 están ya funcionando en el mundo).
- Elevada eficiencia en cogeneración (85%).
- Aplicación en plantas HVAC (aire, ventilación, aire acondicionado) en edificios

**DESVENTAJAS:**

- Elevada utilización de catalizadores costosos.
- Gran tamaño y peso.

**2.2.2 Membrana Intercambiadora de Protones (PEMFC):**

Temperatura de operación: 80°C tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial de energía importante, tal como en el caso de automóviles, de acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios y potencialmente otras aplicaciones mucho más pequeñas [7].

**VENTAJAS:**

- Electrolito sólido reduce la corrosión y problemas de manejo.
- Bajas temperaturas de funcionamiento.
- Adaptación rápida a la demanda de energía.
- Ideales en aplicaciones portátiles, transportes y en domésticas.
- La ausencia de líquido elimina el problema de movimiento del electrolito y no inunda los electrodos (lo cual las hace ideal para aplicaciones de transporte).

**DESVENTAJAS:**

- Requiere catalizadores costosos.
- Gran sensibilidad a las impurezas del combustible.
- Problemas de evacuación del agua producida puede limitar la densidad de potencia.

### 2.2.3 Carbonato Fundido (MCFC):

Esta celda trabaja a una temperatura de operación: 650 °C estas celdas de combustible de carbonato fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles a base de carbón, usa una mezcla de sales de carbonato fundido como electrolito. La composición del electrolito varia, pero usualmente consiste en Carbonato de Litio ( $\text{LiCO}_3$ ) y Carbonato de Potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) y/o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , la mezcla de sal es liquida y es un buen conductor iónico. El electrolito es suspensión en una matriz de cerámica porosa ( $\text{LiAlO}_2$ ) aislada y químicamente inerte [7], Figura 2.3.



Figura 2.3 Estación Generadora de Celda de Combustible MCFC.

#### VENTAJAS:

- Utilización de catalizadores menos costosos (Níquel por ejemplo).
- Las elevadas temperaturas de rechazo permite cogeneración.

## DESVENTAJAS:

- La elevada temperatura de funcionamiento de los dos tipos favorece los problemas de corrosión y daña los componentes de la celda de combustible

**2.2.4 Oxido Sólido (SOFC):**

Este tipo de celda tiene una temperatura de operación: 500 - 1000°C es una celda de combustible altamente prometedora, podría ser utilizada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de éstas en vehículos motores.

Las unidades que se abrigan van desde 25 hasta 100kw de potencia. Un sistema de óxido sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación sea muy elevada. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60% [7], en la Figura 2.4 se presenta el esquema de funcionamiento de una celda de combustible SOFC.

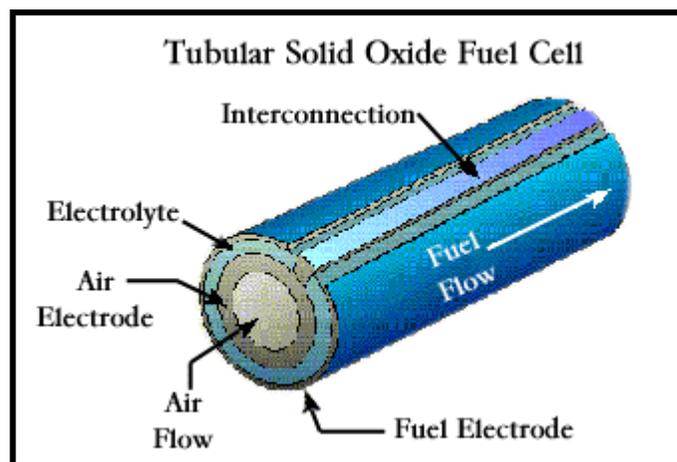


Figura 2.4 Esquema de Funcionamiento de una Celda de Combustible SOFC.

## VENTAJAS:

- Construcción sólida y por lo tanto menos corrosión característica de los electrolitos líquidos.
- El diseño de las celdas puede ser de formas tubulares o planas.
- La ausencia de líquido elimina el problema de movimiento del electrolito y no inunda los electrodos.

## DESVENTAJAS:

- La elevada temperatura de funcionamiento de los dos tipos favorece los problemas de corrosión y daña los componentes de la celda de combustible.

**2.2.5 Alcalinas (AFC):**

La celda alcalina tiene una temperatura de operación: 50 - 250 °C utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta un 70%. Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando la forma de reducir los costos y mejorar la flexibilidad en su operación [7], Figura 2.5.

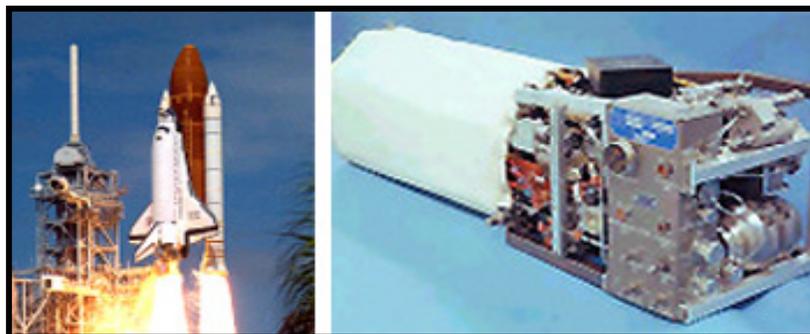


Figura 2.5 Celda de Combustible AFC.

**VENTAJAS:**

- Fueron las primeras celdas de combustibles modernas en ser desarrolladas y aplicadas en los programas espaciales de la NASA.
- Funcionamiento excelente con  $H_2$  y  $O_2$ .

**DESVENTAJAS:**

- Elevada utilización de catalizadores costosos.
- Elevado costo en la eliminación del  $CO_2$  del combustible.

La existencia de diferentes celdas de combustibles caracterizadas por regímenes de operación propios hace que sus materiales de construcción, técnicas de fabricación y requerimiento del sistema sean diferentes. Estas distinciones implican ventajas y desventajas individuales los cuales rigen la potencialidad de diferentes tipos de celdas para ser usadas en un tipo de aplicación determinada [7].

### **2.3 Tipos de Celdas para Automóvil.**

Existen dos tipos de celda aptas para automóvil las cuales son:

1. Membrana de Intercambio Protónico ( $H_2$ ).
2. Membrana de Intercambio Protónico (DMFC).

De acuerdo a sus características de funcionamiento la más apropiada para su aplicación en automóviles es la celda de combustible de membrana intercambiadora de protones (PEM) con hidrogeno. Así lo ha asumido la mayoría de los fabricantes de

automóviles del mundo y el departamento de energía de los estados unidos (DOE), que realizan distintos prototipos con este tipo de celdas de combustible [3].

La estructura básica de una PEMFC consiste en un ensamble membrana- electrodos (MEA) que puede verse como la estructura genérica de una celda electroquímica: electrodo/electrolito/electrodo, empacada en la forma de un emparedado de tres películas delgadas. Este ensamble, es el corazón de la celda y esta constituido por una capa de electrolito (Membrana Polimérica) en contacto con un ánodo y un cátodo a cada lado, esto constituirá una monocelda, que se puede apilar en serie lo que formaría un “*stack*” ( ver figura2.6)

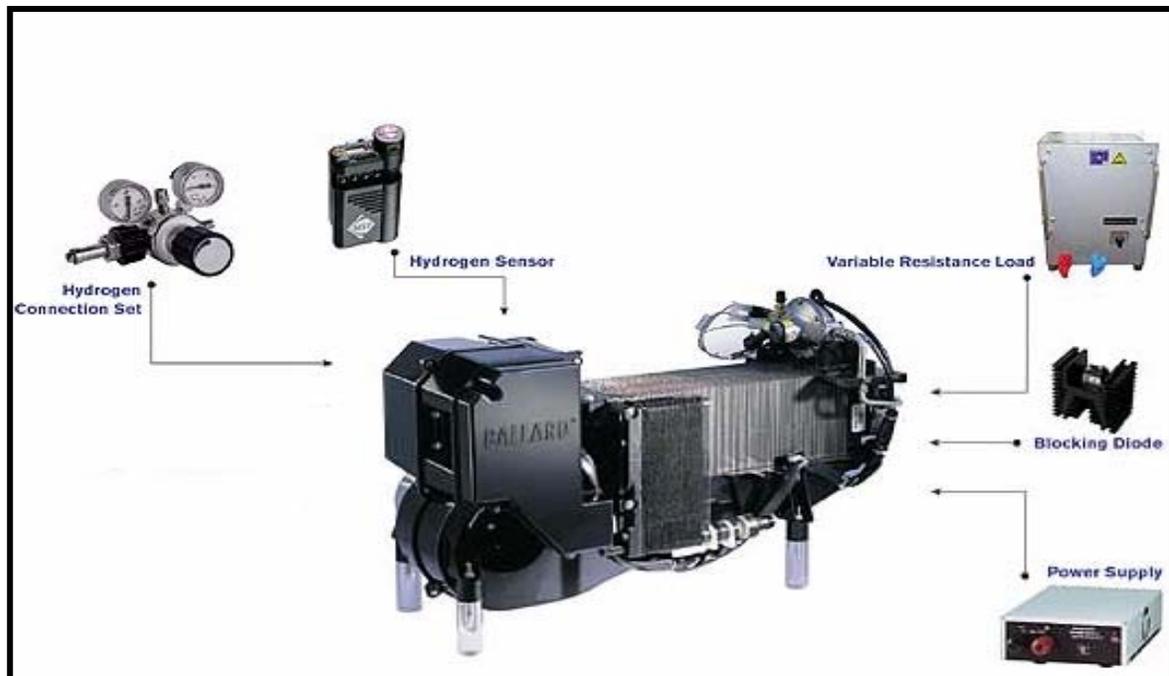


Figura 2.6 celda de combustible de un automóvil

Los prototipos de *stack* constan de una conexión para el hidrogeno, sensor del hidrogeno y las celdas están unidas eléctricamente en serie, cada cierto número de celdas unitarias se inserta un dispositivo que permite extraer el calor generado por la reacción electroquímica, manteniendo de esta forma la temperatura dentro de los márgenes óptimos para cada tipo de celda.

El calor extraído a través del circuito interno de refrigeración es conducido hacia una serie de intercambiadores que lo entregan a un circuito externo, produciéndose agua caliente o vapor, dependiendo de la temperatura de funcionamiento de la celda.

