



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE EDUCACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**TEMA:**

**“CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA.”**

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en la especialidad Mantenimiento Automotriz

**AUTORES:** CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO  
QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO

**DIRECTOR:** ING. MARIO GRANJA

Ibarra, 2012

## **ACEPTACIÓN DEL TUTOR**

Luego de haber sido designado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Educación, Ciencia y Tecnología de la Universidad Técnica del Norte de la ciudad de Ibarra, he aceptado con satisfacción participar como director de la tesis del siguiente tema: **“CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA.”** trabajo realizado por los Señores egresados: **CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO Y QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO**, previo a la obtención del título de Ingeniero en la Especialidad de Mantenimiento Automotriz.

A ser testigo presencial, y corresponsable directo del desarrollo del presente trabajo de investigación, que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentado públicamente ante el tribunal que sea designado oportunamente.

Esto es lo que puedo certificar por ser justo y legal.

ING. MARIO GRANJA  
**DIRECTOR DE TESIS**

## **DEDICATORIA**

Aun se encuentra latente el día aquel en que la incertidumbre de que rumbo seguir para continuar mi formación académica y el peso en mis hombros de no decepcionar a mis padres, hermanos y familiares, hoy se ve reflejado el duro esfuerzo de años de estudio y perseverancia es por ello que quiero dedicar este logro a mi querida familia a mi esposa quienes me prestaron su apoyo incondicional e gracias a su esfuerzo y dedicación hicieron posible que culminara mi carrera de Ing. En Mantenimiento Automotriz.

Quiero dedicar de manera muy agradecida este logro a mis padre Zoila y Wilson, y a mi esposa Tania porque son y seguirán siendo pilar fundamental en mis metas y logros futuros.

**CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO**

Este proyecto se lo dedico a mis padres, personas que con mucho esfuerzo, entusiasmo y sacrificio, enfrentaron muchos obstáculos muy duros, sosteniendo siempre viva la esperanza de darme una educación, brindándome su apoyo incondicional ya sea moral o económico ayudándome a culminar con éxito mis estudios superiores.

A mi abuelito, que con su fortaleza y manera de ser, me enseñó que en la vida nada es imposible y que los objetivos hay que alcanzarlos y cumplirlos con satisfacción.

**QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios ya que sin la fuerza espiritual que me dio esto no hubiera sido posible.

De igual manera quiero agradecer a mi familia de manera especial a mis padres Zoila P, Wilson C, hermanos Wilmer C, Jhonny C, y de manera especial a mi esposa Tania C.

También un sincero reconocimiento de gratitud a la UTN por los conocimientos adquiridos y a la empresa E.C industrial por abrirme las puertas a una oportunidad laboral, a mis compañeros de aula, a mis maestros y amigos porque de una u otra forma me apoyaron a lo largo de mi carrera.

**CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO**

Al culminar con mucha satisfacción mis estudios superiores, mi agradecimiento hacia Dios, por permitirme vivir y gozar de buena salud, mostrándome el camino del bien.

El agradecimiento especial a la Universidad Técnica del Norte, a todos los docentes de la facultad de educación ciencia y tecnología, quienes con su sabiduría y enseñanza supieron sembrar en mi cimientos muy fuertes de conocimientos, ayudándome a conocer el camino de la superación y el éxito, preparándome así para alcanzar muchos logros más, llegando siempre al objetivo final.

**QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO**

## CONTENIDOS

ACEPTACIÓN DEL TUTOR.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
CONTENIDO.....	iv
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY.....	xix
CAPITULO I.....	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.4. DELIMITACIÓN.....	3
1.4.1. UNIDADES DE OBSERVACIÓN.....	3
1.4.2. ESPACIAL.....	
1.4.3. TEMPORAL.....	3
1.5. OBJETIVOS.....	4
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.6. JUSTIFICACION.....	4
CAPITULO II.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. ENERGIA.....	5
2.1.1 DEFINICION DE ENERGIA.....	6
2.1.2. CLASIFICACION DE LAS FUENTES DE ENERGIA.....	10
2.1.3RELACION DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ENERGIA.....	11
2.2. ENERGIAS ALTERNATIVAS.....	11
2.2.1 ENERGIAS RENOVABLES.....	12

2.2.1.1. ENERGIA EOLICA.....	12
2.2.1.2. ENERGIA GEOTERMICA.....	14
2.2.1.2.1. USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	14
2.2.1.2.2. VENTAJAS.....	14
2.2.1.2.3. DESVENTAJAS.....	15
2.2.1.3. ENERGIA HIDRAULICA.....	15
2.2.1.3.1. TECNOLOGÍA DE EXPLOTACIÓN.....	16
2.2.1.3.2. VENTAJAS.....	16
2.2.1.3.3. DESVENTAJAS .....	17
2.1.5.4. ENERGIA SOLAR.....	17
2.1.5.4.1. UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR.....	17
2.1.5.4.2. VENTAJAS.....	18
2.1.5.4.3. DESVENTAJAS.....	18
2.1.5.5. HIDRÓGENO.....	19
2.1.5.5.1. INTRODUCCION.....	19
2.1.5.5.2. ANTECEDENTES.....	23
2.1.5.5.3. GENERALIDADES DEL HIDROGENO.....	25
2.1.5.5.4. PROPIEDADES FISICAS DEL HIDROGENO.....	25
2.1.5.5.5. PROPIEDADES QUIMICAS DEL HIDROGENO.....	26
2.1.5.5.6. ESTADO NATURAL Y ABUNDANCIA.....	26
2.1.5.5.7. PRODUCCION DE HIDROGENO.....	28
2.1.5.5.8. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE HIDROGENO.....	32
2.1.5.5.8.1 CONVERSION QUIMICA.....	32
2.1.5.5.9. PROCESOS DE REFORMADO DEL HIDROGENO.....	32
2.1.5.5.9. 1. REFORMADO CON VAPOR DE AGUA.....	33
2.1.5.5.9. 2. OXIDACION PARCIAL.....	35
2.1.5.5.9. 3. REFORMADO AUTOTERMICO.....	36
2.1.5.5.9.4. PROCESOS DE PIROLISIS.....	37
2.1.5.5.9.5. PROCESOS DE GASIFICACION.....	38

2.1.5.5.9.6. TERMÓLISIS.....	42
2.1.5.5.9.6.1. PROCESOS DE CLASE I.....	44
2.1.5.5.9.6.2. PROCESOS DE CLASE II (DESCARBONIZACION Y REDUCCION DE OXIDOS METALICOS	47
2.1.5.5.9.7 ELECTROLISIS.....	50
2.1.5.5.9.7.1 ELECTRÓLISIS A BAJA TEMPERATURA.....	53
2.1.5.5.9.7.2. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA.....	53
2.1.5.5.9.8. FERMENTACION.....	54
2.1.5.5.9.8.1. FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA.....	54
2.1.5.5.9.8.2. FERMENTACIÓN ANAEROBIA.....	55
2.1.5.5.9.9. PROCESOS FOTOLITICOS.....	56
2.1.5.5.9.9.1. PROCESOS FOTOBIOLOGICOS.....	56
2.1.5.5.9.9.2. PROCESOS FOTOELECTROQUIMICOS.....	57
2.1.5.5.9.10. BIOFOTOLISIS.....	57
2.1.5.5.10. FUENTES PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO.....	60
2.1.5.5.11. ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO.....	60
2.1.5.5.11.1. HIDROGENO COMPRIMIDO.....	62
2.1.5.5.11.2. HIDROGENO LÍQUIDO.....	64
2.1.5.5.11.3. HIDRUIROS METÁLICOS.....	66
2.1.5.5.11.4. OTROS MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO.....	67
2.1.5.5.12. TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DE HIDROGENO.....	68
2.1.5.5.13. PILAS DE COMBUSTIBLE.....	71
2.1.5.5.13.1. INTRODUCCIÓN.....	71
2.1.5.5.13.2. FUNCIONAMIENTO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....	72
2.1.5.5.13.3. TENSIÓN DE OPERACIÓN DE LAS PILAS DE ..... COMBUSTIBLE.....	74
2.1.5.5.13.4. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLES.....	76
2.1.5.5.13.4.1. PILAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS (AFC).....	77
	78

2.1.5.5.13.4.2. PILAS DE COMBUSTIBLE DE CARBONATO FUNDIDO (MCFC).....	
2.1.5.5.13.4.3. PILAS DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC).....	80
2.1.5.5.13.4.4. PILAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEMFC).....	82
2.1.5.5.13.4.5. PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC).....	84
2.1.5.5.13.4.6. PILAS DE COMBUSTIBLE DE CONVERSIÓN DIRECTA DE METANOL (DMFC).....	86
2.1.5.5.13.4.7. BENEFICIOS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	87
2.1.5.5.13.4.8. NIVELES DE EFICIENCIA.....	88
2.1.5.5.14. APLICACIONES DEL HIDROGENO.....	89
2.1.5.5.14.1. HIDRÓGENO EN LA INDUSTRIA QUÍMICA.....	89
2.1.5.5.14.2. HIDRÓGENO EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA.....	91
2.1.5.5.14. USOS ENERGÉTICOS DEL HIDRÓGENO.....	92
2.1.5.5.14.1. COMBUSTIÓN DIRECTA.....	93
2.1.5.5.14.2. COMBUSTIBLE DE MOTORES.....	93
2.1.5.5.15. HIDROGENO Y SEGURIDAD.....	94
2.2.2 ENERGIAS NO RENOVABLES.....	97
2.2.2.1. PETROLEO.....	97
2.2.2.1.1. ORIGEN DEL PETRÓLEO.....	97
2.2.2.1.2. TECNOLOGÍA DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS YACIMIENTOS DE PETRÓLEO.....	97
2.2.2.1.3. USOS DEL PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS.....	98
2.2.2.2. GAS NATURAL.....	98
2.2.2.2.1. EXPLOTACIÓN DEL GAS NATURAL.....	99
2.2.2.3. CARBON.....	99
2.2.2.3.1. FORMACIÓN DEL CARBÓN.....	100
2.2.2.3.2. UTILIZACIÓN DEL CARBÓN.....	100

2.2.2.4. ENERGIA NUCLEAR.....	101
2.2.2.4.1. RADIATIVIDAD.....	101
2.2.2.4.2. EXPLOTACIÓN Y USOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR.....	101
2.3. LA ELECTROQUÍMICA.....	102
2.3.1. CÉLULA VOLTAICA.....	103
2.3.2 APLICACIONES INDUSTRIALES.....	105
2.3.3 CONDUCCION METALICA.....	106
2.3.4. CONDUCCION ELECTROLITICA.....	108
2.4 LA ELECTROLISIS.....	111
2.4.1. LEYES DE FARADAY.....	112
2.4.2. ESTEQUIOMETRIA DE LA ELECTROLISIS.....	116
2.4.3. TIPOS DE ELECTROLIZADORES.....	117
2.4.3.1. POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM).....	117
2.4.3.2. ALCALINOS.....	118
2.4.3.3.ÓXIDO SÓLIDO.....	119
2.4.4. FUERZA ELECTROMOTRIZ.....	119
2.4.5. GALVANOTECNIA.....	121
2.4.6. DETERMINACION DEL VOLTAJE MINIMO PARA INICIAR LA ELECTRÓLISIS.....	122
2.4.7. VOLTAJE TOTAL PARA INICIAR LA ELECTROLISIS.....	124
2.4.8. EFICACIA DE POTENCIAL.....	127
2.4.9. EFICACIA DE CORRIENTE.....	127
2.4.10. CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA.....	128
2.5. ELECTRODOS.....	129
2.5.1 ELECTRODOS ELECTROCATALITICOS.....	129
2.5.2. REQUISITOS DE LOS ELCTRODOS ELECTROCATALITICOS.....	131
2.5.2.1. CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA.....	131
2.5.2.2. ESTABILIDAD QUIMICA.....	133
2.6. EL MOTOR DE COMBUSTION INTERNA.....	134

2.6.1. INTRODUCCION.....	134
2.6.2. PARTES FUNDAMENTALES DE UN MOTOR A GASOLINA.....	136
2.6.2.1. LA CULATA.....	137
2.6.2.2. EL BLOQUE.....	137
2.6.3. COMPONENTES DE UN MOTOR DE GASOLINA.....	139
2.6.4. FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR TÍPICO DE GASOLINA DE CUATRO TIEMPOS.....	152
2.6.4.1. CICLOS DE TIEMPO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	152
2.6.4.1.1. PRIMER TIEMPO (ADMISION).....	153
2.6.4.1.2. SEGUNDO TIEMPO (COMPRESION).....	154
2.6.4.1.3. TERCER TIEMPO (EXPLOSION).....	155
2.6.4.1.4. CUARTO TIEMPO (ESCAPE).....	156
2.6.5. CICLO OTTO.....	157
2.6.6. SISTEMA DE ALIMENTACION DEL VEHICULO A CARBURADOR.	158
2.6.6.1. INTRODUCCION.....	158
2.6.6.2. SISTEMAS EMPLEADOS PARA LA ENTRADA DEL CARBURANTE AL CILINDRO.....	159
2.6.6.3. BOMBA DE ALIMENTACION.....	159
2.6.6.4. EL CARBURADOR.....	160
2.6.6.4.1. LA CUBA.....	161
2.6.6.4.2. EL SURTIDOR.....	161
2.6.6.4.3. EL DIFUSOR.....	161
2.6.6.4.4. FUNCIONAMIENTO DEL CARBURADOR.....	163
2.6.6.4.5. BOMBA DE ACELERACIÓN.....	164
2.6.6.4.6. ECONOMIZADOR.....	165
2.6.6.4.6. DISPOSITIVOS DE ARRANQUE EN FRÍO.....	166
2.6.6.4.6.1. CLASIFICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE ARRANQUE EN FRIO.....	166

2.6.6.4.6.1.1. MANUALES.....	166
2.6.6.4.6.1.2. AUTOMÁTICOS.....	168
2.6.7. MEZCLA ESTEQUIOMÉTRICA.....	169
2.6.7.1. RELACIÓN DE MÁXIMA POTENCIA.....	170
2.6.7.2. RENDIMIENTO DEL MOTOR.....	170
CAPITULO III.....	172
3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	172
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	172
3.1.1 BIBLIOGRÁFICA.....	172
3.1.2 TECNOLÓGICO.....	172
3.1.3 PRÁCTICA.....	172
CAPITULO IV.....	173
4. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	173
4.1 RECURSOS.....	174
4.1.1 HUMANOS.....	174
4.1.2 INSTITUCIONALES.....	174
4.1.3 ECONÓMICOS.....	174
CAPÍTULO V.....	176
5.PROPUESTA.....	176
5.1 TITULO DE LA PROPUESTA.....	176
5.2 ANÁLISIS DE LA PROPUESTA.....	176
5.2.1 OBSERVAR Y ANALIZAR.....	176
5.2.2 PLANEAR Y PROYECTAR.....	176
5.2.3 CONSTRUIR Y EJECUTAR.....	176
5.2.4 PRUEBAS.....	177
5.3 TAREAS REQUERIDAS EN LA PROPUESTA.....	177
5.4 “CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA”.....	177

5.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	178
5.4.2. SISTEMAS DEL ELECTROLIZADOR.....	178
5.4.2.1. SISTEMA DE PRODUCCION Y DISTRIBUCION DE HIDROGENO.....	179
5.4.2.1.1. DISEÑO DEL ELECTROLIZADOR.....	179
5.4.2.1.1.1. VENTAJAS.....	179
5.4.2.1.1.2. DESVENTAJAS.....	180
5.4.2. 2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.....	181
5.4.2.2.1. RECIPIENTE CUADRADO HERMÉTICO CON TAPA DE POLIETILENO.....	182
5.4.2.2.1.1. VENTAJAS.....	183
5.4.2. 3. SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROLIZADOR.....	183
5.4.2. FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR.....	184
5.4.3. APLICACIÓN EN MOTORES DE COMBUSTION INTERNA.....	185
5.5 DESARROLLO DEL PROYECTO.....	186
5.5.1. CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROLIZADOR.....	188
5.5.1.1. ARANDELAS DE ACERO INOXIDABLE 316L.....	188
5.5.1.2. CAUCHOS SEPARADORES DE LAS ARANDELAS.....	190
5.5.1.3. PLACAS DE LOS EXTREMOS DE PVC.....	191
5.5.1.4. PERNOS DE ACERO INOXIDABLE.....	193
5.5.1.5. UNIONES PLASTICAS.....	194
5.5.1.6. ENFRIADOR.....	195
5.5.1.7. CONEXIONES ELECTRICAS.....	196
5.5.1.7.1 BATERÍA DE 12 VOLTIOS.....	197
5.5.1.8. DIAGRAMA DEL SISTEMA GENERADOR DE HIDROGENO.....	198
5.5.1.9. ELECTROLITO.....	199
5.5.1.9.1. CONCENTRACIÓN DEL ELECTROLITO.....	199
5.5.1.10. CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	200
5.5.2. MONTAJE DEL GENERADOR EN EL VEHICULO.....	201

5.5.3. PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	203
5.5.4. MODELO MATEMATICO PARA EL ANALISIS DE RESULTADOS..	205
5.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	207
5.6.1 CONCLUSIONES.....	207
5.6.2 RECOMENDACIONES.....	208
5.7. BIBLIOGRAFÍA.....	209
5.8. ANEXOS.....	214

<b>LISTADO DE FIGURAS</b>		Pág
FIGURA 2.1.	CONVERSIÓN DE LAS DIFERENTES FORMAS DE ENERGÍA.....	11
FIGURA 2.2.	ESQUEMA COMPARATIVO DE ABUNDANCIA DEL HIDROGENO.....	28
FIGURA 2.3.	ORIGEN DEL HIDRÓGENO PRODUCIDO EN LA ACTUALIDAD.....	29
FIGURA 2.4.	APLICACIONES ACTUALES DEL HIDRÓGENO.....	30
FIGURA 2.5.	MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	30
FIGURA 2.6.	ESQUEMA DEL PROCESO DE REFORMADO CON VAPOR DE AGUA.....	33
FIGURA 2.7.	PROCESO DE GASIFICACIÓN DE UN COMBUSTIBLE.....	39
FIGURA 2.8 <sup>a</sup> .	ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA GASIFICACIÓN INTEGRADA EN CICLO COMBINADO.....	40
FIGURA 2.8 <sup>b</sup> .	DIAGRAMA DE PLANTA DE UNA INSTALACIÓN DE GASIFICACIÓN INTEGRADA EN CICLO COMBINADO...	41
FIGURA 2.9.	INTEGRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO CON CAPTURA DE CO <sub>2</sub> EN CICLO COMBINADO CON GASIFICACIÓN DE CARBÓN.....	41
FIGURA 2.10.	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CICLO SI.....	45
FIGURA 2.11.	ESQUEMA DEL CICLO UT-3.....	46
FIGURA 2.12.	ESQUEMA DE LOS PROCESOS DE DESCARBONIZACIÓN.....	47
FIGURA 2.13.	COMPARACIÓN ENTRE EL REFORMADOR CONVENCIONAL (PROCESO QUÍMICO) Y EL DE MEMBRANAS (PROCESO TERMOLÍTICO).....	48
FIGURA 2.14.	DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL CICLO ZN/ZNO...	50

FIGURA 2.15.	DEMANDAS ENERGÉTICAS DEL PROCESO ELECTROLÍTICO A PRESIÓN AMBIENTE EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	52
FIGURA 2.16.	ESCENARIO FUTURO PARA APROVECHAR LAS SINERGIAS DE DIVERSOS MICROORGANISMOS EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	57
FIGURA 2.17.	ESQUEMA DE BIOFOTOLISIS INDIRECTA DE HALLENBECK Y BENEMANN (2002).....	59
FIGURA 2.18.	TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO.	59
FIGURA 2.19.	DENSIDAD ENERGÉTICA POR UNIDAD DE PESO, (EL PESO REFIERE AL PROPIO VECTOR, NO AL CONTENEDOR).....	61
FIGURA 2.21.	MÍNIMO CONSUMO DE ENERGÍA PARA COMPRIMIR HIDRÓGENO DESDE 1 ATM Y 20°C. EL CONSUMO SE REFIERE AL PODER CALORÍFICO INFERIOR DEL HIDRÓGENO.....	65
FIGURA 2.22.	REACCIONES QUÍMICAS QUE SE PRODUCEN EN ÁNODO Y CÁTODO.....	72
FIGURA 2.23.	DIAGRAMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE.....	73
FIGURA 2.24.	DIAGRAMA DE REACTANTES Y PRODUCTOS.....	74
FIGURA 2.25.	REACCIÓN EN UNA PILA DE COMBUSTIBLE ALCALINA.....	77
FIGURA 2.26.	REACCIÓN DE UNA PILA DE CARBONATO FUNDIDO.....	79
FIGURA 2.27.	REACCIÓN EN UNA PILA DE COMBUSTIBLE PAFC....	81
FIGURA 2.28.	REACCIÓN DE UN APILA DE COMBUSTIBLE PEM.....	83
FIGURA 2.29.	REACCIÓN DE UN APILA DE COMBUSTIBLE SOFC...	85
FIGURA 2.30.	DIAGRAMA COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	89
FIGURA 2.31.	CORRIENTE ELÉCTRICA Y MOVIMIENTO DE IONES.....	103

FIGURA 2.32.	ELECTRÓLISIS DEL CLORURO DE SODIO FUNDIDO.....	109
FIGURA 2.33.	ELECTRÓLISIS DEL SULFATO DE SODIO ACUOSO.....	111
FIGURA 2.34.	ELECTRÓLISIS DE UNA SOLUCIÓN DE SULFATO CÚPRICO ENTRE ELECTRODOS DE COBRE.....	113
FIGURA 2.35.	REPRESENTACIÓN GRAFICA DE LA LEY DE FARADAY.....	115
FIGURA 2.36.	RELACIÓN DE LAS MASAS DEPOSITADAS EN LOS ELECTRODOS.....	124
FIGURA 2.37.	SISTEMA BÁSICO DE UN ELECTROLIZADOR.....	126
FIGURA 2.39	PARTES PRINCIPALES EN LAS QUE SE DIVIDE UN MOTOR DE GASOLINA.....	136
FIGURA 2.40.	DIFERENTE DISPOSICIÓN DE LOS CILINDROS EN EL BLOQUE DE LOS MOTORES DE GASOLINA: 1.- EN LÍNEA. 2.- EN "V". 3.- PLANO DE CILINDROS OPUESTOS.....	138
FIGURA 2.42.	(A.- CIGÜEÑAL. B.- ÁRBOL DE LEVAS.).....	148
FIGURA 2.43.	CICLOS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR.....	153
FIGURA 2.44.	DIAGRAMA CICLO DE ADMISIÓN.....	153
FIGURA 2.45.	DIAGRAMA CICLO DE COMPRESION.....	154
FIGURA 2.46.	DIAGRAMA CICLO DE EXPLOSIÓN.....	155
FIGURA 2.47.	DIAGRAMA CICLO DE ESCAPE.....	156
FIGURA 2.48.	CICLO DE TRABAJO OTTO.....	157
FIGURA 2.49.	PARTES DE LA BOMBA DE ALIMENTACIÓN DE MEMBRANA.....	160
FIGURA 2.50.	PARTES DE UN CARBURADOR.....	162
FIGURA 2.51	FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA DE ACELERACIÓN.....	164
FIGURA 2.52.	DIAGRAMA DEL ECONOMIZADOR.....	167
FIGURA 5.1	GENERADOR DE HIDROGENO.....	180
FIGURA 5.2	DEPÓSITO DEL ELECTROLITO.....	182

FIGURA 5.3	ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL GENERADOR DE HIDROGENO.....	184
FIGURA 5.4	ELECTROLIZADOR.....	187
FIGURA 5.5.	CORTE DE ARANDELAS DE ACERO INOXIDABLE.....	189
FIGURA 5.6.	ANILLOS DE CAUCHO PARA SEPARAR LAS ARANDELAS DE ACERO.....	191
FIGURA 5.7.	PLACA LATERAL DE PVC.....	193
FIGURA 5.8.	PERNOS DE ACERO INOXIDABLE.....	194
FIGURA 5.9.	UNIONES PLÁSTICAS PARA UNIR LOS DIFERENTES ELEMENTOS.....	194
FIGURA5.10.	ENFRIADOR DEL GAS DE HIDROGENO.....	195
FIGURA5.11.	CONEXIONES ELÉCTRICAS DEL GENERADOR.....	196
FIGURA5.12.	BATERÍA DE 12V PARA ALIMENTAR EL SISTEMA....	198
FIGURA 5.13.	DIAGRAMA DEL SISTEMA GENERADOR DE HIDROGENO.....	199
FIGURA 5.14.	TOMA DE VALORES PARA EL CALCULO MATEMATICO.....	204

## LISTADO DE TABLAS

TABLA 2.1	CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA.....	10
TABLA 2.2.	DENSIDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSOS COMBUSTIBLES.....	22
TABLA 2.3.	CLASES DE TERMÓLISIS.....	43
TABLA 2.4.	EFICIENCIAS Y TEMPERATURAS DE ALGUNOS CICLOS TERMOQUÍMICOS.....	44
TABLA 2.5.	BALANCES TERMODINÁMICOS PARA LA REACCIÓN A DIFERENTES TEMPERATURAS Y 1 ATM.....	52
TABLA 2.6.	EFICIENCIAS VOLUMÉTRICAS Y MÁSICAS DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.....	.62
TABLA 2.7.	PRINCIPALES HIDRUROS PARA EL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.....	67
TABLA 2.8.	RESUMEN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE Y APLICACIONES.....	87
TABLA 2.9.	CONVENCIONES RELATIVAS A LOS TÉRMINOS ÁNODO Y CÁTODO.....	109
TABLA 4.1.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	173
TABLA 4.2	RECURSOS ECONÓMICOS.....	174

## RESUMEN

Este trabajo de investigación nos da la pauta para poder diseñar, construir y adaptar equipos y dispositivos que pueden aprovechar el hidrogeno como fuente de energía limpia y renovable, que remediara en algo la gran contaminación ambiental que producen los automotores y en un futuro trabajar en una economía energética limpia, sustentable y casi inagotable. Este documento contiene la construcción, el montaje en el automóvil y pruebas que verifican el funcionamiento de un generador de hidrogeno, variando parámetros para conseguir una mayor eficiencia en el electrolizador. Para lograr este objetivo se requiere de un conocimiento que comprenda todas las condiciones de funcionamiento y el rendimiento que este aporta al motor de combustión interna así como la notable reducción de la emisiones contaminantes generadas por combustiones incompletas, entre las condiciones más notables para obtener un máxima eficacia en el sistema es definir el tipo de electrolito a usar para la reacción, material y diseño de los electrodos, distancia entre placas y corriente suministrada. Del análisis teórico, se establecen los criterios y requerimientos que necesitamos para obtener las dimensiones, construcción y adaptación del sistema generador de gas de hidrogeno al sistema de alimentación de aire del automóvil. Para alcanzar este proyecto se utilizaron procesos de fabricación y materiales existentes en nuestro medio para lograr la máxima fiabilidad del generador. Además detallamos el proceso de fabricación, adaptación y normas de protección personal de acuerdo a la utilización y aplicación que se le quiere dar al generador de hidrogeno, utilizando como fuente de poder la energía suministrada por la batería del automóvil, a su vez esta es abastecida por el sistema de carga del automóvil. Para evaluar el rendimiento real del generador en condiciones habituales de manejo utilizamos un medio de sentido común y su aplicación.

## SUMMARY

This investigation work gives us the rule to be able to design, to build and teams and devices that can take advantage to adapt a hydrogenate as source of clean and renewable energy that remedied in something the great environmental contamination that produce the railcars and in a future to work in a clean, sustainable and almost inexhaustible energy economy. This document contains the construction, the assembly in the automobile and tests that verify the operation of a generator of a hydrogenate, varying parameters to get a bigger efficiency in the electrolizador. To achieve this objective it is required of a knowledge that get all the operation conditions and the yield that this it contributes to the motor of internal combustion as well as the remarkable reduction of the polluting emissions generated by incomplete combustions, among the most remarkable conditions to obtain a maximum effectiveness in the system is to define the electrolyte type to use for the reaction, material and design of the electrodes, it distances between badges and given current. Of the theoretical analysis, the approaches and requirements that we need to obtain the dimensions, construction and adaptation of the generating system of gas settle down of hydrogenate to the system of feeding of air of the automobile. To reach this project processes of production and existent materials they were used in our means to achieve the maximum reliability of the generator. We also detail the process of production, adaptation and norms of personal protection according to the use and application that is wanted to give to the generator of hydrogenate, using as source of power the energy given by the battery of the automobile, in turn this it is supplied by the system of load of the automobile. To evaluate the real yield of the generator under habitual conditions of handling we use a means of common sense and the application.

## **CAPITULO I**

### **1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Antecedentes.**

La inminente disminución de las reservas del petróleo se presentara en pocos años, si no se encuentra una solución inmediata a una crisis energética y a la dependencia del petróleo esto ocasionara un cambio sin precedentes en el ritmo de vida actual. El agotamiento de los combustibles fósiles hace necesaria la utilización de nuevas tecnologías para contrarrestar los problemas actuales de contaminación ambiental, la cual esta acarreado cambios climáticos y posibles conflictos internacionales provocados por el acceso a los recursos. Entre las tecnologías se destaca la utilización del hidrogeno, el cual esta siendo utilizado para desplazar a los combustibles fósiles para llegar a construir una economía basada en hidrogeno.

Al utilizar hidrogeno ya sea en procesos de combustión en motores otto o para producir energía eléctrica en pilas de combustible tiene gran campo de aplicación en las diferente tareas diarias del humano. La ventaja mas notable del hidrogeno es la abundancia de este elemento en el universo y su combustión solo origina calor y vapor de agua, además de ser un sistema energético renovable, no contaminante y silencioso para el medio ambiente. Entre los inconvenientes se presenta la gran inflamabilidad del gas y la construcción de instalaciones para su almacenaje y producción.

Con la presente investigación buscamos aportar una solución a este gran problema medioambiental, desarrollando la construcción de este sistema de generación de hidrogeno y su aplicación en automóviles a carburador.

El sistema que utilizaremos para la obtención del gas será un electrolizador el cual será accionado por la batería para obtener hidrogeno mediante la electrolisis del agua. Es por las razones descritas que justificamos la construcción del generador de hidrogeno para suministrar este gas al motor de combustión interna del vehículo.

## **1.2. Planteamiento del Problema.**

La humanidad ha logrado maravillas gracias a los combustibles fósiles no renovables (carbón, petróleo y gas natural), pero con un costo medioambiental muy alto. También, el uso acelerado de estos, fundamentalmente por los países desarrollados, que constituyen alrededor de 30 % de la población mundial, ha llevado a la disminución de los rendimientos de las minas y los pozos más asequibles. Por otra parte, la demanda crece debido al incremento de la población mundial y al necesario desarrollo del restante 70 % de la población.

En la última década se ha llevado a cabo un importante esfuerzo investigador en métodos alternativos para la producción de hidrógeno. Estas metodologías, no siempre nuevas, tienen como denominador común un planteamiento en la línea del “Desarrollo sostenible” utilizar el hidrógeno como fuente energética de bajo impacto en el medio ambiente (reducción de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> en el mayor grado posible).

Proporcionando un método viable, eficaz y seguro de generación distribuida de energía facilitará además la adopción de sistemas alternativos de suministro energético para los métodos de automoción y utilización del mismo en la industria del transporte terrestre.

La teoría es sencilla, pero la práctica no lo es tanto. El hidrógeno como combustible tiene inconvenientes prácticos que han impedido su utilización como fuente de energía para los automóviles, salvo en algunos vehículos experimentales. Por ejemplo, su capacidad de combustión natural hace peligrosas las maniobras de almacenamiento de hidrogeno en tanques reservorios sin las medidas de precaución necesarias.

Además, el hidrógeno en estado natural es gas y para poder disponer de suficiente reserva, para garantizar la misma autonomía que los coches convencionales, sería imprescindible recurrir al hidrógeno líquido esto debido a que su distribución a vehículos es más segura y factible al momento de recargar el tanque de almacenamiento.

### **1.3. Formulación del Problema.**

¿Cómo generar hidrogeno para un motor a carburador y como implementarlo en un prototipo?.

### **1.4. Delimitación.**

#### **1.4.1. Unidades de Observación.**

Motor de combustión interna alimentado por carburador.

#### **1.4.2. Espacial.**

Ibarra, talleres de de la UTN.

#### **1.4.3. Temporal.**

Este proyecto se ha llevado a cabo desde Marzo del 2011 hasta Enero del 2012.

## **1.5. Objetivos.**

### **1.5.1 Objetivo General**

Construir y adaptar un sistema generador de gas de hidrogeno para suministrarlo a un motor de combustión interna a carburador.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un estudio de los métodos de generación de H<sub>2</sub> para usarse como combustible para un motor a carburador.
- Adaptar un método de generación de hidrogeno para un motor a carburador.
- Realizar pruebas de funcionamiento.

## **1.6. Justificación.**

El empleo de motores de combustión interna, ya consolidados, permite que la energía calórica del hidrógeno pueda transformarse directamente en energía de propulsión mecánica.

El hidrógeno es óptimo para la utilización como combustible para autos ya que se constituye como un excelente combustible alternativo que, a la vez, tiene el potencial suficiente para ofrecer las soluciones limpias que se precisan, todo esto debido a que el hidrógeno prácticamente no genera emisiones nocivas, y por eso se pone en marcha este proyecto con la convicción de reducir la contaminación medioambiental y reducir el consumo de los limitados recursos combustibles fósiles.

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ENERGIA

Al mirar a nuestro alrededor se observa que las plantas crecen, los animales se trasladan y que las máquinas y herramientas realizan las más variadas tareas. Todas estas actividades tienen en común que precisan del concurso de la energía.<sup>1</sup>

La energía es una propiedad asociada a los objetos y sustancias y se manifiesta en las transformaciones que ocurren en la naturaleza. La energía se manifiesta en los cambios físicos, por ejemplo, al elevar un objeto, transportarlo, deformarlo o calentarlo.

La energía está presente también en los cambios químicos, como al quemar un trozo de madera o en la descomposición de agua mediante la corriente eléctrica.

La energía es la fuerza vital de nuestra sociedad. De ella dependen la iluminación de interiores y exteriores, el calentamiento y refrigeración de nuestras casas, el transporte de personas y mercancías, la obtención de alimento y su preparación, el funcionamiento de las fábricas, etc. Todas estas actividades tienen en común que precisan del concurso de la energía ya que es una propiedad asociada a los objetos y sustancias y se manifiesta en las transformaciones que ocurren en la naturaleza.

---

<sup>1</sup> [http://newton.cnice.mec.es/materiales\\_didacticos/energia/index.html](http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/index.html)

Hace poco más de un siglo las principales fuentes de energía eran la fuerza de los animales y la de los hombres y el calor obtenido al quemar la madera. El ingenio humano también había desarrollado algunas máquinas con las que aprovechaba la fuerza hidráulica para moler los cereales o preparar el hierro en las herrerías, o la fuerza del viento en los barcos de vela o los molinos de viento.

Pero la gran revolución vino con la máquina de vapor, y desde entonces, el gran desarrollo de la industria y la tecnología han cambiado, drásticamente, las fuentes de energía que mueven la moderna sociedad.

Ahora, el desarrollo de un país está ligado a un creciente consumo de energía de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural.

De la misma manera los seres humanos son también mecanismos que transforman en energía los alimentos que ingieren para utilizarla en su propio beneficio al realizar actividades diarias; de ahí la importancia de concluir que la energía está asociada al movimiento.

### **2.1.1 DEFINICION DE ENERGIA.**

La definición de energía<sup>2</sup> está relacionada con la capacidad de poner en movimiento o transformar algo. En el ámbito económico y tecnológico, la energía hace referencia a un recurso natural y los elementos asociados que permiten hacer un uso industrial del mismo.

Energía Para la física, la energía es una magnitud abstracta que está ligada al estado dinámico de un sistema cerrado y que permanece invariable con el tiempo. Se trata de una abstracción que se le asigna al estado de un sistema físico. Debido a diversas propiedades (composición química, masa,

---

<sup>2</sup> <http://definicion.de/energia/>

temperatura, etc.), todos los cuerpos poseen energía. Pueden detallarse diversos tipos de energía según el campo de estudio. La energía mecánica, por ejemplo, es la combinación de la energía cinética (generada por el movimiento) y la energía potencial (relacionada a la posición de un cuerpo dentro de un campo de fuerzas).

Entendida como un recurso natural, la energía nunca es un bien en sí misma, sino que es que un bien intermedio que permite satisfacer otras necesidades en la producción de bienes y servicios.

La energía también puede clasificarse según fuente. Se llama energía no renovable a aquella que proviene de fuentes agotables, como la procedente del petróleo, el carbón o el gas natural. En cambio, la energía renovable es virtualmente infinita, como la eólica (generada por la acción del viento) y la solar.

La explotación económica o industrial de la energía comprende diversos procesos, que varían de acuerdo a la fuente empleada. Puede mencionarse, por ejemplo, la extracción de la materia prima (como el petróleo obtenido de los pozos), su procesamiento (en el caso del petróleo, su refinamiento) y su transformación en energía (por combustión, etc.).

Es por ello que en todos los actos cotidianos se emplea algo de fuerza. Al levantarnos, peinarnos, caminar, correr, jugar, trabajar, etc. Siempre se necesita de fuerza para poder desenvolvemos con facilidad, según las exigencias del medio ambiente que nos rodee. La capacidad que posee una persona, o un objeto, para ejercer fuerza y realizar cualquier trabajo, se denomina: **Energía.**

En la ecuación 2.1 se denota a la energía como la capacidad de producir un trabajo en potencia o en acto expresada en N/m. Por eso decimos que alguien tiene mucha energía cuando grandes actividades durante el día como: trabajar, estudiar o practicar deportes. Entonces se puede deducir que trabajo es la resultante de una fuerza por su distancia de acción.

$$W=F*d \quad (2.1)$$

Para entender la importancia que hoy día tiene la energía, basta con remontarnos un poco a la historia y hacer un breve recuento de las actividades del hombre y su evolución. En los primeros tiempos el hombre utilizaba únicamente sus fuerzas y objetos rudimentarios que encontraba en su camino esto con el fin solo de alimentarse, divertirse y comunicarse con sus semejantes.

Esto significa que utilizaba su propia energía física, en la caza, pesca, recolección de frutas silvestres, confección de sus rudimentarios vestidos y viviendas y así un sin número de actividades. Entonces si sabemos que la unidad de medida de la energía es la misma que la unidad de medida del trabajo es decir el [J]. Podemos deducir que:

$$J=kg \text{ m/s}^2 * m = kgm^2/s^2 \quad (2.2)$$

Si decimos que la velocidad es igual a distancia sobre tiempo expresada en m/s se resume que:

$$V=d/t. \quad (2.3)$$

Si asociamos a  $V=m/s$ , entonces  $J=kg.V^2$ . Fue Albert Einstein quien descubrió que la velocidad no es sino la de la luz u dedujo su triunfal fórmula<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> ACOSTA German, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 watos con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN ,Ecuador, Pág. 6

$$E=mc^2 \quad (2.4)$$

**Donde:**

<b>E=</b> Energía	[J]
<b>m=</b> masa	[kg]
<b>c=</b> constante de velocidad de la luz en ( $3 \times 10^8$ )	[m/s]

Esta fórmula nos revela que la energía y la materia son intercambiables, pero para que se cumpla esto se debe realizar a la velocidad de la luz. En el caso de un motor de ciclo OTTO el resultado de la liberación de energía es producido por la combustión de un combustible mezclado con oxígeno mientras que el motor se convierte en un mecanismo para producir el trabajo necesario que permita poner en marcha el vehículo.

En la tabla 2.1 se puede apreciar las diferentes formas de energía, su origen, producción y aplicaciones. Las energías pueden transformarse en otra cumpliendo los siguientes principios termodinámicos:

“La energía no se crea ni se destruye; sólo se transforma”. De este modo, la cantidad de energía inicial es igual a la final.

“La energía se degrada continuamente hacia una forma de energía de menor calidad (energía térmica)”. Dicho de otro modo, ninguna transformación se realiza con un 100% de rendimiento, ya que siempre se producen unas pérdidas de energía térmica no recuperable.

El rendimiento de un sistema energético es la relación entre la energía obtenida y la que suministramos al sistema multiplicado por el 100% de la energía que debería resultar de lo entregado al sistema.

## 2.1.2. CLASIFICACION DE LAS FUENTES DE ENERGIA.

<b>FORMA</b>	<b>ORIGEN</b>	<b>PRODUCCION</b>	<b>APLICACIÓN</b>
➤ Mecánica	➤ Energía potencial	➤ Hidráulica ➤ Eólica	➤ Automotriz ➤ Industria Eléctrica
➤ Química	➤ Elementos químicos ➤ Reacciones ➤ Seres vivos	➤ Combustibles fósiles	➤ Maquinas térmicas OTTO. ➤ Industria alimenticia
➤ Gravitacional	➤ Planetas	➤ Hidráulico	➤ Maquinaria
➤ Magnética	➤ Planetas, imanes	➤ Electricidad	➤ Electromagnetismo
➤ Térmica	➤ Combustión ➤ Fricción entre cuerpos	➤ Electricidad ➤ Térmica ➤ Solar	➤ Aplicación en el hogar calefacción. ➤ Preparación de alimentos
➤ Eléctrica	➤ Electricidad ➤ Pilas ➤ Baterías ➤ Magnetismo	➤ Centrales hidráulicas ➤ Centrales térmicas ➤ Pilas de combustible	➤ Motores ➤ Iluminación ➤ Comodidad ➤ Aparatos Electrónicos
➤ Radiante	➤ Electricidad ➤ Sol	➤ Química ➤ Solar	➤ Iluminación
➤ Nuclear	➤ Átomo	➤ Centrales Nucleares	➤ Producción de Energía eléctrica ➤ Centrales Nucleares

Tabla 2.1 Clasificación de los diferentes fuentes de energía<sup>4</sup>

<sup>4</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 watos con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 8

### 2.1.3 RELACION DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ENERGIA

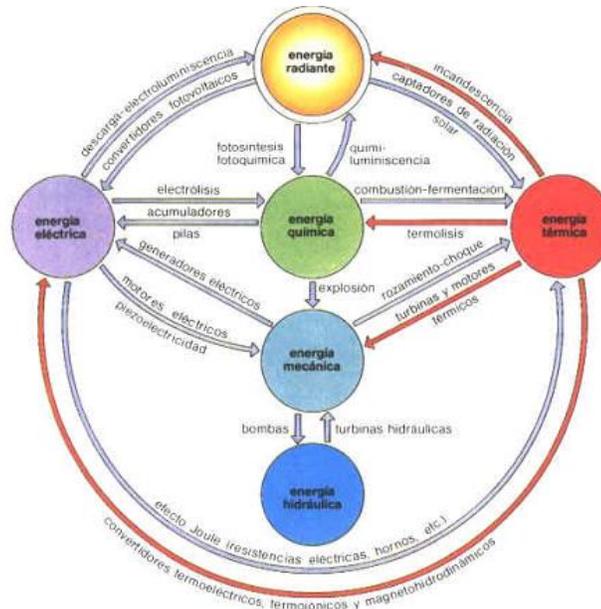


Figura 2.1. Conversión de las diferentes formas de energía<sup>5</sup>

## 2.2 ENERGIA ALTERNATIVAS

En la Figura 2.1 se analiza la relación que existe entre los diferentes tipos de energía y los procesos que se requieren para obtener cada una de ellas ahora es importante clasificarlas de acuerdo a su estado de abundancia y regeneración en la tierra. Las fuentes de energía se clasifican en renovables y no renovables y no renovables.

Las energías no renovables son el petróleo, el gas natural y el carbón. Se las llama no renovables porque cuando se extrae estos combustibles de la tierra, no se los vuelve a reponer y su disponibilidad es cada vez menor. Se forman por la descomposición producida durante millones de años de

<sup>5</sup> <http://html.rincondelvago.com/evolucion-y-tipos-de-energia.html>

material orgánico en el interior de la tierra. La energía nuclear es también una fuente no renovable de energía.

Las fuentes de energía renovables, en cambio, provienen de fuentes inagotables, principalmente el Sol y la Tierra seguirán proveyendonos de energía durante algunos millones de años más y con el los vientos, la fotosíntesis de las plantas, el ciclo de agua, las fuerzas del mar y el calor al interior de la tierra.

## **2.2.1 ENERGÍAS RENOVABLES.**

Las energías renovables<sup>6</sup> son energías limpias que contribuyen a cuidar el medio ambiente. Frente a los efectos contaminantes y el agotamiento de los combustibles fósiles, las energías renovables son ya una alternativa.

### **2.2.1.1. ENERGIA EOLICA.**

La fuerza del viento ha sido aprovechada por los seres humanos desde las primeras civilizaciones para sus necesidades de fuerza y transporte<sup>7</sup>.

La producción mundial de energía eléctrica con aerogeneradores ha crecido de manera dramática en las últimas décadas, apoyada por políticas de fomento de energías renovables, disminución de la dependencia de los combustibles fósiles y creación de puestos de trabajo. La capacidad instalada ha crecido diez veces en la última década hasta llegar en el año 2002 a cerca de 28300 MW. Las posibilidades de aplicación de los sistemas de viento en el Ecuador en zonas remotas se limitan a los sistemas de menos de 50 kW y en fincas o casas a los de menos de 3 kW.

---

<sup>6</sup> <http://erenovable.com/energias-renovables/>

<sup>7</sup> <http://www.enerpro.com.ec/Recursos/Articulos/ResumenEnergiasRenovables.pdf>

La energía eólica es la energía cuyo origen proviene del movimiento de masa de aire es decir del viento. En la tierra el movimiento de las masas de aire se deben principalmente a la diferencia de presiones existentes en distintos lugares de esta, moviéndose de alta a baja presión, este tipo de viento se llama viento geoestrófico.

Para la generación de energía eléctrica a partir de la energía del viento a nosotros nos interesa mucho mas el origen de los vientos en zonas más específicas del planeta, estos vientos son los llamados vientos locales, entre estos están las brisas marinas que son debidos a la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra.

También están los llamados vientos de montaña que se producen por el calentamiento de las montañas y esto afecta en la densidad del aire y hace que el viento suba por la ladera de la montaña o baje por esta dependiendo si es de noche o de día. La energía eólica es aprovechada por nosotros básicamente por un sistema de un rotor que gira a medida que pasa viento por este.

La potencia del viento depende principalmente de 3 factores:

1. Área por donde pasa el viento (rotor)
2. Densidad del aire
3. Velocidad del viento

Para calcular la formula de potencia del viento se debe considerar el flujo másico del viento que va dado por:

$\rho$  : Densidad del viento

$A$  : Área por donde pasa el viento

$V$  : Velocidad del viento

Entonces el flujo másico viene dado por la siguiente expresión:

$$M = \rho AV \quad (2.5)$$

Entonces la potencia debido a la energía cinética esta dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (2.6)$$

### **2.2.1.2. ENERGIA GEOTERMICA**

La energía geotérmica<sup>8</sup> es aquella energía que puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. El calor del interior de la Tierra se debe a varios factores, entre los que caben destacar el gradiente geotérmico, el calor radiogénico, etc. Geotérmico viene del griego geo, "Tierra", y thermos, "calor"; literalmente "calor de la Tierra".