El sistema opera con dos gases, combustible y oxidante, que pasan a través de la estructura de los difusores de gas, los cuales están hechos de papel o tela de carbón poroso, estos facilitan el acceso directo y uniforme de los gases reactivos, hidrógeno y oxígeno, hacia las capas catalizadoras, sin tener la difusión de agua líquida a través de las películas, alta conductividad electrónica y estabilidad en un medio ambiente húmedo y ácido son características necesarias para los materiales utilizados como difusores. Figura 2.7.

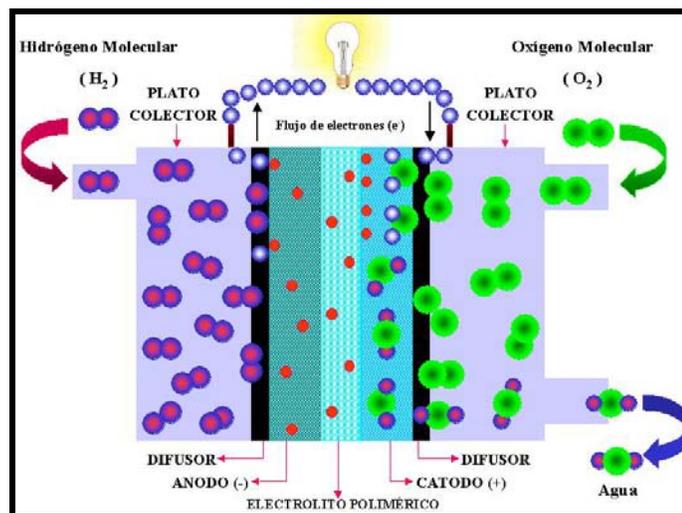


Figura 2.7 Representación de las Reacciones de una Celda PEMFC.

Las placas colectoras de corriente, es el encargado de mantener la separación de los gases y de recolectar la corriente eléctrica. El grafito de alta pureza es el material utilizado tradicionalmente en su construcción. Entre las propiedades mas importante se encuentra, la alta conductividad electrónica, resistencia a la corrosión e impermeabilidad a los gases hidrógeno y oxígeno.

La aplicación de las PEMFC en sistemas móviles, es uno de sus mayores atractivos, sin embargo, esta aplicación necesita un sistema generador de potencia económica, ligera y con alta densidad de potencia. En tal sentido los colectores de corriente actuales constituyen un impedimento, pues estos representan más del 80% del peso y volumen de este tipo de celda, además, de aproximadamente el 40% del costo total de sus componentes. Los empaques de teflón limitan el flujo de gas hacia el área activa y proporcionan, junto con la periferia de la membrana polimérica, un sellado efectivo.

Los vehículos que utilizan las celdas de combustible son eléctricos. No obstante, tienen una importante diferencia respecto a los coches eléctricos habituales: en este tipo de vehículos la electricidad no se almacenan en baterías; se produce en el propio vehículo, gracias a una reacción química llamada combustión fría.

En la investigación y desarrollo los mayores esfuerzos están dirigidos a la reducción de los costos de los componentes de la celda, específicamente de catalizadores, membrana, y colectores de corriente, constituyendo un gran desafío para muchos investigadores obtener una celda de combustible que entregue alta eficiencia con el menor costo posible, [8].

Afectando por ende el mercado de celdas de combustible ya que mientras no exista una alta demanda de sistemas basados en celdas de combustible, pues no existirá una producción masiva de éstos y sus precios iniciales seguirán siendo altos.

De acuerdo con un informe actualizado de la Business Communications Company, el mercado de los Estados Unidos para la próxima generación de vehículos de transporte fue valuado en \$ 3,4 billones en el 2002. Con una tasa promedio de crecimiento anual del 11,7 % el mercado llegará a los \$ 6 billones para el 2007 [9].

El valor actual de este mercado asciende a los \$ 2,25 millones y se espera un crecimiento del 84 % anual para los próximos cinco años para llegar a los \$ 47,6 millones [9].

## **2.4 Características Funcionales de las PEMFC**

Los elementos que constituyen la estructura de la celda de combustible PEMFC constan de:

1. **Ánodo:** Es el electrodo en donde se lleva a cabo la reacción de oxidación del combustible, en este caso el hidrógeno.
2. **Cátodo:** Es el electrodo en donde se lleva a cabo la reacción de reducción del comburente, en este caso el oxígeno.
3. **Electrolito polimérico:** Es el medio en el cual se desplazan los protones resultantes de la oxidación del hidrógeno en el ánodo hacia el cátodo, también se le conoce como membrana intercambiadora de protones.
4. **Difusores:** Son los encargados de distribuir de manera uniforme el hidrógeno y el oxígeno sobre el ánodo y el cátodo para que se efectúen de manera mas eficiente las reacciones de oxidación y reducción, se utilizan dos por cada celda, están hechas de papel de carbón poroso hidrofobizado, o tela de carbón. Estas capas son de 100-300 $\mu$ m de espesor. Obviamente, tienen que

ser hechas de un material de alta conductividad eléctrica y que sea estable en un medio ambiente mojado [8].

5. Colectores de corriente: Cumplen dos funciones básicas, contienen los ductos por donde viajan el hidrógeno y el oxígeno para llegar al difusor y colectan los electrones de la reacción de oxidación en el ánodo para que puedan viajar a través de un circuito eléctrico externo en forma de corriente eléctrica haciéndolos llegar al cátodo, cada celda requiere dos platos colectores [8].
6. Empaque de Teflón: es un empaque de plástico resistente a la temperatura, su función es la de sellar el proceso electroquímico es el corazón de la celda y evitar que haya fugas [8].

Este ensamble (MEA), con espesor menor a un milímetro, es la parte principal de la celda de combustible. Figura 2.8.

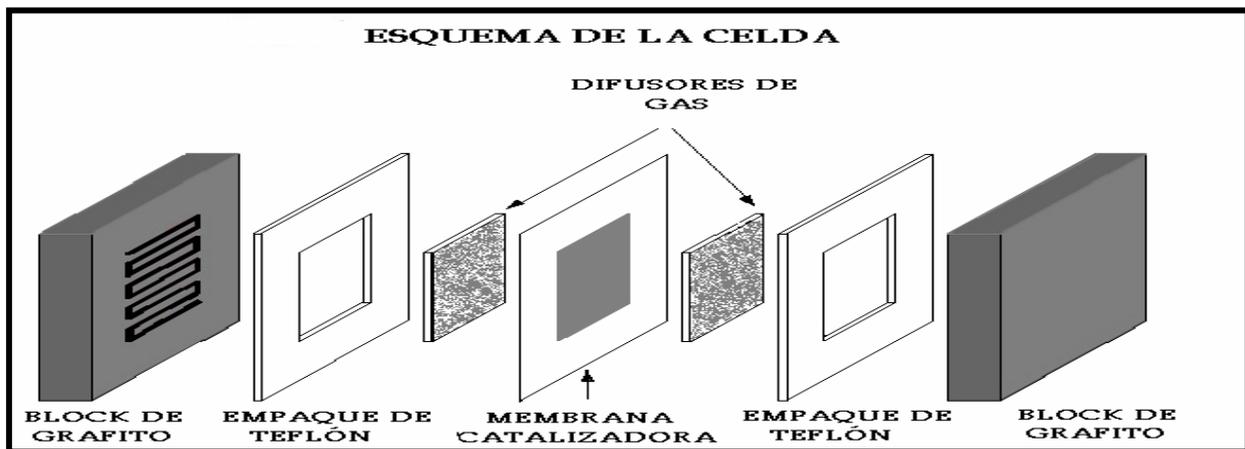


Figura 2.8 Esquema de las Diferentes Partes y Componentes de una Celda PEM.

## III. PROCEDIMIENTO DEL ESTUDIO

En este capítulo se expone las técnicas empleadas en los pronósticos cualitativas y cuantitativas, también se dan a conocer las herramientas que utilizan cada una de las técnicas y su definición, determinando la técnica a emplear, así como sus antecedentes, características y etapas.

Posteriormente se determina el procedimiento que lleva a cabo en el estudio, como es la elaboración de la encuesta piloto, características del panel de expertos, desarrollo de la primera, segunda y tercer encuesta y el análisis de cada una de ellas.

### 3.1 Técnicas Empleadas en los Pronósticos.

La prospectiva se ha beneficiado con la incorporación de diferentes enfoques y la introducción de recursos metodológicos surgidos de diversos ámbitos, dichos recursos ha sido producto de refinamientos metodológicos y también de la preocupación por contar con información confiable y relevante.

La mayoría de los autores agrupan los recursos metodológicos en dos grandes categorías. A continuación se presenta en la tabla 3.1 muestra la clasificación de cada una de las técnicas.

<b>TECNICAS DE PROSPECTIVA</b>	<b>CUALITATIVAS</b>	a) Análisis de Fuerzas
		b) Análisis Morfológico
		c) Ariole
		d) Delphi
		e) Escenarios
		f) Evaluación Tecnológica
		g) TKJ
	<b>CUANTITATIVAS</b>	I. Impactos Cruzados
		II. Insumo – Producto
		III. Modelos de Simulación
		IV. Proyección

Tabla 3.1 Clasificación de las técnicas de pronósticos.

**A) TECNICAS CUALITATIVAS:** Se consideran aquellas que priorizan el uso de información subjetiva con base en la experiencia y en la intuición de los expertos y de los involucrados directamente o indirectamente en el estudio a realizar y se clasifican de la siguiente manera:

**a) Análisis de Fuerzas:** Tiene como objetivo detectar mediante un proceso sistemático, la dinámica y composición de las fuerzas del entorno que pueden impulsar el cambio futuro, así las fuerzas que se dan en una determinada sociedad, son consideradas como elementos causales que habrán de ser analizados. Para ello un juicio de especialistas se torna en un componente fundamental ya que se emplea como medio de identificación, descripción, análisis de causas y repercusiones.

Esta técnica puede ser de utilidad sobre todo en la fase definicional de la prospectiva, ya que permite una explicación inicial de ciertos eventos y de su impacto, así mismo, a poya la elaboración de programas y constituye un ejercicio que puede llevarse a cabo en áreas de administración, de investigación y de capacitación.

**b) Análisis Morfológico:** Es una técnica exploratoria que provee información reconocida sobre alternativas futuras, con la ventaja de que es la única que produce sistemáticamente una amplia gama de opciones.

Esta técnica podrá darse si toda la información vital es susceptible de derivarse y de plantearse en forma concisa. Por otra parte, brinda un panorama concreto del problema, sus soluciones y complementa el empleo de otras técnicas.

**c) Ariole:** Mas que una técnica en si, constituye una guía para la planeación y mantiene como propósito el apoyar la toma de decisiones a través del conocimiento integral de los diversos factores vinculados a un problema específico.

Una de las limitaciones consideradas para esta técnica, sobre todo en países en desarrollo, es la relativa a la existencia y acceso a la información documental, estadística para la primera fase.

**d) Delphi :** Consiste en obtener información relevante por el método mas directo como es la consulta, empleando cuestionarios diseñados progresivamente, excluyéndose así la confrontación directa de los participantes.

Esta técnica puede aplicarse en las fases referidas al diseño del futuro, la construcción del modelo de la realidad y la determinación estratégica, los participantes pueden ser tanto especialistas y tomadores de decisiones como aquellas personas a las que afectaran directa o indirectamente las medidas a tomarse.

**e) Escenarios:** el objetivo básico de los escenarios es el de integrar el análisis individual de tendencias, posibles eventos y situaciones deseables, dentro de una visión general del futuro. Aunque no existe un modelo de4 escenarios, estos deben presentarse4 ciertas características, entre las que destacan hipotéticos, integrales, relevantes, creíbles, útiles y comprensibles.

El desarrollo de escenarios permite concentrar la atención en una perspectiva a largo plazo, sobre aquellas posibilidades que pueden ser consideradas en un análisis del futuro. Ilustra la interacción de diversos elementos, o bien identifica aquellos aspectos que pueden ser ignorados o relegados en otro tipo de técnicas.

- f) Evaluación Tecnológica:** Su propósito es apoyar la toma de decisiones a través de la anticipación y el análisis de las consecuencias sociales de una nueva tecnología, nuevos usos de una tecnología existente o de cambios significativos en el rango de empleo de una determinada tecnología. La evaluación tecnológica se inicia considerando los beneficios y costos planeados de la tecnología, los cuales son materia del análisis de sistemas y de la investigación de operaciones.

También puede ser considerada como técnica mixta, ya que engloba tanto los juicios y opiniones de especialistas como estudios formales y rigurosos. Para ello es necesario emplear también otras técnicas como matrices de decisión, delphi, escenarios, modelos causales, entrevistas y análisis de valores.

- g) TKJ:** Esta técnica busca la solución de un problema, estableciendo un grupo común de “estandarte” que permita al grupo transformarse en un equipo, al encaminar los esfuerzos personales hacia a una meta compartida. Al igual que el delphi, este recurso es útil para organizar la participación permitiendo una discusión abierta sobre diversos aspectos del problema considerado, el inconveniente de esta técnica es que los participantes deben reunirse en diversas sesiones para llegar a un acuerdo por medio de un consenso.

**B) TECNICAS CUANTITATIVAS:** Técnicas formales en las que se obtienen y analiza la información mediante procesos estadísticos y métodos matemáticos, clasificándose de la siguiente manera.

- I. **Matriz de Impactos Cruzados:** El objetivo de la matriz es estudiar los efectos de diversos elementos sobre la probabilidad de ocurrencia de un evento, así como el impacto o consecuencia que esta puede tener en otra serie de eventos. Además analiza las diversas cadenas de impacto que un determinado evento mantiene sobre otro(s) y determina su efecto global, esta técnica puede ser empleada en un ejercicio de naturaleza cualitativa en donde las probabilidades son otorgadas de acuerdo con el conocimiento y opinión de los involucrados, es mas conveniente cuando el numero de eventos es limitado y si es con propósitos educativos. Por otra parte puede usarse como apoyo para la elaboración de escenarios Delphi, o bien de un análisis Monte Carlo.
  
- II. **Insumo – Producto:** Esta técnica permite estudiar la estructura de las interrelaciones existentes entre las diversas partes de un proceso real o imaginario y medir las interdependencias tanto de los elementos de entrada (insumos) entre si, como de estos con los elementos de salida (productos). Junto con técnicas de programación lineal y modelos macroeconómicos apoya la elección de alternativas y la predicción de acontecimientos futuros.
  
- III. **Modelos de Simulación:** La elaboración de modelos requiere como herramienta de descripción del problema, de la modelación, la cual es un apoyo técnico compuesto por un conjunto de métodos, conceptos y lenguaje que permiten formular, rápida y correctamente el problema y consiste en un conjunto de recursos informáticos que permiten la construcción, pruebas, validación, solución (matemática y/o algorítmica) y análisis de un modelo dinámico formal.
  
- IV. **Proyección:** Las técnicas de proyección y de extrapolación, permiten la conformación de visiones futuras que se darían de mantenerse la situación actual sin variaciones, consisten principalmente en inferir una cantidad y/o valor más allá del rango conocido, por medio de hipótesis derivadas de datos u observaciones conocidas. Al seleccionar las técnicas de proyección es necesario considerar los siguientes puntos: existencia y/o disponibilidad de datos, horizonte de tiempo, el patrón de comportamiento de los

datos y tipo de modelo, ajuste de datos. Primero se estudia una variante que describe la realidad con el fin de analizar y descubrir la tendencia de su evolución en el pasado, para luego computar los valores futuros bajo el supuesto de continuidad de la tendencia. Las relaciones más comúnmente empleadas para proyecciones son: tendencia lineal, logarítmica, cuadrática y asintótica.

### 3.2 Herramientas Utilizadas en las Técnicas de Prospectiva

Las técnicas de prospectiva utilizan instrumentos o recursos básicos que las auxilian, esas herramientas nos ayudan a obtener datos confiables y reales del estudio a realizar (ver tabla 3.2).

INSTRUMENTOS
1. CUESTIONARIO
2. DIFERENCIAL SEMATICO
3. ESCALA DE GUTTMAN
4. ESCALA DE LIKERT
5. ESCALA DE LHURSTONE
6. CONFERENCIA
7. MESA REDONDA CON INTERROGADOR
8. ENTREVISTA
9. PÓSTER
10. PROMOCIÓN DE IDEAS

Tabla 3.2 Instrumentos para utilizar en las técnicas de prospectiva.

- 1. Cuestionario:** Es un medio para la obtención de respuestas que pueden incluir, escalas y mecanismos que aporten información sobre la personalidad del que responde, obteniéndose información un asunto o tema determinado.

- 2. Diferencial Semántico:** Su propósito es medir las connotaciones semánticas de un concepto determinado, esto es el significado personal y afectivo que para el individuo tiene el concepto.
- 3. Escala de Guttman:** Es una especie de termómetro que integra una lista de proposiciones tales que la adhesión a un grado superior, implica necesariamente la adhesión a los niveles inferiores. Sirve para describir la jerarquización de actitudes del individuo, determinando su nivel de compromiso y adhesión.
- 4. Escala de Likert :** Sirve para medir las actitudes presentes y/o explorar las futuras, siendo un conjunto de planteamientos en relación con las predicciones que se tienen sobre un referente (escuela, estado, tecnología, familia, etc.) cada enunciado es inequívocamente favorable o desfavorable y las personas responden según su grado de acuerdo o desacuerdo.
- 5. Escala de Thurstone:** Mide la dirección e intensidad de las actitudes de un individuo ante determinados referentes (escuela, estado, tecnología, familia, etc.), en un conjunto de enunciados en relación con, diversas opiniones y formas de reaccionar hacia algo ante lo cual se tiene una predisposición.  
  
A cada planteamiento se le asigna un valor que indica la fuerza de la actitud y la persona debe responder si esta de acuerdo o en desacuerdo con las afirmaciones.
- 6. Conferencia:** Presenta información en forma estructurada de una ponencia por un orador calificado, ante un auditorio determinado, siendo un medio en extremo formal y rápido de transmitir información completa y detallada, sin distracciones.
- 7. Mesa Redonda con Interrogador:** Explora las numerosas facetas de un problema complejo, obteniendo hechos detallados de los expertos, mediante un intercambio de ideas entre un pequeño grupo de expertos en un tema (mesa

redonda), con la participación de una o más personas que funcionan como interrogadores, a menudo bajo la dirección de un moderador.

- 8. Entrevistas:** Desarrolla un diálogo sobre una línea de pensamiento de manera coherente, obteniendo información más cualitativa sobre los puntos de vista del entrevistado, estableciendo un diálogo formal cara a cara sobre un tema específico.
- 9. Póster:** Representa un punto de partida para despertar el interés y reflexión de un grupo sobre aspectos del futuro, combina la expresión creativa, las expectativas y deseos de un grupo, a través de manifestaciones visuales para las cuales recurre a diferentes elementos: colores, fotografías, objetos, mensajes, etc.
- 10. Promoción de Ideas:** Hacer posible una revisión de todas las vías de acción, asegurando que todos los aspectos relevantes de un problema han sido considerados, mediante la interacción de un grupo pequeño, concebida para alentar la libre presentación de ideas, sin restricciones ni limitación en cuanto a su factibilidad.

Es completamente informal; brinda al grupo la oportunidad para considerar una diversidad de alternativas y permite el despliegue de la facultad creadora de los integrantes del grupo.

### **3.3 Selección de la Técnica a Emplear.**

Al existir diferentes técnicas de prospectivas se debe seleccionar, la técnica que brinde la mayor información posible sobre el estudio, esta selección se llevo a cabo mediante una tabla considerando con lo que se cuenta o tiene, si se requiere y si se espera la

participación), para que se tenga una idea clara de la técnica a emplear en el estudio, se presenta a continuación en la tabla 3.3, [10].