#### **2.2.1.2.1. USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA**

- Balnearios: Aguas termales que tienen aplicaciones para la salud.
- Calefacción y agua caliente.
- Electricidad.
- Extracción de minerales: Se obtienen de los manantiales azufre, sal común, amoníaco, metano y ácido sulfhídrico.
- Agricultura y acuicultura: Para invernaderos y criaderos de peces.

#### **2.2.1.2.2. VENTAJAS DE LA ENERGIA GEOTERMICA.**

- Es una fuente que evitaría la dependencia energética del exterior.

---

<sup>8</sup> RODRÍGUEZ Javier, (2009), "Control de emisiones y contaminantes", UNES, Pág. 15

- Los residuos que produce son mínimos y ocasionan menor impacto ambiental que los originados por el petróleo, carbón...
- Sistema de gran ahorro, tanto económico como energético<sup>4</sup>. Ausencia de ruidos exteriores
- Los recursos geotérmicos son mayores que los recursos de carbón, petróleo, gas natural y uranio combinados.

#### **2.2.1.2.3. DESVENTAJAS DE LA ENERGIA GEOTERMICA.**

- Emisión de ácido sulfhídrico que se detecta por su olor a huevo podrido, pero que en grandes cantidades no se percibe y es letal.
- Emisión de CO<sub>2</sub>, con aumento de efecto invernadero.
- Contaminación de aguas próximas con sustancias como arsénico, amoníaco, y deterioro del paisaje.
- Contaminación térmica.
- No se puede transportar.

#### **2.2.1.3. ENERGIA HIDRAULICA**

Hidráulica<sup>9</sup> o energía hídrica a aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente de ríos, saltos de agua o mareas. Es un tipo de energía verde cuando su impacto ambiental es mínimo y usa la fuerza hídrica sin represarla, en caso contrario es considerada sólo una forma de energía renovable.

Se puede transformar a muy diferentes escalas, existiendo desde hace siglos pequeñas explotaciones en las que la corriente de un río mueve un rotor de palas y genera un movimiento aplicado, por ejemplo, en molinos rurales. Sin embargo, la utilización más significativa la constituyen las centrales hidroeléctricas de represas, aunque estas últimas no son

---

<sup>9</sup> RODRÍGUEZ Javier, (2009), "Control de emisiones y contaminantes", UNES, Pág.10

consideradas formas de energía verde por el alto impacto ambiental que producen.

#### **2.2.1.3.1. TECNOLOGÍA DE EXPLOTACIÓN**

El aprovechamiento de la energía hidráulica se lleva a cabo en las centrales hidroeléctricas, normalmente situadas en los embalses. Una central hidroeléctrica consta de las siguientes partes:

1. **Embalse.-** Lugar donde se acumula el agua del río. Además regula el caudal del río.
2. **Presa.-** Muro grueso cuya función es retener el agua del embalse:
  - Aliviaderos: Salidas de agua que sirven para regular el volumen de agua almacenada.
3. **Tubería forzada:** Enlaza el embalse con la sala de máquinas, y soporta gran presión.
  - Canal de descarga: Canal por el que se redistribuye el agua al río.
4. **Central o sala de máquinas.-** Edificio donde se sitúan:
  - Turbinas: Máquinas en las que se transforma energía cinética del agua en energía de rotación.
5. **Generador-alternador:** Dispositivo unido a la turbina que convierte la energía de rotación en energía eléctrica.
6. **Transformador:** Transforma la energía que se produce en el generador en una corriente de baja intensidad, para transportarla a largas distancias de la central.

#### **2.2.1.3.2. VENTAJAS DE LA ENERGIA HIDRAULICA.**

Las ventajas de la energía hidráulica son que es renovable, no contaminante y que produce mucha energía.

### **2.2.1.3.3. DESVENTAJAS DE LA ENERGIA HIDRAULICA.**

Los inconvenientes de la energía hidráulica son que es muy caro construir sus infraestructuras, depende de los factores climáticos, supone un impacto medioambiental ya que se inundan valles.

### **2.1.5.4. ENERGIA SOLAR**

La Energía solar<sup>10</sup> es la que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del Sol, donde ha sido generada por un proceso de fusión nuclear. El aprovechamiento de la energía solar se puede realizar de dos formas: por conversión térmica de alta temperatura (sistema fototérmico) y por conversión fotovoltaica (sistema fotovoltaico).

La conversión térmica de alta temperatura consiste en transformar la energía solar en energía térmica almacenada en un fluido. Para calentar el líquido se emplean unos dispositivos llamados colectores. La conversión fotovoltaica consiste en la transformación directa de la energía luminosa en energía eléctrica. Se utilizan para ello unas placas solares formadas por células fotovoltaicas (de silicio o de germanio).

#### **2.1.5.4.1. UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR**

➤ **Utilización directa:** Se realiza mediante unas técnicas como acristalamientos, protecciones, receptores, etc.

➤ **Transformación en calor:**

1. Conversión a baja temperatura (hasta 90°C).- Se utilizan los paneles solares que captan la energía del sol con una superficie oscura, y se utiliza para calentar agua.

---

<sup>10</sup> [http://newton.cnice.mec.es/materiales\\_didacticos/energia/solar.htm](http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/solar.htm)

2. Conversión a medias temperaturas (90°-200°C).- Se logra concentrando dicha energía por medio de lupas y espejos, llamados concentradores solares.
3. Conversión a altas temperaturas (+200°C).- Se utilizan grandes espejos, hilitastos orientables, que captan la luz. Esta energía calienta las calderas produciendo vapor que mueve una turbina y así produce electricidad.

- **Transformación en electricidad:** Transforma la energía solar en eléctrica a través de células fotovoltaicas (formadas por silicio). Estas células pueden funcionar tanto en días nublados como despejados.

#### **2.1.5.4.2. VENTAJAS DE LA ENERGIA SOLAR.**

- Es una fuente de energía inagotable.
- Escaso impacto ambiental.
- No produce residuos perjudiciales para el medio ambiente.
- Distribuida por todo el mundo, y con más intensidad en las zonas con mayor deuda externa (tropicales).
- No tiene costes, una vez instalada.
- No hay dependencia de las compañías suministradoras.
- El mantenimiento es sencillo.

#### **2.1.5.4.3. DESVENTAJAS DE LA ENERGIA SOLAR.**

- Los paneles fotovoltaicos contienen agentes químicos peligrosos.
- Puede afectar a los ecosistemas por la extensión ocupada por los paneles.
- Impacto visual negativo.

## 2.1.5.5. HIDRÓGENO

### 2.1.5.5.1. INTRODUCCION

El hidrógeno<sup>11</sup> es un combustible en el que se están depositando muchas esperanzas y al que se está dedicando un gran esfuerzo investigador. Sin embargo, el hidrógeno no es un combustible más. Por una parte tiene unas propiedades físicas y químicas bastante diferenciadas de los demás combustibles; por otra, no es un recurso natural, es decir, no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, sino que se encuentra combinado en otros compuestos, como los hidrocarburos o el agua.

El hecho de que el hidrógeno no se encuentre de manera aislada en la naturaleza obliga a tener que obtenerlo por distintos procedimientos, siendo éste un cuello de botella para su uso masivo en el futuro, y uno de los campos en los que más recursos se están invirtiendo, pues muchas de las ventajas de su uso pueden quedar anuladas en función del procedimiento empleado en su obtención, una vez producido, sus peculiares propiedades físicas y químicas dificultan en gran medida las tareas de manipulación, especialmente las relacionadas con su almacenamiento, transporte y distribución.

La economía del hidrogeno se basa en las siguientes razones, las cuales son muy poderosas:

**1.- Razones de eficiencia energética.** La energía química del hidrógeno puede ser convertida de forma directa en energía eléctrica, sin el paso intermedio del accionamiento térmico de un ciclo de potencia. Esta conversión directa se lleva a cabo en las llamadas pilas de combustible,

---

<sup>11</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

capaces de convertir por medios electroquímicos la energía química del hidrógeno en energía eléctrica. La supresión del ciclo termodinámico intermedio permite superar las limitaciones impuestas por el rendimiento de Carnot, alcanzándose así elevados rendimientos energéticos.

La energía eléctrica producida puede emplearse tanto con fines estacionarios (electricidad como energía final para consumidores industriales, domésticos y de servicios) como con fines de transporte, mediante su uso en vehículos eléctricos. Incluso se puede emplear en aplicaciones portátiles en las que la típica batería sería reemplazada por un cartucho de hidrógeno o metanol y una pila de combustible.

**2.- Razones de dependencia energética.** En la actualidad hay una fuerte dependencia de los combustibles fósiles, de los que quedan cantidades finitas. Así, las reservas de petróleo se estiman en 40 años, las de gas natural en 60 y las de carbón en 200 años. Esta limitación de reservas va unida en muchas ocasiones a una elevada concentración de los yacimientos (muy elevada en el caso del petróleo, menor en el del gas natural y reducida en el caso del carbón), lo que facilita presiones políticas por parte de los países productores.

Estas dos circunstancias obligan a volver la vista hacia otras fuentes energéticas: renovables y nuclear. Si bien el hidrógeno no es una fuente energética sí facilita el transporte y almacenamiento de ellas, y puede ser producido a partir de fuentes renovables y nucleares, por lo que puede jugar un papel importante en cuanto a la reducción de la dependencia energética, que también se ve favorecida por el elevado rendimiento en la conversión.

**3.-Razones medioambientales.** Aunque de manera indirecta las razones anteriores repercuten de manera favorable en el medio ambiente, existe una

ventaja adicional para el uso con fines energéticos del hidrógeno: su combustión sólo libera vapor de agua, libre de CO<sub>2</sub>. Esto supone que si en el proceso de producción no se ha emitido CO<sub>2</sub> (habiendo varias alternativas para ello), la producción de electricidad<sup>2</sup> a partir de hidrógeno está libre de emisiones de CO<sub>2</sub>, al igual que la electricidad producida por vía renovable y nuclear.

Sin embargo, la ventaja de producir hidrógeno a partir de energía renovable es que permite regularizar la frecuente aleatoriedad de la producción eléctrica con renovables, pudiendo además destinar la energía eléctrica a aplicaciones de transporte y portátiles, siendo las primeras un importante contribuyente a las emisiones de CO<sub>2</sub>. Todo lo anterior justifica la apuesta tanto de Estados Unidos como de la Unión Europea por el paso de la actual economía energética basada en combustibles fósiles a una economía energética basada en el hidrógeno.

Como ya se ha dicho, el hidrógeno no es un recurso sino un vector energético, es decir, un portador de energía. Esto supone que se ha de producir a partir de fuentes energéticas, conteniendo una cierta cantidad de energía una vez producido

En la tabla 2.2 se aprecia que el hidrógeno es capaz de almacenar aproximadamente el triple de energía por unidad de masa que los demás, pero al ser tan ligero (89,3 g/Nm<sup>3</sup>) es el que menor energía almacena por unidad de volumen (aproximadamente la tercera parte del gas natural, que se sirve canalizado).

Este hecho implica ciertos problemas en el transporte, almacenamiento y distribución del hidrógeno, comparado con la gasolina o el butano,

especialmente en aplicaciones en las que el hidrógeno deba ser desplazado por el sistema (aplicaciones de transporte y portátiles).

	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Energía Almacenada		
		Volumen [kWh/m <sup>3</sup> ]	Volumen [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	Masa [kWh/kg]
H2liquido (1 bar;-252.8°C )	70.71	2.375	3	33.59
H2gas (300 bar;25°C)	20.55	690		
H2gas (700 bar;25°C)	47.69	1.611		
Gas natural (1 bar;25°C)	0.65	9.1	10	13.93
Butano no liquido(25°C)	550	7.000	33	12.73
Gasolina	750	9.270	-	12.36

Tabla 2.2. Densidades energéticas de diversos combustibles<sup>12</sup>

En tanto que vector energético, el hidrógeno precisa un elemento de conversión final, que puede ser directo o indirecto. Las pilas de combustible son un sistema directo de conversión de energía, es decir, transforman la energía química del hidrógeno en energía eléctrica; los motores de combustión interna (alternativos o turbinas de gas) transforman la energía química del hidrógeno en energía mecánica, la cual puede ser empleada para mover un alternador o como propulsión para un sistema de transporte.

Aunque los problemas técnicos inherentes a la combustión de hidrógeno son menores que los que se presentan en las pilas de combustible, hoy día el impulso y el apoyo gubernamental a éstas últimas es mucho mayor que a los primeros, estando justificado por su mayor eficiencia y, posiblemente, por las presiones de los asesores científicos a los organismos gubernamentales.

<sup>12</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

Las pilas de combustible presentan elementos en común tanto con las baterías como con los motores de combustión interna. Así, las pilas de combustible se asemejan a las baterías en que es la electroquímica la que rige el comportamiento de ambas, produciendo así los dos dispositivos corriente continua.

Por el contrario, las pilas de combustible se diferencian de las baterías en que no almacenan energía, sino que transforman la energía química de un flujo de hidrogeno en electricidad de modo continuo, cesando la producción eléctrica al cesar el suministro de hidrógeno.

#### **2.1.5.5.2. ANTECEDENTES DEL HIDROGENO.**

A pesar de que el Hidrógeno fue descubierto desde el siglo XVII, su utilización a nivel industrial no ocurrió hasta ya entrado el siglo XX. Esto es posible explicarle debido a factores como su no existencia en forma simple en la tierra y a lo tardío de la aparición de tecnologías que permitiesen su obtención de manera eficiente y económica, o incluso al desconocimiento sobre sus posibles aplicaciones.<sup>13</sup> Tal situación dificulta en cierta manera el poder hablar de antecedentes, sí es que se pretende hacerlo desde una perspectiva histórica funcional.

Resultaría más aplicable al caso utilizar u ordenar cronológicamente los principales eventos relacionados con su descubrimiento, primeros intentos de aplicación y su aparición en la sociedad moderna.

1766            Es identificado como un nuevo elemento por el científico británico **Henry Cavendish** después de haberle obtenido a

---

<sup>13</sup> CARRASCO Carlos , RODRÍGUEZ Jorge, (2010), *“El hidrógeno Fuente de energía renovable”* , Universidad Nacional Autónoma De México, Pág. 3

partir de una reacción utilizando metal de zinc y el ácido hidrolórico

- 1783 El químico francés **Antoine Lavoisier** dio al hidrógeno su nombre, que fue sacado de las palabras griegas - "hydro" "y genes", queriendo decir "el agua" " y nacer de. "
- 1783 **Jacques Alexander Cesar Charles**, un físico francés, realiza el primer vuelo de globo de hidrógeno.
- 1800 Los científicos ingleses **Guillermo Nicholson y Antonio Carlisle** descubren la electrolisis, aunque se le atribuye a M. faraday en 1833.
- 1838 El químico suizo **Christian Friedrich Schoenbein** descubre el efecto de pila de combustible por la combinación de hidrógeno y oxígeno para producir agua y corriente eléctrica.
- 1889 **Ludwig Mond y C. Langer** construyen el primer dispositivo fuel-cell usando de combustible aire y el gas de hulla industrial.
- 1900 **Ferdinand von Zeppelin** crea el primer dirigible, el cual era elevado mediante el uso de hidrógeno.
- 1920 **Rudolf Erren**, ingeniero alemán, convierte los motores de combustión interna de camiones a motores de combustión por hidrogeno
- 1952 Se detona la "**Ivy Mike**", primera bomba de Hidrógeno.
- 1959 **Francis Bacon T.** de la Universidad de Cambridge en Inglaterra construyó la primera batería de tecnología fuel cell que utilizaba hidrogeno.

### **2.1.5.5.3. GENERALIDADES DEL HIDROGENO**

El Hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica. En condiciones normales es un gas incoloro, inodoro e insípido, compuesto de moléculas diatómicas (H<sub>2</sub>). El átomo de hidrógeno, consta de un núcleo de unidad de carga positiva y un solo electrón.

Tiene número atómico 1 y peso atómico de 1.00797. Es uno de los constituyentes principales del agua y de toda la materia orgánica, y está distribuido de manera amplia no sólo en la Tierra sino en todo el universo.

Existen 3 isótopos del hidrógeno: el protio, de masa 1, que se encuentra en más del 99.98% del elemento natural; el deuterio, de masa 2, que se encuentra en la naturaleza aproximadamente en un 0.02%, y el tritio, de masa 3, que aparece en pequeñas cantidades en la naturaleza, pero que puede producirse artificialmente por medio de varias reacciones nucleares.<sup>14</sup>

### **2.1.5.5.4. PROPIEDADES FISICAS DEL HIDROGENO**

- La molécula de hidrógeno, en condiciones usuales, es un gas incoloro, inodoro e insípido.
- Es la molécula más pequeña que se conoce.
- Su densidad es 0.089Kg./m<sup>3</sup>.
- Tiene gran rapidez de transición de las moléculas a la fase gaseosa de ahí la ausencia casi total del hidrógeno en la atmósfera terrestre.
- Gran facilidad de difusión y fusión.
- Buena conductividad calorífica.

---

<sup>14</sup> CARRASCO Carlos , RODRÍGUEZ Jorge, (2010), *"El hidrógeno Fuente de energía renovable"* , Universidad Nacional Autónoma De México, Pág.4

- Punto de fusión es de 14025 K. y Ebullición es de 20268 K

#### **2.1.5.5.5. PROPIEDADES QUIMICAS DEL HIDROGENO.**

- Su peso atómico es de 1.00974 uma.
- Su estado de oxidación son +1, -1.
- Para completar su nivel de valencia captura un electrón a fin de producir el anión  $H^-$ .
- Las combinaciones con metales alcalinos y alcalinotérreos excepto Be y Mg., son esencialmente enlaces iónicos.
- Con los no metales son enlaces del tipo covalente.
- El  $H^+$ , salvo en el estado gaseoso, en la química siempre se encuentra asociado por ejemplo:  $H_3O^+$  (catión oxonio).
- Tiene una estructura cristalina hexagonal.
- Soluble en agua y la solubilidad no es afectada por la temperatura.
- El hidrógeno reacciona con la mayoría de los elementos

#### **2.1.5.5.6. ESTADO NATURAL Y ABUNDANCIA**

El hidrógeno en estado libre sólo se encuentra en muy pequeñas cantidades en la atmósfera, aunque se estima que el 90% del universo visible esta compuesto de hidrógeno. En combinación con otros elementos se encuentra ampliamente distribuido en la Tierra, en donde el compuesto más abundante e importante del hidrógeno es el agua,  $H_2O$ .<sup>15</sup>

El hidrógeno se halla en todos los componentes de la materia viva y de muchos minerales. También es parte esencial de todos los hidrocarburos y

---

<sup>15</sup> <http://www.monografias.com/trabajos34/hidrogeno/hidrogeno.shtml#estado>

de una gran variedad de otras sustancias orgánicas. Todos los ácidos contienen hidrógeno; una de las características que define a los ácidos es su disociación en una disolución, produciendo iones hidrógeno (véase Ácidos y bases).

El hidrógeno es con mucho el elemento más abundante en el universo, pero es muy escaso en la Tierra. En términos de masa, este constituye sólo alrededor del 0.9% de la corteza terrestre, lo que lo coloca muy por abajo en la lista de los elementos abundantes.

En términos de número de átomos sin embargo, el hidrógeno es muy abundante. En una muestra de corteza terrestre tomada al azar, hay:

- 5330 átomos de oxígeno por cada 10,000 átomos
- 1590 átomos de silicio por cada 10,000 átomos
- 1510 átomos de hidrógeno por cada 10,000 átomos

En la Figura 2.2 se muestra la abundancia de diferentes elementos y se hace notar que la mayor parte del hidrógeno de la Tierra se encuentra combinado con oxígeno, en forma de agua. Casi todos los compuestos derivados de los organismos vivos contienen H.

Las grasas, almidones, azúcares y proteínas contienen hidrógeno. El petróleo y el gas natural también contienen mezclas de hidrocarburos (compuestos de hidrógeno y carbono).

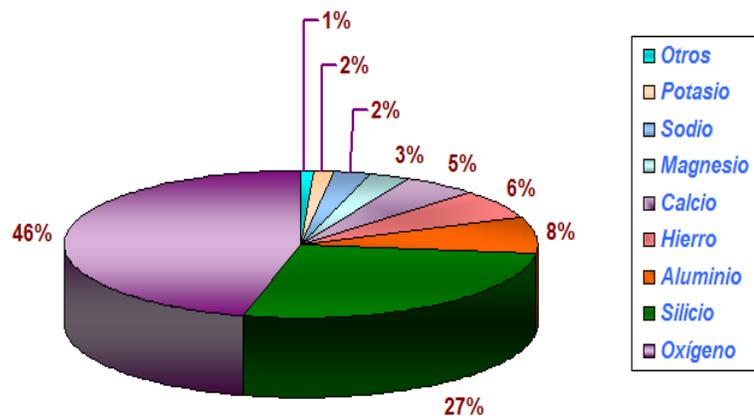


Figura 2.2 Esquema comparativo de abundancia del Hidrogeno<sup>16</sup>

#### 2.1.5.5.7. PRODUCCION DE HIDROGENO

Puesto que el hidrógeno no se encuentra aislado en la naturaleza es preciso obtenerlo a partir de otras materias primas llevando a cabo ciertos procesos de transformación.

Aparentemente la producción de hidrógeno no debería ser un problema que requiriese investigación, pues hoy día se produce hidrógeno con fines industriales mediante procedimientos suficientemente probados. Actualmente se producen en el mundo aproximadamente 41 millones de toneladas de hidrógeno, que representan un valor energético de 5.000 TJ.

La demanda de energía primaria mundial en 2003 fue de 9.741 Mtep  $\approx$  4 x 10<sup>8</sup> TJ, mientras que en la Unión Europea de los 15 fue de 1.500 Mtep. Esto significa que con el hidrógeno producido en el mundo se cubrirían apenas 12 ppm de las necesidades mundiales de energía primaria o 81,2 ppm de las necesidades de la Unión Europea de los 15. Resulta evidente, por tanto, que si se desea alcanzar un escenario de economía del hidrógeno es preciso

<sup>16</sup> <http://www.monografias.com/trabajos34/hidrogeno/hidrogeno.shtml#estado>

producirlo de manera masiva y a partir de una elevada diversidad de fuentes en aras a poder garantizar el abastecimiento energético.

En la [Figura 2.3] se representan las fuentes energéticas de las que se obtiene el hidrógeno actualmente, produciéndose casi la mitad a partir del gas natural. En concreto, el 96% del hidrógeno requiere como energía primaria combustibles fósiles, siendo el 95% de la producción “cautiva”, es decir, se produce para consumo propio de las industrias que lo demandan.

En la [Figura 2.4] se muestran los usos que actualmente se dan al hidrógeno, siendo de tipo químico el 72% y nada para fines energéticos. Estas cifras demuestran que los sistemas productivos actuales no están preparados para satisfacer las demandas de la “sociedad del hidrógeno”, siendo preciso actualizarlos.

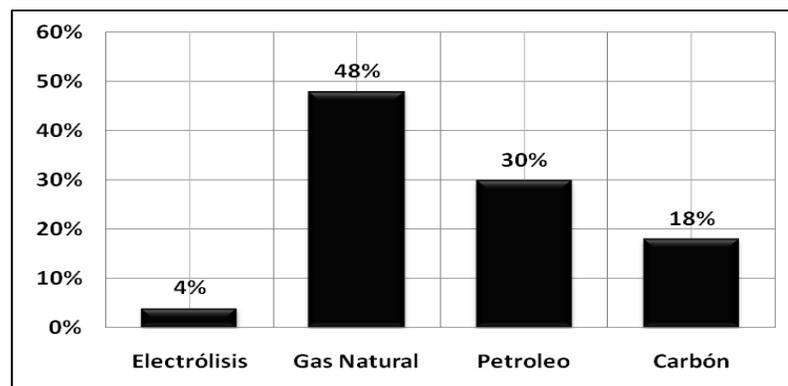


Figura 2.3. Origen del hidrógeno producido en la actualidad<sup>17</sup>

Afortunadamente los métodos para producir hidrógeno son muy variados, admitiendo varios de ellos tanto esquemas centralizados y masivos como descentralizados. En la [Figura 2.5] se muestran los principales caminos de obtención de hidrogeno.

<sup>17</sup>, LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), “El hidrógeno y la energía”, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

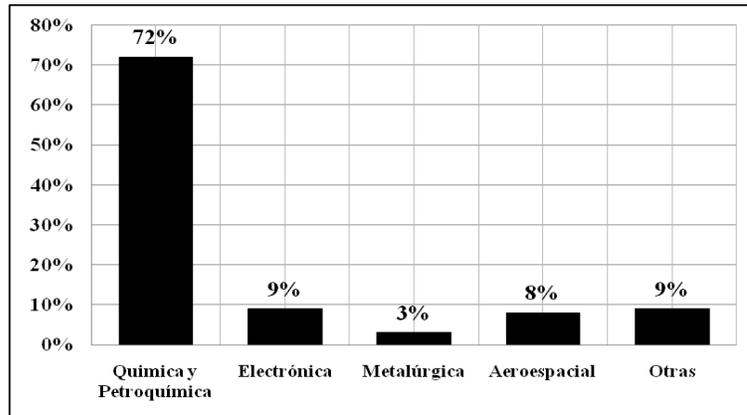


Figura 2.4. Aplicaciones actuales del hidrógeno<sup>18</sup>

Así, la electrólisis se puede llevar a cabo a partir de energía nuclear o de energía eólica. Algo similar ocurre con los procesos de termólisis, que pueden ser activados desde la energía nuclear o desde la energía solar de alta temperatura. La gasificación es otro ejemplo de proceso que se puede aplicar al carbón (combustible fósil) o a la biomasa (renovable).

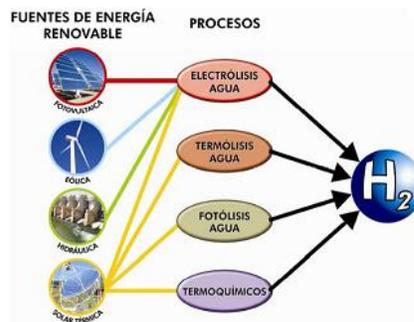


Figura 2.5. Métodos de producción de hidrógeno.<sup>19</sup>

Es por ello que para no repetir contenidos se va a establecer, en primer lugar, una exposición de los métodos de obtención de hidrógeno basada en los procesos y no en las fuentes. Seguidamente se abordarán los sistemas

<sup>18</sup>LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

<sup>19</sup> <http://labengalaperdida.blogspot.com/2011/10/hacia-la-era-del-hidrogeno.html>

de implantación desde las diferentes fuentes para utilizar los procedimientos descritos.

#### **2.1.5.5.8. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE HIDROGENO**

La **producción de hidrógeno** se realiza mediante diversos métodos que requieren la separación del hidrógeno de otros elementos químicos como el carbono (en los combustibles fósiles) y el oxígeno (del agua). El hidrógeno se extrae tradicionalmente de los combustibles fósiles (habitualmente hidrocarburos) - compuestos de carbono e hidrógeno- por medio de procesos químicos.

El hidrógeno también puede ser obtenido del agua por medio de producción biológica en un biorreactor de algas, o usando electricidad (por electrólisis-electrolisis del agua)- químicos (por reducción química) o calor (por termólisis); estos métodos están menos desarrollados en comparación con la generación de hidrógeno a partir de hidrocarburos pero su crecimiento aumenta ya que, por sus bajas emisiones en dióxido de carbono permiten reducción la contaminación y el efecto invernadero.El descubrimiento y desarrollo de métodos más baratos de producción masiva de hidrógeno acelerara el establecimiento de la denominada economía de hidrógeno.

##### **2.1.5.5.8.1 CONVERSION QUIMICA.**

La designación de procesos de conversión química resulta muy amplia, pudiendo aplicarse tanto a combustibles fósiles (carbón e hidrocarburos) como a fuentes renovables (biomasa). Los principales procesos son:

###### **1.-Reformado.**

- Reformado con vapor de agua.
- Oxidación parcial.
- Reformado autotérmico.

**2.-Pirólisis.**

**3.-Gasificación.**

En todos los procesos anteriores se produce CO<sub>2</sub> en mayor o menor medida, siendo posible secuestrarlo. Este secuestro resulta necesario si el proceso se aplica a un combustible fósil de cara a lograr la limpieza medioambiental atribuible al hidrógeno.

Si el proceso se aplica a biomasa la captura de CO<sub>2</sub> produciría una emisión negativa de CO<sub>2</sub>, aunque quizás el coste económico no se vea justificado.

#### **2.1.5.5.9. PROCESOS DE REFORMADO DEL HIDROGENO**

Los procesos de reformado más habituales hoy día para la obtención de hidrógeno. Desde un punto de vista termodinámico se pueden clasificar en endotérmicos y exotérmicos. Los primeros requieren el aporte de calor desde una fuente externa, como en el reformado con vapor de agua; los segundos liberan calor en la reacción, siendo el caso de la oxidación parcial. En el reformado autotérmico se produce una combinación de los dos procesos, obteniéndose un balance neto de calor nulo.

##### **2.1.5.5.9. 1. REFORMADO CON VAPOR DE AGUA**

El proceso de reformado con vapor de agua (SMR, “Steam Methane Reformer”) se puede aplicar a gran variedad de hidrocarburos (gas natural, GLPs, hidrocarburos líquidos,) y alcoholes. De todos ellos el más utilizado por su disponibilidad y facilidad químicas expuestas seguidamente. El proceso consta de tres fases que se desarrollan en equipos diferentes, tal como muestra la [Figura 2.6].

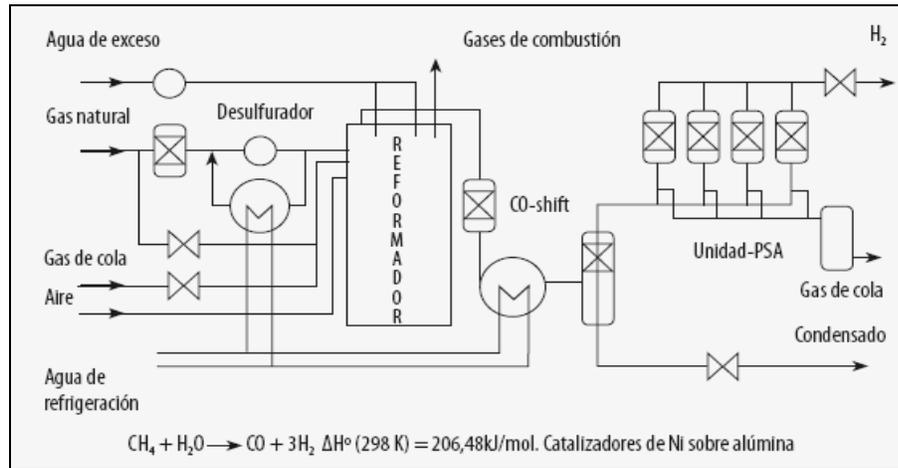


Figura 2.6. Esquema del proceso de reformado con vapor de agua.<sup>20</sup>

La reacción que se verifica en la primera fase es la de reformado propiamente dicho, esto se aprecia en la ecuación, que posee una entalpía de reacción estándar de +206,14 kJ/mol, es decir, es endotérmica. Se produce a temperaturas alrededor de 900°C en unos tubos por los que circulan el metano y el vapor de agua a través de lechos catalizadores de base de níquel. Los tubos están contenidos en un horno cuya temperatura es de alrededor de 960°C, que se mantiene mediante quemadores.



A la salida del reformador el gas se dirige a la unidad de desplazamiento de CO (“CO-shift”) en la que se verifica la reacción sobre catalizadores de cobre, que posee una entalpía de reacción estándar de -41,17 kJ/mol, siendo por tanto exotérmica. La cantidad de calor liberada y su nivel de temperatura no es suficiente para satisfacer totalmente la demanda de la reacción de reformado, por lo que parte del gas natural se emplea en los quemadores para mantener la temperatura de operación del reformador. El calor liberado

<sup>20</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), “El hidrógeno y la energía”, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

en la reacción de desplazamiento se aprovecha para precalentar el gas natural a su entrada al reformador, como se ilustra en la [Figura 2.6].



El gas producido como consecuencia de las reacciones revisadas pasa por un condensador en el que se le retira el vapor de agua y finalmente llega a la tercera fase del proceso, la de depuración. El gas que llega a esta unidad es un gas rico en H<sub>2</sub> con CO<sub>2</sub>, restos de agua, CO y CH<sub>4</sub>.

Esta corriente gaseosa se depura en un sistema separador de membranas o de adsorción-desorción (PSA, "Pressure Swing adsorption") de donde se obtiene hidrógeno con una pureza de, 99,999%. Los gases adsorbidos constituyen el llamado "gas de cola" que, al ser combustible, se recircula hacia los quemadores del reformador, el rendimiento del proceso de reformado de gas natural con vapor de agua se sitúa aproximadamente en el 80% (medido respecto a los poderes caloríficos inferiores del hidrógeno producido y del gas natural consumido).

Aunque minoritario, también es posible aplicar el reformado con vapor de agua a alcoholes y a gasolinas. La utilización de alcoholes, especialmente de metanol, resulta menos endotérmica que la del gas natural y se verifica a temperaturas mucho más bajas (200 a 300°C), alcanzándose conversiones próximas al 99%.

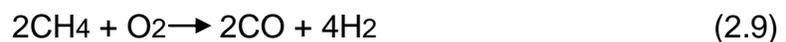
Este hecho hace que este tipo de reformado sea interesante para producir hidrógeno embarcado en aplicaciones de transporte a partir de metanol mediante un reformador. Sin embargo, esta aplicación está perdiendo interés a medida que las pilas de combustible de metanol directo (supresión del reformador) van alcanzando un nivel suficiente de desarrollo. Sí resulta

interesante, no obstante, el reformado de alcoholes si éstos han sido obtenidos a partir de la biomasa, ya sea en forma de bioetanol o de metanol obtenido de la biomasa a partir de un gas de síntesis obtenido de tratamientos termoquímicos (gasificación y pirólisis).

De estas dos aplicaciones la obtención a partir de biocarburantes (bioetanol) no parece razonable, pues éstos pueden ser empleados directamente en motores alternativos.

#### **2.1.5.5.9. 2. OXIDACION PARCIAL.**

La oxidación parcial (POX, “Partial OXidation”) consiste en una oxidación incompleta de un hidrocarburo, por ejemplo gas natural, donde sólo se oxida el carbono (y sólo hasta CO), quedando libre el hidrógeno, según la reacción posterior. La entalpía estándar de reacción es de -36 kJ/mol, siendo por tanto una reacción exotérmica, pudiendo así prescindir de quemadores externos para mantener la reacción.



La reacción se verifica con oxígeno puro o con aire en presencia de catalizadores y transcurre a temperaturas superiores a 800°C. La elevada presencia de CO en el gas obtenido tiene el riesgo de la deposición de carbonilla, especialmente si la reacción ocurre a presión elevada, lo que es deseable para lograr reformadores más compactos.

Esta carbonilla depositada sobre los catalizadores inhibe la continuación del proceso. El CO formado se puede eliminar oxidándolo para formar CO<sub>2</sub> o bien desplazándolo con agua según la reacción siguiente para obtener más hidrógeno y nuevamente CO<sub>2</sub>.

El hecho de que la reacción sea exotérmica y de que se active con facilidad abre una expectativa interesante a la POX como medio para producir hidrógeno embarcado en aplicaciones de transporte, al poder utilizar así la experiencia de vehículos alimentados con gas natural. En este caso no sería factible la captura de CO<sub>2</sub>. La eficiencia del proceso es de alrededor del 70% en grandes producciones industriales.

### **2.1.5.5.9. 3. REFORMADO AUTOTERMICO.**

El reformado autotérmico (ATR, "Auto-Thermal Reforming") es un proceso bien estudiado aplicado industrialmente en grandes unidades centralizadas. Sólo recientemente se ha trasladado esta tecnología a pequeños equipos.

Se trata de un método que combina el SMR y el POX, de modo que el calor liberado en el último se aproveche para el primero, dando lugar a un balance neto nulo. El CO producido es desplazado con agua para producir más hidrógeno y CO<sub>2</sub>. La eficiencia del proceso es similar a la del método de oxidación parcial.

### **2.1.5.5.9.4. PROCESOS DE PIROLISIS**

Consiste en la descomposición de la biomasa por la acción del calor (a unos 450 °C) en ausencia de oxígeno, proceso en el que la naturaleza y la composición de los productos finales dependen de las propiedades de la biomasa tratada, de la temperatura y presión de operación y de los tiempos de permanencia del material en la unidad de pirólisis. Así, los productos obtenidos se pueden clasificar en tres grandes grupos:<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> <http://www.cje.org/inice/Ter/BIOMA/BIOMA14.htm>

- Gases compuestos por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos.
- Líquidos hidrocarbonados.
- Residuos sólidos carbonosos.

Las materias primas que se estudian actualmente para someterlas a este proceso son los subproductos agrícolas y forestales y los residuos sólidos urbanos; precisamente, las mejores perspectivas de tratamiento de los residuos sólidos urbanos se encuentran en el campo de la pirólisis, orientándose las directrices de tratamiento respecto a la obtención de productos hacia los líquidos y los sólidos.

Para obtener combustibles líquidos y carbón se requiere una alimentación seca que se somete a un tratamiento, con objeto de mejorar los rendimientos en combustibles líquidos se están estudiando los procesos llamados de "licuefacción", que son variantes de la pirólisis con adición de un gas reductor (monóxido de carbono, hidrógeno o gas de síntesis) a temperaturas entre 300 y 500 °C y a alta presión. En definitiva, la pirólisis parece ser un buen método para la obtención de energía a partir de biomasa seca y, quizás, el mejor para convertir los residuos sólidos urbanos en compuestos de interés económico. Aún queda un largo camino por recorrer, pero las investigaciones en marcha permiten contemplar un futuro muy interesante en la aplicación de la pirolisis como procedimiento para convertir la biomasa en energía útil.

#### **2.1.5.5.9.5. PROCESOS DE GASIFICACION.**

El proceso de gasificación consiste en una combustión con defecto de oxígeno en la que se obtiene CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso. El oxígeno se limita entre un 10 y un 50% del estequiométrico y la temperatura

oscila entre 700 y 1.500°C. La gasificación puede aplicarse tanto a la biomasa como al carbón.<sup>22</sup>

Si la reacción se verifica con aire se obtiene un “gas pobre” (gas de gasógeno) que en el caso de proceder de carbón o coque contiene entre un 25 al 30% de CO, 65 al 70% de N<sub>2</sub> y algo de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Para obtener hidrógeno sería necesario efectuar una reacción de desplazamiento (Ecuación  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ) sobre dicho gas. Por el contrario, si la reacción se verifica con oxígeno y vapor de agua se obtiene un gas de síntesis (H<sub>2</sub> y CO) que puede ser empleado, además de para producir hidrógeno, para obtener combustibles líquidos como metanol y gasolina.

El caso de la gasificación a partir de carbón merece una exposición algo más detallada, pues resulta un procedimiento masivo para la producción de hidrógeno en el que la captura de CO<sub>2</sub> resulta rentable si se realiza en instalaciones centralizadas (constituyendo entonces el 5% de los costes de inversión. En concreto, la gasificación de carbón se puede integrar adecuadamente en un ciclo combinado (GICC) al que además se puede dotar de captura de CO<sub>2</sub>. De este modo se puede hablar de una nueva forma de cogeneración: la producción simultánea de electricidad e hidrógeno.

Las [Figura2.7] a [Figura 2.9] recogen estas posibles sinergias. La [Figura2. 8] recoge el esquema básico del proceso de gasificación. Una vez que se ha limpiado de compuestos de azufre y cenizas el gas obtenido en el proceso de gasificación se somete a una reacción de desplazamiento (Ecuación  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ) con lo que se llega a una mezcla de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Éste último es separado para finalmente purificar el H<sub>2</sub> dejándolo con una pureza del 99,99%.

---

<sup>22</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), “*El hidrógeno y la energía*”, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 35.

En la [Figura2. 8a] se ilustra el esquema simplificado de un proceso de gasificación de carbón integrado en un ciclo combinado (GICC). La integración consta de tres niveles:

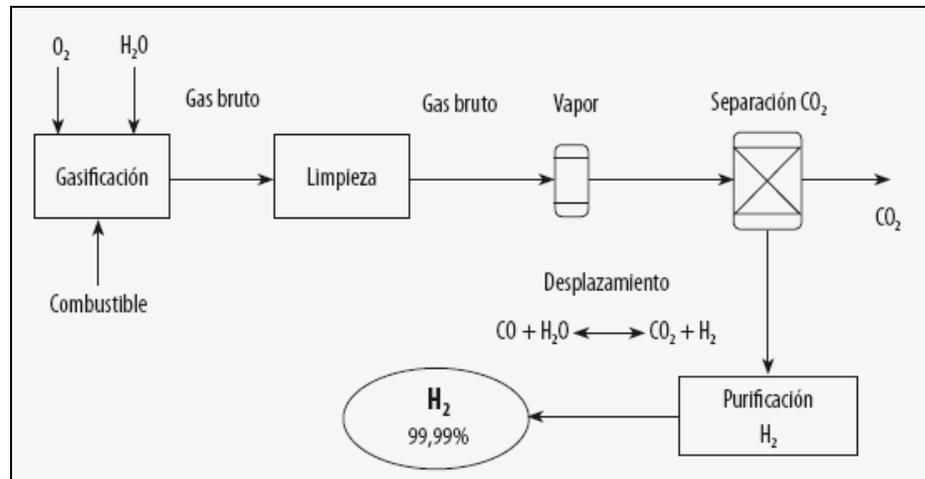


Figura 2.7. Proceso de gasificación de un combustible, por ejemplo carbón<sup>23</sup>

1.-El aire para producir el oxígeno de la gasificación se obtiene presurizado del compresor del ciclo de gas del ciclo combinado.

2.-El nitrógeno obtenido en el fraccionamiento del aire se emplea para el transporte neumático y el acondicionamiento del carbón, así como para controlar la temperatura de la cámara de combustión del ciclo de gas del ciclo combinado, reduciendo así la formación de NOx.

3.-En el enfriamiento del gas producido se produce vapor que sirve de alimentación al ciclo de vapor del ciclo combinado, complementando la caldera de recuperación de la turbina de gas.

<sup>23</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 36.

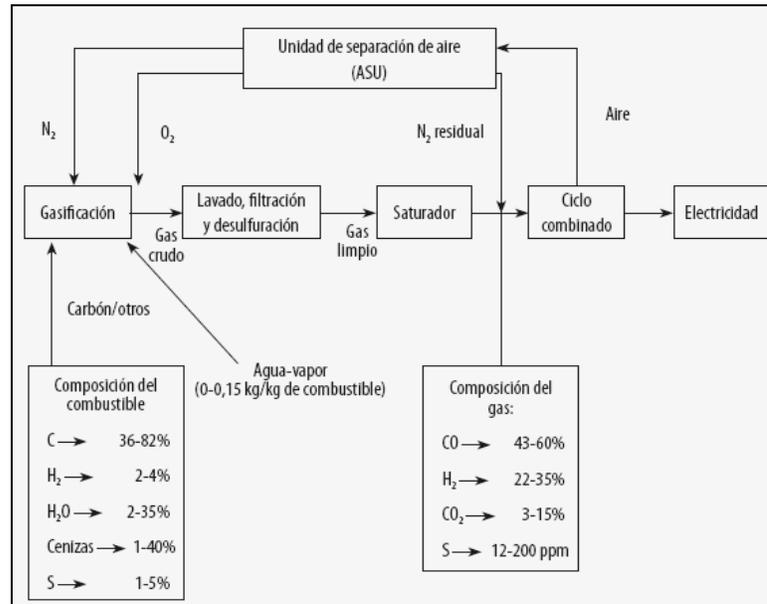


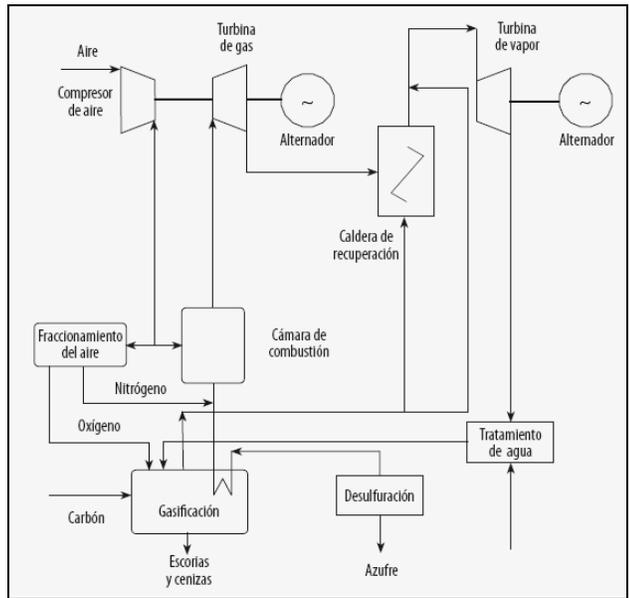
Figura 2.8a Esquema simplificado de la gasificación integrada en ciclo combinado.<sup>24</sup>

Este nivel de integración se puede apreciar con más detalle en la [Figura 2.8b]. La [Figura 2.9] presenta la integración de los sistemas anteriores para producir de forma simultánea electricidad e hidrógeno.

La producción de hidrógeno se logra derivando parte del gas de síntesis producido tras la fase de limpieza y sometiéndolo a un proceso de desplazamiento (Ecuación  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ) tras el que se elimina la mayor parte de  $\text{CO}_2$ .

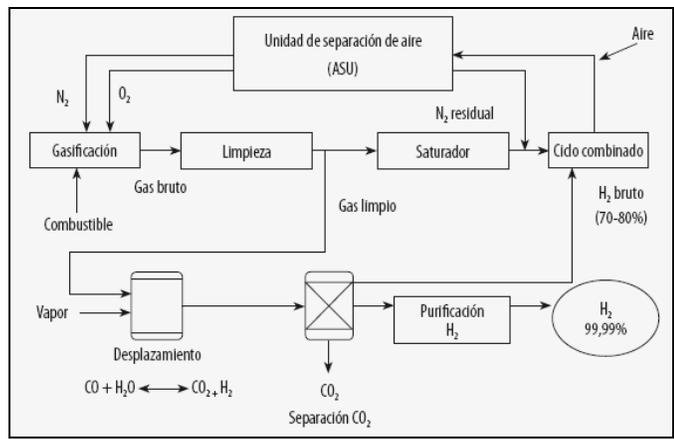
El gas así obtenido tiene una concentración de hidrógeno entre el 70 y el 80%, suficiente para su combustión en el ciclo combinado, sólo o en combinación con el resto de gas de síntesis.