SELECCIÓN DE LA TÉCNICA					
SI SE TIENE			SI SE ESPERA LA PARTICIPACIÓN		
SI SE REQUIERE	DISPONIBILIDAD DE TIEMPO Y RECURSOS	COMO FACTORES CRÍTICOS, EL TIEMPO Y LOS RECURSOS	DE UN GRUPO NUMEROSO O PEQUEÑO	DE UN GRUPO ESTRATÉGICO	SE RECOMIENDA
DISEÑAR EL FUTURO DESEABLE	X		X		DELPHI DE TIEMPO REAL, ESCENARIOS.
		X		X	ESCENARIOS, ENTREVISTAS, CUESTIONARIOS, MESA REDONDA
PERFILAR EL FUTURO PROBABLE	X			X	COMPASS, PRONOSTICO TECNOLÓGICO, PROYECCIONES
		X		X	IMPACTOS CRUZADOS, PROYECCIONES, MAPEO CONTEXTUAL
CONSTRUIR EL MODELO DE LA REALIDAD	X			X	MODELOS DE SIMULACIÓN, ESCENARIOS, JUEGOS DE SIMULACIÓN, ANÁLISIS DE FUERZAS, ARIOLE
DISEÑAR ESTRATEGIAS GLOBALES	X			X	TKJ, MATRIZ DE DECISIÓN, ÁRBOL DE PERTINENCIA, CONFERENCIA DE BÚSQUEDA, ANÁLISIS DE FUERZAS.
SENSIBILIZAR A UN GRUPO SOBRE LA IMPORTANCIA DEL FUTURO		X		X	PÓSTER, IMÁGENES ALTERNATIVAS, PROYECCIONES, ESCENARIOS, INTUICIONES SISTEMÁTICAS

Tabla 3.3 Selección de la técnica.

Al considerar cada una de las interrogantes establecida en la tabla se determino que la técnica Delphi es la más conveniente de acuerdo con lo que se deseaba obtener en el objetivo del estudio, también otros puntos que se tomaron en cuenta fueron:

- El perfil requerido de los expertos corresponde a individuos que ocupan puestos y/o realizan funciones las cuales no les permiten disponer de tiempo para realizar sesiones de consultas directas.
- Se requiere que los resultados no fueran influenciados por puntos de vista predominantes.
- Que los encuestados tomaran su tiempo en responder y no se sintieran presionados con la presencia, de otras personas que consideraran mas familiarizadas con el tema.
- Que la información resultante fuera producto de un consenso en el que intervinieran personas con perspectivas distintas del mismo tema.

### **3.4 Antecedentes del Método DELPHI.**

El método Delphi, cuyo nombre se inspira en el antiguo oráculo de Delphos, fue ideado originalmente a finales de los años 40 en el seno del Centro de Investigación estadounidense Rand Corporation por Olaf Helmer y Norman Dalkey, con el propósito de obtener el mas confiable consenso de opiniones de un grupo de expertos, mediante series de cuestionarios con retroalimentación controlada de opiniones. Desde entonces, ha sido \*utilizado frecuentemente como sistema para obtener información sobre el futuro [11].

En la actualidad en método se ha difundido en todo el mundo y se ha aplicado a diversos problemas de distintas áreas como son:

- Recolección de datos actuales e históricos poco conocidos o disponibles.
- Análisis del significado de eventos históricos.
- Evaluación de la distribución del presupuesto.
- Exploración de opciones de planeación urbana.

- Planeación y desarrollo de un campus universitario.
- Evaluación de los pros y los contras de probables políticas a implantar.
- Definición de relaciones causales en fenómenos complejos de tipo económico y social.
- Deducción de las prioridades de los valores personales y objetivos sociales.
- Evaluación de acuerdos entre instituciones.
- Pronóstico de la situación futura de mercados industriales.

Existen tres condiciones necesarias para que un proceso Delphi tenga éxito:

- a) Tiempo adecuado: El tiempo mínimo requerido para un estudio de este tipo es de aproximadamente 45 días. La mayor parte de los estudios Delphi requieren más de un mes para llevarse a cabo.
- b) Destreza de quien participa en la comunicación escrita: Esta técnica tampoco debe utilizarse con grupos que tengan dificultades para leer o para expresarse por medio de la escritura.
- c) Alta motivación del participante: La calidad de las respuestas esta grandemente determinada por el interés y por la dedicación de los participantes y el proceso Delphi requiere una alta motivación del participante, dado que no hay quien estimule y mantenga la comunicación.

### **3.4.1 Características del Método Delphi**

El método Delphi pretende extraer y maximizar las ventajas que presentan los métodos basados en grupos de expertos y minimizar sus inconvenientes. Para ello se aprovecha la sinergia del debate en el grupo y se eliminan las interacciones sociales indeseables que existen dentro de todo grupo. De esta forma se espera obtener un consenso lo más fiable posible del grupo de expertos.

Por lo tanto, la capacidad de predicción Delphi se basa en la utilización sistemática de un juicio intuitivo emitido por un grupo de expertos. Los métodos de expertos utilizan como fuente de información un grupo de personas que se tienen un conocimiento elevado del tema a tratar.

1. Anonimato: Durante un Delphi, ningún experto conoce la identidad de los otros que componen el grupo de debate. Esto tiene una serie de aspectos positivos, como son:
  - Impide la posibilidad de que un miembro del grupo sea influenciado por la reputación de otro de los miembros o por el peso que supone oponerse a la mayoría. La única influencia posible es la de la congruencia de los argumentos.
  - Permite que un miembro pueda cambiar sus opiniones sin que eso suponga una pérdida de imagen.
  - El experto puede defender sus argumentos con la tranquilidad que da saber que en caso de que sean erróneos, su equivocación no va a ser conocida por los otros expertos.
2. Iteración y realimentación controlada: La iteración se consigue al presentar varias veces el mismo cuestionario. Como, además, se van presentando los resultados obtenidos con los cuestionarios anteriores, se consigue que los expertos vayan conociendo los distintos puntos de vista y puedan ir modificando su opinión si los argumentos presentados les parecen más apropiados que los suyos.
3. Respuesta del grupo en forma estadística: La información que se presenta a los expertos no es sólo el punto de vista de la mayoría, sino que se presentan todas las opiniones indicando el grado de acuerdo que se ha obtenido.

Este método Delphi se emplea cuando se da alguna de las siguientes condiciones:

1. No existen datos históricos. Un caso típico de esta situación es la previsión de implantación de nuevas tecnologías.
2. El impacto de los factores externos tiene más influencia en la evolución que el de los internos. Así, la aparición de una legislación favorable y reguladora y el apoyo por parte de algunas empresas a determinadas tecnologías pueden provocar un gran desarrollo de éstas que de otra manera hubiese sido más lento.
3. Las consideraciones éticas o morales dominan sobre las económicas y tecnológicas en un proceso evolutivo. En este caso, una tecnología puede ver dificultado su desarrollo si éste provoca un alto rechazo en la sociedad.

#### **3.4.2 Etapas del Método DELPHI.**

Los pasos que se llevarán a cabo para garantizar la calidad de los resultados y analizar los resultados son los siguientes [11]:

1. Formulación del problema: Es una etapa fundamental en la realización de un Delphi, es de gran importancia de definir con precisión el campo de investigación al que desea encuestar y es preciso estar seguros de que los expertos consultados poseen todos la misma noción de este campo, las preguntas deben ser precisas e cuantificables.
2. Elección de expertos: Esta etapa se refiere al experto, que no importa su nivel jerárquico, sus títulos, su función, este será elegido por su capacidad de encarar el futuro y que posea conocimientos sobre el tema consultado.

La falta de independencia de los expertos puede constituir un inconveniente; por esta razón los expertos son aislados y sus opiniones son recogidas por vía postal o electrónica y de forma anónima; así pues se obtiene la opinión real de cada experto.

3. Selección del tamaño de la muestra: el tamaño del equipo de entrevistados es variable., si se trata de un grupo homogéneo, de diez a quince participante son suficientes. Sin embargo si participan grupos de referencia, podrían integrarse varios centenares de personas.
4. Elaboración y lanzamiento de los cuestionarios (en paralelo con la fase 2): Los cuestionarios se elaborarán de manera que faciliten la investigación de estas características. Preferentemente las respuestas habrán de poder ser cuantificadas y ponderadas y se formularán cuestiones relativas al grado de ocurrencia (probabilidad) y de importancia.
5. Desarrollo práctico y explotación de resultados: El cuestionario es enviado a cierto número de expertos (hay que tener en cuenta las respuestas no contestadas. Naturalmente el cuestionario va acompañado por una nota de presentación que precisa las finalidades, del Delphi, así como las condiciones prácticas del desarrollo de la encuesta.
6. Decisión de continuar las iteraciones o parar: si la información del análisis es suficiente y se aproxima a un consenso, se llega al final de las iteraciones y se prepara un informe final, en caso contrario se realiza una nueva iteración.

### **3.5 Metodología del Estudio.**

Se determina el procedimiento que se llevo a cabo para la realización del estudio y se describe, la encuesta piloto, las características del panel de expertos y la aplicación de la primera, segunda y tercera encuesta.

Así como el análisis de cada uno de los cuestionarios y las puntuaciones de la valoración definitiva en el estudio, dando a conocer el consenso de los expertos.

#### **3.5.1 Elaboración de la Encuesta Piloto.**

Una vez conocido y delimitado el problema objeto del estudio, se elaboró una encuesta piloto analizando las preguntas y cuestiones que deberían ser consultadas para obtener información real, el panel de la encuesta piloto se realizo con ayuda de investigadores y estudiantes del Centro de Investigación en Energía del área de Celdas de Combustible.

Tras la presentación del cuestionario base, se les motivo a expresar ideas y comentarios, factores críticos, prioridades y visualización del presente y futuro de celdas de combustible.

Posteriormente se realizaron las modificaciones sugeridas por los entrevistados y se verifico que la encuesta cumpliera con el objetivo, se elaboro la encuesta final que fue enviada en la primera ronda de consultas al grupo de expertos. En este estudio se tienen considerados sucesos en el horizonte de los próximos 25 años, el proceso de consulta interactiva se desarrollo en tres etapas o rondas.

#### **3.5.2 Características del Panel.**

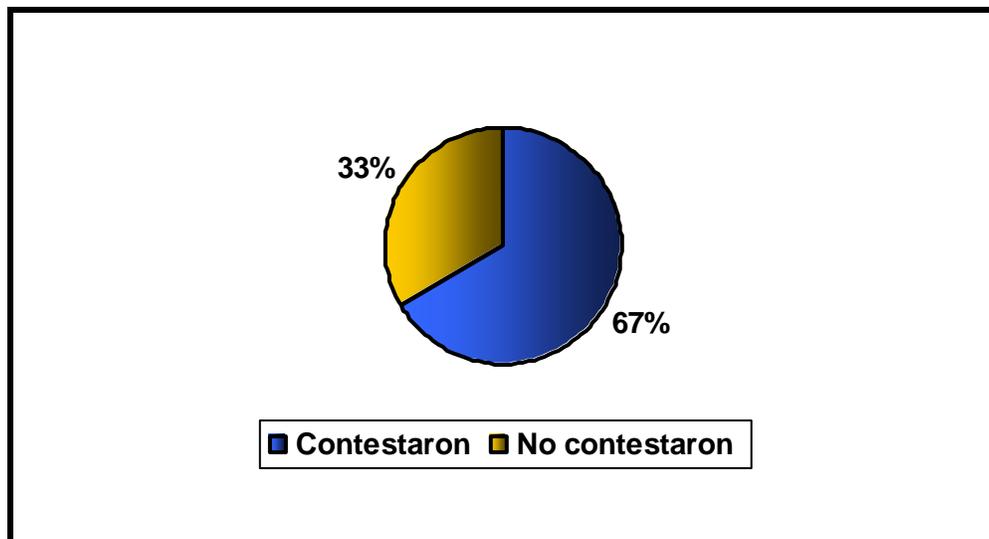
La siguiente fase del estudio consistió en seleccionar el panel de encargados de contribuir en el estudio el cual se realiza desde el punto de vista de la investigación. Con el fin de dar

a conocer y tratar de involucrar a los potenciales participantes, en la selección de cada uno de los participantes, se tomo en cuenta los siguientes criterios:

- Disposición e interés para participar en el estudio.
- Institución donde laboran.
- Grado académico.
- Años de experiencia.

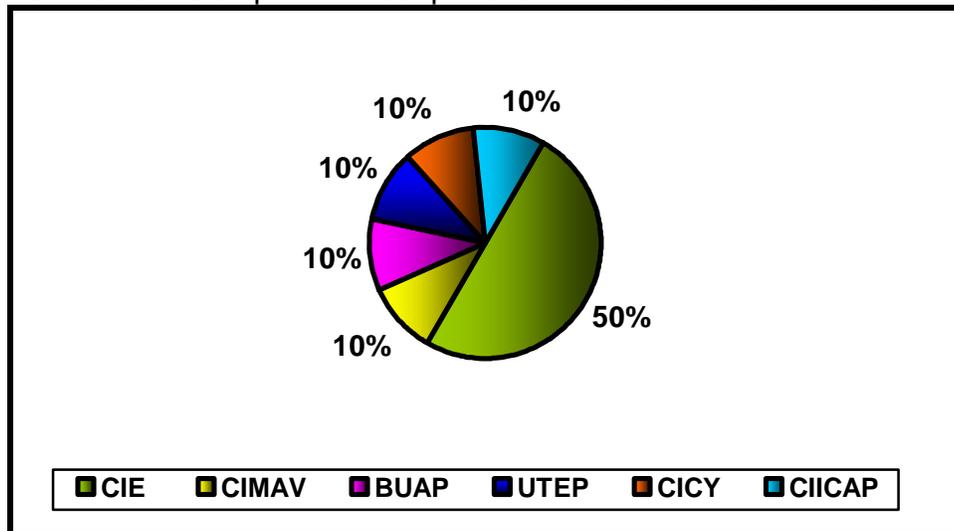
De la selección del panel de quince investigadores solo diez lo que representa una tasa de respuesta del 67 % de la población que se invito a participar en este estudio acepto y contesto el cuestionario y el 33% no contestaron (véase la grafica 3.1 y anexo A).

Grafica 3.1 composición del panel por disposición e interés.



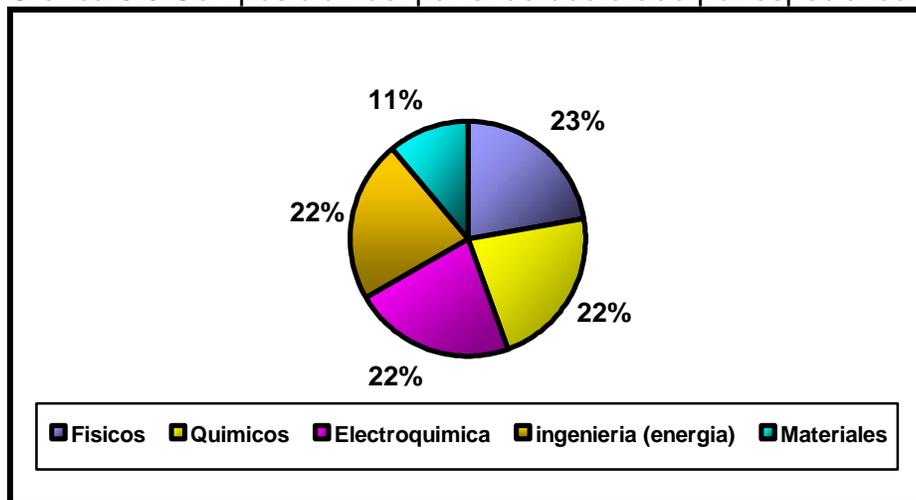
Dentro de la encuesta una característica importante en el panel, fue la institución donde labora cada uno de los investigadores que colaboraron en el estudio, contestando el cuestionario. (Grafica 3.2)

Grafica 3.2 Composición del panel de la institución donde laboran



También se tomo en consideración el nivel académico uno de los investigadores, ya que este nos ayudo a definir la confiabilidad de la información que se obtuvo, del 67% de los investigadores que contestaron el cuestionario, todos tienen el nivel de Doctorado en diferentes áreas ver Grafica 3.3.

Grafica 3.3 Composición del panel de doctorado por especialidad



Otra característica importante en este estudio es la experiencia en celdas de combustible de cada uno de los investigadores, por tanto se selecciono a investigadores, que tuvieran de tres años de experiencia en adelante en celdas de combustible, debido a que esta tecnología es prácticamente nueva.

### 3.5.3 Desarrollo de la consulta.

La consulta se realizó en tres etapas siguientes:

1. Primera Consulta (respuestas libres).
2. Análisis de la primera consulta.
3. Segunda Consulta.
4. Análisis de la segunda consulta (Valoración de la importancia de los aspectos a desarrollar).
5. Tercera Consulta (reconsideración de las puntuaciones).

### 3.5.4 Primera Consulta (respuestas libres).

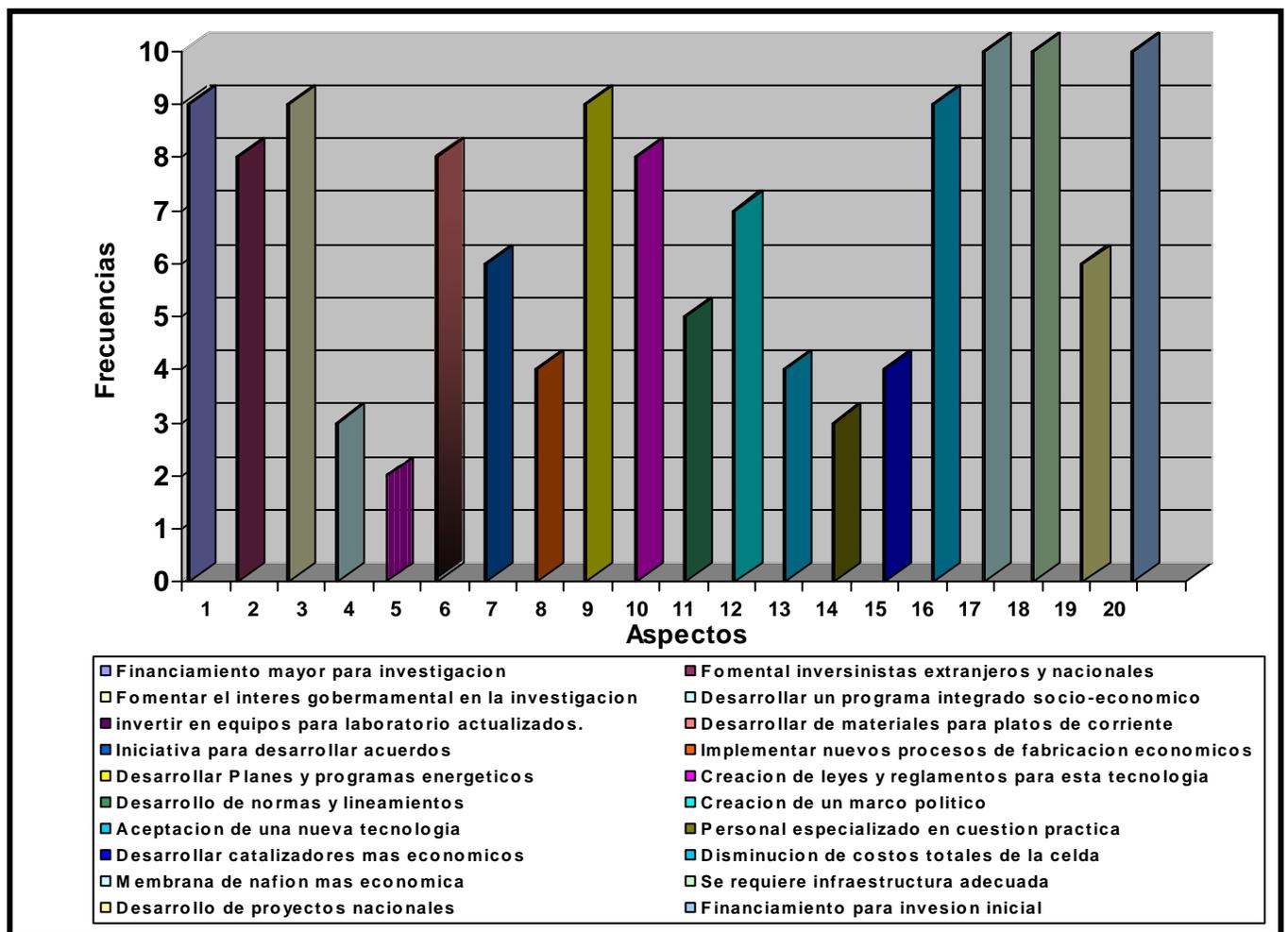
En la primera etapa se envió a los investigadores, una invitación para participar en el estudio por medio de una carta de presentación (véase Anexo A), en la cual se les informa de la naturaleza y los objetivos del estudio que se pretendía realizar y de las metodologías a seguir, junto con el primer cuestionario al que debían responder. La encuesta se realizó con cada uno de los investigadores mediante correo electrónico dado que es un medio que posibilita un rápido y cómodo intercambio de información.