<sup>24</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 37



[Figura 2.8b] Diagrama de planta de una instalación de gasificación integrada en ciclo combinado.<sup>25</sup>

Este hidrógeno también podría ser empleado para pilas de combustible de alta temperatura que no son tan exigentes en la calidad del combustible como las de baja



[Figura 2.9] Integración de la producción de hidrógeno con captura de CO2 en ciclo combinado con gasificación de carbón.<sup>26</sup>

<sup>25,26</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 37

#### **2.1.5.5.9.6. TERMÓLISIS**

Los procesos de termólisis implican la extracción del hidrógeno de la molécula que lo alberga (hidrocarburo o agua) mediante la aplicación de calor. Bajo esta definición el reformado, la gasificación y la pirólisis se pueden entender como procesos de termólisis.

La consideración de estos procesos como métodos químicos o termolíticos depende de la fuente de calor empleada. Así, se habla de procesos químicos, en el sentido del apartado anterior, cuando el calor para el proceso se extrae de la propia materia prima a través de una combustión; por el contrario, se habla de procesos de termólisis cuando el calor procede de una fuente externa, como la energía solar concentrada o la energía nuclear de alta temperatura.

El proceso que mayor temperatura requiere es la termólisis directa del agua, que se verifica a partir de 2.500 K y por tanto resulta inabordable en la práctica. A temperatura intermedia (Clase II) se tienen los procesos de descarbonización (pirólisis, gasificación y reformado), situados todos alrededor de 1.000 K y ya tratados en el apartado de conversión química. La inclusión en esta sección se debe a que el aporte de calor se realiza con una fuente externa (solar o nuclear de alta temperatura).

También pertenecen a la Clase II las reacciones de reducción de óxidos metálicos que se sitúan en un nivel superior de temperaturas, sobre los 2.500 K. Por último, a “baja temperatura” (entre 900 y 1.000 K) se verifican ciertos ciclos termoquímicos, de los que el de yodo-azufre es el más prometedor.

En la tabla 2.3 siguiente se presentan las eficiencias que se pueden obtener con algunos ciclos termoquímicos tanto de Clase I (basados en el

azufre) como de Clase II (óxidos metálicos tanto volátiles como no volátiles). Estas eficiencias han de ser sopesadas con otros factores de tipo práctico, pues de los ciclos basados en el azufre el que se revela como más factible es el de azufre-yodo, que presente una eficiencia del 38%, por debajo de otros del mismo grupo, por el contrario, el de óxido de zinc, preferido entre los óxidos metálicos, presenta una eficiencia bastante elevada pero también una de las mayores temperaturas de trabajo.

Clase I $T \leq 1.000 \text{ K}$			
Proceso		Reacción Endotérmica	T (K)
Ciclos termoquímicos de temperaturas moderadas	Ciclos de la familia del azufre	Descomposición del ácido sulfúrico. $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow \text{SO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + 1/2\text{O}_2(\text{g})$	$T \approx 1.000$
	Ciclos del tipo UT-3	Hidrólisis del bromuro de calcio y del bromuro de hierro. $\text{CaBr}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + 2\text{HBr}(\text{g})$ $3\text{FeBr}_2(\text{s}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 6\text{HBr}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$	$T \approx 900$
Clase II $1.000 \text{ K} \leq T \leq 2.500 \text{ K}$			
Proceso		Reacción Endotérmica	T (K)
Ciclos termoquímicos de temperaturas "elevadas"	Reducción óxidos metálicos	Disociación del óxido metálico $\text{M}_x\text{O}_y \rightarrow x\text{M} + y/2\text{O}_2$	$T \approx 2.500$
Descarbonización de combustibles fósiles	Pirólisis (cracking)	Descomposición térmica de hidrocarburos $\text{C}_x\text{H}_y \rightarrow x\text{C}(\text{g}) + y/2\text{H}_2$	$T \approx 1.000$
	Reformado	Descarbonización de hidrocarburos ligeros $\text{C}_x\text{H}_y + x\text{H}_2\text{O} \rightarrow x\text{CO} + (y/2 + x)\text{H}_2$	$T \approx 1.000$
	Gasificación	Descarbonización de hidrocarburos pesados o carbón $\text{C}_x\text{H}_y + x\text{H}_2\text{O} \rightarrow x\text{CO} + (y/2 + x)\text{H}_2$	$T \approx 1.000$
Clase III $T > 2.500 \text{ K}$			
Proceso		Reacción Endotérmica	T (K)
Termólisis directa del agua		Disociación del agua $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$	$T \approx 2.500$

Tabla 2.3. Clases de termólisis<sup>27</sup>

<sup>27</sup> <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Capitulo+2+-+Producción+de+Hidrógeno.pdf>

Ciclos de Ácido Sulfúrico	Eficiencia LHV	T(°C)
Sulfuro híbrido	43 %	900
Sulfuro de yodo	38 %	900
Sulfuro polivalente	35 %	1.570
Ciclos de Sulfato de Metal	Eficiencia LHV	T(°C)
Sulfato de Cadmio	46 %	1.000
Sulfato de Bario	39 %	1.000
Sulfato de Manganeso	35 %	1.000
Ciclos de Óxido de Metal Volátiles	Eficiencia LHV	T(°C)
Óxido de Zinc	45 %	2.000
Cadmio Híbrido	42 %	1.600
Carbonato de Cadmio	43 %	1.600
Ciclos de Óxido de Metal no Volátiles	Eficiencia LHV	T(°C)
Óxido de Hierro	42 %	2.200
Manganeso de Sodio	49 %	1.560
Ferrita de Manganeso de Níquel	43 %	1.800
Ferrita de Manganeso de Zinc	43 %	1.800

Tabla 2.4. Eficiencias y temperaturas de algunos ciclos termoquímicos<sup>28</sup>

#### 2.1.5.5.9.6.1. PROCESOS DE CLASE I

Lo integran los llamados ciclos termoquímicos de temperatura moderada, siendo éstos principalmente dos: los basados en la familia del azufre y los de tipo UT-3.<sup>29</sup>

- **Familia del azufre.-** Se trata de un ciclo termoquímico desarrollado por General Atomics en los años 70 y que requiere básicamente dos niveles térmicos, uno a 850° C para la descomposición del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y otro a aproximadamente 360° C para la descomposición del HI, tal como se muestra en el diagrama simplificado de la [Figura 2.10].

<sup>28</sup> <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Capítulo+2+-Producción+de+Hidrógeno.pdf>

<sup>29</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 41

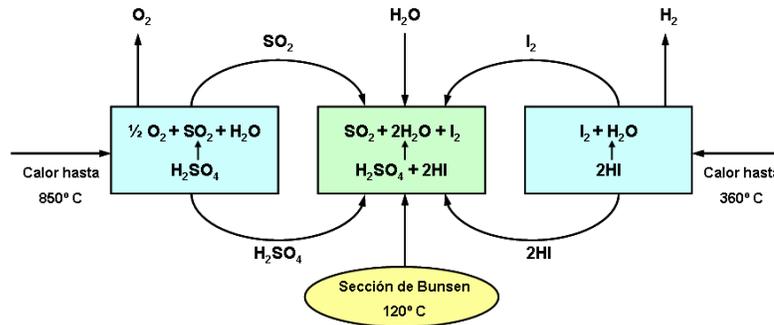


Figura 2.10. Diagrama de bloques del ciclo SI<sup>30</sup>

El núcleo del proceso es la reacción Bunsen, y que transcurre a 120° C, esto se aprecia en la siguiente ecuación.



Tras esta reacción se realizan dos procesos de destilación, uno sobre los productos D1 y otro sobre los D2. La destilación sobre D1 produce HI y se verifica a 230°C; con el HI separado se procede a su descomposición según la reacción, que ocurre aproximadamente 360°C y que es donde se obtiene el hidrógeno.



La destilación sobre los productos D2, a 360°C, produce H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, que finalmente es descompuesto a 870°C según la reacción. Esta reacción es la que fija la demanda de calor de alta temperatura del proceso<sup>4</sup>.



El proceso descrito supone un ciclo porque el SO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O producto de la reacción de arriba y el I<sub>2</sub> producto de la reacción [2HI H<sub>2</sub> + I<sub>2</sub>] se dirigen hacia la reacción Bunsen, que sólo consume del exterior H<sub>2</sub>O. Como

<sup>30</sup> <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Capítulo+2+-Producción+de+Hidrógeno.pdf>

productos del ciclo se produce H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Se observa que atendiendo sólo a las entradas y salidas de especies se verifica la reacción global propia del proceso de termólisis, así;



- **Ciclo UT-3.-** Precisamente este nivel térmico intermedio provoca un mal acoplamiento con las fuentes de calor disponibles (reactores nucleares de alta temperatura), lo que reduce la eficiencia del proceso.

Por otra parte, la separación del hidrógeno de los productos se realiza mediante membranas que operan por debajo de la presión atmosférica, por lo que es preciso comprimir el H<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>, con el consiguiente consumo energético. La [Figura 2.11] muestra un diagrama de bloques del proceso.

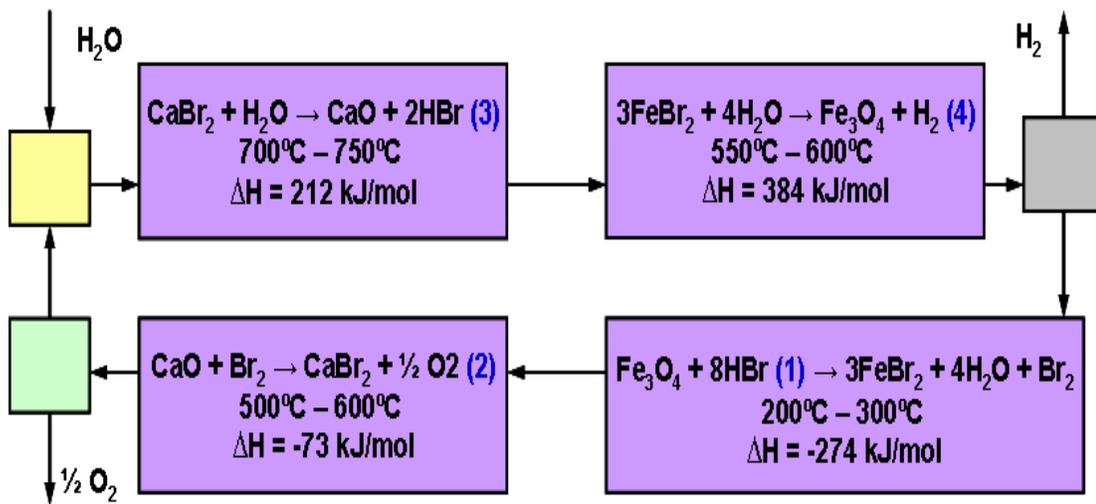


Figura 2.11 Esquema del ciclo UT-3<sup>31</sup>

<sup>31</sup> <sup>31</sup> <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Capítulo+2+-Producción+de+Hidrógeno.pdf>

## 2.1.5.5.9.6.2. PROCESOS DE CLASE II (DESCARBONIZACION Y REDUCCION DE OXIDOS METALICOS)

- **Procesos de descarbonización.-** Como ya se ha mencionado, los procesos de reformado con vapor (SMR), pirólisis y gasificación, se incluyen en los medios termolíticos en la medida en que el calor que consumen se suministre mediante fuentes externas adecuadas y no mediante la combustión del propio recurso. La [Figura 2.12] muestra el esquema de los principales procesos.

Como se aprecia, una vez se ha aportado la energía térmica el proceso continúa de la misma manera que se describió en los métodos de conversión química.

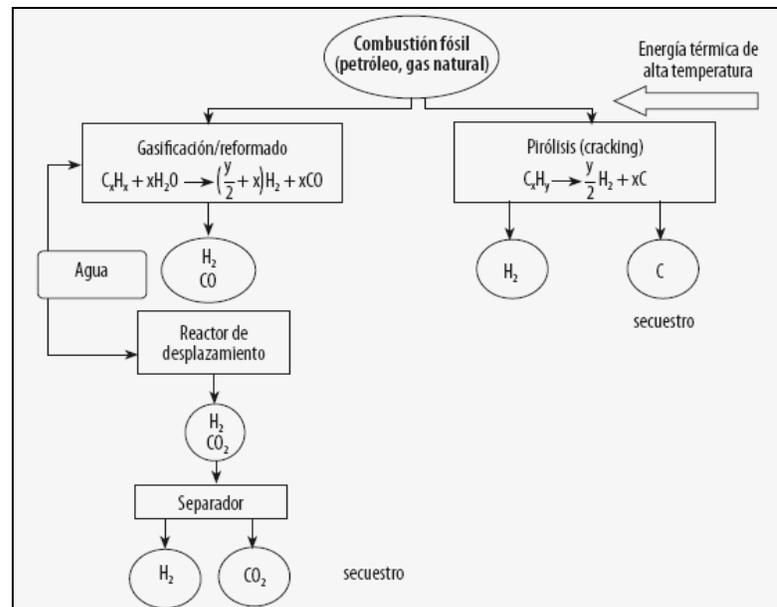


Figura 2.12. Esquema de los procesos de descarbonización.<sup>32</sup>

<sup>32</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 43

En el caso de la descarbonización por termólisis los equipos para la reacción pueden variar respecto a los empleados en el proceso de conversión química. Así, el SMR realizado con aporte exterior de calor se lleva a cabo en un reformador de membrana que opera a temperatura intermedia y que resulta más compacto, tal como se muestra en la [Figura 2.13]. Más adelante se detallarán los procesos de acoplamiento de la fuente a este tipo de equipos.

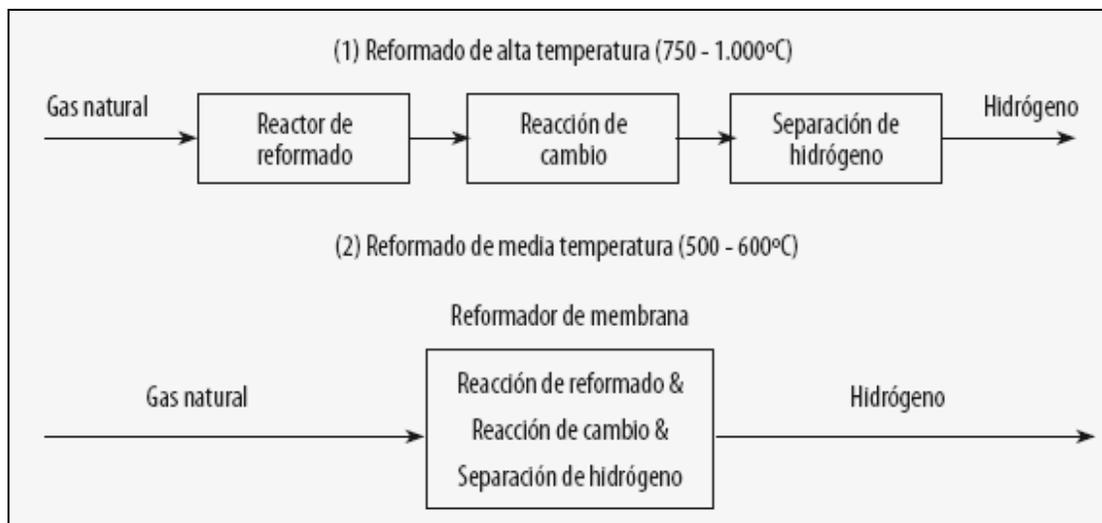
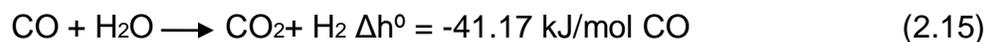


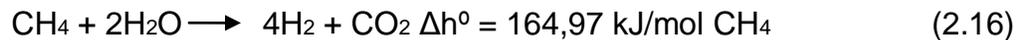
Figura 2.13. Comparación entre el reformador convencional (proceso químico) y el de membranas (proceso termolítico).<sup>33</sup>

La ventaja de aportar un calor externo en cuanto al ahorro del recurso empleado se puede ver en el ejemplo siguiente, basado en el procedimiento SMR. Si se toma 1 mol de CH<sub>4</sub> se verifican las reacciones siguientes:

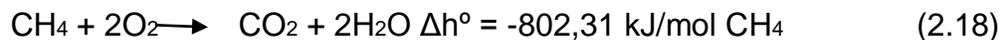


<sup>33</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 44

Como se forma 1 mol de CO por cada mol de CH<sub>4</sub> ambas ecuaciones se pueden escribir de forma neta como:



La Ecuación anterior indica que para obtener 4 moles de H<sub>2</sub> se deben consumir 164,97 kJ. También indica que esos 4 moles de H<sub>2</sub> se obtienen a partir de 1 mol de CH<sub>4</sub>, siempre que el aporte de 164,97 kJ se realice a partir de fuentes externas. Si dicho aporte proviene de la combustión del CH<sub>4</sub>, como ocurre en el SMR tradicional, y considerando la combustión estequiométrica del CH<sub>4</sub>:



Es decir, se deben de consumir  $164,97/802,31 = 0,2056$  mol de CH<sub>4</sub> para producir el calor demandado por el proceso global SMR. De ahí se deduce que para obtener 1 mol de H<sub>2</sub> se requiere consumir 0,25 mol de CH<sub>4</sub> si el calor para el proceso procede de una fuente externa ó 0,30 mol de CH<sub>4</sub> si el calor ha de proceder del mismo CH<sub>4</sub>.

Dicho de otro modo, aportando el calor desde una fuente externa hay un ahorro en CH<sub>4</sub> de 0,05 mol por cada mol de H<sub>2</sub> producido, con los que pueden obtenerse 0,2 mol de H<sub>2</sub> recurriendo a una fuente externa (es decir, el empleo de una fuente externa incrementa un 20% la producción volumétrica de hidrógeno).

Evidentemente esa fuente externa no debería ser un combustible fósil, sino que habría de carecer de emisiones de CO<sub>2</sub>, pudiendo ser combustión de biomasa (poco indicado), energía solar concentrada o energía nuclear

- **Procesos por reducción de óxidos metálicos.**- Este proceso queda descrito genéricamente mediante las reacciones descritas a continuación donde  $M_xO_y$  representa un óxido metálico:

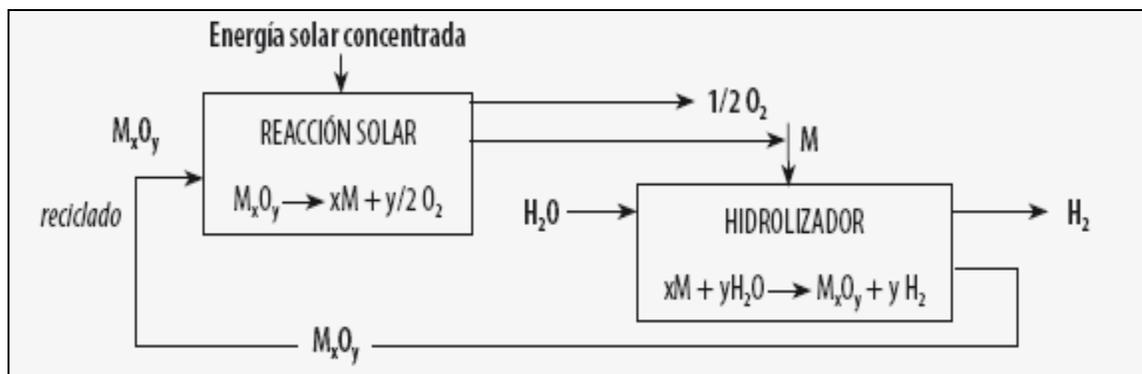


Figura 2.14. Diagrama de bloques para el ciclo Zn/ZnO<sup>34</sup>

El esquema de este procedimiento se representa en la [Figura 2.14], actualmente se está trabajando en variantes de este ciclo que producen la descomposición del ZnO con la ayuda de carbono (disociación carbotérmica) procedente de biomasa, coque, etc., según la reacción  $[xM + yH_2O \rightarrow M_xO_y + yH_2]$ . La ventaja de este procedimiento es que se reduce la temperatura de la reacción a 1.300 K, es decir, unos 1.000 K por debajo de la reacción  $[M_xO_y \rightarrow xM + y/2O_2]$  dando como resultado la siguiente reacción.



<sup>34</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 45

### 2.1.5.5.9.7 ELECTROLISIS

La electrolisis consiste en la ruptura de la molécula de agua por acción de una corriente eléctrica. Cuando ocurre en condiciones ambiente (25°C y 1 atm) se trata de un proceso poco interesante, como muestra el balance energético llevado a cabo sobre la siguiente ecuación.



La electrólisis del agua es la descomposición de agua (H<sub>2</sub>O) en gas de oxígeno (O<sub>2</sub>) e hidrógeno (H<sub>2</sub>) por medio de una corriente eléctrica a través del agua. Este proceso electrolítico es raramente usado en aplicaciones industriales debido a que el hidrógeno puede ser producido a menor costo por medio de combustibles fósiles.

Una fuente de poder eléctrica es conectada a dos electrodos, o dos platos (típicamente hechos de algún metal inerte como el platino o acero inoxidable), los cuales son puestos en el agua. En una celda propiamente diseñada, el hidrógeno aparecerá en el cátodo (el electrodo negativamente cargado, donde los electrones son bombeados al agua), y oxígeno aparecerá en el ánodo (el electrodo positivamente cargado). La cantidad de hidrógeno generado es el doble que la de oxígeno, y ambas son proporcionales al total de carga eléctrica que fue enviada por el agua. Sin embargo, en varias celdas las reacciones del lado competidor dominan, resultando en diferentes productos. La electrolisis de agua pura requiere una gran cantidad de energía extra en forma de sobrepotencial para romper varias barreras de activación. Sin esa energía extra la electrólisis de agua pura ocurre muy lentamente si es que logra suceder. Esto es en parte debido a la limitada autoionización del agua. El agua pura tiene una conductividad eléctrica alrededor de una millonésima parte de la del agua de mar. Varias celdas electrolíticas pueden

no tener los electrocatalizadores requeridos. La eficacia de la electrólisis aumenta con la adición de un electrolito (como la sal, un ácido o una base) y el uso de electrocatalizadores.<sup>35</sup>

	$\Delta h$ [kJ/mol]	$T\Delta s$ [kJ/mol]	$\Delta g$ [kJ/mol]
25°C	286,43	48,72	237,75
1.000°C	249,87	72,17	177,66

Tabla 2.5. Balances termodinámicos para la reacción a diferentes temperaturas y 1 atm.<sup>36</sup>

En la [Figura 2.15] se muestra la representación gráfica de esta variación, se ve que la demanda eléctrica se va reduciendo a medida que la temperatura a la que se verifica la electrólisis aumenta, siendo la reducción mucho más significativa cuando el proceso ocurre con vapor de agua que con agua líquida. También se aprecia en esa Figura que dicha demanda eléctrica se reduce principalmente porque aumenta la demanda térmica ( $T\Delta s$ ), que a 1.000°C representa un 29,8% de la energía contenida en el hidrógeno producido.

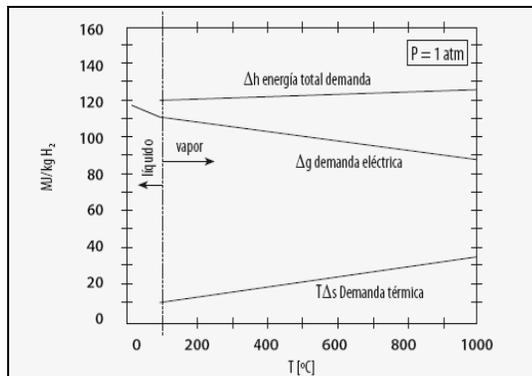


Figura 2.15. Demandas energéticas del proceso electrolítico a presión ambiente en función de la temperatura<sup>37</sup>

<sup>35</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis\\_del\\_agua](http://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis_del_agua)

<sup>36, 37</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 45

Los resultados anteriores sugieren por tanto dos formas de llevar a cabo la electrólisis:

#### **2.1.5.5.9.7.1 ELECTRÓLISIS A BAJA TEMPERATURA.**

El consumo eléctrico es muy elevado, del orden de la energía contenida en el hidrógeno producido. Si ese hidrógeno se emplea para producir electricidad mediante una pila de combustible con un rendimiento menor del 60% resulta un balance energético deficitario en electricidad.

Este procedimiento, por tanto, sólo se justifica para obtener hidrógeno “in situ” en pequeñas cantidades y en ausencia de otro tipo de suministros. Otra alternativa puede ser la integración con energías renovables (principalmente eólica) en la que se busque una forma de almacenar el potencial eólico excedentario. La temperatura de operación realmente no es 25°C sino hasta 80°C en electrolizadores alcalinos o de membrana de intercambio protónico.

#### **2.1.5.5.9.7.2. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA.**

El consumo de electricidad, siendo alto, comienza a resultar aceptable, para esta operación se precisa disponer de vapor de agua y de una fuente térmica de elevada temperatura, que puede ser energía solar concentrada o energía nuclear de reactores avanzados, como se explicará más adelante. Los electrolizadores también han de ser modificados, pasando a ser de óxidos sólidos.

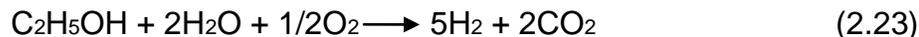
#### 2.1.5.5.9.8. FERMENTACION

Dentro de las formas de producir hidrógeno a partir de biomasa destacan las técnicas de fermentación, que pueden ser de tipo alcohólica o de tipo anaeróbica.

##### 2.1.5.5.9.8.1. FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

Las plantas almacenan la energía solar captada en forma de hidratos de carbono simples (azúcares) o complejos (almidón o celulosa), a partir de los que se puede obtener etanol por fermentación según las siguientes fases:

- **Pretratamiento de la biomasa:** se realizan procesos de trituración, molienda o pulverización para favorecer la fermentación.
- **Hidrólisis:** las moléculas complejas se transforman, en medio acuoso, en moléculas más sencillas ya sea por la acción de enzimas o por reactivos químicos.
- **Fermentación:** los azúcares se convierten en etanol por la acción de levaduras. El proceso dura unos 3 días, obteniéndose finalmente una concentración de etanol inferior al 14%.
- **Separación y purificación:** el producto obtenido se destila para obtener una concentración de etanol del 96%, pudiendo llevarse a cabo una destilación adicional con benceno para obtener una concentración del 99,5%. Es la etapa de mayor consumo energético. Sobre el etanol conseguido se puede llevar a cabo un reformado con vapor (VPR, “Vapour Phase Reforming”), que tras el tratamiento de desplazamiento produce la reacción global.



Una variante del proceso consiste en sustituir la fermentación por un proceso de reformado con agua (APR, "Aqueous Phase Reforming") de productos tales como el sorbitol, obtenidos en el proceso de hidrólisis. En este caso se sigue la Ecuación.



#### **2.1.5.5.9.8.2. FERMENTACIÓN ANAEROBIA**

También conocida como digestión anaerobia, se trata de una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que produce una mezcla de gases (principalmente CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) conocida como biogás, y a una suspensión acuosa o lodo que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa.

La materia prima para producir biogás es biomasa residual con alto contenido en humedad, especialmente purines ganaderos y lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas. Aunque hay mucha experiencia en el proceso su química y microbiología no son conocidas en detalle. Como variables importantes en el proceso se han identificado la temperatura (lográndose un funcionamiento óptimo a 35°C), la acidez (valor óptimo de pH entre 6,6 y 7,6), contenido en sólidos (deseable inferior al 10%), existencia de nutrientes para las bacterias y ausencia de inhibidores del proceso como amoníaco, sales minerales, detergentes y pesticidas. En función de todas estas variables se logra un biogás con un contenido en CH<sub>4</sub> que oscila entre el 50 y el 70%, siendo el resto mayoritariamente CO<sub>2</sub>.

Dado el elevado contenido de CH<sub>4</sub> en el biogás éste puede ser tratado con cualquiera de los procedimientos de reformado (SMR, POX o ATR) vistos en el punto dedicado a la conversión química.

#### **2.1.5.5.9.9. PROCESOS FOTOLITICOS**

Los procesos fotolíticos emplean la luz solar para producir la hidrólisis del agua. Actualmente se conocen dos procedimientos: los fotobiológicos y los fotoelectroquímicos. En ambos casos se trata de procedimientos actualmente en investigación y que se plantean para largo plazo.

##### **2.1.5.5.9.9.1. PROCESOS FOTOBIOLOGICOS**

Algunos organismos como las algas verdes, cianobacterias, bacterias fotosintéticas y bacterias de fermentación oscura pueden actuar como catalizadores biológicos para producir hidrógeno a partir de agua y ciertas enzimas como la hidrogenasa y la nitrogenasa. <La gran variedad de organismos susceptibles de ser empleados permite plantear esquemas de hibridación como el que muestra la [Figura 2.16]. En ella se distinguen dos reactores:

- **Fotorreactor:** contiene tanto algas verdes<sup>6</sup>, sensibles a la luz visible, como bacterias fotosintéticas<sup>7</sup> y cianobacterias, sensibles a la luz infrarroja. Además de hidrógeno producen azúcares que son conducidos al fermentador.
  
- **Fermentador:** se trata de un digestor anaeróbico que contiene otro tipo de bacterias que producen la fermentación de los azúcares enviados desde el fotorreactor y la biomasa alimentada desde el exterior.

La eficiencia solar de conversión de las algas verdes es del 10% y la de las bacterias fotosintéticas del 6%. Esta tecnología permitirá, por tanto, producir hidrógeno a partir de agua, luz, enzimas y biomasa, aunque a largo plazo.

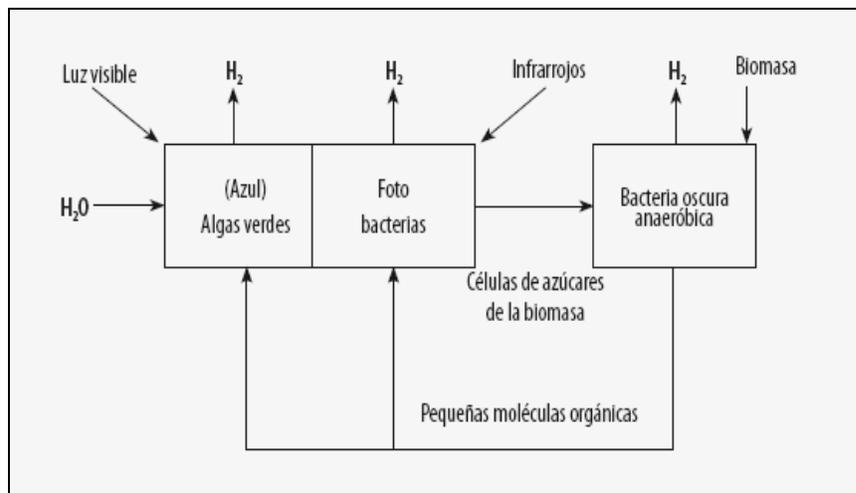


Figura 2.16. Escenario futuro para aprovechar las sinergias de diversos microorganismos en la producción de hidrógeno<sup>38</sup>

### 2.1.5.5.9.2. PROCESOS FOTOELECTROQUIMICOS

En este proceso se trata de lograr la electrólisis del agua utilizando la luz solar mediante semiconductores especializados. Diferentes materiales semiconductores trabajan en diferentes longitudes de onda, de manera que las investigaciones se centran en seleccionar aquellos que disocien el agua y sean estables en ella. El atractivo de este procedimiento radica en que ofrece gran potencial de reducción de costes, presenta una eficiencia un 30% mayor que la electrólisis realizada con células fotovoltaicas y en laboratorio se ha obtenido una eficiencia de conversión solar H<sub>2</sub> de hasta el 16%.

<sup>38</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 50

#### 2.1.5.5.9.10. BIOFOTOLISIS

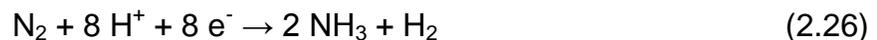
La captura de la energía solar basada en fotosíntesis puede realizarse por medio de la biofotólisis, que consiste en la capacidad que algunas algas verdes tienen de poder captar energía luminosa y usarla a través de una cadena de transporte de electrones y unas singulares enzimas (hidrogenasas), para producir hidrógeno por descomposición del agua.

La investigación del proceso de biofotólisis ha conocido grandes progresos en la última década, pero falta un largo camino que recorrer para hacer éstas producciones sostenibles y encontrar nuevos organismos.<sup>39</sup>

La formación de H<sub>2</sub> se debe a la actividad específica de la hidrogenasa:



También podemos mencionar la actividad de una nitrogenasa, que genera H<sub>2</sub> de forma secundaria a la producción de amoníaco:



La estequiometría de la reacción depende del tipo de nitrogenasa. En este caso, mo-nitrogenasa, en la Figura 2.17 se muestra la producción de hidrógeno por este proceso, la cual denota ser altamente ineficiente pues necesita que haya una escasa actividad fotolítica del agua por parte del fotosistema II combinada con anaerobiosis, lo que lleva a una degradación irreversible de los cultivos.

---

<sup>39</sup> LOPEZ Natalia, (2006), "Usos de la electricidad para la obtención de hidrógeno a través de la electrólisis de agua", Universidad de Costa Rica, Costa Rica, Pág. 15.

Para evitar tales problemas, se ha intentado abordar el proceso desde diversos ángulos: cultivos en ausencia reversible de azufre, mutagénesis dirigida.

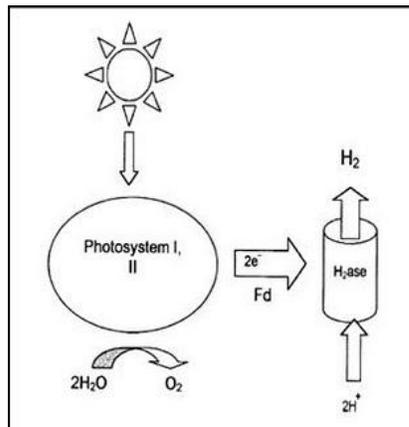


Figura 2.17. Esquema de biofotólisis indirecta de Hallenbeck y Benemann (2002)<sup>40</sup>

Falta un largo camino que recorrer para hacer éstas producciones sostenibles y encontrar nuevos organismos en resumen se detalla las tecnologías existentes para la generación de hidrógeno tal como se muestra en la Figura 2.18.

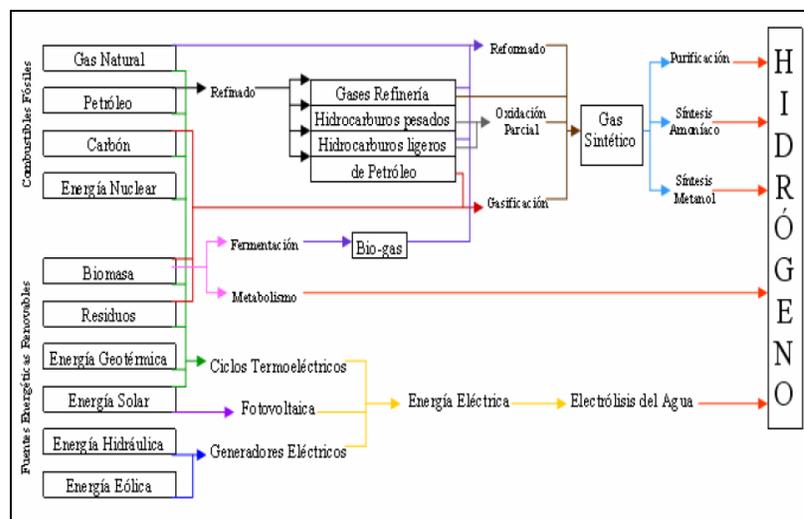


Figura 2.18. Tecnologías de generación de hidrógeno.<sup>41</sup>

<sup>40</sup> <http://elbacilosutil.blogspot.com/2009/07/produccion-biologica-de-hidrogeno-iii.html>

#### **2.1.5.5.10. FUENTES PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO.**

Al contrario de la mayoría de los combustibles, el hidrógeno debe ser extraído químicamente de materiales que son ricos en contenido de hidrógeno, tales como las fuentes fósiles, la biomasa y fuentes de energía alternativas (solar, hidroeléctrica, eólica y nuclear).

Dado que se necesita consumir energía considerable en el proceso de extracción, es importante resaltar que el hidrógeno debería ser considerado como un transmisor de energía, más que como una fuente de energía.

Las fuentes fósiles tales como el petróleo y sus derivados, el gas natural y el carbón mineral, pueden utilizarse para liberar la energía requerida para producir hidrógeno. El hidrógeno puede obtenerse de la misma fuente fósil, o se puede separar del agua utilizando la energía almacenada en la fuente.

Las fuentes de energía alternativas para producir hidrógeno se utilizan para procesos endotérmicos que dividen las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno. Los sistemas biológicos utilizan la energía solar para la obtención del hidrógeno, y la electrólisis utiliza la energía proveniente de alguna fuente suplidora de electricidad.

#### **2.1.5.5.11. ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO**

Al igual que ocurre con los procesos de producción, existen varios procedimientos para almacenar hidrógeno, enfrentándose todos ellos a la realidad expuesta en la tabla siguiente, y es que el hidrógeno almacena mucha energía por unidad de masa, pero muy poca por unidad de volumen,

---

<sup>41</sup> LOPEZ Natalia, (2006), *“Usos de la electricidad para la obtención de hidrógeno a través de la electrólisis de agua”*, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, Pág. 16.

como muestra las graficas de la densidad energética comparativa efectuada en las [Figuras 19 y 20].

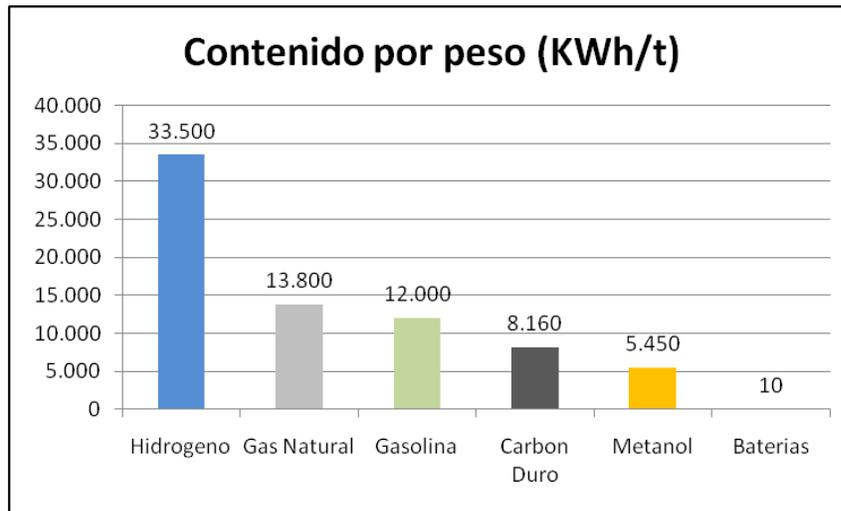


Figura 2.19 Densidad energética por unidad de peso, (el peso se refiere al propio vector, no al contenedor)<sup>42</sup>

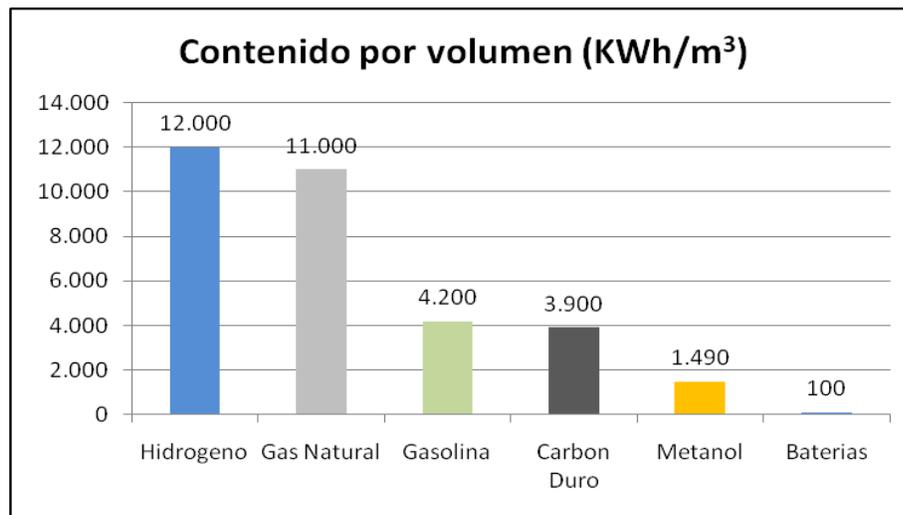


Figura 2.20. Densidad energética por unidad de volumen (el hidrógeno se supone comprimido a 700 bar. El volumen es del propio vector, no el del contenedor)<sup>43</sup>

<sup>42</sup> y <sup>43</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 73

La tabla 2.6 expresa las eficiencias volumétricas y másicas para distintas tecnologías de almacenamiento, como se ve, los sistemas de mejores prestaciones desde el punto de vista del hidrógeno almacenado por unidad de peso son el hidrógeno líquido y el comprimido. Los hidruros resultan sistemas de elevada densidad energética por unidad de volumen, pero de poca masa de hidrógeno almacenada por unidad de peso, a excepción de los hidruros químicos, que resultan competitivos en cuanto a prestaciones con el hidrógeno líquido y comprimido

	Densidad energética volumétrica teórica [kWh/l] <sup>(1)</sup>	Densidad energética volumétrica del contenedor [kWh/l] <sup>(2)</sup>	Fracción másica útil de hidrógeno [%] <sup>(3)</sup>	Proyección de la fracción másica útil de hidrógeno [%] <sup>(4)</sup>
H <sub>2</sub> líquido (1 bar; 20 K)	2,4	1,2	6	12
H <sub>2</sub> comprimido (700 bar; 300 K)	1,3	1,1	4	9
Carbón activado (100 bar; 300 K)	0,6	0,2	1	2
Carbón activado (100 bar; 77 K)	1,9	0,5	4	6
Hidruros metálicos intersticiales (AB <sub>2</sub> , AB <sub>3</sub> )	4,2	1,8	1,5	2
Hidruros metálicos complejos	4,2	0,7	5	7
Hidruros químicos (NaBH <sub>4</sub> )	3,7	1,4	6	9

Tabla 2.6. Eficiencias volumétricas y másicas de diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno<sup>44</sup>

#### 2.1.5.5.11.1. HIDROGENO COMPRIMIDO

El almacenamiento como gas comprimido es el más sencillo, aunque las densidades energéticas conseguidas son las menores a menos que se emplee alta presión, ya que la densidad energética depende linealmente de la presión si se asume un comportamiento como gas ideal. Las presiones de trabajo actuales son de 200 bar, llegando a 700 bar en los equipos más

<sup>44</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), "El hidrógeno y la energía", Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Pág. 74

avanzados. El consumo energético de este procedimiento viene dado por la necesidad de comprimir el hidrógeno.

La [Figura 2.21] presenta la mínima energía de compresión requerida, respecto a la energía química contenida en el hidrógeno, según la presión de almacenamiento. Hay que hacer notar que dichos consumos de energía se han calculado para compresiones isotermas reversibles, siendo los consumos reales mayores. Así, el 5,3% teórico para alcanzar 200 bar se convierte en realidad en algo menos del 10%. En cualquier caso, la curva no crece linealmente, lo que supone que en términos relativos resulta más eficaz trabajar a altas presiones.

Así, el mínimo consumo para alcanzar los 700 bar es 6,5%, es decir, sólo un 22% más que para alcanzar 200 bar, habiéndose incrementado la presión 3,5 veces. La desviación con la realidad se mantiene, siendo el consumo real para llegar a 700 bar de aproximadamente un 15% de la energía química almacenada en el hidrógeno.

Dentro de las instalaciones de hidrógeno comprimido se pueden distinguir:

- Las instalaciones con gran volumen de almacenamiento donde es importante el coste, y no lo es el volumen o la masa del sistema, por tratarse de instalaciones estacionarias. Para reducir el coste se suelen utilizar espacios libres enterrados como cuevas o acuíferos (naturales o artificiales; muchas veces son yacimientos de gas naturales vacíos), en los que se puede almacenar el hidrógeno a pocos milibares y en algunos casos hasta unos 10 bar (lo que supone un gasto muy pequeño en compresión).

- En las pequeñas instalaciones estacionarias normalmente se busca una solución de compromiso entre el coste, empleando para ellos equipos estándares y el volumen y la masa, ya que normalmente se transporta el hidrógeno hasta estas instalaciones en camiones. Se suelen utilizar botellas de acero estándar con presión de 200 bar, y volúmenes de 10 ó 50 litros.
- Para instalaciones móviles (transporte o dispositivos portátiles) las botellas de acero no satisfacen plenamente los requerimientos planteados, ya que son pesadas y la presión no es suficientemente alta para que sean poco voluminosas. En los últimos años se han desarrollado materiales avanzados, siguiendo varias líneas (aluminio, compuestos, polímeros, fibras, etc.), que presentan un peso muy inferior al acero manteniendo unas buenas propiedades mecánicas de resistencia. Además estos materiales consiguen almacenar hidrógeno a más alta presión, siendo hoy en día bastante habitual la de 300 ó 350 bar, y existiendo desarrollos de depósitos de hasta 700 bar que están empezando a salir al mercado. Este procedimiento de almacenamiento resulta común en flotas de autobuses, estando favorecido por la experiencia con vehículos de gas natural.

#### **2.1.5.5.11.2. HIDROGENO LÍQUIDO.**

La tecnología criogénica del hidrógeno no está tan extendida como lo está la del hidrógeno comprimido, pero ha alcanzado un alto nivel de madurez, y mantiene una cuota de mercado importante. No obstante es una tecnología compleja que parece que quedará reservada al uso industrial por las complicaciones asociadas al uso generalizado por los ciudadanos.

Pese a ello se considera el suministro de hidrógeno líquido para vehículos mediante el uso de brazos robóticos que manipulen las mangueras, etc. Aun

así, el principal campo de aplicación es el almacenamiento a gran escala, incluyendo especialmente el transporte transoceánico en barco.

La temperatura de saturación del hidrógeno a 1 atm es de unos 20 K (-253°C), esta es la máxima temperatura a la que el hidrógeno existe como líquido a presión ambiente, y que por tanto debe ser mantenida para poder almacenarlo en ese estado. Esto presenta dos problemas: alcanzar esa temperatura y mantenerla.

Pese a que el calor necesario para condensar hidrógeno a presión ambiente e inicialmente a 20°C representa sólo el 3,2% de la energía química contenida en él este procedimiento no es viable, pues exigiría disponer de un foco térmico de temperatura inferior a 20 K, para lo que habría que disponer de un sistema frigorífico que como mínimo demandase  $(293-20)/20$  kWh de energía por cada kWh de frío producido, es decir, que en el mejor de los casos se estaría consumiendo casi un 44% del poder calorífico inferior del hidrógeno almacenado.

El proceso de condensación empleado más frecuentemente es el método Linde que requiere suministrar hidrógeno gaseoso a baja temperatura (como máximo a 183 K para que el sistema comience a funcionar). Esta baja temperatura se puede suministrar a partir de nitrógeno líquido (77 K a presión atmosférica) obtenido en una planta auxiliar.

Existen diversas variaciones sobre el proceso Linde, entre ellas la de Claude y Heylandt. Con carácter general puede decirse que el proceso de licuefacción demanda un 30% de la energía química del hidrógeno almacenada.

Otro inconveniente del hidrógeno líquido es la necesidad de mantener el recipiente a 20 K. Ello se logra como en los tanques de gas natural, recurriendo a cámaras de vacío en las paredes, aunque en el caso del gas

natural la temperatura a la que hay que mantenerlo es de 112 K. El consumo energético demandado por este sistema se cifra entre el 1 y el 2% de la energía almacenada.

Actualmente se está estudiando un sistema híbrido entre la compresión y la licuefacción, el llamado hidrógeno “crio-comprimido” [W 4]. Se trata de hidrógeno gaseoso a presión pero a temperatura criogénica (77 K, lograda mediante nitrógeno líquido). Este sistema presenta similares prestaciones volumétricas que el hidrógeno licuado pero reduce considerablemente las pérdidas por evaporación, así como la energía consumida.

### 2.1.5.5.11.3. HIDRUROS METÁLICOS

Los hidruros metálicos son combinaciones de aleaciones metálicas que absorben hidrógeno, generalmente entre 1%-2% en peso trabajando a temperatura ambiente y a presión atmosférica. Para almacenar grandes volúmenes de hidrógeno se emplean tanques que contienen metal granular, que absorbe y libera hidrógeno con la aplicación de calor.

Compuesto Intermetálico	Prototipo	Hidruros
AB <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>
AB <sub>5</sub>	ZrV <sub>2</sub> , ZrMn <sub>2</sub> , TiMn <sub>2</sub>	ZrV <sub>2</sub> H <sub>5.5</sub>
AB <sub>3</sub>	CeNi <sub>3</sub> , YFe <sub>3</sub>	CeNi <sub>3</sub> H <sub>4</sub>
A <sub>2</sub> B <sub>7</sub>	Y <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub> , Th <sub>2</sub> Fe <sub>7</sub>	Y <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub> H <sub>3</sub>
A <sub>6</sub> B <sub>23</sub>	Y <sub>6</sub> Fe <sub>23</sub>	Ho <sub>6</sub> Fe <sub>23</sub> H <sub>12</sub>
AB	TiFe	TiFeH <sub>2</sub>
A <sub>2</sub> B	Mg Ni, Ti <sub>2</sub> Ni	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>

Tabla 2.7 Principales Hidruros para el almacenamiento de Hidrógeno<sup>45</sup>

Los hidruros más importantes para almacenaje de hidrógeno se muestran en la Tabla 2.7 El elemento A normalmente es una tierra rara o un metal alcalino y tiende a formar un hidruro estable. El elemento B suele ser un

<sup>45</sup> <http://www.elp.uji.es/paperspdf/2005%20almacen%20energia.pdf>

metal de transición y sólo forma hidruros inestables. El níquel se suele usar como elemento B por sus propiedades catalíticas para la disociación de hidrógeno.

La densidad volumétrica de hidrógeno en hidruros metálicos llega a ser el doble que la densidad del hidrógeno líquido, debido a que el hidrógeno se intercala en el metal anfitrión y actúa como un átomo metálico en la matriz anfitrión.

La máxima densidad volumétrica alcanzable es de 187 kg/m<sup>3</sup>. Con LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub> se consiguió una densidad volumétrica de 115 kg/m<sup>3</sup>, que corresponde a una densidad en peso de 1.4%.<sup>1</sup> Los hidruros reversibles que trabajan a temperatura ambiente y presión atmosférica están limitados a una densidad gravimétrica de hidrógeno menor que el 3% por la presencia de los metales de transición. El tanque de hidruro metálico está considerado como un sistema de combustible muy seguro en caso de colisión, ya que la pérdida de presión en caso de rotura enfría el hidruro metálico e interrumpe la emisión de hidrógeno. Muchos investigadores creen que los hidruros metálicos pueden representar un medio ideal de almacenamiento.

#### **2.1.5.5.11.4. OTROS MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO**

Otros métodos más novedosos consisten en el empleo de un sólido poroso para adsorber en él el hidrógeno, presentando este procedimiento la ventaja de reducir drásticamente la presión de almacenamiento (desventaja del hidrógeno comprimido y de los hidruros).

Los nanotubos de carbono surgieron en 1991 como una derivación de la investigación en fullerenos llevada a cabo por Sumio Iijima [W 6] y consisten en una especie de grafito enrollado con forma cilíndrica, constituyendo una estructura muy resistente y con numerosas aplicaciones. Pueden almacenar

una gran cantidad de hidrógeno, ya sea adsorbido en la superficie del nanotubo o dentro de la estructura del tubo.

#### **2.1.5.5.12. TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DE HIDROGENO.**

Una vez almacenado el hidrogeno es posible que el consumidor final demande un servicio de distribución cuya logística vendrá determinada principalmente en función del consumo y necesidades. En la actualidad y para la demanda exclusivamente industrial de hidrógeno el transporte se realiza:

- Por carretera en botellas presurizadas.
- Por ferrocarril o barco en botellas presurizadas o depósitos criogénicos.

Los gaseoductos convencionales para gas natural admiten una mezcla de hidrógeno en gas natural de entre el 5 y el 30%. Y la construcción de gaseoductos para hidrógeno no supone un gran inconveniente ni técnico ni económico.

Existen diferentes formas de distribución de hidrógeno atendiendo a las aplicaciones:

- **Hidrogenas con servicio de hidrógeno presurizado.** A nivel de transporte por carretera estarían dedicadas al vehículo privado y autobuses urbanos (con pila o con motor de combustión interna), así como a camiones y furgonetas de reparto. Todas estas aplicaciones serían en mercados masivos. También se aplicaría este suministro al transporte ferroviario, siendo un nicho de mercado de corto plazo el de

transporte de viajeros. En cuanto al transporte marítimo, se produciría un mercado a corto plazo en embarcaciones destinadas a ríos y lagos.

- **Hidrogenas con servicio de hidrógeno líquido.** El mercado se establecería a corto plazo para motocicletas, suministrando el hidrógeno en cartuchos.
- **Hidrógeno canalizado.** Se destinaría a aplicaciones estacionarias, tanto para el sector residencial/comercial con pilas de combustible de menos de 200 kW, como para aplicaciones de generación distribuida con pilas de más de 200 kW.
- **Suministro en botellas a presión.** Se destinaría a la aviación y vehículos de gran uso (taxis, etc), siendo ambos campos nichos de corto plazo. Bajo este formato se suministraría el hidrógeno también a aplicaciones portátiles, en sustitución de las actuales baterías.

Dentro de los diferentes sistemas logísticos, el destinado a satisfacer las necesidades de transporte merece una atención especial, debido a ser un mercado masivo. Existen tres grupos de interés relacionados con una estación de servicio:

1. Los usuarios finales.
2. El gestor de la estación.
3. La empresa energética comercializadora del hidrógeno.

Las prioridades principales en los usuarios finales son: la seguridad, el tiempo de repostado, el coste y la disponibilidad, siendo prioritaria la primera. Si bien se lleva utilizando el hidrógeno en la industria durante muchos años ya, el uso por personal no cualificado de forma segura es algo nuevo. Esto

va a implicar un diseño de los surtidores de manejo muy sencillo y a prueba de fugas o errores.

La disponibilidad suficientemente extensa y el sobre-coste que la estación de servicio tenga sobre el precio final del combustible son temas económicos que probablemente tengan su solución a largo plazo. Por último, la velocidad de repostado es un problema técnico, que afectará al diseño del esquema de carga y dependerá del tipo de combustible que se imponga **hidrógeno comprimido**, licuado o combinado en un **compuesto líquido**.

Los gestores de las estaciones de servicio tienen prioridades, en este caso existirán dos tipos de instalaciones diferentes, las que tengan producción “in situ” y las que se provean de hidrógeno producido de forma externamente. Para ambos la seguridad, no sólo del cliente, sino de su personal y de toda la instalación, es una prioridad, y para que esta seguridad no encarezca las instalaciones de forma desmesurada, es importante el desarrollo de estándares.

En el caso de estaciones de servicio con producción “in situ”, estos sistemas han de ser suficientemente compactos para no aumentar la huella de la estación, lo que aumentaría la inversión, automáticos y de control remoto, para no aumentar los costes de personal aumentando las necesidades de formación de los operarios, y suficientemente fiables para no tener problemas de suministro o necesidades excesivas de suministro complementario.

En el caso de suministro del hidrógeno de fuentes externas, el suministro por tubería se realizará de forma equivalente a como se realiza el de gas natural en la actualidad, mientras que el realizado por carretera será probablemente de hidrógeno licuado, donde las únicas variaciones respecto

al suministro actual de combustibles líquidos será la tecnología de almacenamiento y trasvase.

### **2.1.5.5.13. PILAS DE COMBUSTIBLE**

#### **2.1.5.5.13.1. INTRODUCCIÓN**

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos en los que la energía de una reacción química se convierte directamente en electricidad, con una alta eficiencia. Las pilas de combustible no disponen de partes móviles internas, combinan electro químicamente un combustible (típicamente hidrógeno) y un oxidante sin que haya combustión, de este modo se compensan las ineficiencias y contaminación de las formas de conversión de la energía tradicionales.

Las pilas de combustible producen electricidad a partir de la oxidación controlada del hidrógeno. La energía química se convierte dentro de la pila de combustible directamente en energía eléctrica y calor cuando el combustible hidrógeno se combina con el oxígeno del aire, el único subproducto de la pila de combustible es agua. Si se utiliza hidrógeno puro no se generan productos contaminantes. Los productos contaminantes se pueden producir a la hora de generar el hidrógeno.

Las pilas de combustible son mucho más eficientes que las fuentes de energía tradicional por que convierten la energía química del combustible directamente en electricidad. Por esto la pila de combustible es mucho más limpia que cualquier combustible de hidrocarburos.

### 2.1.5.5.13.2. FUNCIONAMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE

Cada pila de combustible tiene dos electrodos exactamente iguales, uno positivo y otro negativo, llamados cátodo y ánodo respectivamente. Las reacciones que producen la electricidad tienen lugar en estos electrodos mediante un electrolito, que transporta las partículas cargadas eléctricamente de un electrodo al otro, y funciona como catalizador, acelerando y controlando las reacciones que tienen lugar en los electrodos.

La Figura 2.22 explica las reacciones que se producen en el electrolito ya que el sistema opera con dos tipos de gases, combustible y oxidante, que pasan a través de las superficies del ánodo y cátodo opuestas al electrolito, respectivamente, y generan energía eléctrica por oxidación electroquímica del combustible, generalmente hidrógeno, y la reducción electroquímica del oxidante, normalmente oxígeno. Se transforma entonces la energía química, almacenada en el enlace H-H de la molécula H<sub>2</sub>, en energía eléctrica y vapor de agua.

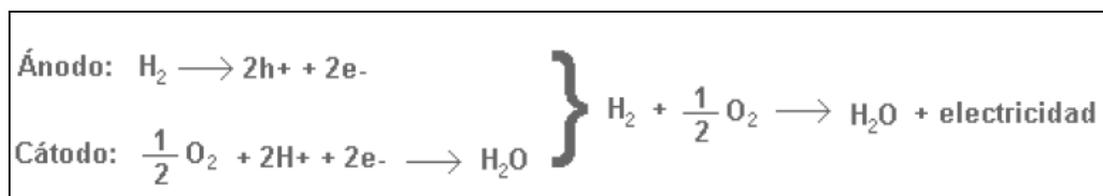


Figura 2.22. Reacciones químicas que se producen en Ánodo y Cátodo.<sup>46</sup>

Existen varios tipos de pilas de combustible, y cada una opera de una forma un poco diferente a las demás. Pero en términos generales, los átomos de hidrógeno entran en la pila de combustible por el ánodo donde por medio de una reacción química se les extraen sus electrones. Ahora los átomos de hidrógeno están ionizados, y transportan una carga eléctrica

<sup>46</sup> [http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14\\_electroquimica.php](http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14_electroquimica.php)

positiva, los electrones cargados negativamente generan la corriente a través de las conexiones eléctricas y realizan el trabajo para el que se haya dispuesto la pila de combustible.

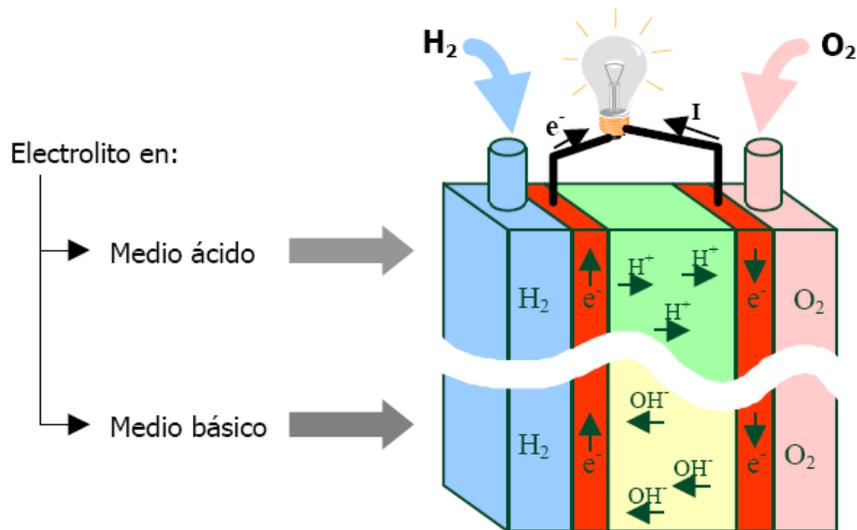


Figura 2.23. Diagrama del funcionamiento de una pila de combustible.<sup>47</sup>

En la figura 2.23 se explica en funcionamiento de una pila de combustible, en la cual el oxígeno entra en la pila de combustible por el cátodo y, en algunos tipos de pilas de combustible, allí se combina con los electrones que regresan del circuito eléctrico y los iones de hidrógeno que han viajado desde el ánodo a través del electrolito.

En otros tipos de pilas de combustible, el oxígeno coge los electrones del cátodo y entonces viaja a través del electrolito hasta el ánodo, donde se combina con los iones de hidrógeno.

En las pilas de combustible el electrolito juega un papel clave. Sólo debe dejar que pasen los iones apropiados del cátodo al ánodo. Si electrones libres u otro tipo de sustancias pudiesen pasar a través del electrolito,

<sup>47</sup> CAPÁRROS María, (2004), "Tecnologías del Hidrogeno y Pilas de Combustible", ARIEMA Energía y Medioambiente, SL, Madrid

entorpecerían la reacción química. El electrolito puede estar compuesto de distintos materiales. El tipo de material del que está compuesto el electrolito determina el tipo de pila, que describiremos más adelante.

Las reacciones que se producen dentro de la pila generan una tensión entre los electrodos. Esta tensión inicial es de alrededor de 1.2v para las pilas de baja temperatura (<100°C) y de 1.0v para las pilas de alta temperatura (>100°C). Sin embargo, esta tensión se reduce por varios factores que más adelante explicaremos.

El rendimiento de la reacción viene determinado por la ecuación 2.27 de Nernst:

$$E = E_0 + \frac{Rt}{2F} \ln \left[ \frac{P[\text{H}_2] \cdot P[\text{2O}_2]}{P[\text{H}_2\text{O}]} \right] \quad (2.27)$$

### **2.1.5.5.13.3. TENSIÓN DE OPERACIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.**

El valor teórico de la tensión del circuito abierto de una pila de combustible de hidrógeno viene dado por la fórmula:

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} \quad (2.28)$$

Esto nos da un valor de alrededor de 1.2 V para una pila que opere por debajo de 100°C. Sin embargo, cuando la pila de combustible es fabricada y

puesta en funcionamiento, sucede que la tensión es menor que esta, usualmente considerablemente menor.

La figura 2.24 muestra el funcionamiento de una típica pila de una sola celda operando alrededor de 70 °C, a una presión de aire normal. Los puntos clave a destacar de este gráfico de la tensión de la pila contra la densidad de corriente son los siguientes:

- Incluso el valor de la tensión del circuito abierto es menor que el valor teórico.
- Hay una rápida caída de tensión inicial.
- A continuación la tensión cae más lentamente, y más linealmente.
- En ocasiones existe una densidad de corriente mayor para la cual la tensión vuelve a caer rápidamente.

Si la pila de combustible opera a mayores temperaturas, la forma del gráfico tensión/densidad de corriente cambia. En particular, la caída de tensión inicial según la pila va generando la corriente es marcadamente menor.

Los puntos clave son los siguientes:

- El valor de la tensión del circuito abierto es igual o sólo un poco menor que el valor teórico.
- La caída de tensión inicial es muy pequeña, y el gráfico es más lineal.

Puede haber una densidad de corriente mayor para la cual la tensión cae rápidamente, como para las pilas de combustible de baja temperatura.

#### 2.1.5.5.13.4. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLES

Los distintos tipos de pilas de combustible generalmente se caracterizan por el tipo de material que utiliza el electrolito. En la figura 2.24 se aprecia como el electrolito es la sustancia que hay entre el cátodo y el ánodo y que sirve de puente para el intercambio de iones que genera la corriente eléctrica.<sup>48</sup>

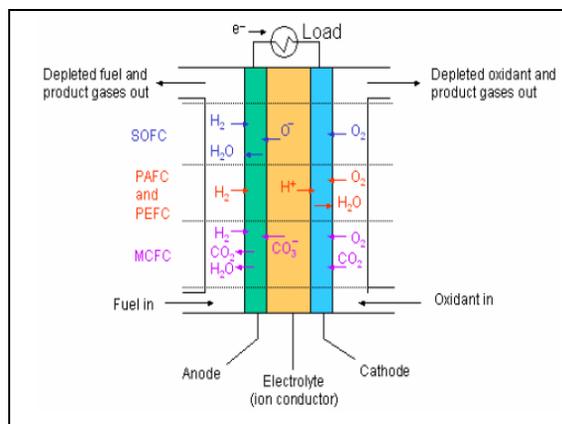


Figura 2.24. Diagrama de reactantes y productos.<sup>49</sup>

Aunque existen decenas de tipos distintos de pilas de combustible, hay seis tipos principales de pilas de combustible que se encuentran en distintas etapas de viabilidad económica, o en investigación, desarrollo y demostración.

Es por eso que se determinan seis tipos de celdas de combustible:

1. Alcalina (AFC).
2. Carbonato Fundido (MCFC).
3. Ácido Fosfórico (PAFC).

<sup>48</sup> <http://www.qarlos.online.fr/Personal/LasPilasDeCombustible.pdf>

<sup>49</sup> [http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET-TE\\_pilas\\_de\\_combustible.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET-TE_pilas_de_combustible.pdf)

4. Membrana Polimérica (PEMFC).

5. Óxido Sólido (SOFC).

6. Conversión Directa de Metanol (DMFC).

#### 2.1.5.5.13.4.1. PILAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS (AFC)

Las pilas de combustible alcalinas (AFC) fueron una de las primeras pilas de combustible en ser desarrolladas, y el primer tipo usado de forma extensiva en el programa espacial de Estados Unidos para producir energía eléctrica y agua a bordo de las naves espaciales.

Estas pilas de combustible utilizan una solución de hidróxido de potasio en agua como electrolito y pueden usar una gran variedad de metales no preciosos como catalizadores en el ánodo y el cátodo como muestra la Figura 2.25.

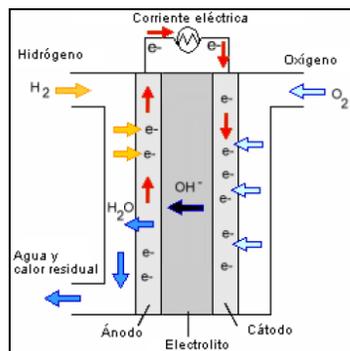


Figura 2.25. Reacción en una pila de combustible alcalina.<sup>50</sup>

Las pilas AFC de altas temperaturas pueden funcionar a temperaturas entre 100°C y 250°C. No obstante, diseños más modernos de estas pilas funcionan a temperaturas más bajas, entre 23°C y 70°C. Las pilas AFC son

<sup>50</sup>[http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET-TE\\_pilas\\_de\\_combustible.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET-TE_pilas_de_combustible.pdf)

de alto rendimiento debido a la velocidad a la que tienen lugar las reacciones que se producen en ellas. También son muy eficientes, alcanzando un 60% rendimiento en aplicaciones espaciales.<sup>51</sup>

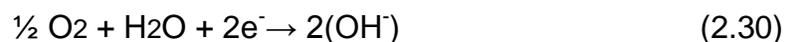
Su desventaja reside en su sensibilidad a la contaminación por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). De hecho, incluso una pequeña cantidad de CO<sub>2</sub> en el aire puede afectar el funcionamiento de la pila, haciendo necesario purificar tanto el hidrógeno como el oxígeno utilizados.

Este proceso de purificación incrementa el coste de la pila, y además duran menos debido a la susceptibilidad que presentan a este tipo de contaminación. En ambientes como el espacio o el fondo del mar, esta desventaja no tiene lugar. Sin embargo, para competir en mercados más generales, estas pilas de combustible tendrán que hacerse más rentables.

**Reacción en el ánodo:**



**Reacción en el cátodo:**



---

<sup>51</sup> <http://www.qarlos.online.fr/Personal/LasPilasDeCombustible.pdf>

#### 2.1.5.5.13.4.2. PILAS DE COM BUSTIBLE DE CARBONATO FUNDIDO (MCFC)

Las pilas MCFC [Figura 2.26] son pilas de combustible de alta temperatura que utilizan un electrolito compuesto de una mezcla de sales de carbonato fundidas dispersas en una matriz cerámica porosa y químicamente inerte de óxido de litio-aluminio. Dado que operan a temperaturas extremadamente altas de entre 600 y 650°C, se pueden utilizar en el ánodo y el cátodo metales que no sean nobles como catalizadores, lo que reduce los costes.

Las pilas MCFC pueden tener un rendimiento de aproximadamente el 60%, considerablemente más alto que las plantas de pilas de ácido fosfórico que sólo obtienen entre un 37 y un 42% de rendimiento. Las altas temperaturas de operación las convierten en unas buenas candidatas para aplicaciones en ciclos combinados, en los que el calor de escape se utiliza para generar electricidad de forma adicional.

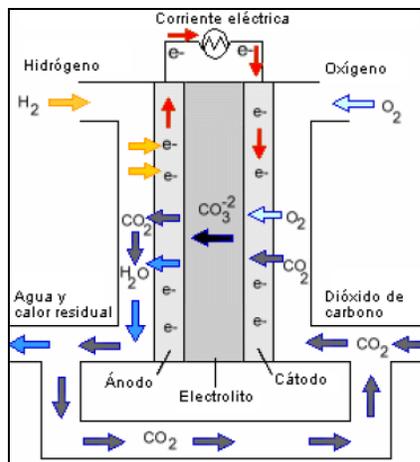


Figura 2.26. Reacción de una pila de carbonato fundido.<sup>52</sup>

<sup>52</sup>[http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET-TE\\_pilas\\_de\\_combustible.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET-TE_pilas_de_combustible.pdf)

Cuando el calor de escape se utiliza en la cogeneración, la eficiencia térmica total puede alcanzar el 85%.<sup>53</sup> Las pilas MCFC no necesitan un reformador externo para convertir en hidrógeno combustibles de energía más densa. Debido a las altas temperaturas a las que operan, estos combustibles se convierten en hidrógeno dentro de la propia pila de combustible mediante un proceso que se denomina conversión interna, lo que también reduce costes.

Las pilas de carbonato fundido no son propensas a la contaminación por monóxido o dióxido de carbono (pueden incluso usar óxidos de carbono como combustible), permitiendo que se puedan usar en ellas como combustible gases fabricados del carbón. Aunque son más resistentes a las impurezas que otros tipos de pilas, los científicos están buscando formas de hacer la pila MCFC suficientemente resistente a las impurezas procedentes del carbón, como pueden ser el sulfuro y las partículas.

La desventaja más importante de la tecnología existente de MCFC es la duración. Las altas temperaturas a las que operan estas pilas y el electrolito corrosivo que se utiliza en ellas, hacen que sus componentes se deterioren, reduciendo la duración de la pila.

**Reacciones en el ánodo:**



**Reacción en el cátodo:**



---

<sup>53</sup><http://www.carlos.online.fr/Personal/LasPilasDeCombustible.pdf>

#### **2.1.5.5.13.4.3. PILAS DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)**

La tecnología de las pilas de ácido fosfórico es la más madura de las que se utilizan hoy en día. Las pilas PAFC utilizan un electrolito de ácido fosfórico concentrado al 100% ( $H_3PO_4$ ) retenido de una matriz de carburo de silicio y opera a unas temperaturas que se encuentran entre 150 y 220°C.

El ácido fosfórico concentrado es un ácido relativamente estable, que permite operar a estas temperaturas. A temperaturas menores, el envenenamiento del electro-catalizador del ánodo (usualmente platino) con CO y la pobre conducción iónica en el electrolito empieza a ser problemáticos. Los electrodos consisten típicamente en platino y carbono.

La pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC) es considerada como la primera generación de pilas de combustible modernas. Es uno de los tipos de pilas de combustible más desarrollados y el más usado en la actualidad (existen mas de 200 unidades en uso actualmente). Este tipo de pila se usa normalmente en la generación de energía estacionaria.

La pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC) es considerada como la primera generación de pilas de combustible modernas. Es uno de los tipos de pilas de combustible más desarrollados y el más usado en la actualidad.

En la actualidad sus plantas de 200 KW están disponibles y han sido instaladas en más de 200 lugares de los Estados Unidos, Europa y Asia. Las pilas PAFC [Figura 2.27] son menos sensibles a la contaminación del CO que otros tipos de pilas.<sup>54</sup>

---

<sup>54</sup> <http://www.qarlos.online.fr/Personal/LasPilasDeCombustible.pdf>

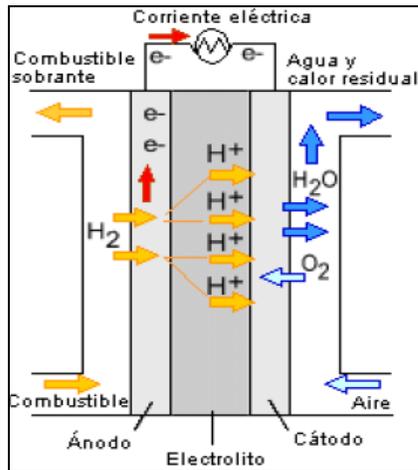


Figura 2.27. Reacción en una pila de combustible PAFC<sup>55</sup>

Presentan una eficacia del 85% cuando se utilizan como generadores de energía eléctrica y calórica, pero son menos eficaces cuando generan sólo energía eléctrica (entre el 37 y el 42%). Las pilas PAFC también producen menos energía que otras pilas a igualdad de peso y volumen. Por este motivo, estas pilas normalmente presentan gran tamaño y peso y son más caras.

**Reacción en el ánodo:**



**Reacción en el cátodo:**



**2.1.5.5.13.4.4. PILAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEMFC).**

Las pilas PEM usan como electrolito un polímero sólido y electrodos porosos de carbono que contienen un catalizador de platino. Necesitan

<sup>55</sup>[http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET-TE\\_pilas\\_de\\_combustible.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET-TE_pilas_de_combustible.pdf)

hidrógeno y oxígeno y agua, y no requieren el uso de fluidos corrosivos como otras pilas de combustible. Normalmente usan hidrógeno puro como combustible almacenado en depósitos o convertidores incorporados.

Las pilas de membrana de electrolito polímero operan a relativamente bajas temperaturas, (80°C). Esto permite que arranquen rápidamente al necesitar menos tiempo de calentamiento. Esto representa una ventaja, ya que supone menor desgaste entre los componentes del sistema, y por tanto aumenta la duración del mismo. Estas pilas operan con un catalizador de platino, lo que encarece mucho el sistema.

Además, el catalizador de platino es extremadamente sensible a la contaminación por CO, por lo que es necesario utilizar un reactor adicional para reducir el nivel de CO en el gas combustible. Este problema se agudiza cuando el hidrógeno empleado proviene de un combustible de alcohol o de hidrocarburo. Actualmente, se están estudiando reemplazar estos catalizadores por los de platino/rutenio, que presentan más resistencia a la contaminación por CO.

Las pilas PEM [Figura 2.28] se usan fundamentalmente para aplicaciones en el transporte e instalaciones estacionarias. Debido a su rapidez para el arranque, baja sensibilidad a la orientación, y su relación favorable entre peso y energía producida, las pilas de combustible PEM son especialmente adecuadas para su uso en vehículos de pasajeros, como por ejemplo coches y autobuses.

Un obstáculo importante para el uso de estas pilas en vehículos es el almacenamiento del hidrógeno. La mayoría de los vehículos que funcionan con hidrógeno deben almacenarlo en el propio vehículo en forma de gas comprimido dentro de depósitos presurizados.

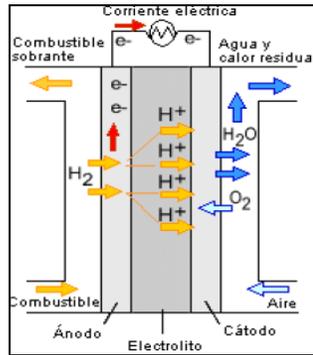


Figura 2.28. Reacción de un apila de combustible PEM<sup>56</sup>

Debido a la baja densidad energética del hidrógeno, es difícil almacenar suficiente hidrógeno a bordo para conseguir que los vehículos tengan la misma autonomía que los que usan gasolina (entre 200 y 250 Km.).

Combustibles líquidos de alta densidad tales como metanol, etanol, gas natural, gas de petróleo licuado y gasolina, pueden usarse como combustible, pero entonces los vehículos deben de contar con un procesador de combustible a bordo para convertir el metanol en hidrógeno.

Esto incrementa los costes y las necesidades de mantenimiento. Aunque el procesador también desprende dióxido de carbono (un gas invernadero), la cantidad desprendida es menor que la de los motores convencionales de gasolina.

**Reacción en el ánodo:**



**Reacción en el cátodo:**



<sup>56</sup>[http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET-TE\\_pilas\\_de\\_combustible.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET-TE_pilas_de_combustible.pdf)

#### 2.1.5.5.13.4.5. PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

Las pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) usan como electrolito un componente de cerámica sólido y no poroso. Al ser el electrolito sólido, las pilas no se tienen que construir con una configuración laminar, como ocurre con las otras pilas.

Se espera que las pilas SOFC tengan un rendimiento en la conversión de combustible en electricidad de entre el 50-60%. En aplicaciones cuya finalidad es captar y utilizar el calor que desprende el sistema (cogeneración), el rendimiento total del combustible puede llegar hasta el 80-85%. Las pilas de óxido sólido operan a temperaturas muy elevadas (alrededor de los 1000° C). Las elevadas temperaturas hacen que no sea necesario utilizar metales nobles como catalizadores, reduciendo el coste. También permite a la pila SOFC [Figura 2.29] convertir los combustibles internamente, lo que supone la posibilidad de usar diferentes combustibles y reduce el coste asociado que supone añadir un convertidor al sistema.

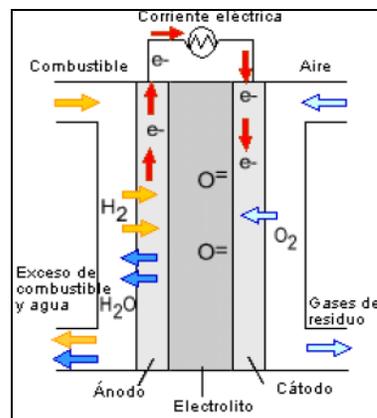


Figura 2.29. Reacción de un apila de combustible SOFC<sup>57</sup>

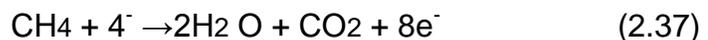
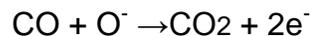
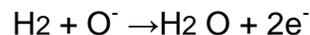
<sup>57</sup>[http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET-TE\\_pilas\\_de\\_combustible.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET-TE_pilas_de_combustible.pdf)

Estas pilas también son las más resistentes al sulfuro. Además, no se contaminan con monóxido de carbono (CO), que puede incluso ser utilizado como combustible. Esto permite el uso en estas pilas de gases procedentes del carbón.

Las elevadas temperaturas tienen desventajas: su arranque es lento y necesitan abundante protección para evitar que el calor se escape y para proteger al personal que trabaja con ellas, lo que puede ser aceptable para algún tipo de aplicaciones, pero no para el transporte y para algunos aparatos portátiles. Las altas temperaturas afectan también a la duración de los materiales que se utilizan. El desarrollo de materiales a bajo precio y de larga duración a las temperaturas a las que funciona la pila, es la clave del reto tecnológico al que se somete esta tecnología.

Los científicos están estudiando en la actualidad el potencial para desarrollar pilas SOFC que funcionen a 800 °C o menos, que tengan menos problemas de duración y que cuesten menos ya que a temperaturas más bajas producen menos electricidad, y no se han encontrado materiales para estas pilas que funcionen a este rango de temperaturas.

**Reacciones en el ánodo:**



**Reacción en el cátodo:**



### 2.1.5.5.13.4.6. PILAS DE COMBUSTIBLE DE CONVERSIÓN DIRECTA DE METANOL (DMFC):

La pila de conversión directa de metanol es similar a las pilas PEMFC en que utiliza una membrana polimérica como electrolito. De todas formas, un catalizador en el ánodo de la DMFC extrae hidrógeno del metanol líquido, eliminando la necesidad de un reformador del combustible. Mientras que representan una muy atractiva solución a los problemas de almacenamiento y transporte de hidrógeno, el principal problema a la hora de las aplicaciones comerciales de este tipo de pilas de combustible estriba en su relativamente bajo rendimiento frente a las pilas PEMFC que utilizan hidrógeno como combustible.

La tecnología de la pila de combustible de metanol directo es relativamente nueva si se compara con la de otras pilas de combustible que funcionan con hidrógeno, y su investigación y desarrollo va 3 ó 4 años por detrás de las otras pilas de combustible. En la tabla 2.8 se muestra en resumen los diferentes tipos de celdas de combustible.

Tipo	Electrolito	Temperatura de operación °C	Usos	Ventajas	Desventajas
Membrana polimérica (PEMFC)	Polímero sólido	60-100	Generación estacionaria. Portátiles. Vehículos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electrolito sólido reduce corrosión y mantenimiento.</li> <li>Baja temperatura.</li> <li>Arranque rápido.</li> </ul>	Catalizadores costosos. Sensible a impurezas en H <sub>2</sub> u otro combustible.
Alcalina (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	90-100	Espacio. Militar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reacción catódica más rápida en electrolito alcalino.</li> <li>Mayor eficiencia.</li> </ul>	Sensible a impurezas.
Ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido	175-200	Generación estacionaria. Portátiles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>85 % eficiencia en cogeneración de electricidad y calor.</li> <li>Acepta H<sub>2</sub> impuro.</li> </ul>	Catalizador de Pt. Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen.
Carbonatos fundidos (MFCC)	Solución líquida de litio, sodio y potasio	600-1000	Generación estacionaria.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ventajas por alta temperatura: mayor eficiencia, catalizadores más baratos.</li> </ul>	Corrosión debido a altas temperaturas. Baja vida útil.
Oxidos sólidos (SOFC)	Oxido de Zr sólido con adiciones de Itrio	600-1000	Generación estacionaria.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ventajas por alta temperatura.</li> <li>Ventajas electrolito sólido.</li> </ul>	Corrosión debido a altas temperaturas. Baja vida útil.
Metanol directo (DMFC)	Similares a las PEM, pero con metanol como combustible	60-100	Generación estacionaria. Portátiles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Usa un combustible líquido (más cómodo y mayor densidad energética)</li> <li>Reformado in situ en la propia Pila</li> </ul>	Problemas de cross-over (metanol atraviesa electrolito sin reaccionar) Baja densidad energética. Aprox. Triple tamaño que una PEM para misma potencia.

Tabla 2.8 Resumen de los diferentes tipos de pilas de combustible y aplicaciones.<sup>58</sup>

<sup>58</sup> <http://www.qarlos.online.fr/Personal/LasPilasDeCombustible.pdf>

#### **2.1.5.5.13.4.7. BENEFICIOS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE**

Los beneficios de la utilización de las pilas de combustible para la generación de energía a partir del hidrógeno son múltiples, entre ellos los más importantes son los siguientes:

- **Beneficios medioambientales:** Los beneficios medioambientales de las pilas de combustible representan uno de las principales razones que han motivado el desarrollo de las mismas. Estos beneficios se refieren a que las pilas no emiten o casi no emiten productos contaminantes y no tiene unas emisiones acústicas.

Estas propiedades de las pilas de combustible que respetan el medio ambiente pueden eliminar el desdén que los consumidores tienen a la generación de energía eléctrica en lugares situados cerca de sus hogares y negocios. Mientras que la mayoría de consumidores probablemente preferirían que la generación de energía eléctrica de forma convencional se produjese lejos de sus hogares debidos a la contaminación y al ruido, la naturaleza benigna de las pilas de combustible las hacen inofensivas incluso si se encuentran situadas en zonas residenciales.

#### **2.1.5.5.13.4.8. NIVELES DE EFICIENCIA**

Dependiendo del tipo de pila de combustible y del diseño del sistema, los niveles de eficiencia de combustible a electricidad se encuentran entre el 30 y el 60 por ciento (LHV). Para los sistema híbridos pila de combustible/turbina de gas, se espera que los niveles de eficiencia de la conversión eléctrica alcancen niveles de alrededor del 70 por ciento. Cuando se aprovecha el calor producido por la pila de combustible, la eficiencia energética total del sistema de la pila de combustible puede alcanzar hasta el 85 por ciento.

Como se puede ver en la Figura 2.30, los sistemas de pilas de combustible por si solas tienen la capacidad de alcanzar niveles de eficiencia por encima del 50 por ciento, incluso para tamaños relativamente pequeños (Ej. 10 Kw).

Por lo tanto, los sistemas de pilas de combustible pueden reducir el impacto de la producción de energía eléctrica en el cambio climático global reduciendo la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera por kilovatio hora de energía.

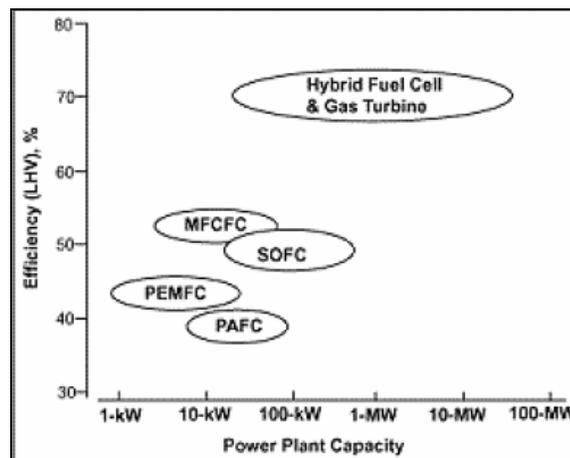


Figura 2.30. Diagrama comparativo de la eficiencia de las pilas de combustible.

También reducirían el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y la dependencia que tenemos de ellos, permitiendo producir más energía para la misma cantidad de combustible.

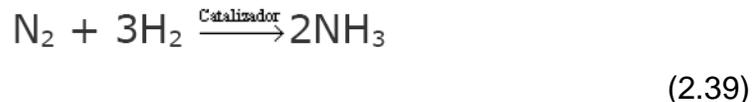
#### 2.1.5.5.14. APLICACIONES DEL HIDROGENO.

El hidrógeno es una molécula muy importante que se emplea convencionalmente en un gran número de aplicaciones y usos en sectores tan diversos como la industria química, refino, metalúrgica, vidrio o electrónica, entre otros.

#### 2.1.5.5.14.1. HIDRÓGENO EN LA INDUSTRIA QUÍMICA.

El hidrógeno es un compuesto de gran interés para la industria química, participando en reacciones de adición en procesos de hidrogenación o como agente reductor en procesos de reducción. A continuación se citan algunos de los procesos más importantes en los que participa:

1. **Síntesis de amoníaco:** El amoníaco se obtiene por la reacción catalítica entre nitrógeno e hidrógeno.



2. **Procesos de Refinería:** Los procesos de hidrogenación en refinería tienen como objetivo principal la obtención de fracciones ligeras de crudo a partir de fracciones pesadas, aumentando su contenido en hidrógeno y disminuyendo su peso molecular. De forma simultánea pueden eliminarse elementos indeseados como azufre, nitrógeno y metales.
3. **Tratamiento de carbón:** Mediante el tratamiento de carbón en presencia de hidrógeno, en diferentes condiciones de presión, temperatura, pueden obtenerse productos líquidos y/o gaseosos mediante diferentes procesos (hidrogenación, hidropirólisis, y gasificación hidrogenante).
4. **Aprovechamiento del Gas de Síntesis:** La producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos conduce a una mezcla de gases formada principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono.

Esta mezcla de gases se denomina Gas de Síntesis debido a su empleo en procesos de síntesis de productos químicos especiales, como por ejemplo la síntesis de metanol, síntesis Fisher-Tropsch, hidroformilación de olefinas (síntesis oxo) y síntesis de metano y etileno, entre otras.

5. **Síntesis orgánica:** En química orgánica el hidrógeno participa en un gran número de procesos de hidrogenación o reducción para la obtención de productos químicos e intermedios.
  
6. **Síntesis inorgánica:** El hidrógeno es imprescindible en procesos de importancia comercial como por ejemplo la producción de ácido clorhídrico, peróxido de hidrógeno, hidroxilaminas, etc.

#### **2.1.5.5.14.2. HIDRÓGENO EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA.**

En la industria siderúrgica, el mineral de hierro puede ser reducido empleando coque o un gas que contenga hidrógeno, monóxido de carbono, o mezclas de éstos. Este gas reductor puede obtenerse mediante reformado con vapor de agua o oxidación parcial de combustibles fósiles.

Además de los usos industriales del hidrógeno mencionados en los apartados anteriores, que son los de mayor volumen de utilización, cabe citar los siguientes:

- **Combustible aeroespacial:** Además de servir como suministro de energía para los ordenadores y sistemas de soporte en el espacio, obteniendo agua como “subproducto”.

- **Llamas de alta temperatura:** La combustión de una mezcla estequiométrica de hidrógeno y oxígeno conduce a temperaturas de llama comprendidas entre 3000 y 3500 K, las cuales pueden ser usadas para corte y soldadura en la industria del metal, crecimiento de cristales sintéticos, producción de cuarzo, etc.
- **Plasma de hidrógeno:** El elevado contenido calorífico de un plasma de hidrógeno puede ser utilizado en algunos procesos de producción.
- **Procesamiento de metales:** Es habitual añadir diferentes proporciones de hidrógeno a las corrientes gaseosas empleadas en diferentes procesos de corte y soldadura, tratamientos superficiales (atomización) y tratamientos en atmósferas especiales (templado, sinterización, fusión, flotación de vidrio, etc.).
- **Producción de semiconductores:** Para producir semiconductores dopados se depositan en una matriz de silicio cantidades traza de elementos (Si, As, Ge, etc.), en forma de hidruros, mezclados con una corriente de hidrógeno de elevada pureza.
- **Tratamiento de agua:** Los contenidos demasiado elevados de nitratos en aguas potables pueden ser reducidos por desnitrificación en birreactores, en los que las bacterias emplean el hidrógeno como fuente de energía.
- **Otros usos:** El hidrógeno se emplea también para aumentar la temperatura de transición de aleaciones superconductoras, así como gas portador y combustible en cromatografía gaseosa. El hidrógeno líquido se usa como refrigerante, por ejemplo para enfriar metales superconductores a temperaturas inferiores a las de transición.

#### **2.1.5.5.14. USOS ENERGÉTICOS DEL HIDRÓGENO**

El hidrógeno puede quemarse directamente para la generación de electricidad mediante turbinas de gas y ciclos combinados o directamente

como combustible de motores. Las principales ventajas de este compuesto se centran en las elevadas eficacias que pueden alcanzarse y en que el único producto de su combustión es vapor de agua, estando exento de NO<sub>x</sub>, si se controla la temperatura para inhibir la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno atmosféricos, y de CO<sub>2</sub>, evitando la contribución al calentamiento global.

#### **2.1.5.5.14.1. COMBUSTIÓN DIRECTA**

La combustión del hidrógeno con oxígeno puro conduce a la formación de vapor de agua puro:



El principal inconveniente de esta reacción es la alta temperatura desarrollada en la zona de la llama, superior a 3.000°C, lo que acarrea problemas con los materiales de los equipos y por la generación de NO<sub>x</sub>, como se comentó previamente. Para solventarlos puede recurrirse a la inyección de agua adicional, lo que permite ajustar la temperatura del vapor al valor deseado, pudiendo obtenerse vapor saturado o sobrecalentado. Otra alternativa es recurrir al empleo de catalizadores basados en platino (combustión catalítica), consiguiendo que la reacción tenga lugar a menores temperaturas, desde ambiente hasta 500 °C.

Los gases de combustión producidos pueden llevarse directamente a una turbina de gas o a un ciclo combinado de turbina de vapor/turbina de gas para la generación de electricidad.

#### **2.1.5.5.14.2. COMBUSTIBLE DE MOTORES.**

Una de las aplicaciones tradicionales del hidrógeno ha sido como combustible de cohetes y transbordadores espaciales. Los programas

espaciales son los mayores consumidores de hidrógeno líquido, habiendo adquirido gran experiencia en su manejo que puede ser la base de futuros desarrollos en otros campos.

Las investigaciones actuales se están centrando tanto en motores de combustión externa (motores Stirling) o interna para vehículos de transporte terrestre, aéreo y marítimo.

El uso de hidrógeno en motores de combustión interna es un campo que está recibiendo cada vez más interés. El hidrógeno es un excelente combustible, haciendo que los motores basados en este gas sean un 20 % más eficaces que los que emplean gasolina.

Esta clara diferencia se debe a las características del hidrógeno:

1. Su elevada difusividad facilita la formación de mezclas combustible-aire mucho más homogéneas que con cualquier otro combustible.
2. Su amplio intervalo de inflamabilidad (4-75%) hace que sea capaz de arder en mezclas pobres. Con ello se consigue una mayor facilidad de arranque (también relacionada con su baja energía de ignición), que la combustión sea más completa y una mejor economía del combustible. Además, la temperatura final de combustión es menor, minimizando la formación de óxidos de nitrógeno.
3. Su alta temperatura de auto-ignición permite mayores relaciones de compresión en los pistones, proporcionando mayores eficacias térmicas.

El principal inconveniente del hidrógeno es su baja densidad energética volumétrica (energía/volumen) que lleva a la necesidad de grandes tanques de almacenamiento y a que la mezcla estequiométrica aire/combustible en los cilindros del motor tenga un menor contenido energético, produciéndose

una pérdida de potencia. Este factor también limita el contenido en hidrógeno en dicha mezcla, no permitiendo que ésta sea demasiado pobre.

#### **2.1.5.5.15. HIDROGENO Y SEGURIDAD**

Atendiendo a las propiedades físicas del hidrógeno, se pueden ver algunas particularidades frente a otros combustibles desde el punto de vista de la seguridad.