Este primer cuestionario consta de 7 preguntas y su objetivo es la búsqueda de elementos comunes y esenciales en las valoraciones de los expertos pronosticando las percepciones del mercado futuro de las celdas de combustible en nuestro país e identificar los aspectos a desarrollar en México. El cuestionario fue enviado a todos los investigadores y se dividió en dos partes: en la primera parte se les pide que contesten las preguntas de los datos del encuestado identificando algunas características o criterios que se consideran necesarios para tener información sobre el investigador (institución donde laboran, grado académico y años de experiencia en celdas de combustible).

En la segunda parte se plantea una pregunta abierta: ¿Qué futuro se prevé para el mercado de celdas de combustible en México? El estudio comienza con esta pregunta abierta para identificar problemas concretos sobre los que se construiría el cuestionario utilizado en las otras etapas del trabajo. De esta manera se trata de disminuir la influencia

de los investigadores en la definición de los problemas tratados en las etapas siguientes. En el análisis de la primer pregunta se encontró que los investigadores participantes señalan las mismas dificultades de forma diferente, por lo tanto las preguntas que se realizaron en el primer cuestionario se interpretaron de forma que se mantuviese su sentido y sin perder la información real, es decir, realizando esta actividad de tipo subjetivo de la forma más objetiva posible y se reformuló las respuestas a las preguntas abiertas. Los expertos expusieron que siempre y cuando se desarrollen los siguientes aspectos (ver Grafica 3. 4)

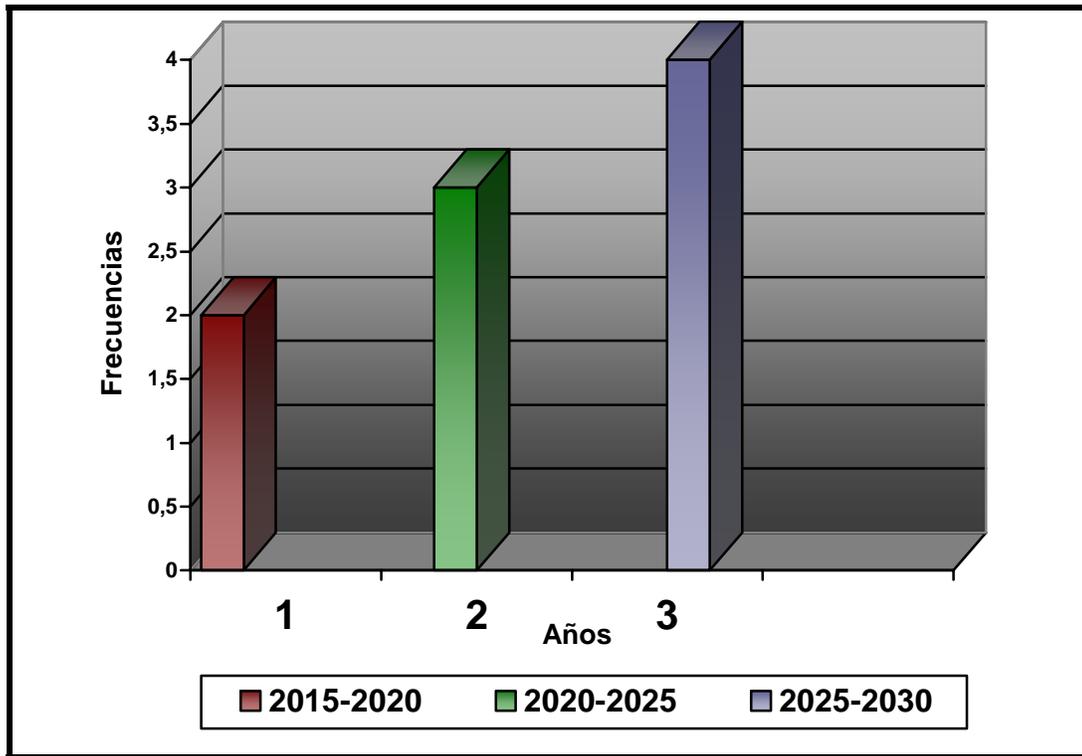
Grafica 3.4 Histograma de frecuencias



Al realizar en análisis de la segunda pregunta ¿En que año se comercializaran en el mercado en México las celdas de combustible?, también es una pregunta abierta con la finalidad de obtener la mayor información posible de cada uno de los integrantes del panel,

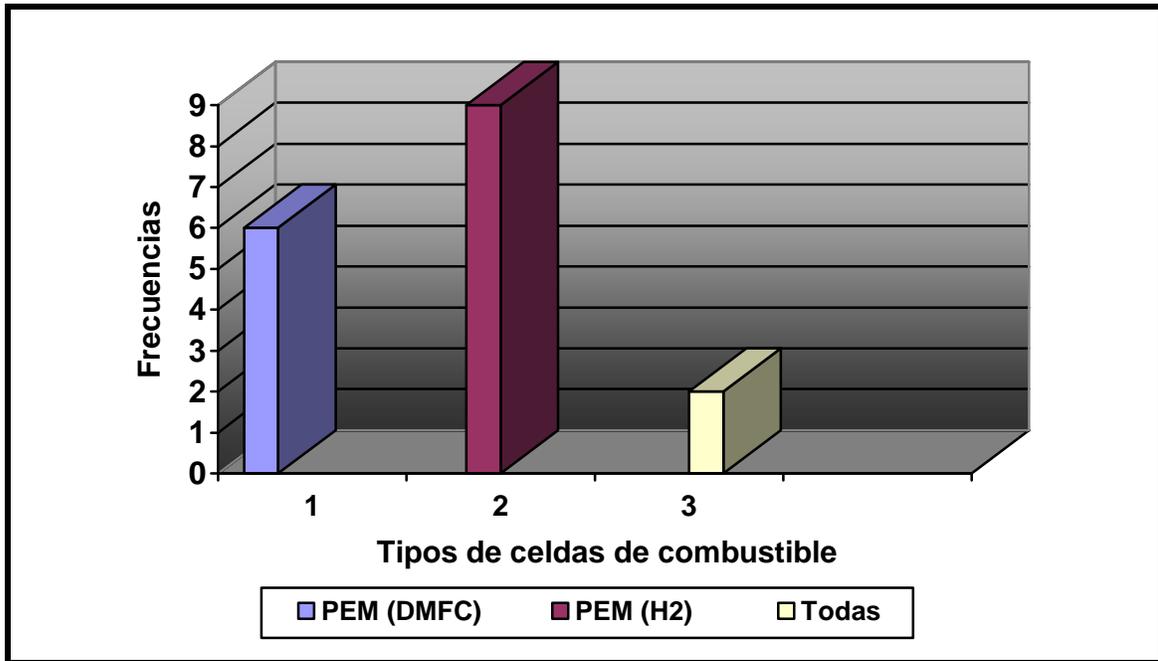
se clasificaron en diferentes rangos de opciones en cada uno de los años que los investigadores respondieron, a continuación (ver Grafica 3.5).

Grafica 3.5 Histograma de frecuencias.



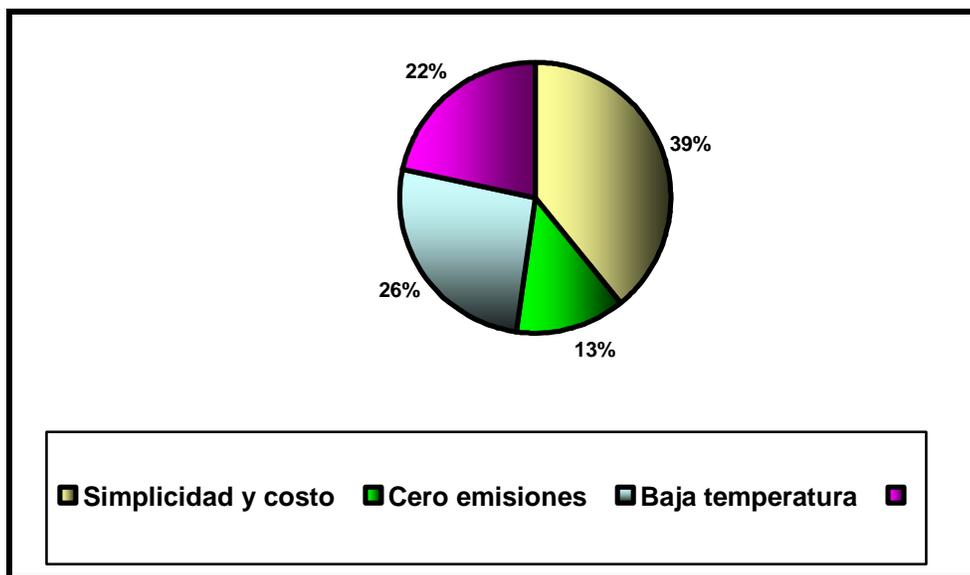
En la tercer pregunta se analiza ¿Cual seria el tipo de celda, que a su criterio pudiera ser más viable para desarrollarse en el país y por que, también es una pregunta abierta con el fin de obtener un análisis minucioso y real, las frecuencias en esta preguntas fueron mas especificas (ver Grafica 3.6).

Grafica 3.6 Histograma de frecuencias.

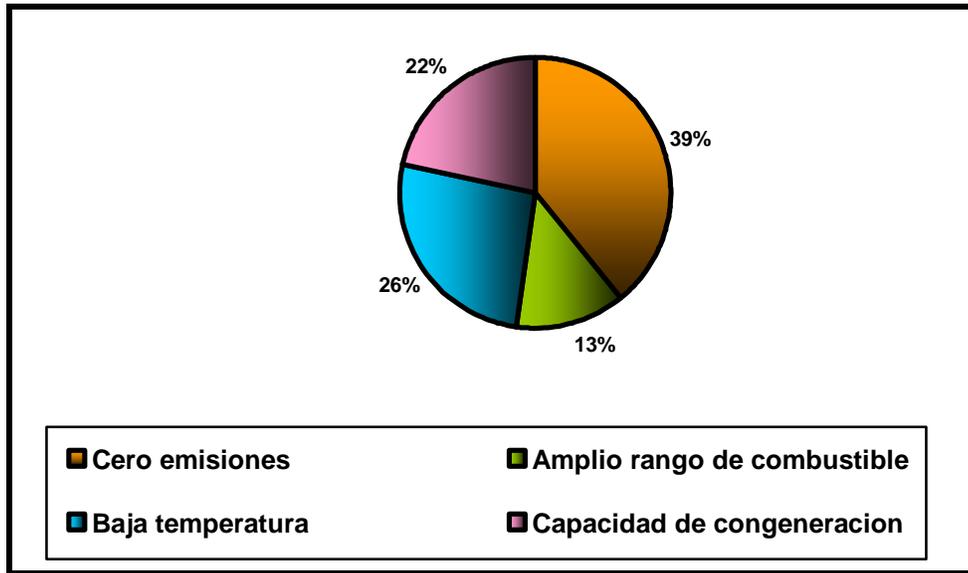


Para indagar más sobre el tipo de celdas se les pregunto a los investigadores por que consideraban esa celda para desarrollarla en el país y contestaron que por sus características serian las más aptas (ver Grafica 3.7 y Grafica 3.8).

Grafica 3.7 Celda apta para desarrollarse en el país PEM (DMFC)

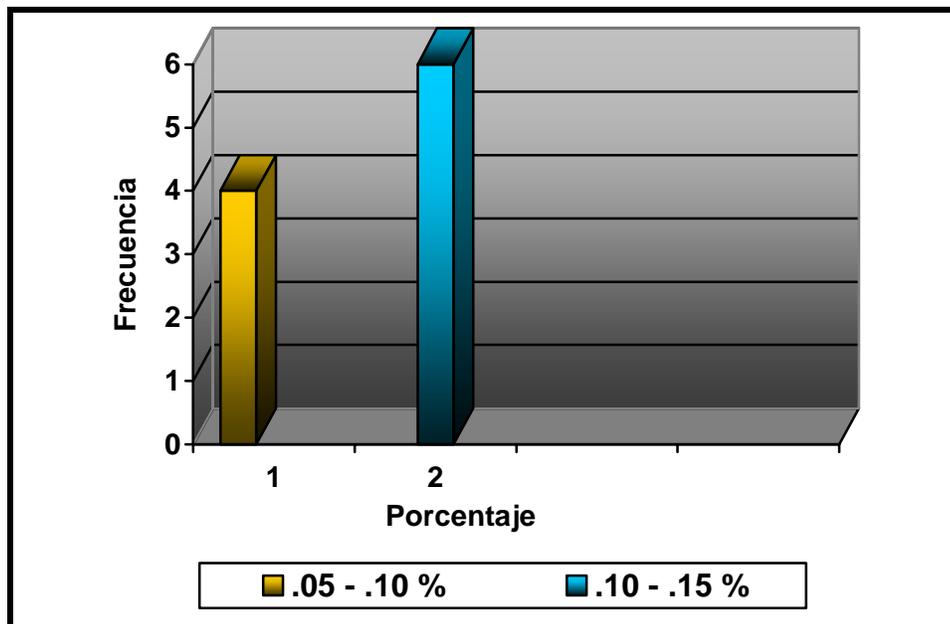


Grafica 3.8 Celda apta para desarrollarse en el país PEM (H<sub>2</sub>)



En la pregunta cuatro se analiza ¿cual sería el volumen de demanda actual de la celda PEM que se tendrían en México? también se plantea una pregunta abierta, con el fin de que la respuesta sea contestada lo mas veraz posible y sin restricciones. La mayoría del panel de investigadores determino que la demanda actual seria del 5% al 10% posteriormente aumentaría (ver Grafica 3.9).

Grafica 3.9 Histograma de Frecuencia



### 3.5.5 Segunda Consulta:

En esta segunda etapa el cuestionario está integrado por preguntas cerradas y su objetivo es la búsqueda de cuestiones generales más comunes en cada pregunta, se les envió al panel de investigadores una carta de agradecimiento dándoles a conocer la segunda etapa del cuestionario.

Se les explica como se organizo y el procedimiento para contestar el cuestionario, junto con el segundo cuestionario al que debían responder (ver Anexo B).

A cada uno de los investigadores se le pidió que realizaran una valoración de la importancia de cada aspecto incluido en la relación, en una escala de 1 a 5 (1. nada importante; 2. Poco importante, 3. Intermedio, 4. Importante, 5. Muy importante), ver Anexo B. Las puntuaciones asignadas por los investigadores a los aspectos a desarrollarse en el país veintinueve se analizaron cuantitativamente.

Se construyeron histogramas de frecuencias y se calcularon medianas para las puntuaciones a cada uno de los aspectos.

Para la información a los investigadores se envió la información completa proporcionada por el histograma de frecuencia. La segunda, tercera y cuarta pregunta se analizan pero no entran en el estudio estadístico debido a los datos tangibles que se obtuvieron.

En la Tabla 3.4 se presentan las medidas de tendencia central correspondientes a las puntuaciones definitivas, jerarquizadas en orden descendente, determinando cada uno de los aspectos a desarrollar en el ámbito de celdas de combustible.

	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>
1. Financiamiento mayor para investigación de celdas	4.7	5
2. Disminución de costos totales de la celda	4.6	5
3. Desarrollo de materiales para platos de corriente económicos y eficientes	4.4	5
4. Financiamiento para inversión inicial	4.3	5
5. Desarrollar de catalizadores mas económicos	4.2	4.5
6. Se requiere infraestructura adecuada.	4.0	4
7. Membrana mas económica	3.8	4
8. Invertir en instalaciones adecuadas a la investigación	3.6	4
9. Creación de un marco político que permita entrar en el mercado a las nuevas tecnologías	3.5	4
10. Invertir en equipos para laboratorios actualizados	3.5	3.5
11. Creación de proyectos nacionales en conjunto con investigadores.	3.5	3.5
12. Implementar nuevos procesos de fabricación económicos	3.4	3.5
13. Iniciativa para desarrollar acuerdo (industria, gobierno e investigadores).	3.2	3.5
14. Fomentar el Interés en la investigación de celdas	3.1	3.5
15. Desarrollar planes y programas energéticos	3.1	3.5
16. Desarrollar un programa integrado de investigación socio-económico para complementar y orientar el apoyo técnico.	2.8	3
17. Creación de leyes y reglamentos para esta tecnología	2.8	3
18. Contar con personal especializado en la cuestión practica	2.8	3
19. Fomentar a Inversionistas extranjeros y nacionales	2.6	2.5
20. Creación de normas	2.1	2

Tabla 3.4 Aspectos a desarrollar de acuerdo con la media y mediana

### 3.5.6 Tercera Consulta

En tercera consulta se reconsideran las puntuaciones asignadas por los investigadores a los veinte aspectos a desarrollar se analizaron cuantitativamente, se construyeron histogramas de frecuencias y se calcularon medianas y medias en cada una de las respuestas con sus respectivas puntuaciones.

A los Investigadores se envió información completa (histogramas de frecuencias, medianas, medias).

De este modo, cada uno de los integrantes del panel de investigadores recibió el histograma acompañado de una tabla con las puntuaciones que él había asignado en la etapa anterior.

Se propone a cada uno de los investigadores si, a la vista de los resultados, deseaba modificar alguna de sus puntuaciones.

En las Tabla 3.5 se presentan las puntuaciones definitivas, una vez tenidas en cuenta las modificaciones realizadas por algunos de los profesores en esta etapa. En general modificaron poco sus puntuaciones.

	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>
1. Financiamiento mayor para investigación de celdas	4.7	5
2. Disminución de costos totales de la celda	4.6	5
3. Desarrollo de materiales para platos de corriente económicos y eficientes	4.4	5
4. Financiamiento para inversión inicial	4.3	5
5. Desarrollar de catalizadores mas económicos	4.2	4.5
6. Membrana mas económica	4.0	4
7. Se requiere infraestructura adecuada.	3.8	4
8. Desarrollar planes y programas energéticos	3.6	4
9. Invertir en instalaciones adecuadas a la investigación	3.5	4
10. Invertir en equipos para laboratorios actualizados	3.5	3.5
11. Creación de proyectos nacionales en conjunto con investigadores.	3.5	3.5
12. Implementar nuevos procesos de fabricación económicos	3.4	3.5
13. Iniciativa para desarrollar acuerdo (industria, gobierno e investigadores).	3.2	3.5
14. Fomentar el Interés en la investigación de celdas	3.1	3.5
15. Creación de un marco político que permita entrar en el mercado a las nuevas tecnologías	3.1	3.5
16. Desarrollar un programa integrado de investigación socio-económico para complementar y orientar el apoyo técnico.	2.8	3
17. Creación de leyes y reglamentos para esta tecnología	2.8	3
18. Contar con personal especializado en la cuestión practica	2.8	3
19. Fomentar a Inversionistas extranjeros y nacionales	2.6	2.5
20. Creación de normas	2.1	2

Tabla 3.5 Aspectos a desarrollar de acuerdo con la puntuación definitiva y con la media y mediana.

## CONCLUSIONES.

Los beneficios descritos a lo largo de este estudio son claramente aplicables en México, siendo un país en desarrollo, presenta aspectos importantes que se tienen que adaptar, los expertos que han colaborado en la realización del presente estudio vislumbran un próximo futuro, que se extiende hasta los siguientes veinte años, en el que señalan la realización de diferentes transformaciones en las perspectivas del mercado futuro de las celdas de combustible en los próximos 20 años.

Las opiniones de los expertos presentan un alto grado de coincidencia en cuanto a las preguntas del primer cuestionario. Por tanto los investigadores prevén que entre el 2025 y 2030 se tendrán fabricando de celdas de combustible en México. También pronostican que el tipo de celda que se fabricara seria PEMFC de hidrogeno, y que actualmente si se fabricaran celdas de combustible se tendría demanda del 10% al 15%, en 20 años se podría dar una producción a gran escala de celdas esto se daría siempre y cuando se tuvieran desarrollo significativo en:

- Disminución de costos totales de la celda.
- Desarrollo de materiales para platos de corriente, económico y eficiente.
- Financiamiento para inversión inicial.
- Desarrollar de catalizadores más económicos.
- Membrana de nafion más económica.
- Se requiere infraestructura adecuada.
- Desarrollar planes y programas energéticos.
- Invertir en instalaciones adecuadas a la investigación.
- Invertir en equipos para laboratorios actualizados.
- Creación de proyectos nacionales en conjunto con investigadores.
- Implementar nuevos procesos de fabricación económicos.
- Iniciativa para desarrollar acuerdo (industria, gobierno e investigadores).
- Fomentar el Interés en la investigación de celdas.