##### **Entre sus ventajas, cabe destacar:**

- Debido a su baja densidad, el hidrógeno es extremadamente volátil, por lo que tiende a difundirse (hacia arriba) a gran velocidad, impidiendo que se formen grandes concentraciones. Esto lo convierte en un combustible especialmente seguro cuando se trabaja en espacios abiertos.
- El hidrógeno no es tóxico, por lo que en caso de que no haya combustión su riesgo para la salud humana se limita al desplazamiento del oxígeno en ciertas condiciones, frente a la toxicidad del resto de los combustibles.
- El hidrógeno tiene una baja densidad energética por unidad de volumen, por lo que la energía liberada por la combustión de un cierto volumen de hidrógeno a una cierta presión es menor que la de otros combustibles (esta propiedad que dificulta el almacenamiento de hidrógeno, es una ventaja desde el punto de vista de la seguridad).
- Como el hidrógeno tiene altos límites inferiores de inflamabilidad y detonación, es más difícil que se produzca la combustión con concentraciones pobres.

- La alta temperatura de combustión espontánea del hidrógeno es otra ventaja adicional.

**Y entre los inconvenientes se debe mencionar:**

- La alta densidad energética por unidad de masa, que lo convierte en buen combustible, es una desventaja en cuanto a seguridad.
- El hidrógeno tiene una muy baja energía de activación comparado con otros combustibles, es decir hay que añadir muy poca energía a una mezcla potencialmente inflamable para que se inicie la combustión.
- Esto es una gran ventaja en procesos de combustión y sobre todo en procesos electroquímicos (como el de las pilas de combustible), pero es una gran desventaja desde el punto de vista de seguridad, ya que cualquier chispa puede activar la reacción no deseada.
- Su baja temperatura de licuefacción complica no sólo funcionalmente el almacenamiento y uso del hidrógeno líquido, sino también la seguridad asociada.
- Debido al pequeño tamaño de su molécula, el hidrógeno es altamente fugable, por lo que las instalaciones de almacenamiento y distribución de hidrógeno deben estar especialmente bien selladas y correctamente inspeccionadas para detectar las fugas.
- El hecho de que hidrógeno es invisible e inodoro hace que los escapes sean indetectables con los sentidos por lo que se requiere tener equipos de detección.

- Su llama, además, es invisible a la luz del día, lo cual supone un peligro extra.

## **2.2.2 ENERGÍAS NO RENOVABLES.**

Son energías que al ser usadas no pueden volver a ser renovadas.

### **2.2.2.1. PETRÓLEO**

El petróleo es una mezcla, que se denomina hidrocarburo (carbón e hidrógeno). Los hidrocarburos se clasifican según sus enlaces (entre los átomos de carbono) en: <sup>59</sup>

- Alcanos: Enlaces covalentes sencillos.
- Alquenos: Dobles enlaces.
- Alquinos: Triples enlaces.

#### **2.2.2.1.1. ORIGEN DEL PETRÓLEO**

Se origina a partir de restos de organismos vivos acuáticos (vegetales y animales del mar y lagunas). Estos restos fueron atacados por bacterias anaerobias que consumieron su oxígeno dejando las moléculas de carbono e hidrógeno. Estos restos se acumulan formando una roca sedimentaria llamada roca madre. La presión ejercida sobre estos sedimentos provocan la expulsión del petróleo, que migra hasta que se encuentra con una roca porosa e incompresible llamada roca almacén.

#### **2.2.2.1.2. TECNOLOGÍA DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS YACIMIENTOS DE PETRÓLEO**

Los pasos que se han de seguir en la explotación petrolífera son:

---

<sup>59</sup> <http://www.tecnologia-industrial.es/Energias%20no%20renovables.htm>

- Prospección geológica y geofísica: Estudio de las zonas favorables para realizar el primer sondeo.
- Sondeo: Primera perforación de un pozo hasta la profundidad calculada.
- Evaluación: Se determina si es económico.
- Puesta en producción.

### 2.2.2.1.3. USOS DEL PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS

Después del refino en plantas petroquímicas se obtienen los siguientes derivados:

- **Gases:** Utilizados para combustible doméstico y de locomoción.
- **Gasolinas:** Utilizadas como combustible para motores industriales y automóviles.
- **Queroseno:** Utilizado como combustible de aviación.
- **Gas-oil:** Utilizado como combustible en motores diesel.
- **Aceites lubricantes:** Utilizados en industria química como engrasado de máquinas o explosivos.
- **Asfaltos:** Utilizados en la pavimentación de carreteras.
- **Parafinas y carbón de coque:** Utilizados en altos hornos.
- **Vaselina:** Utilizada para pomadas y ungüentos.

Otros subproductos son alcoholes, digerinas, bencenos y taduenos, utilizados en la fabricación de fibras textiles, plásticos, lacas, colorantes y disolventes.

### 2.2.2.2. GAS NATURAL

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos, y de otros elementos, que no son hidrocarburos. Los componentes hidrocarburos son: metano, etano, propano y butano. El gas natural se forma en los procesos de maduración del

petróleo y el carbón; es el primero que aparece en los yacimientos, debido a su densidad. También puede aparecer de manera aislada.

#### **2.2.2.2.1. EXPLOTACIÓN DEL GAS NATURAL**

Consiste en instalar una conducción que permita la salida de los hidrocarburos al exterior. El gas es comprimido a la presión atmosférica, después se licúa para transportarlo por los gaseoductos.

##### **Ventajas**

1. Contiene poco carbono, por lo que es más limpio y produce menos CO<sub>2</sub>.
2. Alto poder calorífico.
3. Combustión sin residuos.
4. Utilización cómoda.
5. Facilidades en ciertos procesos industriales.
6. Pueden reemplazar a las restantes energías primarias.

##### **Desventajas**

1. La gran desventaja es que los yacimientos se encuentran en los países que tienen inestabilidad política (Norte de África, Este de Europa y Oriente Medio) por lo que el suministro de los grandes consumidores (Europa Occidental y Estados Unidos) puede verse afectada.
2. Otro gran inconveniente es que es una fuente no renovable y no se puede malgastar.

### 2.2.2.3. CARBON

El carbón es un combustible fósil, de color negro, formado por la acumulación de vegetales. Es una de las principales fuentes de energía no renovable, dado el poder calorífico que almacena

Existen diferentes tipos de carbón<sup>60</sup>:

- Turba.
- Lignito.
- Carbón bituminoso.
- Antracita.
- Hulla.

#### 2.2.2.3.1. FORMACIÓN DEL CARBÓN

Se formó en el periodo carbonífero, cuando grandes extensiones del planeta estaban cubiertas por una vegetación muy abundante que crecía en pantanos.

Al morir estas plantas, quedaban sumergidas y se descomponían poco a poco. La materia vegetal perdía átomos de oxígeno e hidrógeno, con lo que quedaba un elevado porcentaje de carbono.

Encima de las turberas se fueron depositando sedimentos, y con movimientos geológicos endurecieron los depósitos hasta formar el carbón.

#### 2.2.2.3.2. UTILIZACIÓN DEL CARBÓN

El carbón se utiliza en:

- **Centrales térmicas:** producción de energía eléctrica.

---

<sup>60</sup> <http://www.tecnologia-industrial.es/Energias%20no%20renovables.htm>

- **Coquería:** fabricación de hierro rojo.
- **Siderurgia:** procedimientos y técnicas dedicadas a la elaboración de materiales férricos.
- **Uso doméstico:** calefacción.

## **Ventajas**

Las ventajas del carbón son que es una energía barata y con alto poder energético ya que con poco volumen de carbón se consigue mucha energía.

## **Desventajas**

Los inconvenientes del carbón son que es bastante contaminante, y que las minas de las que se extraen ofrecen poca seguridad a los trabajadores, y los accidentes son habituales.

### **2.2.2.4. ENERGIA NUCLEAR**

#### **2.2.2.4.1. RADIATIVIDAD**

Es un proceso natural y espontáneo que consiste en la emisión de radiaciones por elementos químicos sin ninguna excitación previa.

Hay dos tipos de reacciones nucleares:

- **Fisión.-** Ruptura del núcleo incidente por acción de una partícula de igual o diferente masa.
- **Fusión.-** El núcleo inicial y la partícula incidente se unen para dar un núcleo más pesado. <sup>61</sup>

---

<sup>61</sup> <http://www.monografias.com/trabajos5/energia/energia.shtml>

#### 2.2.2.4.2. EXPLOTACIÓN Y USOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Además de la utilidad de la energía nuclear con fines bélicos tiene otras aplicaciones prácticas como es la explotación para transformarla en energía eléctrica. También se utiliza en la prevención y terapia médica; prevención, conservación y manipulación de alimentos; exploraciones geológicas; control de plagas, control de contaminantes, marcado hormonal para el control reproductivo en ganaderías.

Esa transformación se lleva a cabo en las centrales nucleares gracias a los reactores nucleares, que consta de los siguientes elementos:

1. **Combustible:** Material fisionable, normalmente el uranio.
2. **Moderador:** Transforma los neutrones en la fisión de alta velocidad en neutrones lentos. Se utiliza el agua pesada.
3. **Refrigerante:** Extrae el calor generado por el combustible.
4. **Reflector:** Permite reducir el escape de neutrones de la zona del combustible, y por tanto disponer de más neutrones para la reacción en cadena.
5. **Elementos de control:** Actúan como absorbentes de neutrones y permiten controlar la radiactividad.
6. **Blindaje:** Evita el escape de radiación. Se utiliza el hormigón, el agua y el plomo.

### 2.3. LA ELECTROQUÍMICA

Es la parte de la química que trata de la relación entre las corrientes eléctricas y las reacciones químicas, y de la conversión de la energía química en eléctrica y viceversa.

En un sentido más amplio, la electroquímica es el estudio de las reacciones químicas que producen efectos eléctricos y de los fenómenos químicos causados por la acción de las corrientes o voltajes.

Todas las reacciones químicas son fundamentalmente de naturaleza eléctrica, puesto que hay electrones involucrados en todos los tipos de enlaces químicos. Sin embargo, la electroquímica es primordialmente el estudio del fenómeno de oxido-reducción. Las relaciones entre cambios químicos y energía eléctrica tienen importancia teórica y práctica. Las relaciones químicas pueden utilizarse para producir energía eléctrica (en pilas que se llaman pilas voltaicas o galvánicas).

La energía eléctrica puede utilizarse para realizar transformaciones químicas (en pilas electrolíticas). Además el estudio de los procesos electroquímicos lleva a la comprensión y a la sistematización de los fenómenos de oxido-reducción que ocurren fuera de las pilas.

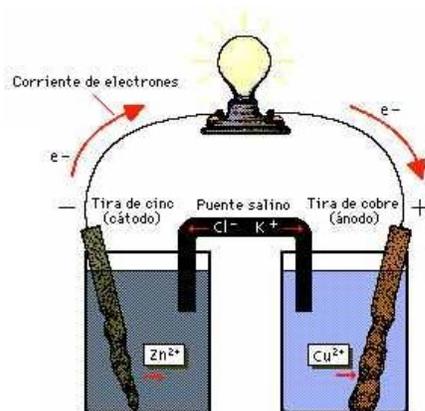


Figura 2.31. Corriente eléctrica y movimiento de iones.<sup>62</sup>

### 2.3.1. CÉLULA VOLTAICA

Una célula voltaica aprovecha la electricidad de una reacción química espontánea para encender una bombilla (foco). Las tiras de cinc y cobre,

<sup>62</sup><http://www.fq.uh.cu/dpto/qf/uclv/infoLab/infoquim/complementos/electroquimica/electroquimica.htm>

dentro de disoluciones de ácido sulfúrico diluido y sulfato de cobre respectivamente, actúan como electrodos.

El puente salino (en este caso cloruro de potasio) permite a los electrones fluir entre las cubetas sin que se mezclen las disoluciones. Cuando el circuito entre los dos sistemas se completa (como se muestra a la derecha), la reacción genera una corriente eléctrica. Obsérvese que el metal de la tira de cinc se consume (oxidación) y la tira desaparece.

La tira de cobre crece al reaccionar los electrones con la disolución de sulfato de cobre para producir metal adicional (reducción). Si se sustituye la bombilla por una batería la reacción se invertirá, creando una célula electrolítica.

La mayoría de los compuestos inorgánicos y algunos de los orgánicos se ionizan al fundirse o cuando se disuelven en agua u otros líquidos; es decir, sus moléculas se disocian en componentes cargados positiva y negativamente que tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica.

Si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrólito (o compuesto ionizable) y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la disolución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo. Al llegar a los electrodos, los iones pueden ganar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas; la naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial o voltaje aplicado.

La acción de una corriente sobre un electrólito puede entenderse con un ejemplo sencillo. Si el sulfato de cobre se disuelve en agua, se disocia en iones cobre positivos e iones sulfato negativos.

Al aplicar una diferencia de potencial a los electrodos, los iones cobre se mueven hacia el electrodo negativo, se descargan, y se depositan en el electrodo como elemento cobre. Los iones sulfato, al descargarse en el electrodo positivo, son inestables y combinan con el agua de la disolución formando ácido sulfúrico y oxígeno.

Esta descomposición producida por una corriente eléctrica se llama electrólisis. En todos los casos, la cantidad de material que se deposita en cada electrodo al pasar la corriente por un electrólito sigue la ley descubierta por el químico físico británico Michael Faraday.

Esta ley afirma que la cantidad de material depositada en cada electrodo es proporcional a la intensidad de la corriente que atraviesa el electrólito, y que la masa de los elementos transformados es proporcional a las masas equivalentes de los elementos, es decir, a sus masas atómicas divididas por sus valencias.

Todos los cambios químicos implican una reagrupación o reajuste de los electrones en las sustancias que reaccionan; por eso puede decirse que dichos cambios son de carácter eléctrico.

### **2.3.2 APLICACIONES INDUSTRIALES**

La descomposición electrolítica es la base de un gran número de procesos de extracción y fabricación muy importantes en la industria moderna. La sosa cáustica (un producto químico importante para la fabricación de papel, rayón y película fotográfica) se produce por la electrólisis de una disolución de sal común en agua. La reacción produce cloro y sodio.

El sodio reacciona a su vez con el agua de la pila electrolítica produciendo sosa cáustica. El cloro obtenido se utiliza en la fabricación de pasta de madera y papel.

Una aplicación industrial importante de la electrólisis es el horno eléctrico, que se utiliza para fabricar aluminio, magnesio y sodio. En este horno, se calienta una carga de sales metálicas hasta que se funde y se ioniza. A continuación, se deposita el metal electrolíticamente.

Los métodos electrolíticos se utilizan también para refinar el plomo, el estaño, el cobre, el oro y la plata. La ventaja de extraer o refinar metales por procesos electrolíticos es que el metal depositado es de gran pureza. La galvanotecnia, otra aplicación industrial electrolítica, se usa para depositar películas de metales preciosos en metales base.

También se utiliza para depositar metales y aleaciones en piezas metálicas que precisen un recubrimiento resistente y duradero. La electroquímica ha avanzado recientemente desarrollando nuevas técnicas para colocar capas de material sobre los electrodos, aumentando así su eficacia y resistencia.

### **2.3.3 CONDUCCION METALICA**

Una corriente eléctrica es el flujo de la carga eléctrica. En los metales esta carga es llevada por los electrones y la conducción eléctrica de este tipo se llama conducción metálica. La corriente resulta de la aplicación de una fuerza eléctrica suministrada por una pila, batería, o alguna otra fuente de energía eléctrica. Se necesita un circuito completo para producir una corriente.

Los electrones desplazados, a su vez, adquieren nuevas posiciones empujando los electrones vecinos hacia delante y este efecto se trasmite por el alambre hasta que los electrones son forzados fuera del alambre en el extremo opuesto.

La fuente de energía puede ser considerada un bomba de electrones, pues sirve para forzar a los electrones por uno de los terminales de circuito y sacarlos por el otro extremo. En cualquier posición en el alambre, se conserva la neutralidad eléctrica, pues la velocidad de entrada de los electrones iguala la velocidad de salida de los mismos. Hace mucho se conoce la analogía entre el flujo de la electricidad fue descrita en términos de una corriente de " fluido eléctrico".

La corriente eléctrica se mide en amperes (A). La cantidad de carga eléctrica se mide en coulombs (C); el coulombs se define como la cantidad de electricidad transmitida en un segundo mediante una corriente de un ampere. Por consiguiente:

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s y } 1 \text{ C} = 1 \text{ A.s} \quad (2.41)$$

La corriente eléctrica se hace pasar a través del circuito mediante una diferencia de potencial eléctrico, el cual se mide en volts (V). Se necesita un joule de trabajo para mover un coulomb desde un potencial mas bajo a uno mas alto cuando la diferencia de potencial es de un volt. Un volt, por consiguiente, es igual a un joule coulomb y un volt coulomb es una unidad de energía e igual a un joule.

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$$

$$1 \text{ V} \cdot \text{C} = 1 \text{ J} \quad (2.42)$$

Mientras mayor sea la diferencia de potencial entre dos puntos en un alambre dado, mayor será la corriente que transporte el alambre entre estos dos puntos. Georg Simon Ohm, en 1826, expuso la relación cuantitativa entre la diferencia de potencial, E, en voltios y la corriente, I, en amperes, como:

$$I = E / R \quad \text{o} \quad E = I \cdot R \quad (2.43)$$

donde la constante de proporcionalidad, R, de la ley de Ohm se llama la resistencia.

La resistencia se mide en ohms ( $\Omega$ ). Se requiere un volt para transportar una corriente de un ampere a través de una resistencia de un ohm para el flujo de electricidad en los metales es originada probablemente por la vibración de los iones metálicos en sus posiciones del cristal, estas vibraciones interfieren con el movimiento de los electrones y retardan la corriente.

A medida que aumenta la temperatura, aumenta el movimiento térmico de los iones metálicos. Por lo tanto, la resistencia de los metales aumenta y se convierten en conductores deficientes.

#### **2.3.4. CONDUCCION ELECTROLITICA**

La conducción electrolítica, en la cual la carga es transportada por los iones, no ocurrirá a menos que los iones del electrólito se puedan mover libremente. Por consiguiente, la conducción electrolítica es exhibida principalmente por sales fundidas y por soluciones acuosas de electrólitos.

Estos principios de conducción electrolítica se ilustran mejor refiriéndonos a una pila electrolítica tal como la representa la Figura 2.32, para la electrólisis del NaCl fundido entre electrodos inertes (los electrodos inertes

no participan en reacciones de electrodos). La fuente de corriente envía electrones hacia el electrodo izquierdo, el cual por lo tanto puede considerarse cargado negativamente.

Los electrones salen del electrodo de la derecha, el electrodo positivo. En el campo eléctrico así producido, los iones de sodio (cationes) son atraídos hacia el polo positivo (ánodo). La carga eléctrica en la conducción electrolítica es transportada por los cationes que se mueven hacia el cátodo y los aniones que se mueven en dirección opuesta hacia el ánodo.

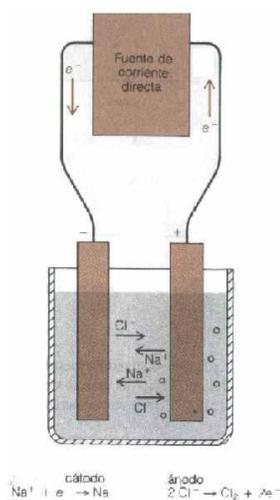


Figura 2.32. Electrólisis del cloruro de sodio fundido<sup>63</sup>

Para un circuito completo la reacción del electrodo debe acompañar el movimiento de los iones. En el cátodo algunas especies químicas (no necesariamente el transportador de carga) debe aceptar electrones y debe reducirse en el ánodo, los electrones deben ser separados de algunas especies químicas que, como consecuencia, se oxidan.

Las convenciones relativas a los términos ánodo y cátodo se resumen en la Tabla 2.9.

<sup>63</sup> [http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14\\_electroquimica.php](http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14_electroquimica.php)

	<b>Cátodo</b>	<b>Ánodo</b>
Iones atraídos	Cationes	aniones
Dirección del movimiento electrónico	Dentro de la pila	Fuera de la pila oxidación
Media reacción	Reacción	
<b>Signo</b>		
Pila de electrólisis	negativo	positivo
Pila galvánica	positivo	negativo

Tabla 2.9 Convenciones relativas a los términos ánodo y cátodo.<sup>64</sup>

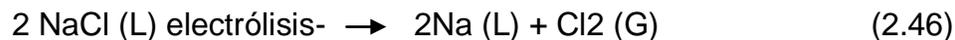
En la pila del diagrama, los iones sodio se reducen en el cátodo:



y los iones cloruro se oxidan en el ánodo.



La suma adecuada de estas dos ecuaciones parciales de la reacción para toda la pila es:



En la operación real de una pila comercial utilizada para producir sodio metálico, se agrega cloruro de calcio para hacer descender el punto de fusión del cloruro de sodio y la pila se opera a una temperatura aproximada de 600 °C. A esta temperatura, el sodio metálico es un líquido.

<sup>64</sup> [http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14\\_electroquimica.php](http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14_electroquimica.php)

Podemos trazar el flujo de la carga negativa a través del circuito de la Figura 2.33 como sigue: los electrones dejan la fuente de corriente y son enviados al cátodo donde son recogidos y reducidos los iones sodio que han sido atraídos a este electrodo negativo.

Los iones cloruro se mueven del cátodo hacia el ánodo y así transportan carga negativa en esta dirección. En el ánodo, los electrones son removidos de los iones cloruro, oxidándolos a cloro gaseoso.

La conducción electrolítica se basa entonces sobre la movilidad de los iones y cualquier cosa que inhiba el movimiento de estos origina una resistencia a la corriente.

Los factores que influyen en la conductividad eléctrica de las soluciones de electrolitos incluyen atracciones interiónicas, solvatación de iones y viscosidad del disolvente. Estos factores se fundamentan sobre atracciones soluto-soluto y soluto-disolvente e interacciones disolvente-disolvente, respectivamente.

## **2.4 LA ELECTROLISIS**

La electrólisis del agua es la descomposición de agua ( $H_2O$ ) en gas de oxígeno ( $O_2$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ) por medio de una corriente eléctrica a través del agua, como se observa en la figura 2.33. Este proceso electrolítico es raramente usado en aplicaciones industriales debido a que el hidrógeno puede ser producido a menor costo por medio de combustibles fósiles.

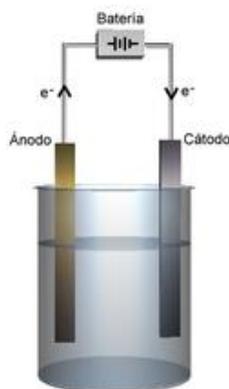


Figura 2.33. Diagrama simplificado del proceso de electrolisis<sup>65</sup>

Una fuente de poder eléctrica es conectada a dos electrodos, o dos platos (típicamente hechos de algún metal inerte como el platino o acero inoxidable), los cuales son puestos en el agua. En una celda propiamente diseñada, el hidrógeno aparecerá en el cátodo (el electrodo negativamente cargado, donde los electrones son bombeados al agua), y oxígeno aparecerá en el ánodo (el electrodo positivamente cargado). La cantidad de hidrógeno generado es el doble que la de oxígeno, y ambas son proporcionales al total de carga eléctrica que fue enviada por el agua. Sin embargo, en varias celdas las reacciones del lado competidor dominan, resultando en diferentes productos.

La electrolisis de agua pura requiere una gran cantidad de energía extra en forma de sobrepotencial para romper varias barreras de activación. Sin esa energía extra la electrolisis de agua pura ocurre muy lentamente si es que logra suceder. Esto es en parte debido a la limitada autoionización del agua. El agua pura tiene una conductividad eléctrica alrededor de una millonésima parte de la del agua de mar. Varias celdas electrolíticas pueden no tener los electrocatalizadores requeridos. La eficacia de la electrolisis

<sup>65</sup> [http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14\\_electroquimica.php](http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14_electroquimica.php)

aumenta con la adición de un electrolito (como la sal, un ácido o una base) y el uso de electrocatalizadores.

### 2.4.1. LEYES DE FARADAY

Los siguientes conceptos son referidos a la corriente eléctrica necesarios para comprender el significado de las leyes de Faraday:

1.-La cantidad de electrones (electricidad) que circulan por un conductor se mide en Coulomb.<sup>66</sup>

$$q = \text{carga} \text{ ® } [q] = \text{coulomb} \quad (2.67)$$

2.-La intensidad de la corriente (caudal de electrones) expresa la cantidad de electricidad que circula por un conductor por unidad de tiempo. La intensidad de la corriente se mide en Amperes.

$$i = q/t \text{ Þ } q = i.t \text{ ® } [i] = \text{A} \quad (2.68)$$

3.-Cuando una fuente fuerza a los electrones a circular por un conductor, se presenta una resistencia al flujo de corriente y se produce una caída de potencial. La resistencia eléctrica se mide en Ohms ,y la diferencia de potencial en Voltios.

$$E = i.R \text{ ® } [E] = \text{V} \text{ y } [R] = \text{ohm} \quad (2.69)$$

**Primera Ley de Faraday:** La masa de un elemento depositada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución del electrólito o del electrólito fundido.

---

<sup>66</sup> www.fisicanet.com

$$m = \zeta \cdot i \cdot t \quad (2.70)$$

Donde  $\zeta$  es una constante que depende del catión y se denomina equivalente electroquímico. Cuando se realiza, por ejemplo, la electrólisis de una solución de sulfato cúprico ( $\text{CuSO}_4$ ) sucede lo siguiente Figura 2.34.

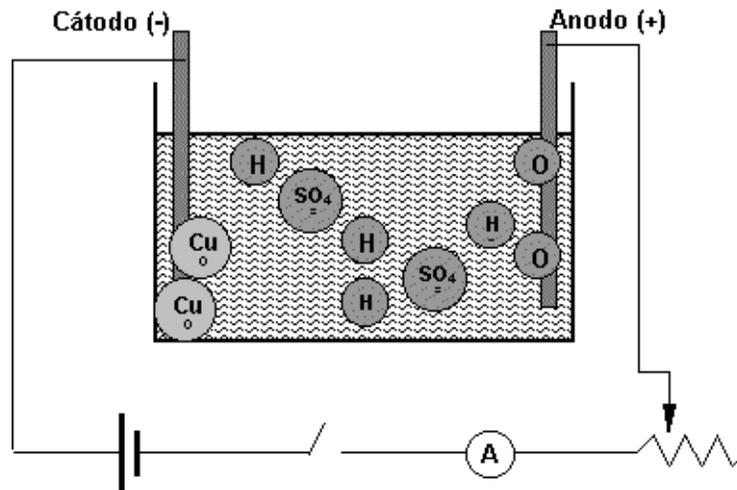
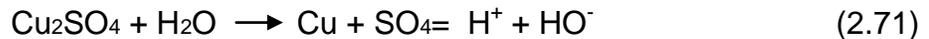
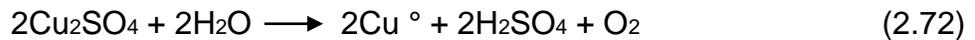


Figura 2.34. Representación gráfica de la ley de Faraday<sup>67</sup>



Al aplicar una diferencia de potencial a los electrodos, el ion cobre se mueve hacia el cátodo, adquiere dos electrones y se deposita en el electrodo como elemento cobre. El ion sulfato, al descargarse en el electrodo positivo, es inestable y se combina con el agua de la disolución formando ácido sulfúrico y oxígeno.



Cuando circula más corriente (más coulombios) más cobre se deposita, pues más electrones han circulado permitiendo que más iones cobre ( $\text{Cu}^{++}$ ) se conviertan en elemento cobre ( $\text{Cu}^\circ$ ).

<sup>67</sup> [http://www.fisicanet.com.ar/quimica/electrolisis/ap07\\_electrolisis.php](http://www.fisicanet.com.ar/quimica/electrolisis/ap07_electrolisis.php)

**Segunda Ley de Faraday:** Las masas de elementos que se depositan en los electrodos son proporcionales a los equivalentes químicos.

Recordemos que el equivalente químico de un elemento es el cociente entre el peso atómico grammo de ese elemento y su valencia:

$$Eq = Pa/V \quad (2.73)$$

Para probar esta segunda ley se hace pasar la misma cantidad de electricidad a través de varias cubas con diferentes soluciones salinas, como indica la Figura 2.35. Midiendo la cantidad de plata y de cobre depositados en el cátodo se llega a la comprobación de la ley:

$$m \text{ Ag}^+ / m \text{ Cu}^{++} = Eq \text{ Ag} / Eq \text{ Cu}$$

$$m \text{ Ag}^+ / m \text{ Cu}^{++} = 107,8/31,75 \quad (2.74)$$

O sea que las masas de plata y de cobre depositadas en los electrodos se hallan en relación de: 107,8 /31,75.

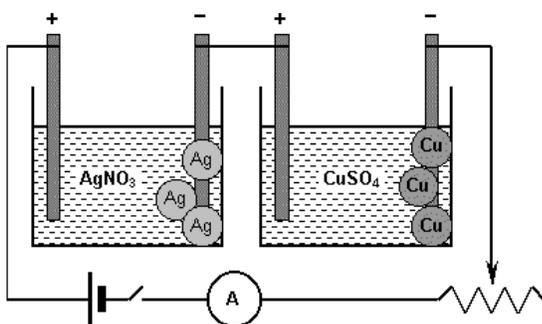


Figura 2.35. Relación de las masas depositadas en los electrodos.<sup>68</sup>

**Número de Faraday:** Para depositar el equivalente químico de cualquier elemento se necesita la misma cantidad de electricidad. La constante o número de Faraday (F) es de 96500 coulomb (96494).

<sup>68</sup> [http://www.fisicanet.com.ar/quimica/electrolisis/ap07\\_electrolisis.php](http://www.fisicanet.com.ar/quimica/electrolisis/ap07_electrolisis.php)

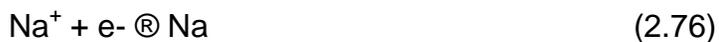
**Equivalente electroquímico:** Se llama equivalente electroquímico # a la masa de un elemento depositada, durante la electrólisis, por la carga de un coulomb.

$$\zeta = Eq/F \quad (2.75)$$

En todos los casos, la cantidad de material que se deposita en cada electrodo al pasar la corriente por un electrólito sigue las leyes de Faraday. Todos los cambios químicos implican una reagrupación o reajuste de los electrones en las sustancias que reaccionan; por eso puede decirse que dichos cambios son de carácter eléctrico. Para producir una corriente eléctrica a partir de una reacción química, es necesario tener un oxidante, es decir, una sustancia que gane electrones fácilmente, y un reductor, es decir, una sustancia que pierda electrones fácilmente.

#### 2.4.2. ESTEQUIOMETRIA DE LA ELECTROLISIS

Las relaciones cuánticas entre electricidad y cambio químico fueron descritas originalmente por Michael Faraday en 1832 y 1833. El trabajo de Faraday se conoce mejor por la referencia a las medias reacciones que ocurren durante la electrólisis. El cambio en el cátodo durante la electrólisis del cloruro de sodio fundido:



Esto indica que requiere un electrón para producir un átomo de sodio. Se requiere un mol electrones (numero de Avogadro de electrones) para producir un mol de átomos de sodio metálico (22,9898g de Na).

La cantidad de carga equivalente a un mol electrones se llama Faraday (F) y se encontró que es igual a 96, 485 coulombs (C), el cual, para problemas de trabajo, por lo general se ha aproximado a 96,5 C.

$$1 F = 96,5 C \quad (2.77)$$

Si se utilizan 2F de electricidad, se producirán dos moles de Na al mismo tiempo que el equivalente de electrones a 1F de electricidad se agrega al cátodo, ese mismo número de electrones se saca del ánodo,



La extracción de 1 mol de electrones (1F) del ánodo dará como resultado la descarga de 1 mol de iones  $Cl^-$  y la producción de 0,5 moles de cloro gaseoso. Si 2F de electricidad fluyen a través de la pila, 2 moles de iones  $Cl^-$  se descargaran y 1 mol de  $Cl_2$  gas se libera.

Por consiguiente, las reacciones de los electrodos pueden interpretarse en términos de moles y faradays. La oxidación del ion hidróxido en el ánodo, por ejemplo,



Entonces la ecuación 2.79 puede leerse que 4 moles de iones  $OH^-$  producen 1 mol de  $O_2$  gaseoso y 2 moles de  $H_2O$  cuando pasan 4F de electricidad a través de la pila. Las relaciones entre moles de sustancias y faradays de electricidad son las bases de los cálculos estequiométricos que comprende la electrólisis. Recordemos que un ampere (1A) es igual a la velocidad de una corriente de un coulomb (1C) por segundo.

$$1 A = 1 C/s \quad (2.80)$$

### 2.4.3. TIPOS DE ELECTROLIZADORES

Los componentes básicos de un electrolizador son similares. Sin embargo, dependiendo del electrolito usado, existen diferentes tipos de electrolizadores.

#### 2.4.3.1. POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM)

En este tipo se utiliza un polímero como electrolito. Cuando se hace pasar la corriente eléctrica entre los electrodos, el agua reacciona en el ánodo liberando oxígeno e iones de hidrógeno cargados positivamente. Los electrones a través del circuito externo, y los iones a través de la membrana, fluyen hasta el cátodo, donde se combinan para formar el hidrógeno.

La reacción en el **ánodo** sería



Y en el **cátodo**



La temperatura del proceso es entre 80 y 100°C.

#### 2.4.3.2. ELECTROLIZADORES ALCALINOS

Los electrolizadores alcalinos son similares a los PEM pero como electrolito usan una solución alcalina, sea hidróxido de sodio ó hidróxido de potasio. El proceso es el mismo que en un PEM pero a una temperatura más alta (entre 100 y 150°C), y las reacciones en los electrodos difieren.

En el **ánodo** la reacción es la siguiente



Y en el **cátodo**



Este tipo de electrolizadores pueden ser monopolares o bipolares. Un electrolizador monopolar tiene los electrodos conectados en paralelo, mientras que uno bipolar en serie, con los electrodos separados por una fina membrana. El costo de un electrolizador monopolar es menor al de uno bipolar ya que, como los electrodos se encuentran separados, el diseño y el mantenimiento resulta más sencillo. Sin embargo, las ventajas de un electrolizador bipolar es la de ser más compacto y poseer mayor capacidad de corriente, densidad y temperatura.<sup>69</sup>

#### **2.4.3.3. ELECTROLIZADORES DE ÓXIDO SÓLIDO**

En los electrolizadores de óxido sólido se utiliza un material cerámico como electrolito, el cual transmite los iones de oxígeno cargados negativamente a elevadas temperaturas (entre 500 y 800°C) para disminuir la cantidad de energía eléctrica requerida.

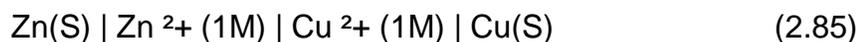
El proceso se diferencia al anterior en que es en el cátodo en que el agua reacciona liberando hidrógeno e iones de oxígeno cargados negativamente, y en el ánodo donde se forma el oxígeno.

---

<sup>69</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 78

#### 2.4.4. FUERZA ELECTROMOTRIZ

Si se emplean soluciones de  $\text{ZnSO}_4$  1M y  $\text{CuSO}_4$  1M en la pila de Daniell, la pila puede representarse por los símbolos:



En los cuales las líneas verticales representan límites de fases. Convencionalmente, se escribe primero la sustancia que forma el ánodo. Los otros materiales de la pila se escriben en el orden en que uno los encuentra: del ánodo hacia el cátodo. La composición del cátodo se da como último dato.

La corriente eléctrica se produce por una pila voltaica como resultado de la fuerza electromotriz (fem) de la pila, la cual se mide en voltios. Entre mayor sea la tendencia a la cual ocurra la reacción de la pila, mayor será la fuerza electromotriz de la pila. Sin embargo, la fem de una pila dada también depende de la concentración de las sustancias utilizadas para hacer la pila. La fuerza electromotriz estándar  $E$  se refiere a la fem de una pila a  $25^\circ\text{C}$ , en la cual todo los reactivos y productos se hallan presentes en sus estados estándar. El estado estándar de un sólido o un líquido es, naturalmente, el sólido puro o el líquido puro. El estado estándar de un gas o una sustancia en solución es un estado definido de unidad de actividad ideal; o sea, se han aplicado correcciones para las desviaciones de lo ideal originadas por las atracciones intermoleculares e interiónicas.

Debido a una aproximación y dado por lo anteriormente explicado, una pila estándar contendría iones a concentraciones 1M y gases a 1 atmósfera de presión. En las celdas mencionadas mas adelante, las concentraciones se indicaran solo si se desvían de lo estándar. Si la fuerza electromotriz de una pila se utiliza como medida de la tendencia para que ocurra la reacción de la

pila, el voltaje debe ser el máximo valor obtenido para la pila en particular bajo consideración. Si existe un apreciable flujo de electricidad durante la medida, se reducirá el voltaje medido,  $E$ , debido a la resistencia interna de la pila.

Por consiguiente, la fem de una pila debe medirse sin flujo de electricidad apreciable a través de la pila. Esta medida esta acompañada por el uso de un potenciómetro. El circuito de un potenciómetro incluye una fuente de corriente de voltaje variable y un sistema para medir este voltaje. La pila bajo estudio esta conectada al circuito del potenciómetro en tal forma que la fuerza electromotriz de la pila se opone a la fem de la corriente del potenciómetro.

#### **2.4.5. GALVANOTECNIA**

Proceso electroquímico por el cual se deposita una capa fina de metal sobre una base generalmente metálica. Los objetos se galvanizan para evitar la corrosión, para obtener una superficie dura o un acabado atractivo, para purificar metales (como en la refinación electrolítica del cobre), para separar metales para el análisis cuantitativo o como es el caso de la electrotipia, para reproducir un molde. Los metales que se utilizan normalmente en galvanotecnia son: cadmio, cromo, cobre, oro, níquel, plata y estaño. Las cuberterías plateadas, los accesorios cromados de automóvil y los recipientes de comida estañados son productos típicos de galvanotecnia.

En este proceso, el objeto que va a ser cubierto se coloca en una disolución (baño) de una sal del metal recubridor, y se conecta a un terminal negativo de una fuente de electricidad externa. Otro conductor, compuesto a menudo por el metal recubridor, se conecta al terminal positivo de la fuente de electricidad. Para el proceso es necesaria una corriente continua de bajo

voltaje, normalmente de 1 a 6 V. Cuando se pasa la corriente a través de la disolución, los átomos del metal recubridor se depositan en el cátodo o electrodo negativo.

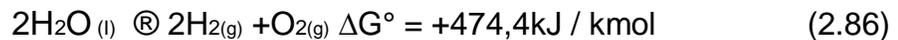
Esos átomos son sustituidos en el baño por los del ánodo (electrodo positivo), si está compuesto por el mismo metal, como es el caso del cobre y la plata. Si no es así, se sustituyen añadiendo al baño periódicamente la sal correspondiente, como ocurre con el oro y el cromo. En cualquier caso, se mantiene un equilibrio entre el metal que sale y el metal que entra en la disolución hasta que el objeto está galvanizado. Los materiales no conductores pueden ser galvanizados si se cubren antes con un material conductor como el grafito. La cera o los diseños de plástico para la electrotipia, y las matrices de los discos fonográficos se recubren de esta manera.

Para asegurar una cohesión estrecha entre el objeto a ser recubierto y el material recubridor, hay que limpiar el objeto a fondo, ya sea sumergiéndolo en una disolución ácida o cáustica, o bien utilizándolo como ánodo en un baño limpiador durante un instante. Para eliminar irregularidades en las depresiones de la placa y asegurar que la textura de su superficie es de buena calidad y propicia para el refinado, hay que controlar cuidadosamente la densidad de la intensidad de corriente (amperios por metro cuadrado de superficie de cátodo) y la temperatura. Con frecuencia se añaden al baño ciertos coloides o compuestos especiales para mejorar la uniformidad de la superficie de la placa.

Algunos metales, en concreto el cromo, tienen poco poder desprendedor, es decir, tienden a recubrir excesivamente las protuberancias y dejan las grietas del ánodo completamente desnudas.

#### 2.4.6. DETERMINACION DEL VOLTAJE MINIMO PARA INICIAR LA ELECTRÓLISIS.

La reacción de descomponer agua para dar hidrogeno y oxigeno en estado gaseoso no se da de manera espontanea se requiere de una fuente de energía correspondiente al cambio de energía de Gibbs, que en condiciones estándar toma el valor:<sup>70</sup>



Por tanto, la ruptura de la molécula de agua por vía electroquímica requiere aplicar un potencial eléctrico mínimo en celda electrolítica para vencer el valor de  $\Delta G$  en condiciones dadas. El potencial de celda necesario relaciona con la energía libre Gibbs mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta G = -n_{\text{mol}} \times F \times E_{\text{equilibrio}} \quad (2.87)$$

En la figura 2.36 puede verse un esquema de un sistema electrolítico básico. Consta de una fuente de alimentación encargada de generar un paso neto de corriente entre dos conductores, llamados electrodos, en contacto con una disolución que contiene los reactivos susceptibles de oxidarse (anolito) y reducirse (catolito).

De esta manera el potencial eléctrico aplicado por la fuente genera un flujo de electrones desde el electrodo positivo (ánodo) hacia el electrodo negativo (cátodo) a través de un circuito eléctrico externo.

La reacción de reducción en la que una especie química gana electrones se produce por tanto en el cátodo, mientras que la reacción de oxidación con perdida de electrones por parte de un elemento se produce en el ánodo.

---

<sup>70</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 84

Para mantener el balance de cargas en el sistema es necesario que exista también un transporte electrónico dentro de la celda electrolítica. Dicho transporte se consigue mediante la introducción de un electrolito que aporta que aporta al medio de reacción iones cargados positiva y negativamente.

Los aniones transportan las cargas eléctricas negativas hacia el ánodo y los cationes transportan las cargas eléctricas positivas hacia el cátodo, completando de esta forma el circuito de corriente eléctrica. Finalmente la celda electrolítica suele constar de un diafragma que separa los productos de la reacción redox, para evitar su posible recombinación.

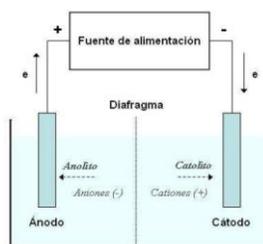
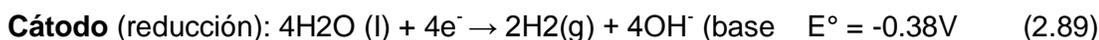
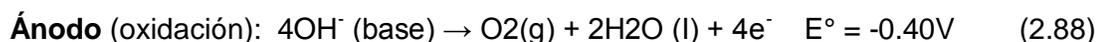


Figura 2.36. Sistema básico de un electrolizador.<sup>71</sup>

En el caso de la electrolisis de agua generalmente se adiciona una base que actúa como electrolito y proporciona al medio de reacción los iones necesarios para aumentar la conductividad del medio.

En medio alcalino, las reacciones que se produce en ambos electrodos son:



<sup>71</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 86

#### 2.4.7. VOLTAJE TOTAL PARA INICIAR LA ELECTROLISIS.

El voltaje de una celda electrolítica es la diferencia de potencial (en voltios) entre los dos electrodos extremos. Dicho potencial unitario de celda (Ecelda) debe alcanzar un valor mínimo para producir la reacción, que resulta de la suma de varias contribuciones.<sup>72</sup>

$$E_{\text{celda}} = E_{\text{equilibrio}} + \eta$$

**Donde:**

$$\eta = \eta_c + \eta_a + \eta_{\Omega} + \eta_{\text{sist}} \quad (2.91)$$

**Eequilibrio:** El potencial de equilibrio termodinámico de la reacción redox se calcula a partir de los potenciales de equilibrio del ánodo y del cátodo. En el caso de la electrolisis del agua este parámetro en condiciones estándar es:

**$\eta$  (Sobre voltaje):** El sobre voltaje se define como la diferencia entre el potencial al que transcurre una reacción electroquímica y el potencial de equilibrio de la misma. Este voltaje adicional que es necesario aplicar a la celda electrolítica para que se produzca la reacción resulta de la suma de las distintas resistencias eléctricas que oponen los componentes del sistema:

**$\eta_c$ : Sobretensión catódica.** Es la sobretensión que existe en el cátodo a la reacción catódica de formación de hidrogeno gas.

**$\eta_a$ : Sobretensión anódica.** Es la sobretensión que existe en el ánodo a la reacción de formación de oxigeno gas.

**$\eta_{\Omega}$ :** Es la caída de tensión en el electrolito por efecto de la resistividad que presenta la disolución.

---

<sup>72</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 87

$\eta_{sist}$  : Representa la caída de potencial a través del resto del sistema, tal como el diafragma, los cables conductores de electricidad, etc.

En el caso de la electrolisis del agua valores típicos [Figura 2.37] de sobrevoltaje en electrolizadores darían una estimación del voltaje unitario de la celda de:

$$E_{celda} = E^{\circ} \text{ equilibrio} + \eta_c + \eta_a + \eta_{\Omega} + \eta_{sist} \quad (2.92)$$

$$E^{\circ} \text{ celda} = -(1.23 + 0.30 + 0.30 + 0.25 + 0.11) = -2.19V$$

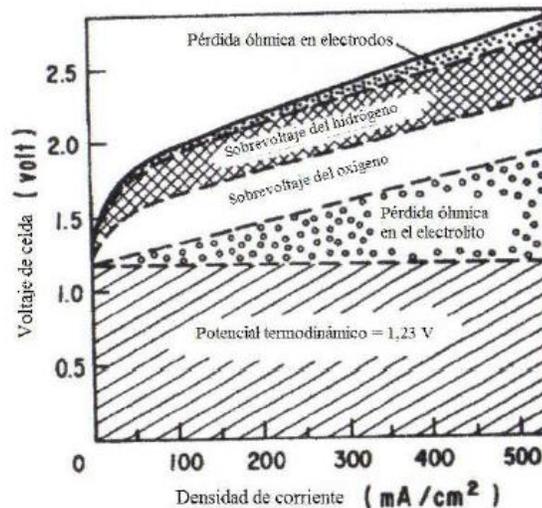


Figura 2.37 Contribuciones Ecelda en la electrolisis de agua en función de la densidad de corriente<sup>73</sup>

Por otra parte, la magnitud de estos sobrevoltajes va a depender de diversos factores que determinan el funcionamiento del equipo: naturaleza química de sus componentes (electrodo, electrolito, diafragma, etc.), dimensiones y geometría de los mismos, condiciones de operación (temperatura y presión), presencia de impurezas o depósitos y, fundamentalmente, de la intensidad de corriente eléctrica suministrada.

<sup>73</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 88

#### 2.4.8. EFICACIA DE POTENCIAL

La eficacia de potencial  $\Phi_E$  se define como el cociente entre el potencial de equilibrio termodinámico y el potencial de celda unitario necesario para la electrolisis:

$$\Phi_E = \frac{E_{equilibrio}}{E_{celda}} \quad (2.93)$$

Este parámetro proporciona información sobre la proporción del potencial que debe ser aplicado para vencer el conjunto de resistencias eléctricas del sistema electrolítico que no son rigurosamente el potencial de equilibrio de la reacción redox.

La eficacia de potencial es, por tanto, un parámetro de diseño para optimizar equipos de electrolisis: la eficacia del potencial puede incrementarse minimizando las resistencias eléctricas de cada uno de los componentes de la celda (electrodos, electrolito, diafragma, condiciones de T y P, etc.) para la optimización de los equipos de electrolisis.

#### 2.4.9. EFICACIA DE CORRIENTE

La eficacia de corriente determinada por la ecuación ( $\Phi_I$ ) relaciona la cantidad de corriente que se ha empleado en producir la relación, la corriente consumida, (obtenida a partir de la ley de Faraday) con la cantidad de corriente que circula por el circuito:<sup>74</sup>

---

<sup>74</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 89

Este parámetro proporciona información sobre la fracción de intensidad de corriente que circula por el sistema sin estar involucrada en el proceso electroquímico. En general, a menor densidad de corriente mejora la distribución de la misma en el equipo, evitándose la formación de caminos preferenciales en los electrodos y mejorando el rendimiento de la reacción.

$$\Phi_I = \frac{I_{consumida}}{I_{circuito}} \quad (2.94)$$

#### 2.4.10. CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA

El suministro de energía necesario para la electrolisis se realiza mediante una fuente de alimentación de corriente continua. Generalmente dichas fuentes son capaces de regular únicamente la potencia eléctrica aplicada (W). La cual se define así:

$$W = V \times I \quad (2.95)$$

**Donde:**

**V**= potencial aplicado por la fuente

**I**= Intensidad de corriente del circuito

Los valores máximos de potencia de la fuente estarán asociados también a unos valores máximos de intensidad y voltaje, por otra parte para hacer circular una corriente de intensidad I a través de un circuito con una resistencia eléctrica R (resultado de la suma de resistencias de los componentes del sistema) es necesario aplicar un potencial eléctrico con valor igual:

$$V = I \times R \quad (2.96)$$

Por tanto se deduce que para un valor de potencia suministrado por la fuente de alimentación, la intensidad de corriente que circule por el proceso su producción y rendimiento vendrán determinada por la magnitud del voltaje unitario de la celda electrolítica (voltaje de equilibrio + sobrevoltaje).

Este aspecto será determinante en el diseño del equipo referido. El consumo energético es así de importante en los procesos industriales de electrolisis, pues puede constituir una fracción importante del coste total de producto.

Un parámetro útil como dato de análisis de la operación es el consumo específico de energía ( $W$  específico), que se obtendría de dividir la potencia eléctrica consumida por la fuente ( $W_{elect}$ ) entre el caudal de moles producido ( $n_{prod}/t$ ):

$$W_{especifico} = \frac{W_{elect}}{n_{prod} / t} = \frac{E_{celda} I_{circuito}}{I_{consumida} / n_e F} = E_{equilibrio} \frac{n_e F}{\Phi_I \Phi_E} \quad (2.97)$$

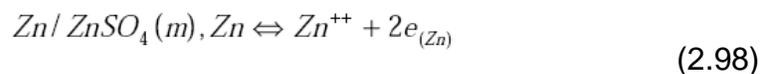
Este parámetro permite cuantificar el coste en energía que supone producir un mol de producto en un electrolizador operando en unas condiciones determinadas. Significativamente, el consumo específico está determinado por los parámetros eficacia de potencial descrito con anterioridad.

## 2.5. ELECTRODOS

### 2.5.1 ELECTRODOS ELECTROCATALITICOS

Se dividen en tres grandes grupos esto dependiendo de las fases que se ponen en contacto:

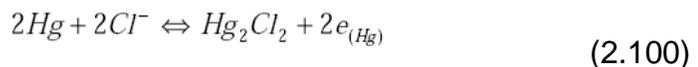
- **Electrodos de primera especie.-** Son electrodos cuyos iones son determinantes del potencial, un ejemplo claro son los electrodos metálicos.<sup>75</sup>



- **Electrodos de segunda especie.-** El metal se halla cubierto de una sal poco soluble y sumergida en una disolución que contiene un ion de esa sal. Aquí esta el determinante de potencial como en el electrodo de Calomel.



La reacción del electrodo es:



- **Electrodos de oxidación y reducción.-** En estos electrodos los estados oxidado y reducido de un par redox se encuentra como iones

---

<sup>75</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 91

en la disolución y el intercambio de electrones se produce en la superficie del metal inerte.



## 2.5.2. REQUISITOS DE LOS ELECTRODOS ELECTROCATALITICOS

- Capacidad electro-catalítica.
- Estabilidad Química.
- Mínima Resistencia Eléctrica

### 2.5.2.1. CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA.

Un catalizador químico es una sustancia que modifica la velocidad de una reacción química sin que consuma ni genere durante el proceso, pero actúa como punto de reunión de los reactivos y promueven su unión.

Por tanto un electrodo es un catalizador de las reacciones de transferencia de carga; es un catalizador de transferencia de carga o electrocatalizador, en la ecuación (2.102) la relación densidad de corriente-sobre tensión en la región no lineal para una reacción de electrolización.<sup>76</sup>

$$i = i_o \left[ \exp\left(\frac{\alpha_A \times F}{R \times T} \eta\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_C \times F}{R \times T} \eta\right) \right] \quad (2.102)$$

**Donde:**

**$i_o$**  : Densidad de corriente de intercambio [A]

<sup>76</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 93

<b><math>\alpha_A</math></b>	: Coeficiente de transferencia de carga del ánodo	
<b><math>\alpha_C</math></b>	: Coeficiente de transferencia de carga del cátodo	
<b><math>\eta</math></b>	: Sobre potencial	[V]
<b>R</b>	: Constante de los gases 8.134	[J/mol K]
<b>F</b>	: Constante de Faraday $9.65 \times 10^7$	[C/kmol]
<b>T</b>	: Temperatura absoluta.	[K]

### ECUACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE DE INTERCAMBIO (A/M<sup>2</sup>)

$$i_o = zFk_c c_A \exp\left(-\frac{\alpha_c F}{RT} E_e\right) \quad (2.103)$$

#### Donde:

<b><math>i_o</math></b>	: Densidad de corriente de intercambio.	[A]
<b>Z</b>	: Numero de electrones en la relación global	
<b>K</b>	: Constante de velocidad catódica	[1/s]
<b>CA</b>	: Concentración superficial de A (acceptor)	[mol/m <sup>2</sup> ]
<b>E<math>\Theta</math></b>	: Voltaje de equilibrio	[V]

### ECUACIÓN DEL COCIENTE TRANSFERENCIA DE CARGA DEL CÁTODO

$$\alpha_c = \frac{s}{v} + r \times \beta \quad (2.105)$$

#### Donde:

- $\alpha_C$**  : Coeficiente de transferencia de carga del cátodo.
- S** : Numero de electrones transferidos antes del paso limitante de la velocidad reacción.
- V** : Numero de veces que debe ocurrir el paso limitante para la reacción

global que ocurra una vez.

**r** : Factor de reacción (r=1) Reacción electroquímica.

**B** : Factor de simetría ( $\beta=0.5$ ).

Esta ecuación destaca el papel catalítico del electrodo. La velocidad de la relación electroquímica depende, en primer lugar, de la diferencia de potencia existente a través de la superficie electrizada y en segundo lugar, de un catalizador. Así, la electrocatálisis consta de ambos aspectos, uno eléctrico (el término que depende de la diferencia de potencia) y uno químico (considerando el término  $\eta$ ).

### ECUACIÓN DE SOBRE POTENCIAL<sup>77</sup>

$$\eta = E - E_e \quad (2.104)$$

**Donde:**

**$\eta$**  : Sobre potencial [V]

**E** : Voltaje aplicado [V]

**$E_e$**  : Voltaje de equilibrio [V]

---

<sup>77</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. 95

### 2.5.2.2. ESTABILIDAD QUIMICA

La estabilidad química se determina por la resistencia que opone el material a la corrosión y a la erosión, es decir al afecto químico corrosivo y al afecto de deterioro físico producido por los gases y el vapor de agua, por el agua y sus soluciones, por las soluciones de sales, de vidrio, de metales, así como la radiación directa y también a la motivada por la activación del medio incidente.

En cualquier reacción química, incluida la de un metal con medio agresivo, la tendencia a corroer es medida por la variación de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ). Cuanto mas negativo es el valor de  $\Delta G$ , mayor es la tendencia a realizarse la reacción de acción.

Puesto que la energía eléctrica se expresa como el producto de voltios por Columbios (Julios), la relación entre  $\Delta G$  en julios y  $E$  en voltios se define por  $\Delta G = -E n F$ , donde  $n$  es el numero de electrones (o equivalentes químicos) que toman parte en la relación y  $F$  es la constante de Faraday (96500 C por equivalente químico).<sup>78</sup>

Puesto que  $\Delta G = -E n F$ , se desprende que:

$$\Delta G^\circ = -E^\circ nF \quad (2.105)$$

**Donde:**

$E^\circ$  : Cuando todos los reactantes y productos están en estados normales (actividades igual a la unidad).

---

<sup>78</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador, Pág. P7

## **2.6. EL MOTOR DE COMBUSTION INTERNA**

### **2.6.1. INTRODUCCION**

Muchas personas en algún momento habrán tenido la oportunidad de ver la parte externa de motor de gasolina (llamado también "motor de explosión" o "de combustión interna"); sin embargo, es muy probable que también muchas de esas personas desconozcan su funcionamiento interno.<sup>79</sup>

Cuando decidimos obtener la licencia para conducir un coche o cualquier otro vehículo automotor, en algunos países se exige responder un test o examen en el que, precisamente, se incluyen algunas preguntas relacionadas con el principio de funcionamiento de los motores de térmicos de combustión interna, ya sean de gasolina o diesel.

No obstante, como simple curiosidad, quizás tú te hayas interesado también en conocer cómo funciona un motor de gasolina y cuáles son las partes y piezas que lo integran, aunque entre tus proyectos a más corto plazo no se encuentre, precisamente, obtener una licencia de conducción.

Un motor de gasolina constituye una máquina termodinámica formada por un conjunto de piezas o mecanismos fijos y móviles, cuya función principal es transformar la energía química que proporciona la combustión producida por una mezcla de aire y combustible en energía mecánica o movimiento, cuando ocurre esa transformación de energía química en mecánica se puede realizar un trabajo útil como, por ejemplo, mover un vehículo automotor como un coche o automóvil, o cualquier otro mecanismo, como pudiera ser un generador de corriente eléctrica.

---

<sup>79</sup> [http://www.asifunciona.com/mecanica/af\\_motor\\_gasolina/af\\_motor\\_gasolina\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/mecanica/af_motor_gasolina/af_motor_gasolina_1.htm)

En líneas generales los motores térmicos de combustión interna pueden ser de dos tipos, de acuerdo con el combustible que empleen para poder funcionar:

**1. De explosión o gasolina.**

**2. De combustión interna diesel.**

Mientras que los motores de explosión utilizan gasolina (o gas, o también alcohol) como combustible, los de combustión interna diesel emplean sólo gasoil (gasóleo).

Si en algún momento comparamos las partes o mecanismos fundamentales que conforman estructuralmente un motor de gasolina y un motor diesel, veremos que en muchos aspectos son similares, mientras que en otros difieren por completo, aunque en ambos casos su principio de funcionamiento es parecido.

Tanto los motores de gasolina como los diesel se pueden emplear para realizar iguales funciones; sin embargo, cuando se requiere desarrollar grandes potencias, como la necesaria para mover una locomotora, un barco o un generador de corriente eléctrica de gran capacidad de generación, se emplean solamente motores de combustión interna diesel.

## 2.6.2. PARTES DE UN MOTOR A GASOLINA.

Desde el punto de vista estructural, el cuerpo de un motor de explosión o de gasolina se compone de tres secciones principales como se muestra en la Figura 2.39:

1. Culata
2. Bloque
3. Cáster

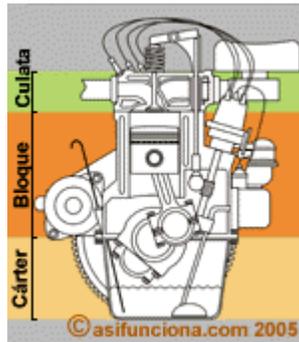


Figura 2.39 Partes principales en las que se divide un motor de gasolina.<sup>80</sup>

### 2.6.2.1. LA CULATA.

La culata constituye una pieza de hierro fundido (o de aluminio en algunos motores), que va colocada encima del bloque del motor. Su función es sellar la parte superior de los cilindros para evitar pérdidas de compresión y salida inapropiada de los gases de escape.

En la culata se encuentran situadas las válvulas de admisión y de escape, así como las bujías. Posee, además, dos conductos internos: uno conectado al múltiple de admisión (para permitir que la mezcla aire-combustible penetre en la cámara de combustión del cilindro) y otro conectado al múltiple de

<sup>80</sup> [http://www.asifunciona.com/mecanica/af\\_motor\\_gasolina/af\\_motor\\_gasolina\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/mecanica/af_motor_gasolina/af_motor_gasolina_1.htm)

escape (para permitir que los gases producidos por la combustión sean expulsados al medio ambiente).

Posee, además, otros conductos que permiten la circulación de agua para su refresco. La culata está firmemente unida al bloque del motor por medio de tornillos. Para garantizar un sello hermético con el bloque, se coloca entre ambas piezas metálicas una “junta de culata”, constituida por una lámina de material de amianto o cualquier otro material flexible que sea capaz de soportar, sin deteriorarse, las altas temperaturas que se alcanzan durante el funcionamiento del motor.

#### **2.6.2.2. EL BLOQUE**

En el bloque están ubicados los cilindros con sus respectivas camisas, que son barrenos o cavidades practicadas en el mismo, por cuyo interior se desplazan los pistones. Estos últimos se consideran el corazón del motor.

La cantidad de cilindros que puede contener un motor es variable, así como la forma de su disposición en el bloque.

Existen motores de uno o de varios cilindros, aunque la mayoría de los coches o automóviles utilizan motores con bloques de cuatro, cinco, seis, ocho y doce cilindros, incluyendo algunos coches pequeños que emplean sólo tres.

Las disposiciones más frecuentes que podemos encontrar de los cilindros en los bloques de los motores de gasolina son las siguientes:

- En línea.
- En “V”.
- Planos con los cilindros opuestos.

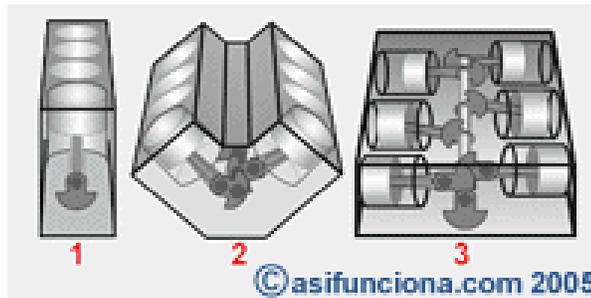


Figura 2.40. Diferente disposición de los cilindros en el bloque de los motores de gasolina: 1.- En línea. 2.- En "V".  
3.- Plano de cilindros opuestos<sup>81</sup>

Los bloques en línea pueden contener 3, 4, 5 ó 6 cilindros. Los motores con bloques en "V" tienen los cilindros dispuestos en doble hilera en forma de "V". Los más comunes que se pueden encontrar son: "V-6", "V-8", "V-10" y "V-12". Los bloques planos son poco utilizados en los motores de gasolina, aunque se pueden encontrar de 4, 6 y hasta de 12 cilindros en unas pocas marcas de coches.

Existen además otras disposiciones de los pistones en un bloque, como por ejemplo los radiales o de estrella (ilustración de la derecha), estructura esta que se empleó durante muchos años en la fabricación de motores de gasolina para aviones.

El cárter es el lugar donde se deposita el aceite lubricante que permite lubricar el cigüeñal, los pistones, el árbol de levas y otros mecanismos móviles del motor. Durante el tiempo de funcionamiento del motor una bomba de aceite extrae el lubricante del cárter y lo envía a los mecanismos que requieren lubricación.

Existen también algunos tipos de motores que en lugar de una bomba de aceite emplean el propio cigüeñal, sumergido parcialmente dentro del aceite

<sup>81</sup> [http://www.asifunciona.com/mecanica/af\\_motor\\_gasolina/af\\_motor\\_gasolina\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/mecanica/af_motor_gasolina/af_motor_gasolina_1.htm)

del cárter, para lubricar “por salpicadura” el mismo cigüeñal, los pistones y el árbol de levas.

### **2.6.3. COMPONENTES DE UN MOTOR DE GASOLINA**

Aunque desde la década de los años 80 del siglo pasado los fabricantes, sobre todo de automóviles, han introducido una serie de cambios y mejoras en los motores de gasolina, a continuación se exponen los componentes básicos que formaron y forman parte todavía en muchos casos o con algunas variantes, de un motor de explosión o gasolina:

**1.- Filtro de aire:** Su función es extraer el polvo y otras partículas para limpiar lo más posible el aire que recibe el carburador, antes que la mezcla aire-combustible pase al interior de la cámara de combustión de los cilindros del motor.

**2.- Carburador:** Mezcla el combustible con el aire en una proporción de 1:10000 para proporcionar al motor la energía necesaria para su funcionamiento. Esta mezcla la efectúa el carburador en el interior de un tubo con un estrechamiento practicado al efecto, donde se pulveriza la gasolina por efecto venturi. Una bomba mecánica, provista con un diafragma de goma o sintético, se encarga de bombear desde el tanque principal la gasolina para mantener siempre llena una pequeña cuba desde donde le llega el combustible al carburador.

En los coches actuales esa bomba de gasolina, en lugar de ser mecánica es eléctrica y se encuentra situada dentro del propio tanque principal de combustible. Para evitar que la cuba se rebose y pueda llegar a inundar de gasolina la cámara de combustión, existe en el interior de la cuba un flotador

encargado de abrir la entrada del combustible cuando el nivel baja y cerrarla cuando alcanza el nivel máximo admisible.

El propio carburador permite regular la cantidad de mezcla aire-combustible que envía a la cámara de combustión del motor utilizando un mecanismo llamado mariposa. Por medio del acelerador de pie del coche, o el acelerador de mano en los motores estacionarios, se regula transitoriamente el mecanismo de la mariposa, lo que permite una mayor o menor entrada de aire al carburador.

De esa forma se enriquece o empobrece la mezcla aire-combustible que entra en la cámara de combustión del motor, haciendo que el cigüeñal aumente o disminuya las revoluciones por minuto. Cuando la mezcla de aire-combustible es pobre, las revoluciones disminuyen y cuando es rica, aumentan.

Los motores más modernos y actuales no utilizan ya carburador, sino que emplean un nuevo tipo de dispositivo denominado “inyector de gasolina”. Este inyector se controla de forma electrónica para lograr que la pulverización de la gasolina en cada cilindro se realice en la cantidad realmente requerida en cada momento preciso, lográndose así un mayor aprovechamiento y optimización en el consumo del combustible.

Es necesario aclarar que los inyectores de gasolina no guardan ninguna relación con los inyectores o bomba de inyección que emplean los motores diesel, cuyo funcionamiento es completamente diferente.

**3.- Distribuidor o Delco:** Distribuye entre las bujías de todos los cilindros del motor las cargas de alto voltaje o tensión eléctrica provenientes de la bobina de encendido o ignición. El distribuidor está acoplado

sincrónicamente con el cigüeñal del motor de forma tal que al rotar el contacto eléctrico que tiene en su interior, cada bujía recibe en el momento justo la carga eléctrica de alta tensión necesaria para provocar la chispa que enciende la mezcla aire-combustible dentro de la cámara de combustión de cada pistón.

**4.- Bomba de gasolina:** Extrae la gasolina del tanque de combustible para enviarla a la cuba del carburador cuando se presiona el “acelerador de pie” de un vehículo automotor o el “acelerador de mano” en un motor estacionario. Desde hace muchos años atrás se utilizan bombas mecánicas de diafragma, pero últimamente los fabricantes de motores las están sustituyendo por bombas eléctricas, que van instaladas dentro del propio tanque de la gasolina.

**5.- Bobina de encendido o ignición:** Dispositivo eléctrico perteneciente al sistema de encendido del motor, destinado a producir una carga de alto voltaje o tensión. La bobina de ignición constituye un transformador eléctrico, que eleva por inducción electromagnética la tensión entre los dos enrollados que contiene en su interior.

El enrollado primario de baja tensión se conecta a la batería de 12 volt, mientras que el enrollado secundario la transforma en una corriente eléctrica de alta tensión de 15 mil ó 20 mil volt. Esa corriente se envía al distribuidor y éste, a su vez, la envía a cada una de las bujías en el preciso momento que se inicia en cada cilindro el tiempo de explosión del combustible.

**6.- Filtro de aceite:** Recoge cualquier basura o impureza que pueda contener el aceite lubricante antes de pasar al sistema de lubricación del motor.

**7.- Bomba de aceite:** Envía aceite lubricante a alta presión a los mecanismos del motor como son, por ejemplo, los cojinetes de las bielas que se fijan al cigüeñal, los aros de los pistones, el árbol de leva y demás componentes móviles auxiliares, asegurando que todos reciban la lubricación adecuada para que se puedan mover con suavidad.

**8.- Cáster:** Es el lugar donde se deposita el aceite lubricante que utiliza el motor. Una vez que la bomba de aceite distribuye el lubricante entre los diferentes mecanismos, el sobrante regresa al cáster por gravedad, permitiendo así que el ciclo de lubricación continúe, sin interrupción, durante todo el tiempo que el motor se encuentre funcionando.

**9.- Aceite lubricante:** Su función principal es la de lubricar todas las partes móviles del motor, con el fin de disminuir el rozamiento y la fricción entre ellas. De esa forma se evita el excesivo desgaste de las piezas, teniendo en cuenta que el cigüeñal puede llegar a superar las 6 mil revoluciones por minuto.

Como función complementaria el aceite lubricante ayuda también a refrescar los pistones y los cojinetes, así como mantenerlos limpios. Otra de las funciones del lubricante es ayudar a amortiguar los ruidos que produce el motor cuando está funcionando. El aceite lubricante en sí ni se consume, ni se desgasta, pero con el tiempo se va ensuciando y sus aditivos van perdiendo eficacia hasta tal punto que pasado un tiempo dejan de cumplir su misión de lubricar.

Por ese motivo periódicamente el aceite se debe cambiar por otro limpio del mismo grado de viscosidad recomendada por el fabricante del motor. Este cambio se realiza normalmente de acuerdo con el tiempo que estipule el propio fabricante, para que así los aditivos vuelvan a ser efectivos y puedan cumplir su misión de lubricar. Un tercio del contenido de los aceites son

aditivos, cuyas propiedades especiales proporcionan una lubricación adecuada

**10.- Toma de aceite:** Punto desde donde la bomba de aceite succiona el aceite lubricante del cárter.

**11.- Cables de alta tensión de las bujías:** Son los cables que conducen la carga de alta tensión o voltaje desde el distribuidor hasta cada bujía para que la chispa se produzca en el momento adecuado.

**12.- Bujía:** Electrodo recubierto con un material aislante de cerámica. En su extremo superior se conecta uno de los cables de alta tensión o voltaje procedentes del distribuidor, por donde recibe una carga eléctrica de entre 15 mil y 20 mil volt aproximadamente. En el otro extremo la bujía posee una rosca metálica para ajustarla en la culata y un electrodo que queda situado dentro de la cámara de combustión.

La función de la bujía es hacer saltar en el electrodo una chispa eléctrica dentro de la cámara de combustión del cilindro cuando recibe la carga de alta tensión procedente de la bobina de ignición y del distribuidor. En el momento justo, la chispa provoca la explosión de la mezcla aire-combustible que pone en movimiento a los pistones. Cada motor requiere una bujía por cada cilindro que contenga su bloque.

**13.- Balancín:** En los motores del tipo OHV (Over Head Valves – Válvulas en la culata), el balancín constituye un mecanismo semejante a una palanca que bascula sobre un punto fijo, que en el caso del motor se halla situado normalmente encima de la culata. La función del balancín es empujar hacia abajo las válvulas de admisión y escape para obligarlas a que se abran. El balancín, a su vez, es accionado por una varilla de empuje movida por el

árbol de levas. El movimiento alternativo o de vaivén de los balancines está perfectamente sincronizado con los tiempos del motor.

**14.- Muelle de válvula:** Muelle encargado de mantener normalmente cerradas las válvulas de admisión y escape. Cuando el balancín empuja una de esas válvulas para abrirla, el muelle que posee cada una las obliga a regresar de nuevo a su posición normal de “cerrada” a partir del momento que cesa la acción de empuje de los balancines..

**15.- Válvula de escape:** Pieza metálica en forma de clavo grande con una gran cabeza, cuya misión es permitir la expulsión al medio ambiente de los gases de escape que se generan dentro del cilindro del motor después que se quema la mezcla aire-combustible en durante el tiempo de explosión.

Normalmente los motores poseen una sola válvula de escape por cilindro; sin embargo, en la actualidad algunos motores modernos pueden tener más de una por cada cilindro.

**16.- Válvula de admisión:** Válvula idéntica a la de escape, que normalmente se encuentra junto a aquella. Se abre en el momento adecuado para permitir que la mezcla aire-combustible procedente del carburador, penetre en la cámara de combustión del motor para que se efectúe el tiempo de admisión. Hay motores que poseen una sola válvula de admisión por cilindro; sin embargo, los más modernos pueden tener más de una por cada cilindro.

**17.- Múltiple o lumbrera de admisión:** Vía o conducto por donde le llega a la cámara de combustión del motor la mezcla de aire-combustible procedente del carburador para dar inicio al tiempo de admisión.

**18.- Cámara de combustión:** Espacio dentro del cilindro entre la culata y la parte superior o cabeza del pistón, donde se efectúa la combustión de la mezcla aire-combustible que llega del carburador. La capacidad de la cámara de combustión se mide en  $\text{cm}^3$  y aumenta o disminuye con el movimiento alternativo del pistón. Cuando el pistón se encuentra en el PMS (Punto Muerto Superior) el volumen es el mínimo, mientras que cuando se encuentra en el PMI (Punto Muerto Inferior) el volumen es el máximo.

**19.- Varilla empujadora:** Varilla metálica encargada de mover los balancines en un motor del tipo OHV (Over Head Valves – Válvulas en la culata). La varilla empujadora sigue siempre el movimiento alternativo que le imparte el árbol de levas.

**20.- Árbol de levas:** Eje parecido al cigüeñal, pero de un diámetro mucho menor, compuesto por tantas levas como válvulas de admisión y escape tenga el motor. Encima de cada leva se apoya una varilla empujadora metálica, cuyo movimiento alternativo se transmite a los balancines que abren y cierran las válvulas de admisión o las de escape.

El árbol de levas se encuentra sincronizado de forma tal que efectúa medio giro por cada giro completo del cigüeñal. Los motores OHV (Over Head Valves – Válvulas en la culata) tienen un solo árbol de levas, mientras que los DOHV (Dual Over Head Valves – Válvulas dobles en la culata) tienen dos árboles de levas perfectamente sincronizados por medio de dos engranes accionados por el cigüeñal.

En los motores DOHV los árboles de levas están colocados encima de la culata y actúan directamente sobre las válvulas sin necesidad de incluir ningún otro mecanismo intermediario como las varillas de empuje y los balancines que requieren los motores OHV.

**21.- Aros del pistón:** Los aros son unos segmentos de acero que se alojan en unas ranuras que posee el pistón. Los hay de dos tipos: de compresión o fuego y rascador de aceite.

Las funciones de los aros son las siguientes:

**De compresión o fuego:**

- Sella la cámara de combustión para que durante el tiempo de compresión la mezcla aire-combustible no pase al interior del cárter; tampoco permite que los gases de escape pasen al cárter una vez efectuada la explosión.
- Ofrece cierta amortiguación entre el pistón y el cilindro cuando el motor se encuentra en marcha.
- Bombea el aceite para lubricar el cilindro.

**Rascador de aceite:**

- Permite que cierta cantidad de lubricante pase hacia la parte superior del cilindro y “barre” el sobrante o el que se adhiere por salpicadura en la parte inferior del propio cilindro, devolviéndolo al cárter por gravedad.
- Normalmente cada pistón posee tres ranuras para alojar los aros. Las dos primeras la ocupan los dos aros de compresión o fuego, mientras que la última la ocupa un aro rascador de aceite.

- Los aros de compresión son lisos, mientras que el aro rascador de aceite posee pequeñas aberturas a todo su alrededor para facilitar la distribución pareja del lubricante en la superficie del cilindro o camisa por donde se desplaza el pistón.

**22.- Pistón:** El pistón constituye una especie de cubo invertido, de aluminio fundido en la mayoría de los casos, vaciado interiormente. En su parte externa posee tres ranuras donde se insertan los aros de compresión y el aro rascador de aceite. Mas abajo de la zona donde se colocan los aros existen dos agujeros enfrentados uno contra el otro, que sirven para atravesar y fijar el bulón que articula el pistón con la biela.

**23.- Biela:** Es una pieza metálica de forma alargada que une el pistón con el cigüeñal para convertir el movimiento lineal y alternativo del primero en movimiento giratorio en el segundo. La biela tiene en cada uno de sus extremos un punto de rotación: uno para soportar el bulón que la une con el pistón y otro para los cojinetes que la articula con el cigüeñal.

**24.- Bulón:** Es una pieza de acero que articula la biela con el pistón. Es la pieza que más esfuerzo tiene que soportar dentro del motor.

**25.- Cigüeñal:** Constituye un eje con manivelas, con dos o más puntos que se apoyan en una bancada integrada en la parte superior del cárter y que queda cubierto después por el propio bloque del motor, lo que le permite poder girar con suavidad la manivela o las manivelas (cuando existe más de un cilindro) que posee el cigüeñal, giran de forma excéntrica con respecto al eje. En cada una de las manivelas se fijan los cojinetes de las bielas que le transmiten al cigüeñal la fuerza que desarrollan los pistones durante el tiempo de explosión.



Figura 2.42. (A.- Cigüeñal. B.- Árbol de levas.)<sup>82</sup>

**26.- Múltiple de escape:** Conducto por donde se liberan a la atmósfera los gases de escape producidos por la combustión. Normalmente al múltiple de escape se le conecta un tubo con un silenciador cuya función es amortiguar el ruido que producen las explosiones dentro del motor. Dentro del silenciador los gases pasan por un catalizador, con el objetivo de disminuir su nocividad antes que salgan al medio ambiente.

**27.- Refrigeración del motor:** Sólo entre el 20 y el 30 por ciento de la energía liberada por el combustible durante el tiempo de explosión en un motor se convierte en energía útil; el otro 70 u 80 por ciento restante de la energía liberada se pierde en forma de calor. Las paredes interiores del cilindro o camisa de un motor pueden llegar a alcanzar temperaturas aproximadas a los 800 °C. Por tanto, todos los motores requieren un sistema de refrigeración que le ayude a disipar ese excedente de calor.

Entre los métodos de enfriamiento más comúnmente utilizados se encuentra el propio aire del medio ambiente o el tiro de aire forzado que se obtiene con la ayuda de un ventilador. Esos métodos de enfriamiento se emplean solamente en motores que desarrollan poca potencia como las

<sup>82</sup> [http://www.asifunciona.com/mecanica/af\\_motor\\_gasolina/af\\_motor\\_gasolina\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/mecanica/af_motor_gasolina/af_motor_gasolina_1.htm)

motocicletas y vehículos pequeños. Para motores de mayor tamaño el sistema de refrigeración más ampliamente empleado y sobre todo el más eficaz, es el hacer circular agua a presión por el interior del bloque y la culata.

Para extraer a su vez el calor del agua una vez que ha recorrido el interior del motor, se emplea un radiador externo compuesto por tubos y aletas de enfriamiento.. Cuando el agua recorre los tubos del radiador transfiere el calor al medio ambiente ayudado por el aire natural que atraviesa los tubos y el tiro de aire de un ventilador que lo fuerza a pasar a través de esos tubos.

En los coches o vehículos antiguos, las aspas del ventilador del radiador y la bomba que ponía en circulación el agua se movían juntamente con el cigüeñal del motor por medio de una correa de goma, pero en la actualidad se emplean ventiladores con motores eléctricos, que se ponen en funcionamiento automáticamente cuando un termostato que mide los grados de temperatura del agua dentro del sistema de enfriamiento se lo indica. El radiador extrae el calor del agua hasta hacer bajar su temperatura a unos 80 ó 90 grados centígrados, para que el ciclo de enfriamiento del motor pueda continuar.

En los coches modernos el sistema de enfriamiento está constituido por un circuito cerrado, en el que existe un cámara de expansión donde el vapor del agua caliente que sale del motor se enfría y condensa. Esta cámara de expansión sirve también de depósito para poder mantener la circulación del agua fresca por el interior del motor.

En invierno, en aquellos lugares donde la temperatura ambiente desciende por debajo de 0 °C (32 °F), es necesario añadir al agua de

enfriamiento del motor sustancias "anticongelante" para evitar su congelación, ya que por el efecto de expansión que sufre ésta al congelarse puede llegar a romper los tubos del sistema, o dejar de circular, lo que daría lugar a que el motor se gripara (fundiera).

**28.- Varilla medidora del nivel de aceite:** Es una varilla metálica que se encuentra introducida normalmente en un tubo que entra en el cárter y sirve para medir el nivel del aceite lubricante existente dentro del mismo. Esta varilla tiene una marca superior con la abreviatura MAX para indicar el nivel máximo de aceite y otra marca inferior con la abreviatura MIN para indicar el nivel mínimo. Es recomendable vigilar periódicamente que el nivel del aceite no esté nunca por debajo del mínimo, porque la falta de aceite puede llegar a gripar (fundir) el motor.

**29.- Motor de arranque:** Constituye un motor eléctrico especial, que a pesar de su pequeño tamaño comparado con el tamaño del motor térmico que debe mover, desarrolla momentáneamente una gran potencia para poder ponerlo en marcha.

El motor de arranque posee un mecanismo interno con un engrane denominado "bendix", que entra en función cuando el conductor acciona el interruptor de encendido del motor con la llave de arranque. Esa acción provoca que una palanca acoplada a un electroimán impulse dicho engrane hacia delante, coincidiendo con un extremo del eje del motor, y se acople momentáneamente con la rueda dentada del volante, obligándola también a girar. Esta acción provoca que los pistones del motor comiencen a moverse, el carburador (o los inyectores de gasolina), y el sistema eléctrico de ignición se pongan funcionamiento y el motor arranque.

Una vez que el motor arranca y dejar el conductor de accionar la llave en el interruptor de encendido, el motor de arranque deja de recibir corriente y el

electroimán recoge de nuevo el piñón del bendix, que libera el volante. De no ocurrir así, el motor de arranque se destruiría al incrementar el volante las revoluciones por minuto, una vez que el motor de gasolina arranca.

**30.- Volante:** En un motor de gasolina de cuatro tiempos, el cigüeñal gira solamente media vuelta por cada explosión que se produce en la cámara de combustión de cada pistón; es decir, que por cada explosión que se produce en un cilindro, el cigüeñal debe completar por su propio impulso una vuelta y media más, correspondientes a los tres tiempos restantes. Por tanto, mientras en uno de los tiempos de explosión el pistón “entrega energía” útil, en los tres tiempos restantes “se consume energía” para que el cigüeñal se pueda mantener girando por inercia.

Esa situación obliga a que parte de la energía que se produce en cada tiempo de explosión sea necesario acumularla de alguna forma para mantener girando el cigüeñal durante los tres tiempos siguientes sin que pierda impulso.

De esa función se encarga una masa metálica denominada volante de inercia, es decir, una rueda metálica dentada, situada al final del eje del cigüeñal, que absorbe o acumula parte de la energía cinética que se produce durante el tiempo de explosión y la devuelve después al cigüeñal para mantenerlo girando.

Cuando el motor de gasolina está parado, el volante también contribuye a que se pueda poner en marcha, pues tiene acoplado un motor eléctrico de arranque que al ser accionado obliga a que el volante se mueva y el motor de gasolina arranque.

En el caso de los coches y otros vehículos automotores, la rueda del volante está acoplada también al sistema de embrague con el fin de transmitir el movimiento del cigüeñal al mecanismo diferencial que mueve las ruedas del vehículo.

## **2.6.4. FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR TÍPICO DE GASOLINA DE CUATRO TIEMPOS**

### **2.6.4.1. CICLOS DE TIEMPO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Los motores de combustión interna pueden ser de dos tiempos, o de cuatro tiempos, siendo los motores de gasolina de cuatro tiempos los más comúnmente utilizados en los coches o automóviles y para muchas otras funciones en las que se emplean como motor estacionario.

Una vez que ya conocemos las partes, piezas y dispositivos que conforman un motor de combustión interna, pasamos a explicar cómo funciona uno típico de gasolina. Como el funcionamiento es igual para todos los cilindros que contiene el motor, tomaremos como referencia uno sólo como muestra la Figura 2.43, para ver qué ocurre en su interior en cada uno de los cuatro tiempos; Admisión, Compresión, Explosión y Escape.

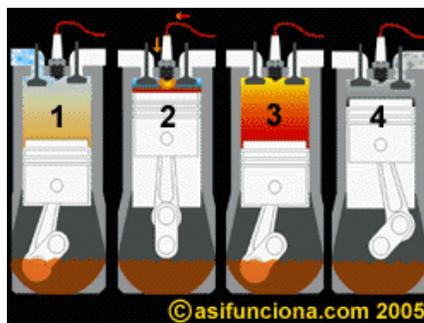


Figura 2.43. Ciclos de funcionamiento del motor.<sup>83</sup>

<sup>83</sup> [http://www.asifunciona.com/mecanica/af\\_motor\\_gasolina/af\\_motor\\_gasolina\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/mecanica/af_motor_gasolina/af_motor_gasolina_1.htm)

### 2.6.4.1.1. PRIMER TIEMPO (ADMISION).

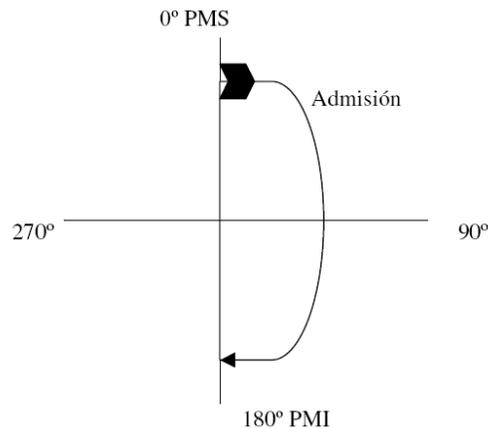


Figura 2.44 Diagrama ciclo de admisión.<sup>84</sup>

La primera etapa del ciclo Otto Figura 2.44, la de admisión, queda representada. Empieza cuando el pistón está colocado en la parte superior del cilindro. Con la válvula de escape cerrada y la admisión abierta, el pistón se mueve hacia abajo provocando la admisión al producirse un vacío parcial en el interior del cilindro. La presión atmosférica, por ser mayor que la que existe en el interior del cilindro, hace que entre aire por el carburador, donde se mezcla en proporciones adecuadas con el combustible.

Esta mezcla pasa por el tubo de admisión múltiple al interior del cilindro. Cuando el pistón llega al punto muerto inferior (PMI) la presión en el interior del cilindro sigue siendo algo menor que la presión atmosférica exterior y la mezcla continua entrando en el cilindro. La válvula de admisión sigue abierta mientras que el pistón inicia el movimiento hacia arriba hasta que la posición de la leva hace que la válvula se cierre. La distancia que recorre el pistón hacia arriba hasta que cierra la válvula es realmente muy pequeña.

<sup>84</sup> <http://www.yomecanico.com/wp-content/uploads/2009/12/ciclo-otto.pdf>

### 2.6.4.1.2. SEGUNDO TIEMPO (COMPRESION).

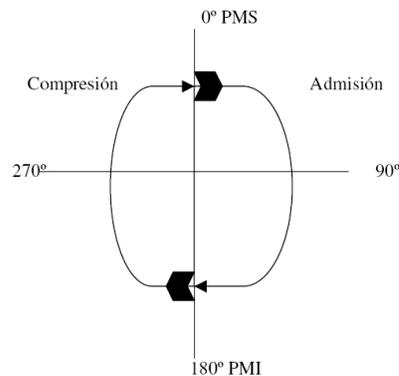


Figura 2.45. Diagrama ciclo de compresion.<sup>85</sup>

La compresión en un motor de 4 tiempos, sigue inmediatamente la admisión. Ambas válvulas están cerradas y la mezcla de combustible queda en el cilindro que ahora está cerrada. El pistón al moverse hacia arriba dentro del cilindro comprime la mezcla combustible al terminar esta etapa el pistón ha completado dos movimientos, uno hacia abajo y el otro hacia arriba y el cigüeñal un círculo completo o sea 360° como se detalla en la figura 2.45.

### 2.6.4.1.3. TERCER TIEMPO (EXPLOSION).

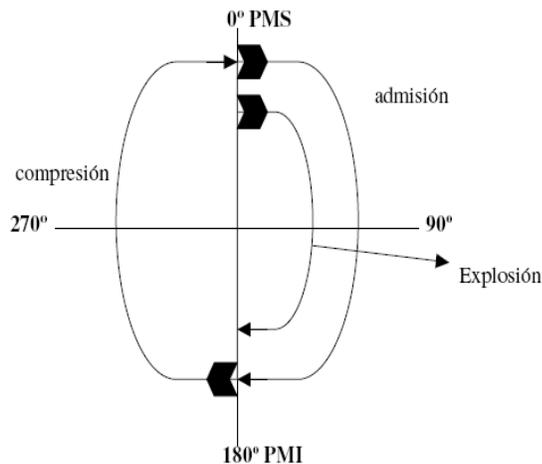


Figura 2.46. Diagrama ciclo de explosión.<sup>86</sup>

<sup>85</sup> <http://www.yomecanico.com/wp-content/uploads/2009/12/ciclo-otto.pdf>

Cuando el pistón ha llegado al punto muerto superior (PMS) la mezcla combustible que entró al cilindro durante la admisión ha quedado comprimida. En este momento del ciclo dicha carga combustible se inflama por medio de una chispa producida por la bujía y se verifica la combustión. Debido al calor generado por la combustión, (aproximadamente de 4000 a 4500 °C igual a 2204 menos 2491°C ). Se expanden los gases y se produce una alta presión en el interior del cilindro así detallada en la Figura 2.46.

Esta presión actúa en forma de “de empuje” contra la cabeza del pistón, obligando a bajar, como se ve, lo que constituye la transmisión de la energía al cigüeñal en forma de fuerza de torsión o rotatoria.

#### 2.6.4.1.4. CUARTO TIEMPO (ESCAPE).

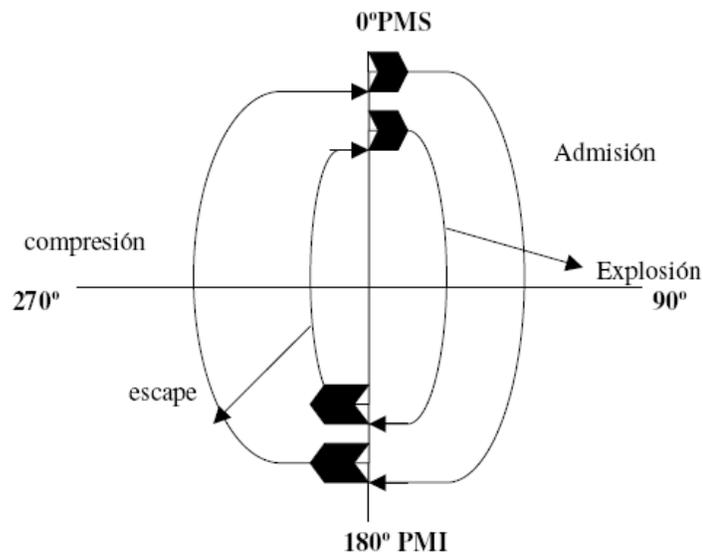


Figura 2.47 Diagrama ciclo de Escape.<sup>87</sup>

Cuando el pistón se acerca al punto muerto inferior (PMI) la posición que corresponde al fin de la energía, la válvula de escape, se abre disminuyendo

<sup>86</sup> <http://www.yomecanico.com/wp-content/uploads/2009/12/ciclo-otto.pdf>

<sup>87</sup> <http://www.yomecanico.com/wp-content/uploads/2009/12/ciclo-otto.pdf>

la presión en el interior del cilindro. Esta válvula permanece abierta mientras el pistón se mueve hacia arriba, hasta que llega al punto muerto superior (PMS). Cuando el pistón alcanza la posición más alta se cierra la válvula de escape.

En la mayoría de los motores la válvula de escape se cierra poco después de alcanzado el punto muerto superior (PMS), antes de que el pistón llegue a la parte superior en la admisión empieza a abrirse la válvula de admisión, esta permite que esté abierta totalmente cuando el pistón baja de nuevo para iniciar la admisión siguiente.

### 2.6.5. CICLO OTTO

El motor de gasolina de cuatro tiempos se conoce también como “motor de ciclo Otto”, denominación que proviene del nombre de su inventor, el Alemán Nikolaus August Otto (1832-1891). El ciclo de trabajo de un motor Otto de cuatro tiempos [Figura 2.44], se puede representar gráficamente, tal como aparece en la ilustración.

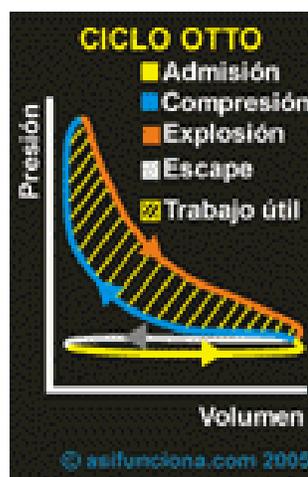


Figura 2.44. Ciclo de trabajo OTTO<sup>88</sup>

<sup>88</sup> www.asifunciona.com

Esa representación gráfica se puede explicar de la siguiente forma:

**1. La línea amarilla representa el tiempo de admisión.** El volumen del cilindro conteniendo la mezcla aire-combustible aumenta, no así la presión.

**2. La línea azul representa el tiempo de compresión.** La válvula de admisión que ha permanecido abierta durante el tiempo anterior se cierra y la mezcla aire-combustible se comienza a comprimir. Como se puede ver en este tiempo, el volumen del cilindro se va reduciendo a medida que el pistón se desplaza. Cuando alcanza el PMS (Punto Muerto Superior) la presión dentro del cilindro ha subido al máximo.

**3. La línea naranja representa el tiempo de explosión,** momento en que el pistón se encuentra en el PMS. Como se puede apreciar, al inicio de la explosión del combustible la presión es máxima y el volumen del cilindro mínimo, pero una vez que el pistón se desplaza hacia el PMI (Punto Muerto Inferior) transmitiendo toda su fuerza al cigüeñal, la presión disminuye mientras el volumen del cilindro aumenta.

**4. Por último la línea gris clara representa el tiempo de escape.** Como se puede apreciar, durante este tiempo el volumen del cilindro disminuye a medida que el pistón arrastra hacia el exterior los gases de escape sin aumento de presión, es decir, a presión normal, hasta alcanzar el PMS..

El sombreado de líneas amarillas dentro del gráfico representa el "trabajo útil" desarrollado por el motor.