- Creación de leyes y reglamentos para esta tecnología.
- Creación de un marco político que permita entrar en el mercado a las nuevas tecnologías.
- Desarrollar un programa integrado de investigación socio-económico para complementar y orientar el apoyo técnico.
- Contar con personal especializado en la cuestión práctica.
- Fomentar a Inversionistas extranjeros y nacionales.
- Creación de normas.

Si estos factores no sedan el panorama nacional para sobrevivir sería imposible y catastrófico para México.

**Recomendaciones:** Todo conocimiento científico es infinito y en tal sentido, falta mucho camino por recorrer en las aspiraciones por alcanzar la perfección en los sistemas de celdas de combustible. Cuestiones como la falta de infraestructura necesaria y limitaciones de tiempo, imposibilitaron profundizar en muchos aspectos importantes, los cuales relacionamos a continuación y recomendamos su investigación futura para complementar los resultados alcanzados en este proyecto.

- Desarrollar nuevos diseños de canales de flujo para colectores de espesor delgados.
- Aplicar los avances obtenidos en la optimización de los ensambles y construcción de colectores de corriente metálicos en desarrollo de celdas de combustible de mayor potencia.
- Adaptar los precios y eficiencia de la celda de combustible al mercado nacional, con materiales y combustible mas adecuado.
- Catalizadores alternativos que oxiden el hidrogeno.

# **ANEXO A**

## **LISTA DE ENCUESTADOS**

## ENCUESTADOS

No.	Nombre	Institución	Departamento	Ciudad
1	Dr. Sebastián Pathiyamattom Joseph	Centro de Investigación en Energía (CIE), UNAM	Sistemas energéticos celdas de combustible	Temixco, Morelos
2	Dr. Arturo Keer Rendón	Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAIV)	Ciencia e Ingeniería Ambiental	Chihuahua
3	Dr. John C. McClure	Universidad del Paso Texas (UTEP)	Metallurgical and Materials Engineering Department	E.E.U.U.
4	Dr. Pal Umapada	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)	Departamento de Física	Puebla
5	Dr. Joel Moreira Acosta	Centro de Investigación en Energía (CIE), UNAM	Celdas de combustible	Temixco, Morelos
6	Dr. Joel Pantoja	Centro de Investigación en Energía (CIE), UNAM	Celdas de combustible	Temixco, Morelos
7	Dra. Mascha Afra Smit	Centro de Investigación Científica de Yucatán	Sistemas energéticos celdas de combustible	Yucatán, Quintana roo
8	Dr. Manzini Poli, Fabio Luigi	Centro de Investigación en Energía (CIE), UNAM	Planificación energética e impacto ambiental	Temixco Morelos
9	Dr. Alberto Alvarez Gallegos	CIICAP, UAEM	Desarrollo y análisis de materiales avanzados	Cuernavaca, Morelos
10	Dr. Jorge Islas Samperio	Centro de Investigación en Energía (CIE), UNAM	Planificación energética e impacto ambiental	Temixco Morelos

# **ANEXO B**

## **CUESTIONARIO 1**

# CUESTIONARIO

## Delphi 1

Temixco, Morelos a 18 de mayo del 2005  
**Asunto:** Invitación para participar en un estudio Delphi

**Dr.**  
**Presente**

Por medio de este conducto, se le invita a participar en un estudio Delphi el cual consiste en la selección de un grupo de expertos, a los que se les pregunta su opinión sobre cuestiones referidas a acontecimientos del futuro, en este estudio se enfocara a pronosticar las perspectivas del mercado de las celdas de combustible en los próximos 20 años e identificar los aspectos a desarrollar en México.

Situación futura de celdas de combustible en México desde el punto de vista de la investigación, el estudio se realiza a personas con conocimiento sobre celdas de combustible de diferentes centros de investigación y consta de dos encuestas sucesivas los cuestionarios se les enviaran por correo electrónico dándoles un plazo de dos semana para contestar las preguntas, posteriormente con los resultados se obtendrá el siguiente cuestionario que se le enviara por correo electrónico, con el objeto de tratar de conseguir un consenso, el procedimiento seguido se representa mediante la siguiente tabla:

<b>OBJETIVOS</b>	<b>ENCUESTAS</b>	<b>PREGUNTAS</b>
Búsqueda de elementos comunes y esenciales en las valoraciones de los expertos.	Primera ronda de preguntas	Abiertas
Búsqueda de cuestiones generales más comunes en cada pregunta.	Segunda ronda de preguntas	Cerradas
Búsqueda de concordancia entre los expertos	Tercera ronda de preguntas	Cerradas

De antemano gracias por su atención y espero una respuesta favorable.

## CUESTIONARIO

### “Futuro del Mercado de las celdas de combustible en México”

El estudio se lleva a cabo con una alumna de maestría Ing. Miriam Gutiérrez Macedo con el objetivo de tener el escenario futuros del mercado de celdas de combustible en México.

#### Datos del encuestado:

Institución: .....

Grado académico: .....

Años de experiencia en celdas de combustible:.....

#### Datos del cuestionario:

Especifique por favor en cada una de las preguntas, lo que se le esta cuestionando.

1. ¿Qué futuro se prevé para el mercado de celdas de combustible en México?

.....

.....

2. ¿En que año se comercializaran en el mercado en México las celdas de combustible?.....

.....

3. ¿Cual sería el tipo de celda, que a su criterio pudiera ser más viable para desarrollarse en el país y por que.....

4. ¿cual sería el volumen de demanda actual de la celda PEM que se tendrían en México?.....

Relación de aspectos que identificas.....

# **ANEXO C**

## **CUESTIONARIO 2**

Temixco, Morelos julio del 2005  
**Asunto:** Invitación para participar en un estudio Delphi

**Dr.  
Presente**

Agradecemos mucho su colaboración en la consulta acerca de la situación futura del mercado en celdas de combustible en México. Como le informábamos en la primera encuesta, la consulta tendría varias etapas y ahora le presentamos la segunda. Hemos sintetizado y ordenado las respuestas en tres categorías: ámbito gubernamental, ámbito Tecnológico y ámbito industrial, por lo cual le solicitamos ahora que a cada una de estas categorías las valore según la importancia que le otorgue. Por favor, utilice una escala de 1 a 5 (1 – nada importante, 2 – poco importante, 3 – intermedio, 4 – importante, 5 – muy importante).

Agradecemos que nos respondiera dentro de dos semanas, Una vez calculados los valores de las puntuaciones le volveremos a enviar el cuestionario para que, si lo considera oportuno, modifique la valoración a la vista de los resultados globales.

Gracias por el tiempo que invierte y el interés que muestra en cada de las encuestas.

## ASPECTOS A DESARROLLAR:

### AMBITO GOBERNAMENTAL.

	VALORACION (1 – 5)
Financiamiento mayor para investigación de celdas	
Fomentar a Inversionistas extranjeros y nacionales	
Fomentar el Interés en la investigación de celdas	
Iniciativa para desarrollar acuerdo (industria, gobierno e investigadores).	
Desarrollar planes y programas energéticos	
Invertir en equipos para laboratorios actualizados	
Invertir en instalaciones adecuadas a la investigación	
Desarrollar un programa integrado de investigación socio-económico para complementar y orientar el apoyo técnico.	

#### a) Político y Legal

	VALORACION (1 – 5)
Creación de leyes y reglamentos para esta tecnología	
Creación de normas	
Creación de un marco político que permita entrar en el mercado a las nuevas tecnologías	
Creación de un plan estratégico de investigación a nivel nacional que oriente los programas comunitarios y nacionales de forma concertada.	

## B) TECNOLÓGICO

### a) Fabricación

	VALORACION (1 – 5)
Desarrollo de materiales para platos de corriente económicos y eficientes	
Implementar nuevos procesos de fabricación económicos	
Contar con personal especializado en la cuestión práctica	
Desarrollar de catalizadores más económicos	
Membrana de nafion más económica	
Disminución de costos totales de la celda	

## ÁMBITO INDUSTRIAL

	VALORACION (1 – 5)
Se requiere infraestructura adecuada.	
Creación de proyectos nacionales en conjunto con investigadores.	
Financiamiento para inversión inicial	

## REFERENCIAS

- [1] Fondo de Población de las Naciones Unidas (FNUAP)  
<http://www.unfpa.org/swp/2004/espanol/ch2/>
- [2] Agencia Espacial Europea (ESA).  
[http://www.esa.int/esapub/annuals/annual03/ar3\\_earthob.pdf](http://www.esa.int/esapub/annuals/annual03/ar3_earthob.pdf)
- [3] El Fuel Cell Catályst Boletín trimestral, volumen 5, no. 2, invierno 2005
- [4] W. Strauss, S.J. Manwaring, Contaminación del Aire, editorial limusa, 2000
- [5] Asociación Mexicana de la Industria Automotriz [www.amia.com.mx](http://www.amia.com.mx)
- [6] Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) [www.imp.mx/publicaciones/prospectiva](http://www.imp.mx/publicaciones/prospectiva)
- [7] Fuel Cells 2003 [worldwide.fuelcells.org/sp\\_base.cgim](http://worldwide.fuelcells.org/sp_base.cgim)
- [8] Tenden01 Boletín iie, julio- agosto 2003, Ulises Cano Castillo, Leonardo Rejón García Mirna Ojeda Hernández.
- [9] Business Communications Company, Inc <http://www.bccresearch.com/>
- [10] Fundación Javier barrios sierra, AC, Prospectiva: un enfoque estratégico para la planeación del futuro, Segunda Edición, Editorial Trillas.2000
- [11] Andre L. Delbecq, Andrew H. David H. Gustafson, Técnicas Grupales para la planeación, Segunda Edición, Editorial Trillas, 1990
- [12] Fernando García Córdoba, El Cuestionario, Primera Edición, Editorial Limusa, 2002
- [13] Richard A. Johnson, Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Millar y Freund, Quinta Edición, Editorial Prentice Hall Hispano Americana, S.A, 1997