## **2.6.6. SISTEMA DE ALIMENTACION DEL VEHICULO A CARBURADOR**

### **2.6.6.1. INTRODUCCION.**

El combustible que ha de servir para mover el vehículo se encuentra almacenado en un tanque o depósito, en algún lugar oculto del automóvil y ha de ir cerrado con un tapón provisto de un orificio para permitir el paso del aire y de los gases que allí se puedan formar, bien sea por el continuo movimiento del vehículo o por un calor excesivo.

El sistema de alimentación tiene por objeto extraer el combustible del depósito y conducirlo a los cilindros en las mejores condiciones, para que la combustión se realice correctamente. Este sistema depende del tipo de motor, pero tanto los motores de gas-olina como los de gas-oil deben ir provistos de una bomba que extrae el combustible del depósito y lo empuja hacia el resto del sistema de alimentación: "Bomba de alimentación".

### **2.6.6.2. SISTEMAS EMPLEADOS PARA LA ENTRADA DEL CARBURANTE AL CILINDRO**

Se emplean distintos sistemas de entrada de carburante en el cilindro.

- Para diesel: Bomba inyectora.
- Para gasolina: Carburador o inyector.

### **2.6.6.3. BOMBA DE ALIMENTACION.**

El tipo más empleado es el de membrana como se detalla en la [Figura 2.45], cuyo funcionamiento es el siguiente:

Una excéntrica del árbol de levas acciona la palanca número 1, que mueve la membrana número 2, aspirando combustible por efecto de las válvulas 3 y 4, que son de efecto contrario cuando la leva no acciona la palanca, ésta vuelve a su sitio por el resorte número 5, impulsando la membrana y con ella el carburante que sale hacia los cilindros por el número 4. La membrana está constituida por un tejido de caucho sintético o de plástico.

Si la membrana se rompe o se estropea producirá fallos en el sistema de alimentación, lo que impedirá que el combustible llegue normalmente a los cilindros. Dicha membrana es accionada por un sistema mecánico, pero existe igualmente un sistema eléctrico para hacerla mover y aspirar.

Suele haber colocados, entre estos sistemas, varios filtros que purifican el combustible de las impurezas que le acompañan.

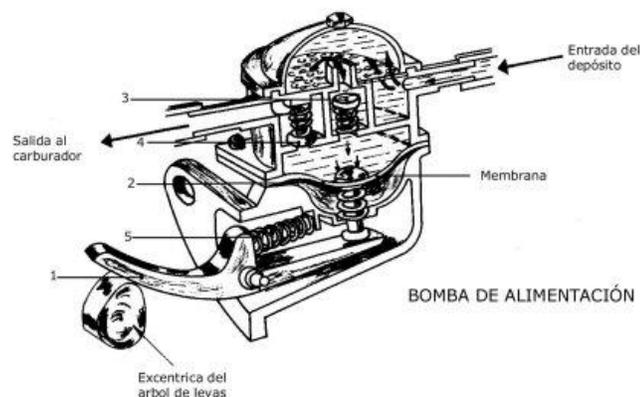


Figura 2.45. Partes de la bomba de alimentación de membrana<sup>89</sup>

<sup>89</sup> [www.mecanicavirtual.org/indice\\_cursos.html](http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html)

#### **2.6.6.4. EL CARBURADOR**

Es el elemento que va a preparar la mezcla de gasolina y aire en un proporción adecuada (10.000 litros de aire por uno de gasolina) que entrará en los cilindros.

Una de las propiedades que ha de tener este elemento, es la de proporcionar una cantidad de mezcla en cada momento, de acuerdo con las necesidades del motor. Esto es, cuando el vehículo necesita más potencia, el carburador debe aportar la cantidad de mezcla suficiente para poder desarrollar esa potencia.

Cuando la proporción de gasolina es mayor a la citada anteriormente, decimos que la mezcla es "rica" y por el contrario, cuando baja la proporción de gasolina, la mezcla es "pobre".

Los carburadores pueden y de hecho varían según las marcas de los automóviles, pero en todos encontraremos tres elementos esenciales, que son:

- **LA CUBA.**
- **EL SURTIDOR.**
- **EL DIFUSOR.**

##### **2.6.6.4.1. LA CUBA**

El carburador dispone de un pequeño depósito llamo cuba (figura 2) que sirve para mantener constante el nivel de gasolina en el carburador, la cual es a su vez alimentada por la bomba de alimentación, que hemos visto.

Este nivel constante se mantiene gracias a un flotador con aguja que abre o cierra el conducto de comunicación, y en este caso, de alimentación entre la cuba y el depósito de gasolina.

#### **2.6.6.4.2. EL SURTIDOR**

La gasolina pasa de la cuba a un bubito estrecho y alargado llamado surtidor que comúnmente se le conoce con el nombre de "gicler". El surtidor pone en comunicación la cuba (Figura 2.46) con el conducto de aire, donde se efectúa la mezcla de aire y gasolina (mezcla carburada).

#### **2.6.6.4.3. EL DIFUSOR**

Es un estrechamiento del tubo por el que pasa el aire para efectuar la mezcla. Este estrechamiento se llama difusor o venturi. El difusor no es más que una aplicación del llamado "efecto venturi", que se fundamenta en el principio de que "toda corriente de aire que pasa rozando un orificio provoca una succión" (figura 2).

La cantidad de gasolina que pasa con el fin de lograr una óptima proporción (1:10.000) , la regulan, como hemos visto, el calibrador o gicler, o el difusor o venturi.

Por su parte, el colector de admisión, que es por donde entra el aire del exterior a través de un filtro en el que quedan las impurezas y el polvo, a la altura del difusor, se estrecha para activar el paso del aire y absorber del difusor la gasolina, llegando ya mezclada a los cilindros.

La corriente que existe en el colector, la provocan los pistones en el cilindro durante el tiempo de admisión, que succionan el aire.

Una válvula de mariposa sirve para regular la cantidad de mezcla, ésta es a su vez accionada por el conductor cuando pisa el pedal del acelerador, se sitúa a la salida del carburador, permitiendo el paso de más o menos mezcla. (Figura 2.46).

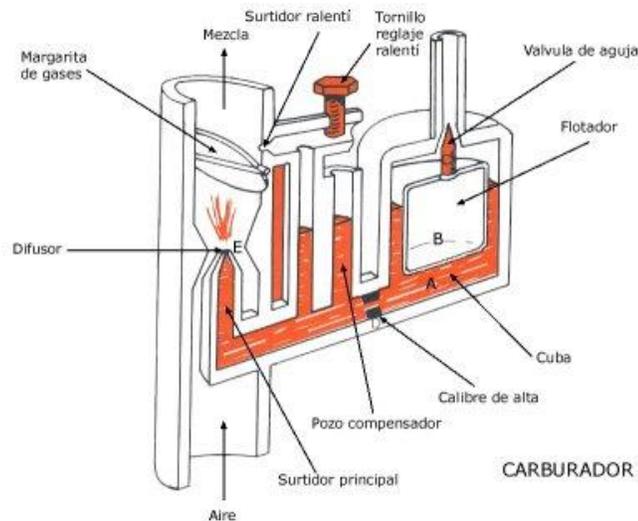


Figura 2.46 Partes de un carburador<sup>90</sup>

#### 2.6.6.4.4. FUNCIONAMIENTO DEL CARBURADOR:

Cuando el conductor no acciona el acelerador, la válvula de mariposa se encuentra cerrada y sólo permite que pase una pequeña cantidad de aire, que absorbe la suficiente gasolina por el llamado surtidor de baja o ralenti, para que el motor no se pare sin acelerar.

El surtidor de ralenti puede regularse mediante unos tornillos, que permiten aumentar o disminuir la proporción de gasolina o de aire.

Cuando el conductor pisa el acelerador, la válvula de mariposa se abre, permitiendo mayor caudal de aire, lo que hace que la succión producida en el difusor de una mayor riqueza de mezcla, con lo que el motor aumenta de revoluciones.

<sup>90</sup> [www.mecanicavirtual.org/indice\\_cursos.html](http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html)

Al dejar de acelerar, la mariposa se cierra e interrumpe la corriente de aire, con lo que anula el funcionamiento del difusor. El motor no se para porque, como hemos visto, en ese momento entra en funcionamiento el surtidor de ralentí.

Si en un momento determinado de la marcha queremos más fuerza, el carburador dispone de un llamado pozo de compensación (surtidor de compensación), situado después del calibrador de alta, que dispone de un remanente de gasolina y en él es donde se alimenta el sistema de ralentí.

Si se pisa el acelerador, el calibrador de alta dificulta el paso inmediato de la gasolina que se necesita para esa aceleración inmediata, por lo que se sirve del remanente en el pozo compensador, al dejar de acelerar, el pozo recobra su nivel.

#### **2.6.6.4.5. BOMBA DE ACELERACIÓN:**

Para poder enriquecer momentáneamente la mezcla para obtener un aumento instantáneo de fuerza, casi todos los carburadores actuales poseen una bomba llamada desaceleración (Figura 2.47).

Suelen ser de pistón, de forma que a partir de cierto punto de apertura de la válvula de mariposa, éste presiona y envía la gasolina al colector a enriquecer la mezcla realizada por el difusor.

Constan de dos válvulas que sólo permiten el paso de gasolina en dirección al colector, una para llenado de la bomba y otra para enviarla al colector.

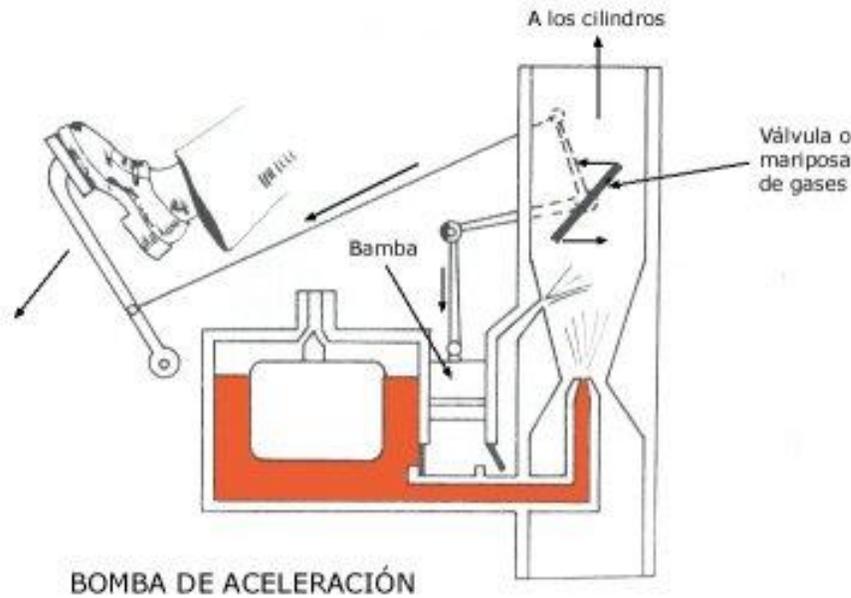


Figura 2.47 Funcionamiento de la bomba de aceleración.<sup>91</sup>

#### 2.6.6.4.6. ECONOMIZADOR

Algunos motores incorporan al carburador un elemento más, llamado economizador, que bien aumentando la proporción de aire o disminuyendo la gasolina, consigue un ahorro de combustible a medida que el motor está más acelerado.

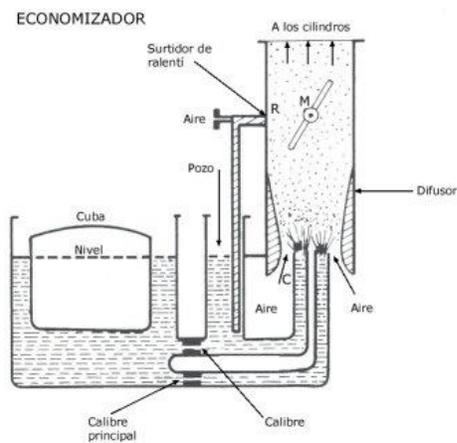


Figura 2.48. Diagrama del economizador

<sup>94</sup> [www.mecanicavirtual.org/indice\\_cursos.html](http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html)

Basa su funcionamiento en que el tapar el pozo compensador con una válvula de membrana, la cual permanece cerrada por la acción de un resorte situado en una cámara que comunica con el colector de admisión, y al acelerar y activar la succión en el colector, ésta hace un vacío en la cámara, que vence el resorte y permite una entrada de aire mayor en el pozo, con lo que se empobrece la mezcla, que sale por el compensador. Cuando el motor marcha a velocidad normal, por C y S (Figura 2.48), sale la gasolina pulverizada, que se mezcla con el aire, al acelerar y aspirar con más fuerza los cilindros, la succión es tan grande que se podría agotar la cantidad de gasolina que hay en el depósito, llamado pozo, de manera que por el surtidor "S" sigue saliendo gasolina, pero por el surtidor "C" sale casi sólo aire, por lo que la mezcla es más pobre, consiguiéndose así menor consumo de gasolina a medida que el motor va más acelerado, y al volver a la marcha normal el pozo se vuelve a llenar de gasolina.

#### **2.6.6.4.6. DISPOSITIVOS DE ARRANQUE EN FRÍO**

Cuando el motor está frío, el combustible que se suministra al motor por parte del carburador se condensa en las paredes de los colectores, por lo que el cilindro no le llega apenas combustible. Si a esto se añade la escasa succión que provocan los pistones cuando el motor de explosión es movido por el de arranque, tendremos una gran dificultad para conseguir que el motor de explosión se ponga en marcha. Para asegurar el arranque en frío se dispone de un sistema que aumenta la riqueza de la mezcla lo suficiente ( $r = 1/4$ ), compensando así las pérdidas de combustible por condensación en las paredes. El sistema de arranque en frío se le llama comúnmente "estrangulador" o bien "starter".

#### **2.6.6.4.6.1. CLASIFICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE ARRANQUE EN FRÍO**

Se pueden diferenciar varios sistemas de arranque en frío, por su forma de accionamiento (manuales y automáticos) y por su forma constructiva (estrangulador, starter):

**2.6.6.4.6.1.1. MANUALES:** Uno de los dispositivos más empleados [Figura 2.49], consiste en una segunda mariposa de gases (1), colocada por encima del difusor, la cual puede ser cerrada mecánicamente por medio de una varilla o cable unido a un mando situado en el interior del habitáculo (salpicadero) y al alcance del conductor.

La mariposa del estrangulador va montada con su eje descentrado (5) y combinada por un sistema de varillas de unión con la mariposa de gases (6), de forma que, cuando se cierra la mariposa de estrangulación de aire, se abre un poco la mariposa de gases (abertura positiva), permitiendo un mayor número de revoluciones del motor en su funcionamiento a ralentí y asegurando el funcionamiento del motor una vez arrancado.

El enriquecimiento de la mezcla ( $r = 1/4$ ) se produce debido a que, al estar cerrada la entrada de aire por encima del difusor, la depresión creada por los cilindros no puede transmitirse al exterior. Esto crea una gran depresión a la altura del surtidor de combustible, con lo cual la succión en el mismo es grande, aportando al poco aire que deja pasar la mariposa estranguladora gran cantidad de combustible, lo que proporciona a la mezcla una dosificación muy rica, necesaria para el arranque del motor en estas condiciones.

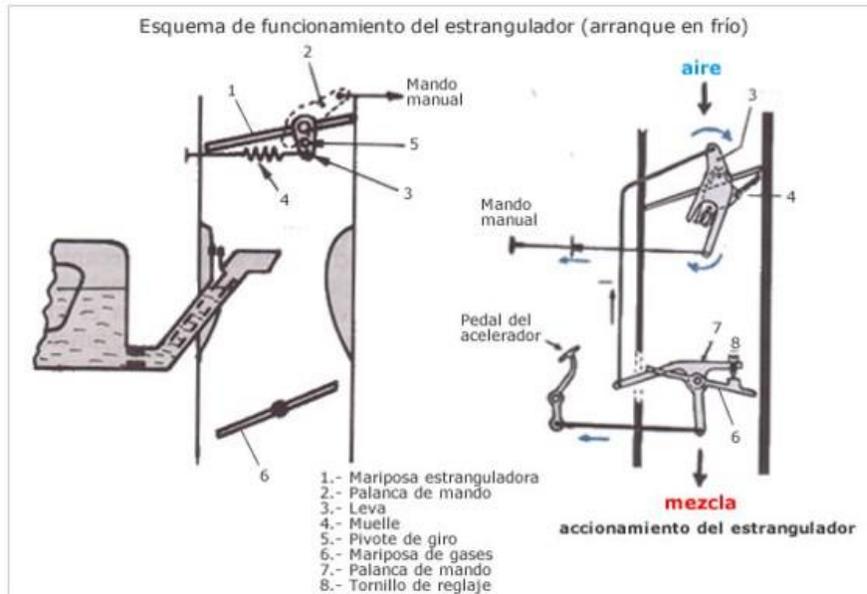


Figura 2.49. Esquema de funcionamiento de un estrangulador manual.<sup>92</sup>

Una vez arrancado el motor, cuando este aumenta de revoluciones, también aumenta la riqueza de la mezcla. Cuando disminuye la condensación (por calentamiento del motor), la succión de aire es mas fuerte, lo que hace que la mariposa estranguladora se abra parcialmente por efecto de su eje descentrado, permitiendo un mayor paso de aire que compensa el enriquecimiento de la mezcla, para que el motor no se ahogue por exceso de combustible.

Cuando el motor ha alcanzado su temperatura de régimen, hay que abrir la mariposa de arranque en frío, con lo cual la mariposa de gases vuelve a su posición normal de funcionamiento a ralentí.

**2.6.6.4.6.1.2. AUTOMÁTICOS: Estrangulador automático:** en este dispositivo el accionamiento de la mariposa estranguladora se realiza de manera automática sin intervención del conductor. También dentro de la denominación "starter" esta el sistema que prescinde de la mariposa

<sup>92</sup> www.mecanicavirtual.com

estranguladora y se sustituye por un circuito auxiliar de alimentación para arranque en frío.

En los sistemas que utilizan válvula estranguladora se utiliza un muelle de lámina bimetálica que, al contraerse por el frío, cierra más o menos la mariposa. Esta se abre por dilatación del muelle, cuando el motor ha alcanzado su temperatura de régimen.

La mariposa estranguladora, a su vez, va unida a una válvula que actúa en función de la depresión creada por los cilindros debajo de la mariposa de gases. Esta válvula abre progresivamente la mariposa de arranque en frío, a medida que la depresión es mayor, y permite un mayor paso de aire para compensar la riqueza de la mezcla, cuando el motor se revoluciona.

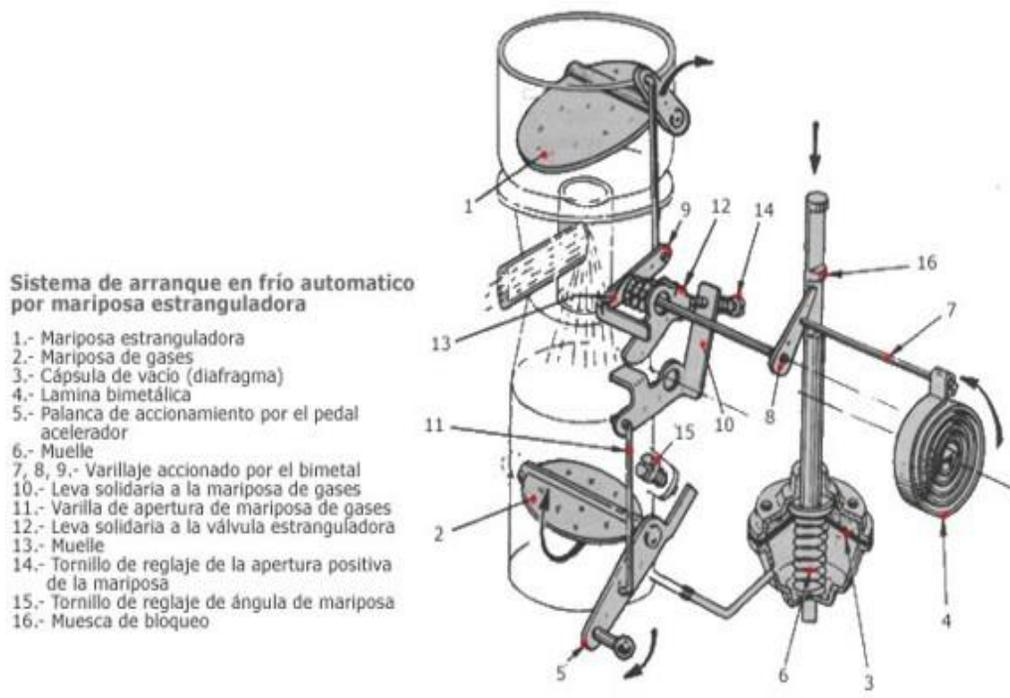


Figura 2.50 Diagrama de un dispositivo de arranque en frío automático.<sup>93</sup>

<sup>93</sup> www.mecanicavirtual.com

### 2.6.7. MEZCLA ESTEQUIOMÉTRICA

La relación entre aire y combustible varía constantemente en un motor de pistones. Esta proporción se calcula de acuerdo al peso.

$$\text{Proporción de Mezcla} = \frac{\text{aire atmosférico en gramos}}{\text{consumo de gasolina en gramos}} \quad (2.106)$$

En condiciones normales, la combustión total de 1 gramo de gasolina se consigue con 14.8 gramos de aire. Sin embargo, los motores de pistón no son capaces de crear las condiciones de homogeneidad entre aire y gasolina para quemarla el ciento por ciento.

Para contrarrestar esta deficiencia los sistemas de alimentación están diseñados de manera que la mezcla contenga un 10 por ciento más de aire por gramo de gasolina. Esta proporción se denomina "mezcla económica" y se forma con 16 partes de aire por cada parte de combustible.

#### 2.6.7.1. RELACIÓN DE MÁXIMA POTENCIA

Esta se obtiene con una mezcla que presenta 20% menos de aire que la proporción económica, es decir, 1 gramo de gasolina por cada 12,5 gramos de aire.

#### 2.6.7.2. RENDIMIENTO DEL MOTOR

El desempeño de un motor varía de acuerdo a la relación de mezcla que utiliza. Si un motor funciona a velocidad constante y variamos la proporción

de aire combustible que lo alimenta su potencia varía de acuerdo a lo descrito en la Figura (2.51).

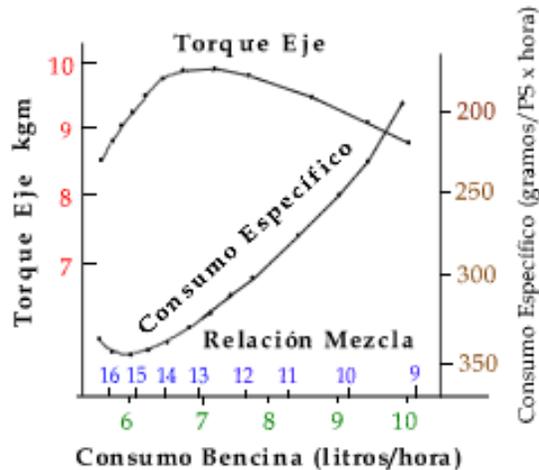


Figura 2.51 Esquema representativo del rendimiento de un motor<sup>94</sup>

A medida que se mejora el rendimiento volumétrico de un motor, mayor cantidad de mezcla alcanza los cilindros y por consiguiente su potencia aumenta. Otras mejoras se obtienen si se ajusta apropiadamente lo siguiente:

- Atomización de la gasolina.
- Uniformidad de alimentación a cada cilindro.
- Aumento de relación de compresión.
- Punto de encendido eléctrico.

Si el armado o los ajustes de un motor no son realizados correctamente su potencia máxima es imposible de conseguir y su consumo de combustible disminuye. Como resultado de la combustión de la gasolina se obtiene calor, dióxido de carbono y agua. Por cada litro de bencina que se quema el motor arroja a través de su sistema de escape 1 litro de agua.

<sup>94</sup> [www.mecanicavirtual.org/indice\\_cursos.html](http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html)

## **CAPITULO III**

### **3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Tipo de investigación.**

La investigación que se llevara a cabo es de naturaleza:

##### **3.1.1 Bibliográfica:**

Ya que se basa en la investigación de fuentes de consulta en libros, tesis y sitios de internet.

##### **3.1.2 Tecnológico:**

En este método nos apoyamos en la tecnología que tenemos a nuestro alcance la cual nos permite demostrar la producción de hidrogeno; y utilizar métodos específicos apoyados en teorías ya comprobadas.

##### **3.1.3 Práctica:**

Esto lo aplicaremos ya que al investigar adquirimos una serie de conocimientos que le permiten poner en práctica, los conceptos científicos para obtener los resultados que estamos buscando.

En este método los conocimientos adquiridos previos a la investigación constituyen uno de los elementos esenciales de la toma de decisión en los campos donde se precisa realizar la investigación.

## CAPITULO IV

### 4. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Nº	Actividad	Semana																								
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª	16ª	17ª	18ª	19ª	20ª	21ª	22ª	23ª	24ª	25ª
1	Problemas	X																								
2	Planteamiento del problema		X																							
3	Búsqueda de información.		X																							
4	Desarrollo del marco teórico			X	X	X																				
5	Organización de la información						X																			
6	Marco administrativo							X																		
7	Construcción del generador.								X	X	X	X														
8	Preparación del vehículo y el sistema generador de hidrogeno									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
9	Presentar borrador																						X	X		
10	Informe Final																								X	
11	Defensa Tesis																									X

## 4.1 Recursos.

### 4.1.1 Humanos:

Este trabajo de investigación será desarrollado por los estudiantes egresados de la Facultad de Educación Ciencia y Tecnología FECYT.

Cando Piarpuezán Hugo Fernando, autor de la tesis  
Quelal Manosalvas Henry Ruperto, autor de la tesis

### 4.1.2 Institucionales:

Universidad “Técnica del Norte”  
Facultad de Educación Ciencia y Tecnología.  
Talleres de Mecánica de la Escuela de Educación Técnica.

### 4.1.3 Económicos:

CANTIDAD	MATERIALES	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
500	Hojas papel Bond	0.01	0.05 <sup>00</sup>
300	Copias	0.02	6. <sup>00</sup>
100	Horas de Internet	0.60	60. <sup>00</sup>
1	Vehículo Honda Civic	1000.00	1000. <sup>00</sup>
1	Insumos para pintura del vehículo	170.00	170. <sup>00</sup>
1	Insumos para reparación de motor	150.00	150. <sup>00</sup>
1	Insumos para montaje del generador en el vehículo	100.00	100. <sup>00</sup>
16	Rodelas acero inox. 316L	10.00	160. <sup>00</sup>
8	Cauchos para temperatura	5.00	40. <sup>00</sup>
1	Recipiente de polietileno.	20.00	20. <sup>00</sup>
2	Metros de manguera ecológica	10.00	20. <sup>00</sup>

1	Cantidad de electrolito	50.00	50. <sup>00</sup>
1	Metro de tubería de bronce de 3/8	10.00	10. <sup>00</sup>
2	Pernos acero inox de ¼ x 3 ½ “	2.00	4. <sup>00</sup>
1	Kit de componentes eléctricos para el encendido del generador	10.00	10. <sup>00</sup>
500	Impresiones	0.10	50. <sup>00</sup>
	<b>TOTAL</b>		

Tabla 4.2 Recursos Económicos.

## CAPÍTULO V

### 5. PROPUESTA

#### 5.1 Título de la Propuesta

“CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA..”

#### 5.2 Análisis de la Propuesta

La finalidad de desarrollar un sistema generador de hidrogeno para alimentar un automóvil a carburador de basa en apoyar las diferentes campañas que se preocupan por hacer conciencia en la gente para no seguir contaminando de manera desmesurada el medio ambiente, esto en gran medida por el parque automotor, de ahí se desprende la necesidad de reducir las emisiones contaminantes del vehículo con este generador.

**5.2.1 Observar y analizar.-** Las necesidades latentes en el entorno que nos rodea.

**5.2.2 Planear y proyectar.-** Proponiendo una solución de economizar combustible y aumentar la eficiencia del motor, mediante la construcción de un generador de hidrogeno como una solución de energía limpia.

**5.2.3 Construir y ejecutar.-** haciendo palpable la iniciativa de construir un generador de Hidrogeno y adaptarlo al vehículo.

**5.2.4 Pruebas.-** ya que es necesario comprobar si el generador produce hidrogeno, reduce el consumo de combustible y aumenta la eficiencia del motor.

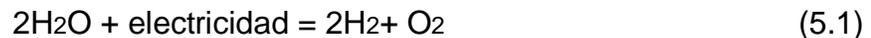
### **5.3 TAREAS REQUERIDAS EN LA PROPUESTA**

1. Reconocer el espacio requerido en el vehículo para montar el generador.
2. Realizar una inspección de los sistemas del vehículo.
3. Preparar materiales y herramientas.
4. Comprobar que el rendimiento del motor sea óptimo.
5. Realizar un esquema del generador.
6. Presentar el generador armado.
7. Montar el generador en el auto y sincronizarlo con el sistema de encendido.
8. Instalar cableado para control del generador.
9. Verificar la producción de Hidrogeno y posibles fugas.
10. Comprobar el funcionamiento del generador y economía en combustible.
11. Pruebas en carretera en condiciones normales de manejo a 2410 rpm.

### **5.4 “CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA”**

### 5.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La electrolisis es un proceso electroquímico en el cual a partir de agua y electricidad se obtiene hidrógeno y oxígeno, de manera totalmente limpia , sin ninguna emisión ni contaminación, la electrolisis se da en un electrolito (solución acuosa ) a base de agua destilada, que permite la transferencia de iones entre los electrodos pero no el paso de electrones es dieléctrico, más un catalizador que es la sustancia química que facilita o provoca una reacción química, no se consume durante la reacción , en este caso el catalizador es hidróxido de potasio.



El poder calorífico de 1 kg de hidrogeno equivale casi a 3 kg de gasolina pero aumenta al combinar el hidrogeno con el oxigeno se consiguen mezclas con mayor poder explosivo, como ya usan en la tecnología espacial para sus transbordadores, junto con el peróxido de hidrogeno para los cohetes lanzadera (agua oxigenada concentrada hasta 100 volúmenes, diez veces más que la que usamos en casa), siendo el combustible más potente que existe.

### 5.4.2. SISTEMAS DEL ELECTROLIZADOR

Para la siguiente investigación hemos tomado en cuenta los siguientes sistemas:

- Sistema de producción y distribución de hidrógeno.
- Sistema de alimentación del electrolito.
- Sistema eléctrico del electrolizador.
- Sistema de medición de la producción de hidrogeno.

#### **5.4.2.1. SISTEMA DE PRODUCCION Y DISTRIBUCION DE HIDROGENO.**

La producción y distribución de hidrogeno, se ha obtenido mediante un proceso de electrólisis que posteriormente será conducido en forma de gas hasta la cámara de combustión del auto, este sistema está conformado por el cuerpo del electrolizador, diafragmas, electrodos anódicos y catódicos.

Para el planteamiento de soluciones del Sistema de Producción y Distribución de Hidrogeno además de considerar las especificaciones del electrolizador se deben establecer criterios de diseño del cuerpo del electrolizador.

##### **5.4.2.1.1. DISEÑO DEL ELECTROLIZADOR.**

Este diseño está constituido por siete celdas cilíndricas separadas entre si por un aislante de caucho resistente a la temperatura, las cuales garantizan la hermeticidad del sistema, cada uno de los ductos de entrada del electrolito están ubicados en el centro de cada celda respectivamente, los ductos de salida de los gases se encuentran ubicados al lado opuesto de los conductos de entrada, la distancia de los electrodos no es regulable puesto que se ajustan de tal manera que los cauchos sellen la salida de electrolito por las paredes de las placas de acero inoxidable como se aprecia en la Figura 5.1

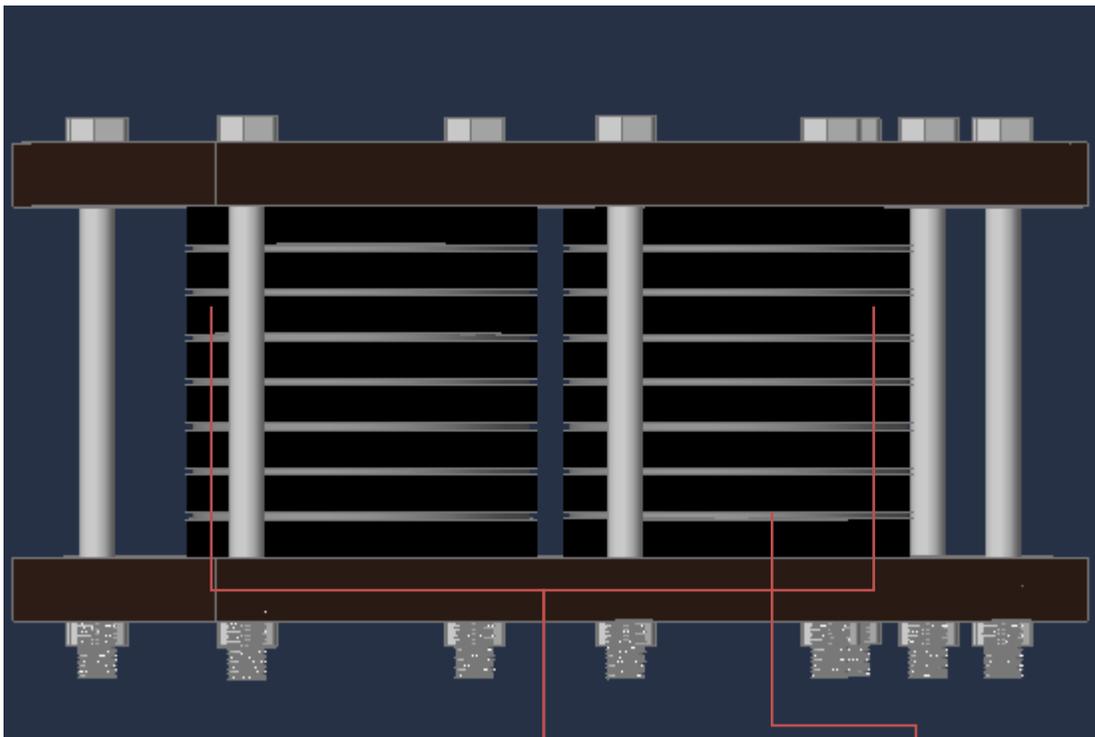
##### **5.4.2.1.1.1. VENTAJAS**

- Diseño compacto.
- Disponibilidad de trabajo continuo.
- Fácil armado.

- Pequeño volumen de trabajo
- Fácil limpieza
- Facilidad de montaje

#### 5.4.2.1.1.2. DESVENTAJAS

- Dificultad en el cambio de electrodos.
- Se incrementa el costo.



- Difícil acceso al material de acero inoxidable 316L.

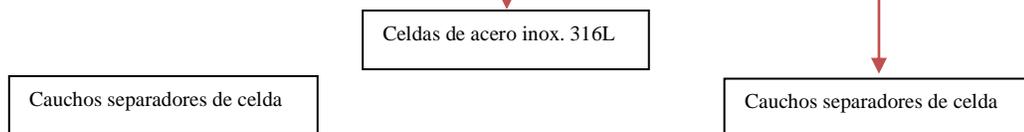


Figura 5.1 Generador de Hidrogeno.

El desempeño de un electrolizador en la producción y distribución depende directamente de la geometría de la celda, separación entre los electrodos, forma de los electrodos, diseño de los ductos de salida de los gases (para evitar la acumulación de los mismos dentro de la celda) y materiales que garanticen una estabilidad química frente al electrolito.

Con el objetivo de obtener un buen rendimiento, un alto grado de pureza en la producción de hidrógeno y garantizar la seguridad en el funcionamiento del electrolizador. Entre los criterios primordiales que se van a considerar en el diseño del cuerpo del electrolizador son:

1. Geometría de la celda.
2. Longitud variable ente los electrodos (ánodo y cátodo).
3. Forma de los electrodos.
5. Áreas pequeñas de conducción de los electrodos. (Área transversal).
6. Bajo sobre potencial de los elementos que componen el circuito eléctrico.
7. Volumen suficiente para el almacenamiento de electrolito.
8. Adecuado diseño de los ductos de salida de los gases (para evitar la acumulación de los mismos dentro de la celda).

#### **5.4.2. 2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.**

Es el sistema encargado de la distribución del electrolito (Solución al 20% de hidróxido de potasio), desde el tanque de almacenamiento principal hacia el electrolizador por gravedad ya que el depósito del electrolito se encuentra por encima del electrolizador.

Para el planteamiento de soluciones para el Sistema de Alimentación del Electrolito se debe considerar todos los criterios de diseño, que satisfagan de forma completa sus requerimientos.

#### 5.4.2.2.1. RECIPIENTE CUADRADO HERMÉTICO CON TAPA DE POLIETILENO.

En la Figura 5.2 se muestra el depósito de almacenamiento de electrolito está constituido por un cuerpo cuadrado de polietileno u otro material que no reaccione con el electrolito, con tapa de polietileno a presión y además con un terminal ubicada en la parte inferior del cuerpo del tanque.

Para redirigir el fluido hacia una válvula de salida en la parte inferior del depósito con la finalidad de que electrolito salga hacia el electrolizador que tendrá dos entradas para la solución que garanticen el nivel uniforme del electrolito en el electrolizador.

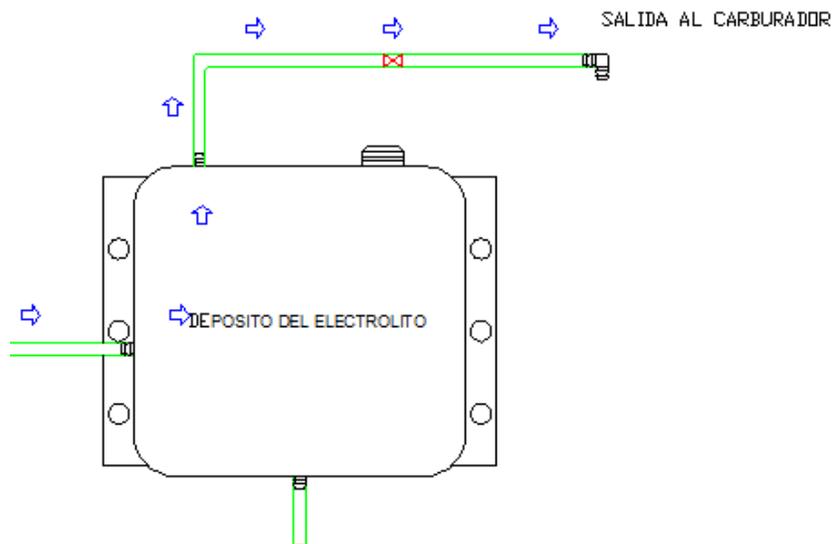


Figura 5.2 Depósito del electrolito

#### **5.4.2.2.1.1. VENTAJAS**

- Facilidad de verificación del nivel de electrolito.
- Fácil limpieza.
- Facilidad de montaje.
- Disponibilidad en cualquier medio.
- Excelentes propiedades aislantes.

El principal criterio de diseño del sistema de alimentación es de soportar la acción química a la que va estar sometido por estar en contacto directo con el electrolito, completamente hermético, se debe otorgar un mantenimiento sencillo y de fácil construcción y además se debe considerar:

1. Disponibilidad de materiales y de fácil construcción.
2. Facilidad de verificación del nivel de electrolito.
3. Alto grado de automatización.
4. Mantenimiento reducido.
5. Alta capacidad de almacenamiento.

#### **5.4.2. 3. SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROLIZADOR.**

Este circuito eléctrico utiliza como fuente de energía una batería de 12V que es alimentada por el alternador del automóvil esto hace que se convierta en una fuente de energía completamente autónoma y capaz de suministrar energía eléctrica constante para el funcionamiento del generador como se detalla en la Figura 2.3.

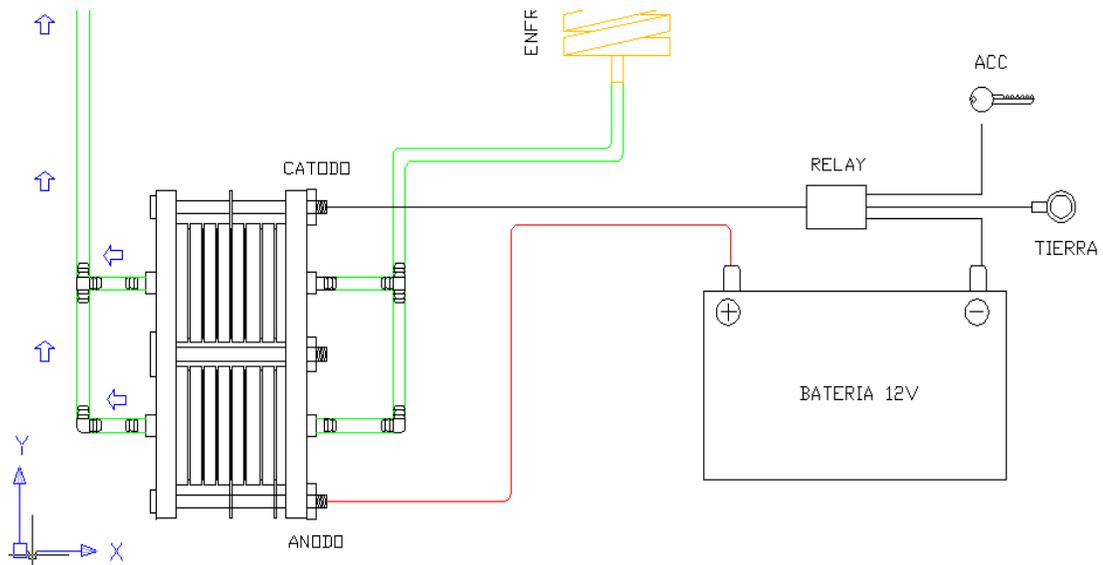


Figura 5.3 Esquema representativo del generador de hidrogeno.

#### 5.4.2. FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR.

Una corriente eléctrica atraviesa el electrolito disociando el enlace químico del agua, se generan un ion positivo y otro negativo que atraviesa el electrolito en direcciones contrarias hacia el cátodo (positivo) y el ánodo negativo, en el cátodo se reducen los iones positivos y los negativos se oxidan en el ánodo formándose moléculas de gas

El voltaje mínimo para la disociación del agua es de 1,5 voltios de corriente continua, nunca alterna. Este generador consume entre 1,5 y 2,5 amperios a un voltaje de 12v, como el de la batería de un coche, sin suponer un trabajo extra para la batería o el alternador, funcionando a baja temperatura hasta 70 grados, sin partes móviles y totalmente silenciosos.

### 5.4.3. APLICACIÓN EN MOTORES DE COMBUSTION INTERNA.

Estos motores son máquinas termodinámicas directas que convierten la energía térmica de un combustible en energía mecánica a través de la combustión en un cilindro que mueve el pistón para generar potencia mecánica y eléctrica a través de un alternador.

Si añadimos el gas producido por el generador a la cámara de combustión a través de la entrada de aire después del filtro, el gas se combina rápidamente con el aire formando mezclas uniformes consiguiendo una mezcla de al menos el 5% de gas con el aire, obtendremos:

- Reacción de combustión más completa, la gasolina no se quema en su totalidad y no se aprovecha ni el 40% de su potencial, al añadir el gas se mejora este porcentaje y se quema más combustible.
- Mayor economía del combustible, con el mismo pedal de gas obtenemos más potencia al reducir las revoluciones para circular a la velocidad deseada reducimos el consumo.
- Menor temperatura final de combustión, la velocidad de la llama es muy elevada permitiendo que el motor se acerque más a su ciclo termodinámico ideal.
- Reducción de las emisiones de óxido de nitrógeno y otras sustancias nocivas, en la combustión se produce un vapor super calentado que limpia las acumulaciones de carbono en los cilindros y escape.

El generador está listo para funcionar sin necesidad de modificaciones en la inyección o en la programación de la centralita que controla el encendido, aunque estos pueden ser modificados si se poseen los conocimientos adecuados para obtener mejores resultados.

Al trabajar con una mezcla pobre en hidrogeno no se dan los perjuicios asociados al hidrogeno como ductilidad y fragilizacion de las estructuras metálicas, ni retroceso de la llama por la velocidad de auto ignición del gas, tampoco es un problema la recombinación del hidrogeno y oxigeno en agua dentro del motor, este proceso es extremadamente lento y solo se produce en la combustión siendo rápidamente absorbido en forma de vapor de agua por el sistema de escape.

El gas no se almacena se produce solo para ser consumido inmediatamente, así que no existe riesgo alguno de explosión, en caso de accidente se derramaría el liquido al suelo y el generador dejaría de funcionar, el hidrogeno tiene alta difusividad y es 16 veces menos denso que el aire, desaparecerá rápidamente hacia arriba combinándose rápidamente con el aire.

## **5.5 DESARROLLO DEL PROYECTO**

Para realizar el proyecto se eligió un vehículo Honda Civic del año 1974 de 3 puertas con motor de 1.4 de cilindraje 8 válvulas, el cual fue adquirido entre 2 compañeros para desarrollar el presente tema de tesis.

El electrolizador que se muestra en la figura 5.4 está basado en el concepto de celdas en serie en ducto común. Utiliza un electrolítico alcalino (KOH) para separar el agua en sus componentes hidrógeno y oxígeno de

manera muy eficiente. Los gases de hidrógeno y oxígeno producidos no son enviados a distintos contenedores, sino que se mantienen mezclados.

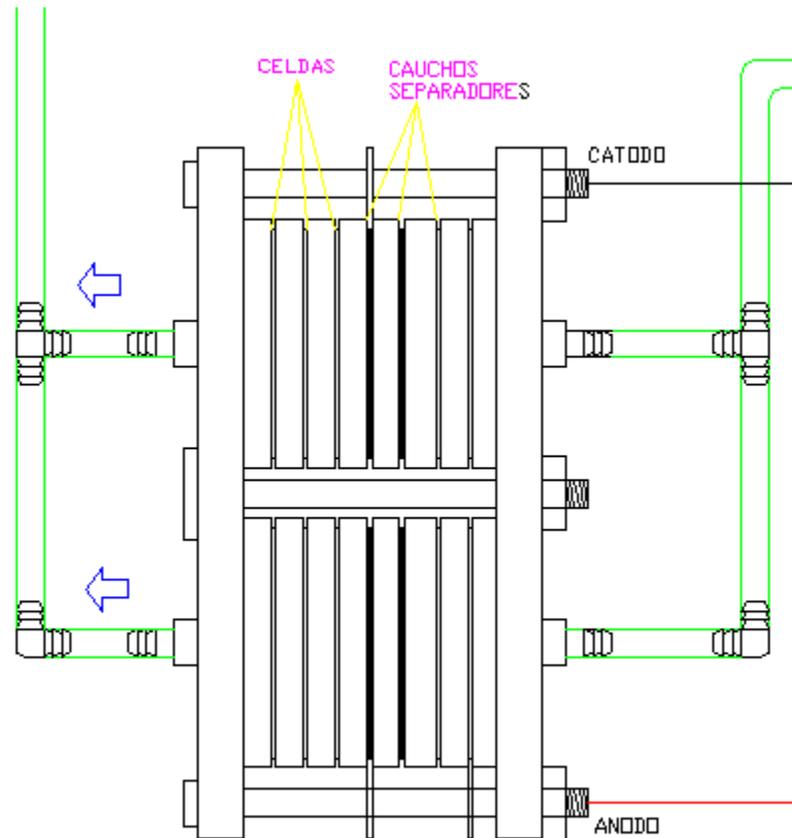


Figura 5.4 Electrolizador

El gas oxihidrógeno es una mezcla estequiométrica de hidrógeno (2 partes en volumen) y oxígeno (1 parte en volumen) y puede combustionarse en vacío. La topología de combinación de celdas en serie es muy eficiente, porque permite a las celdas operar tan cerca de su voltaje óptimo (1.47V) posible.

El electrolizador funciona relativamente fresco, alrededor de entre 30 y 50 grados Celcius dependiendo de la corriente y el electrolito. El electrolizador

mostrado tiene entre el 60 y 70% de eficiencia total cuando todos los factores son considerados (temperatura ambiente, presión ambiente, medición correcta de volumen y corriente del gas) cuando es alimentada por una fuente de corriente directa (DC).

También se comenta de varios fenómenos de resonancia que supuestamente incrementan dramáticamente la producción de gas contra la entrada de corriente cuando el electrolizador es alimentado con cierto tipo de PWM alto en armónicas.

El electrolizador tiene 14 celdas con un voltaje de entrada de entre 12.9 y 14.1 VDC dependiendo de la temperatura. Esto hace que el voltaje de celda sea de entre 1.85 y 2.0 V.

#### **5.5.1. CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROLIZADOR.**

En la construcción del sistema de producción y distribución de hidrógeno se tomo en cuenta el espacio disponible en el auto, la forma mas eficiente de transportar el hidrogeno al vehículo y la seguridad para que el sistema no ocasione lesiones.

##### **5.5.1.1. ARANDELAS DE ACERO INOXIDABLE 316L.**

Los aceros inoxidables contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas.

Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales.

También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de los fluidos corporales. En cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad.

De lo descrito con anterioridad se determina utilizar catorce arandelas [Figura 5.5] del electrolizador son calibre 12 de acero inoxidable (grado 316L), de 2" de diámetro externo por 3/8 de diámetro interno.

El nivel del electrolito cubre todo el interior de la perforación interna de la placa de acero inoxidable. Las placas son entonces lijadas con una lijadora orbital para exponer el metal y después se grava un patrón cruzado.

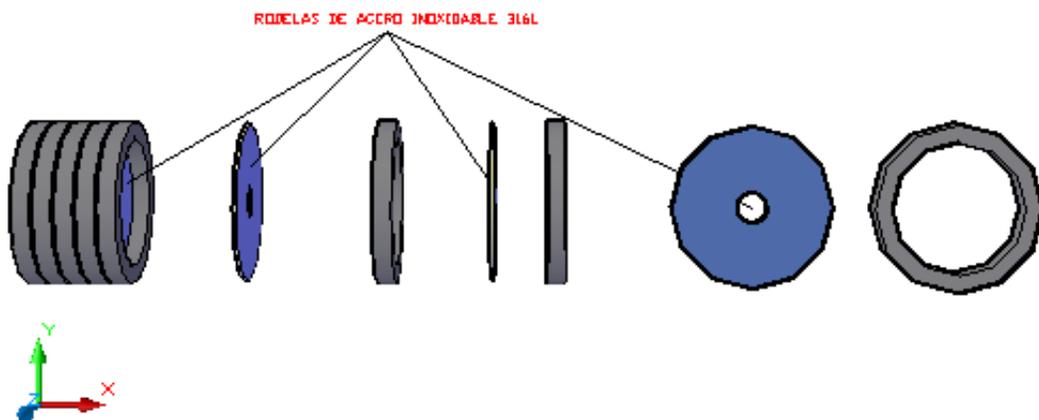


Figura 5.5. Corte de arandelas de acero inoxidable

Esto se puede hacer con una lija áspera sobre una superficie totalmente nivelada. Esto es para incrementar el área activa de las placas y parece ser necesario para alta eficiencia de la célula. Existen otros métodos para incrementar el área activa de las placas.

Para el armado del electrolizador se define ensamblar el electrolizador en dos columnas paralelas para formar el electrolizador la configuración de las arandelas en cada columna se da de la siguiente manera:

**NEGATIVO--NEUTRO-NEUTRO-POSITIVO-NEUTRO-NEUTRO-NEGATIVO**

#### **5.5.1.2. CAUCHOS SEPARADORES DE LAS ARANDELAS.**

El caucho en estado natural es un hidrocarburo blanco o incoloro. El compuesto de caucho más simple es el isopreno o 2-metilbutadieno, cuya fórmula química es  $C_5H_8$ . A la temperatura del aire líquido, alrededor de  $-195\text{ }^\circ\text{C}$ , el caucho puro es un sólido duro y transparente.

De  $0$  a  $10\text{ }^\circ\text{C}$  es frágil y opaco, y por encima de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  se vuelve blando, flexible y translúcido. Al amasarlo mecánicamente, o al calentarlo por encima de  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso. A temperaturas de  $200\text{ }^\circ\text{C}$  o superiores se descompone.

El caucho puro es insoluble en agua, álcalis o ácidos débiles, y soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos clorados y disulfuro de carbono. Con agentes oxidantes químicos se oxida rápidamente, pero con el oxígeno de la atmósfera lo hace lentamente. Dieciséis empaques de caucho resistente a la temperatura son cortados exactamente con sacabocados para los cuales se toma el diámetro exterior de  $2''$  y el diámetro interno de  $1\frac{1}{2}''$ .

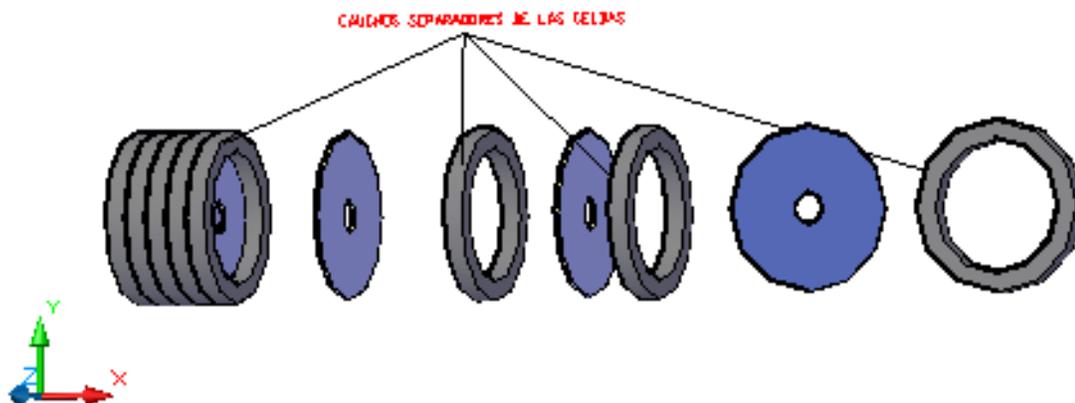


Figura 5.6 Anillos de caucho para separar las arandelas de acero

Los empaques de la Figura 5.6 son de hule y sirven para aislar las placas una de otra y al ser apretadas con las placas externas sirven también para sellar cualquier fuga.

Dentro de la celda no hay presión, solamente la reacción que se genera al separar los elementos. Los gases se trasladan de inmediato al tanque que almacena el electrolito para limpiarlo de impurezas el cual fluye al exterior del tanque hacia el carburador.

### 5.5.1.3. PLACAS DE LOS EXTREMOS DE PVC

PVC, siglas con que se designa el policloruro de vinilo,  $-(\text{CH}_2-\text{CHCl})_n$ , polímero sintético de adición que se obtiene por polimerización del cloruro de vinilo. Su masa molecular relativa puede llegar a ser de 1.500.000. El cloruro de vinilo,  $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$ , es la materia prima para la preparación del PVC. La polimerización se efectúa en suspensión acuosa, utilizando un jabón como emulsionante y un persulfato como iniciador, y transcurre en las tres etapas típicas de las reacciones por radicales libres: iniciación, propagación y terminación. En la iniciación, un radical libre reacciona con el cloruro de vinilo

para dar un radical libre de cloruro de vinilo. En la propagación, el radical del monómero reacciona con más moléculas de cloruro de vinilo obteniéndose un macrorradical. La terminación es una reacción de acoplamiento de dos macrorradicales.

El PVC es un plástico duro, resistente al fuego, a la luz, a los productos químicos, a los insectos, a los hongos y a la humedad. Es ignífugo, no se rompe ni se astilla, ni se mella fácilmente. Todas estas propiedades, y el hecho de que no requiera ser pintado y que pueda reciclarse, implican un coste bajo de mantenimiento y un menor impacto ambiental.

Su rigidez permite utilizarlo en la fabricación de tuberías, láminas y recubrimientos de suelos. Se hace flexible al mezclarlo con un plastificador, generalmente un poliéster alifático, siendo utilizado como aislante de tendidos eléctricos, como cuero sintético, para envases de alimentos y artículos impermeables.

Debido a sus propiedades y la existencia en el medio se utiliza 2 placas de PVC para los extremos del electrolizador de 5" de largo por 2 1/2" de ancho por 3/8" de espesor, en las cuales se realizan 2 perforaciones de 1/2" posteriormente machueleadas para insertar un acople para permitir por los agujeros de una placa el ingreso del electrolito a salida del electrolito, se repite el procedimiento en la otra placa ya que estos agujeros son para la salida del gas de Hidroxi, de igual manera se realizan 8 perforaciones de 1/4" para insertar los pernos de acero inoxidable; de los cuales 6 son para sujetar las placas entre si y asegurar los cauchos y las arandelas y las 2 restantes serán los electrodos del electrolizador como se determina la Figura 5.7.

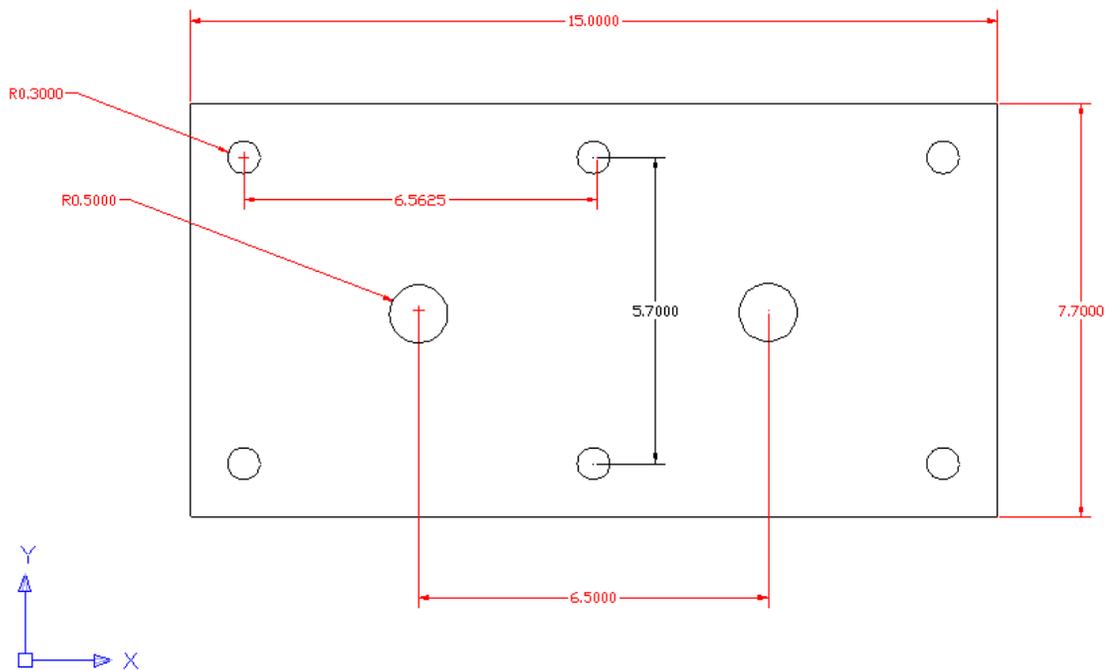


Figura 5.7 Placa lateral de PVC

#### 5.5.1.4. PERNOS DE ACERO INOXIDABLE.

El perno [Figura 5.8] es un dispositivo mecánico de fijación, por lo general metálico, formado esencialmente por un plano inclinado enroscado alrededor de un cilindro o cono. Las crestas formadas por el plano enroscado se denominan filetes, y según el empleo que se les vaya a dar pueden tener una sección transversal cuadrada, triangular o redondeada.

La distancia entre dos puntos correspondientes situados en filetes adyacentes se denomina paso. Si los filetes de la rosca están en la parte exterior de un cilindro, se denomina rosca macho o tornillo, mientras que si está en el hueco cilíndrico de una pieza se denomina rosca hembra o tuerca. Los tornillos y tuercas empleados en máquinas utilizan roscas cilíndricas de diámetro constante, pero los tornillos para madera y las roscas de tuberías tienen forma cónica.

El empleo del tornillo como mecanismo simple (en ese caso también se denomina husillo o tornillo sin fin) aprovecha la ganancia mecánica del plano inclinado. Esta ganancia aumenta por la palanca que se suele ejercer al girar el cilindro, pero disminuye debido a las elevadas pérdidas por rozamiento de los sistemas de tornillo. Sin embargo, las fuerzas de rozamiento hacen que los tornillos sean dispositivos de fijación eficaces.

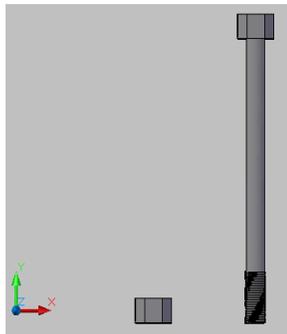


Figura 5.8 Pernos de acero inoxidable.

### 5.5.1.5. UNIONES PLASTICAS

Para unir los diferentes elementos del generador se hace necesario la utilización de boquillas 3/8 NPT y 3/8 para la unión de la manguera.

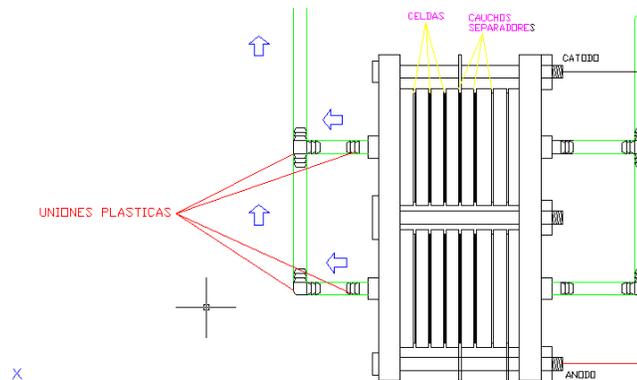


Figura 5.9. Uniones plásticas para unir los diferentes elementos.

Se instala una válvula de seguridad de una sola vía (válvula check) para evitar que le gas de hidrogeno regrese hacia el depósito del electrolito, 3 metros de manguera 9/16 y abrazaderas metálicas 9/16.

#### 5.5.1.6. ENFRIADOR

El enfriador o disipador de calor que montamos en el sistema extrae el calor del gas e hidrogeno el cual se genero por la temperatura que se da en el proceso de la electrolisis y lo evacúa al exterior, en este caso lo evacua al medio ambiente. Para ello coincidimos que el enfriador debería ser de cobre debido a que se necesita una buena conducción de calor a través del mismo, por lo que se determino usar un serpentín de cobre a la salida del generador de hidrogeno, esto para garantizar que el gas de hidrogeno no combustione antes de tiempo.

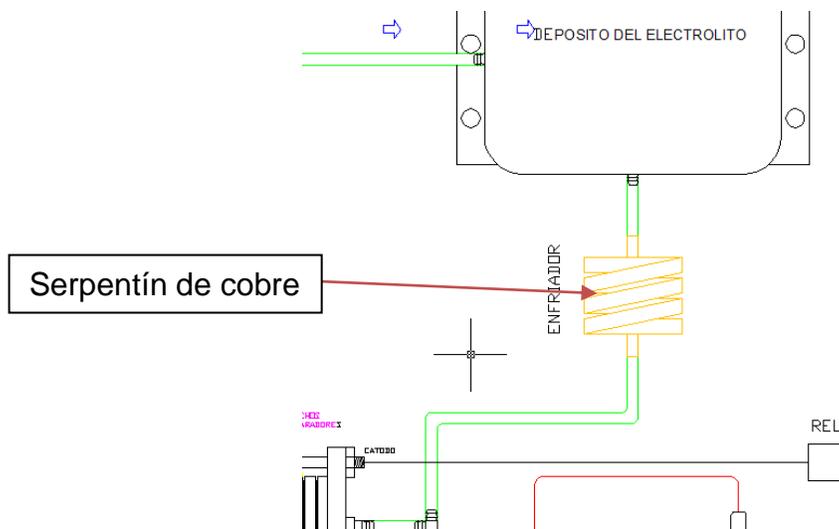


Figura5.10. Enfriador del gas de hidrogeno

En este caso en particular, el disipador está en íntimo contacto con la fuente que genera el calor, empleando el material de cobre para asegurar una baja resistencia térmica entre el componente y el disipador. Para evacuar el calor al ambiente, se aumenta la superficie haciendo un serpentín

para que el ares de circulación del gas sea mayor y tenga mayor área de contacto con el enfriador, cuyo diseño varía dependiendo de si existe circulación forzada del aire o sólo convección natural.

### 5.5.1.7. CONEXIONES ELECTRICAS

La conexión eléctrica [Figura 5.11] del sistema generador de hidrogeno se estableció tomando en cuenta criterios como el de brindarle un optimo funcionamiento al generador y también seguridad; para lo cual se establece la siguiente conexión el electrodo negativo del electrolizador lo conectamos directamente al polo negativo de nuestra fuente de corriente o en su defecto a cualquier parte del chasis mientras que el electrodo positivo (ánodo) lo conectamos a un relay para garantizar su buen funcionamiento, tomando en cuenta que el relay nos permite conectarlo a corriente con swich, esto para dejar de producir hidrogeno el momento que el auto deja de funcionar, para garantizar que la corriente que llega al electrolizador adjuntamos un fusible al relay para evitar los cortos que puedan producirse.

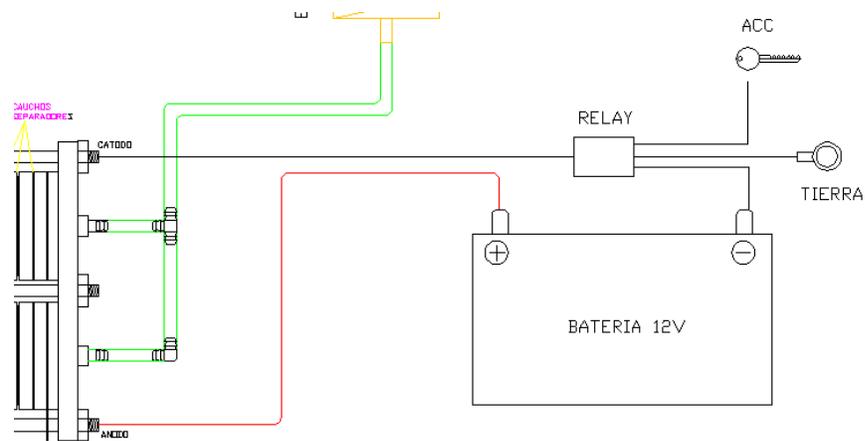


Figura5.11. Conexiones eléctricas del generador

Para el sistema eléctrico del electrolizador se utilizará un circuito independiente, el circuito de carga el cual se encargará de la carga de la

batería de 12 voltios mediante el sistema de carga del alternador del vehículo el cual mantendrá la batería cargada para entregar un voltaje constante para el funcionamiento del generador. Todo el sistema eléctrico fue diseñado y construido, a partir de los requerimientos del electrolizador, considerando el voltaje como también el amperaje que se necesita el electrolizador para una producción moderada y continua de hidrógeno.

El circuito carga tiene los siguientes datos de funcionamiento:

- Voltaje de alimentación: 12 voltios
- Corriente: 50 miliamperios
- Potencia: 6 watios

#### **5.5.1.7.1 BATERÍA DE 12 VOLTIOS**

Debido a los requerimientos del electrolizador se debe trabajar con grandes potencias, razón por la cual se trabaja con una batería de 12 voltios, debido a que el amperaje necesario para funcionar el electrolizador es alto y la batería de 12 voltios cumple con estos requerimientos satisfactoriamente.

La batería de 12 voltios usada para la alimentación de corriente eléctrica continua al sistema eléctrico del electrolizador, se puede observar en la figura, la cual se encuentra instalada en la parte inferior de la mesa de soporte.

#### **Características:**

- Número de placas: 11 placas
- Amperios hora: 55 amperios hora
- Voltaje: 12 voltios
- C.C.A. : 600



Figura5.12. Batería de 12v para alimentar el sistema

#### **5.5.1.8. DIAGRAMA DEL SISTEMA GENERADOR DE HIDROGENO**

Este sistema no requiere de ninguna bomba de llenado, es un sistema por gravedad y lo único que requiere es que el tanque de reserva se encuentre a más de 30 centímetros mas alto en comparación con la celda seca.

Los cables de la conexión eléctrica de la celda de hidrógeno deben de ir conectados a una fuente de 12 volts de corriente directa, es por ello que el generador se conecta al encendido del automóvil esto debido a la peligrosidad de estar generando hidrogeno sin consumirlo, de ahí que la conexión eléctrica del generador funciona con corriente de contacto, así cuando el auto deja de funcionar la corriente eléctrica que alimenta al generador es desconectada automáticamente.

Se recomienda que antes de usar el generador en el auto, probar la celda de manera independiente, tal vez pueda inclusive hacer una antorcha o soplete de hidrógeno.

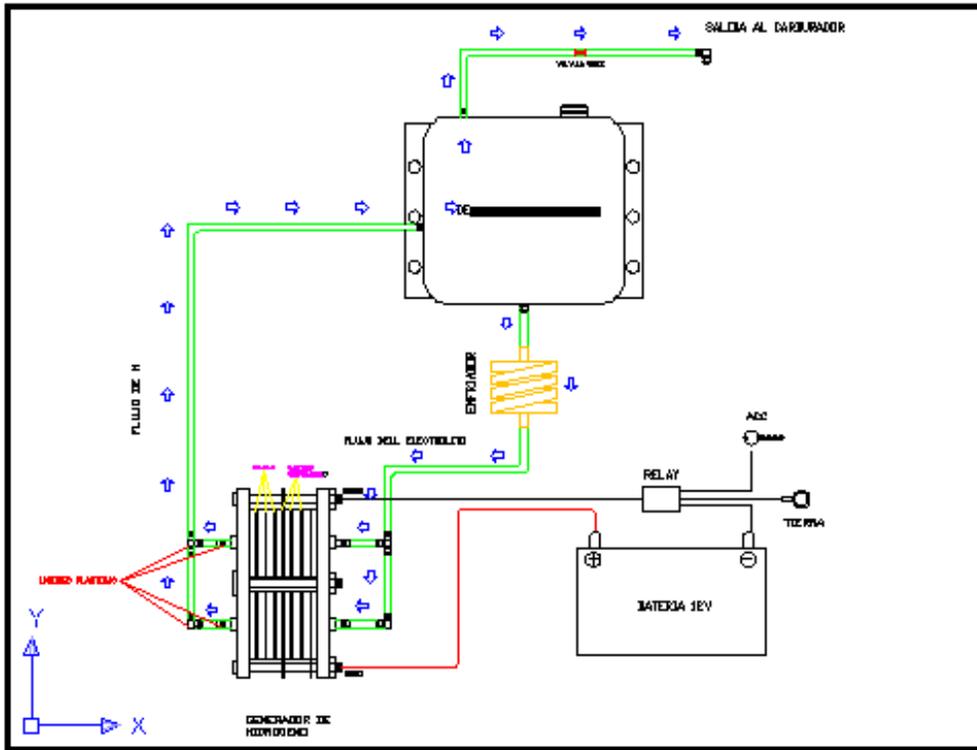


Figura 5.13. Diagrama del sistema generador de hidrogeno

### 5.5.1.9. ELECTROLITO

#### 5.5.1.9.1. CONCENTRACIÓN DEL ELECTROLITO

Se establece la concentración de la solución del electrolito será de  $D \approx 1.2$ , de hidróxido de potasio es decir: La cantidad agua será de 4000 [cm<sup>3</sup>] es decir 4 [kg] evaluada a 25° C y a una atmosfera.<sup>95</sup>

Mediante esta determinación y establecida la concentración de 20% en peso, de la solución se utiliza 800 [g] KOH del catalizador disuelto. Cómo se muestra a continuación, se va obtener el número de moles de KOH en la solución:

<sup>95</sup> ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), "Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 vatios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno", EPN, Ecuador

Elemento	Masa atómica
Potasio K	39
Oxigeno O	16
Hidrogeno H	1
Compuesto KOH	56
Peso Equivalente Pe	56 Kg/mol

Tabla 5.1 Determinación del peso equivalente

De lo descrito anteriormente se puede concluir que el peso equivalente de este compuesto es igual a la suma de las masas atómicas que componen a la sustancia obtenida.

#### 5.5.1.10. CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.

Para el cálculo de la producción de hidrogeno se utilizará la Ley de Faraday que expresa que la cantidad de sustancia transformada químicamente por medio electrolítico, o separada sobre cualquiera de los electrodos, es proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado del electrodo correspondiente al electrodo opuesto, por este motivo se va considerar la tasa de producción de hidrogeno como se expresa en la siguiente fórmula:

$$m = \frac{V}{R \times F} \times Pe \quad (5.8)$$

**Donde:**

V : Voltaje aplicado en el electrolito	[V]
R : Resistencia del electrolito	[Ω]
F : Constante de Faraday 9.65x10 <sup>7</sup>	[C/ kmol]
Pe : Peso equivalente	[kg/ kmol]

## 5.5.2. MONTAJE DEL GENERADOR EN EL VEHICULO

Para el montaje del generador en el auto se hace necesario analizar el espacio disponible en el automóvil, se analizo alternativas como la de instalar en generador en la parte posterior del vehículo, de lo cual se concluyo que el recorrido del gas sería demasiado extenso. Aislando ideas se concluyó el de retirar la batería de su lugar original y removerla hacia la cabina dejando el espacio necesario en el frente del automóvil para instalar el generador, siguiendo los siguientes pasos:

Paso	Detalle	Representación
1	<p><i>Remover la batería, para generar el espacio necesario al acumulador de electrolito.</i></p> <p><b>ACCIONES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Fabricar estructura de soporte para el acumulador.</li><li>➤ Soldar soporte a la carrocería.</li><li>➤ Perforar 3 agujeros en el depósito (Salida del electrolito, Entrada del gas de Hidrogeno, salida del gas) y colocar uniones</li><li>➤ Asegurar el depósito a la estructura.</li></ul>	
2	<p><i>Determinar lugar apropiado para el generador y montar.</i></p> <p><b>ACCIONES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Desmontar frente del auto.</li><li>➤ Fabricar base para generador.</li><li>➤ Soldar base en el frontal del auto.</li><li>➤ Asegurar generador en base con pernos</li></ul>	

<p><b>3</b></p>	<p><i>Unir el depósito de electrolito con el generador mediante mangueras.</i></p> <p>ACCIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Designar agujeros para el paso de las mangueras al generador.</li> <li>➤ Cortar mangueras a medida.</li> <li>➤ Conectar mangueras a la entrada y salida desde el acumulador al generador</li> <li>➤ Calentar el extremo en agua 90°C .</li> <li>➤ Acoplar mangueras con las uniones plásticas.</li> <li>➤ Asegurar con abrazaderas.</li> </ul>	
<p><b>4</b></p>	<p><i>Instalar un serpentín de cobre.</i></p> <p>ACCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cortar la manguera de salida de electrolito al generador.</li> <li>➤ Interponer un serpentín de cobre.</li> <li>➤ Asegurar extremos con abrazaderas.</li> </ul>	
<p><b>5</b></p>	<p><i>Colocar manguera de transporte de hidrogeno del acumulador al carburador.</i></p> <p>ACCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Abrir un agujero en la tapa superior del carburador para un acople plástico 3/8 NPT.</li> <li>➤ Colocar acople u sellar para evitar fugas.</li> <li>➤ Cortar manguera a medida y conectar.</li> <li>➤ Interponer una válvula check de una vía.</li> <li>➤ Asegurar uniones con abrazaderas.</li> </ul>	

<p><b>6</b></p>	<p><i>Llenado del depósito de electrolito.</i></p> <p>ACCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mezclar electrolito en proporción correcta 20% de KOH.</li> <li>➤ Tomar las precauciones del caso al momento de mezclar.</li> <li>➤ Verificar que no haya fugas de electrolito.</li> <li>➤ Usar protección personal.</li> </ul>	
<p><b>5</b></p>	<p><i>Instalar conexiones eléctricas.</i></p> <p>ACCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Instalar cables para energizar generador.</li> <li>➤ Ubicar un interruptor de encendido y apagado del generador.</li> <li>➤ Realizar una conexión segura del generador con corriente de swich.</li> </ul>	

### 5.5.3. PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS.

Para el análisis de resultados se implementa un modelo matemático para determinar el aumento de la eficiencia del motor, para lo cual se requiere de realizar pruebas de carácter práctico al motor.

**Prueba N° 1.** Medir la compresión del motor a un determinado número de revoluciones, para nuestro caso hemos estabilizado las rpm en 2410 rpm.

**Prueba N° 2.** Medir el consumo de gasolina en galones por hora gl/h.

Una vez determinados los valores se procede a documentar los valores obtenidos para cada una de las pruebas esto realizándolas en dos

condiciones distintas , la primera condición el motor alimentado solo con gasolina y la segunda condición el motor alimentado con gasolina mas hidrogeno y se obtuvieron los siguientes resultados como se observa en la Fig. 5.14 y 5.15

#### **Resultados de la prueba N° 1.**

- La compresión del motor alimentado con gasolina a 2410 rpm es de 3.65 Kg/ cm<sup>2</sup>.
- La compresión del motor alimentado con gasolina mas hidrogeno a 2410 rpm es de 4.19 Kg/cm<sup>2</sup>.

#### **Resultados de la prueba N° 2.**

- El consumo de gasolina del motor alimentado con gasolina a 2410rpm es de 1.69 gl/h.
- El consumo de gasolina del motor alimentado con gasolina mas hidrogeno a 2410rpm es de 1.62 gl/h.



Figura 5.14 y 15. Toma de valores para el cálculo matemático.

## 5.5.4. MODELO MATEMATICO PARA EL ANALISIS DE RESULTADOS.

### 1. Motor alimentado solo con gasolina.

				Gasolina
<b>Especificaciones Técnicas</b>  Honda Civic 1974	Consumo horario de combustible	Ch	g/hr	1,69
	Presión media efectiva	pme	Kg/cm <sup>2</sup>	4
	Diámetro del pistón	d	cm	7,4
	Carrera del pistón	L	cm	8,65
	Numero de cilindros	n	4	4
	Revoluciones a las que se determinan las potencias.	N	rpm	2410

<b>Potencia Ideal / Pid</b>  $P_{id} = m \cdot P_c$ [KJ/s]; [Kg/s]*[KJ/Kg] $m = \rho \cdot V$ [Kg/s]; [kg/L]*[L/s] $V = Ch \cdot (1/3600) \cdot (3.785)$ [L/s]; [g/hr]*[1 hr/3600s]*[3.785L/g]					Potencia Ideal [Kw]
	Consumo horario de combustible	Ch	g/hr	1,69	53,2
	Densidad combustible	$\rho$	Kg/L	0,68	
	Poder Calórico C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	PC	KJ/Kg	44000	

					Potencia Indicada [Kw]
<b>Potencia indicada / Pin</b>  $P_{in} = (p_{me} \cdot A \cdot L \cdot n \cdot N) / 2$	Presión media efectiva	pme	Kg/cm <sup>2</sup>	3,65	10,72
	Diámetro del pistón	d	cm	7,4	
	Área del pistón	A	cm <sup>2</sup>	43,0	
	Carrera del pistón	L	cm	8,65	
	Numero de cilindros	n	4	4	
	Revoluciones a las que se determinan las potencias	N	rpm	2410	
	Numero revoluciones para completar ciclo				

Eficiencia

20,2

## 2. Motor alimentado con gasolina mas Hidrogeno.

				Gasolina + Hidrogeno
<b>Especificaciones Técnicas</b>  Honda Civic 1974	Consumo horario de combustible	Ch	gl/hr	1,62
	Presión media efectiva	pme	Kg/cm <sup>2</sup>	4
	Diámetro del pistón	d	cm	7,4
	Carrera del pistón	L	cm	8,65
	Numero de cilindros	n	4	4
	Revoluciones a las que se terminan las potencias	N	rpm	2410

<b>Potencia Ideal / Pid</b> Pid=m*Pc [KJ/s]; [Kg/s]*[KJ/Kg]  m=ρ*V [Kg/s]; [kg/L]*[L/s] V=Ch*(1/3600)*(3.785) [L/s]; [gl/hr]*[1hr/3600s]*[3.785L/g]				Potencia Ideal [Kw]
	Consumo horario de combustible	Ch	gl/hr	1,62
	Densidad combustible	ρ	Kg/L	0,68
	Poder Calórico C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	PC	KJ/Kg	44000
				51,0

<b>Potencia indicada / Pin</b> Pin=(pme*A*L*n*N)/2				Potencia Indicada [Kw]
	Presion media efectiva	pme	Kg/cm <sup>2</sup>	4,14
	Diametro del pistón	d	cm	7,4
	Area del pistón	A	cm <sup>2</sup>	43,0
	Carrera del pistón	L	cm	8,65
	Numero de cilindros	n	4	4
	Revoluciones a las que se determinan las potencias	N	rpm	2410
	Numero revoluciones para completar ciclo			2
				12,11

Eficiencia
23,8

## 5.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 5.6.1 Conclusiones

- Para la construcción del proyecto se investigo tanto como se pudo en vista de que esto es aun una tecnología experimental y se cuenta con poca información.
- Todos los objetivos planteados en el proyecto fueron cumplidos en su totalidad, obteniendo resultados satisfactorios como productivos para el desarrollo de prototipos para la generación de hidrógeno.
- A un menor tiempo de reacción de la solución aumenta la producción de gas de hidrogeno, por esta razón el medio más adecuada para la electrolisis es una solución al 20% de Hidróxido de Potasio (KOH) en un soluto.
- Al utilizar rodela como electrodos se incrementa la producción de hidrógeno, ya que la geometría facilita el desprendimiento de las moléculas de hidrógeno y oxigeno y evita la corrosión.
- El proceso de almacenamiento de hidrógeno en grandes cantidades no es eficiente desde el punto de vista energético, debido al gran consumo de energía para este proceso, volviéndolo menos eficientes, por ello proponemos un sistema de generación y consumo de hidrogeno.
- Podemos concluir además que la manipulación directa de un sistema de generación de hidrogeno que esté funcionando sumado al

conocimiento técnico que un estudiante de mantenimiento automotriz debe tener, incrementa la habilidad que este necesita para proponer soluciones energéticas para reducir el consumo de combustible y efectivamente reducir las emisiones de contaminantes, contribuyendo así crear una cultura sostenible de cuidado y respeto al medio ambiente.

### **5.6.2 Recomendaciones.**

- Para operar el electrolizador se lo debe hacer en zonas ventiladas y lo más alejado posible de fuentes inflamables.
- Para la manipulación de los solutos como las soluciones ya sean bases como sosa caustica y sosa potásica, se debe utilizar guantes quirúrgicos y mascarillas.
- Se debe verificar cada una de las conexiones eléctricas en el esquema eléctrico, antes de accionar el interruptor.
- Comprobar que el sistema sea hermético y no presente fugas de electrolito y menos de hidrogeno.
- Se recomienda antes de apagar el automóvil, primero desenergizar el sistema de producción de hidrogeno para consumir todo el gas de hidrogeno que se quede en los conductos ya que almacenar hidrogeno es muy peligroso si no se toma las medidas adecuadas.
- Se puede experimentar otro tipo de electrolizadores por ejemplo el de célula húmeda.

## 5.7 Bibliografía.

- ACOSTA Germán, SALGADO Christian, (2010), *“Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 watos con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno”*, EPN, Ecuador.
- ANDRÉS, J. y ANDRÉS, P, (1999), *“Carburantes Sintéticos”*, INGENIERIA QUIMICA.
- BESEL, S.A. (Departamento de Energía), *“Biomasa: Gasificación”*, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía C/ Madera, 8 E-28004-Madrid.
- CAPÁRROS María, (2004), *“Tecnologías del Hidrogeno y Pilas de Combustible”*, ARIEMA Energía y Medioambiente, SL, Madrid
- CARRASCO Carlos ,RODRÍGUEZ Jorge , *“El hidrogeno fuente de energia renovable”*, Universidad Autonoma de Mexico.
- COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE BALEARES, (2003), *“Jornada sobre energía”*.
- CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICA, (2003), *“El gas natural y el hidrógeno en automoción”*, Madrid.
- G. San Miguel, J. Dufour , J. Calles, ,J. A, *“Aplicaciones convencionales del hidrógeno y pilas de combustible”*, Botas Grupo de Ingeniería Química y Ambiental. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología (ESCET), Universidad Rey Juan Carlos.
- GUTIÉRREZ Luis,(2005), *“ El Hidrógeno, Combustible Del Futuro”*, Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp) ,Vol. 99, N°. 1, pp 49-67, 2005 ,V Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica.
- JARABO F, FERNANDEZ J, (1989) *“Energías alternativas renovables”*, Instituto de Investigaciones Científicas y Ecológicas, Salamanca.
- LINARES José, MORATILLA Beatriz, (2007), *“El hidrógeno y la energía”*, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.

- LOPEZ Natalia, (2006), "*Usos de la electricidad para la obtención de hidrógeno a través de la electrólisis de agua*", Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- RIFKIN Jeremy,(2002),"*La economía del hidrógeno*",Barcelona, Paidós.
- RODRÍGUEZ Javier, (2009),"*Control de emisiones y contaminantes*", UNES.
- SHARPE A, (1993), "*Química Inorganica*" Ed Reverté, S.A, Barcelona.
- SHIGLEY Jose, (2011), "*Diseno en Ingenieria Mecanica*", Ed Mc Graw Hill, Mexico
- VELASCO Jaime,(2009), "*Energias Renovables*",Ed Reverté, S.A, Barcelona.
- <http://www.muscularmente.com/tecnologia/celdascombust.html>
- [http://ing.unne.edu.ar/pub/celdas\\_hidrogeno.pdf](http://ing.unne.edu.ar/pub/celdas_hidrogeno.pdf)
- <http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/07Energ/100Energ%C3%ADa.htm>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa>
- [http://www.edualter.org/material/consumo/energia4\\_1.htm](http://www.edualter.org/material/consumo/energia4_1.htm)
- <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm>
- <http://pedroreina.net/trabalu/19981999/webitos.htm>
- <http://www.naikontuning.com/mecanica/alimentacion-gasolina/carburador/>
- <http://www.almuro.net/sitios/Mecanica/carburacion.asp?sw05=1>
- [http://www.todomotores.cl/competicion/mezcla\\_combustible.htm](http://www.todomotores.cl/competicion/mezcla_combustible.htm)
- <http://monterrey.olx.com.mx/generador-de-hidrogeno-hazlo-tu-mismo-en-espanol-iid-20186740>
- <http://desenchufados.net/metodos-de-obtencion-del-hidrogeno/>

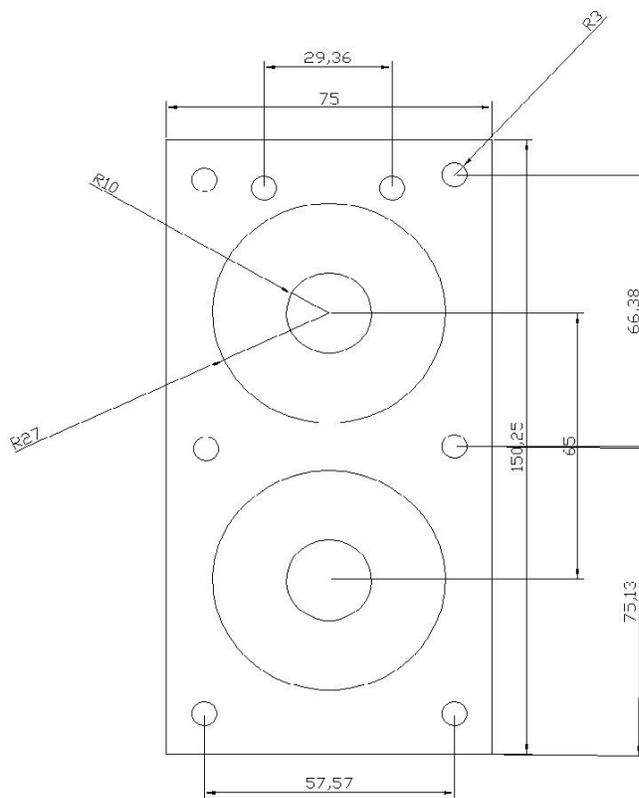
- [www.proyectohercules.es](http://www.proyectohercules.es)
- [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov).
- <http://www.genome.ad.jp:80/kegg/pathway/map/map00195.gif>
- <http://energiaalternativaparaaurantiar1hho.blogspot.com/>
- <http://www.energia-libre.110mb.com/>
- <http://www.inetweb.es/blog/como-fabricar-un-generador-de-hidrogeno/>
- <http://www.furgovw.org/index.php?topic=185783.240>
- [http://newton.cnice.mec.es/materiales\\_didacticos/energia/index.html](http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/index.html)
- <http://definicion.de/energia/>
- <http://html.rincondelvago.com/evolucion-y-tipos-de-energia.html>
- <http://erenovable.com/energias-renovables/>
- <http://www.enerpro.com.ec/Recursos/Articulos/ResumenEnergiasRenovables.pdf>
- [http://newton.cnice.mec.es/materiales\\_didacticos/energia/solar.htm](http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/solar.htm)
- <http://www.monografias.com/trabajos34/hidrogeno/hidrogeno.shtml#estado>
- <http://labengalaperdida.blogspot.com/2011/10/hacia-la-era-del-hidrogeno.html>
- <http://www.cje.org/inice/Ter/BIOMA/BIOMA14.htm>
- [http://newton.cnice.mec.es/materiales\\_didacticos/energia/index.html](http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/index.html)
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Capítulo+2+-+Producción+de+Hidrógeno.pdf>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Electrólisis\\_del\\_agua](http://es.wikipedia.org/wiki/Electrólisis_del_agua)
- <http://elbacilosutil.blogspot.com/2009/07/produccion-biologica-de-hidrogeno-iii.html>

- <http://www.elp.uji.es/paperspdf/2005%20almacen%20energia.pdf>
- [http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14\\_electroquimica.php](http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14_electroquimica.php)
- <http://www.qarlos.online.fr/Personal/LasPilasDeCombustible.pdf>
- [http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET\\_TE\\_pilas\\_de\\_combustible.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/colab/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET_TE_pilas_de_combustible.pdf)
- <http://www.qarlos.online.fr/Personal/LasPilasDeCombustible.pdf>
- <http://www.tecnologia-industrial.es/Energias%20no%20renovables.htm>
- <http://www.monografias.com/trabajos5/energia/energia.shtml>
- <http://www.fq.uh.cu/dpto/qf/uclv/infoLab/infoquim/complementos/electroquimica/electroquimica.htm>
- [http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14\\_electroquimica.php](http://www.fisicanet.com.ar/monografias/monograficos2/es14_electroquimica.php)
- [http://www.fisicanet.com.ar/quimica/electrolisis/ap07\\_electrolisis.php](http://www.fisicanet.com.ar/quimica/electrolisis/ap07_electrolisis.php)
- [http://www.asifunciona.com/mecanica/af\\_motor\\_gasolina/af\\_motor\\_gasolina\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/mecanica/af_motor_gasolina/af_motor_gasolina_1.htm)
- <http://www.yomecanico.com/wp-content/uploads/2009/12/ciclo-otto.pdf>
- <http://erenovable.com/energias-renovables/>
- [www.mecanicavirtual.org/indice\\_cursos.html](http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html)
- <http://www.boltdepot.com/Default.aspx>
- <http://definicion.de/energia/>
- <http://aeh2.org/>
- [www.asifunciona.com](http://www.asifunciona.com)
- [www.hidrogenesis.com](http://www.hidrogenesis.com)

- <http://es.wikipedia.org>
- [www.fisicanet.com](http://www.fisicanet.com)
- <http://www.onlinemetals.com/>
- [www.upcomillas.es](http://www.upcomillas.es)
- [www.rincondelvago.com](http://www.rincondelvago.com)
- [www.monografias.com](http://www.monografias.com)
- [www.energiasostenible.com](http://www.energiasostenible.com)
- [www.icaei.es](http://www.icaei.es)

# ANEXO 1.

## VISTA FRONTAL



ESQUEMA DEL GENERADOR

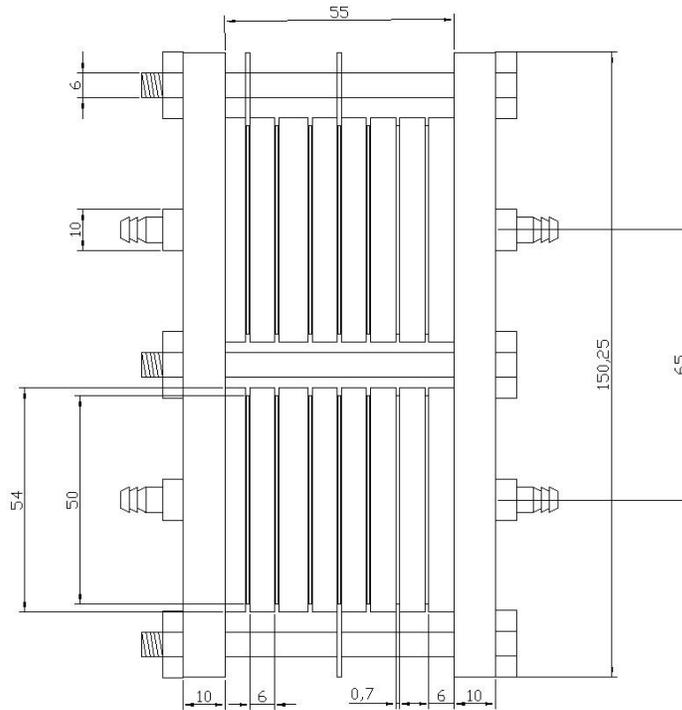
### PLANO DEL GENERADOR HHO

OBSERVACIONES:

DIR. DE TESIS APROBO	ING. MARIO GRANJA PROYECTO	I.S./N. ESCALA	MARZO/2012 FECHA
INVESTIGADORES REVISO	M.G. F.C. LEV. CAL. DIBUJO	1 DE 1 HOJA	# DE PROJ.

## ANEXO 2.

# VISTA SUPERIOR



ESQUEMA DEL GENERADOR

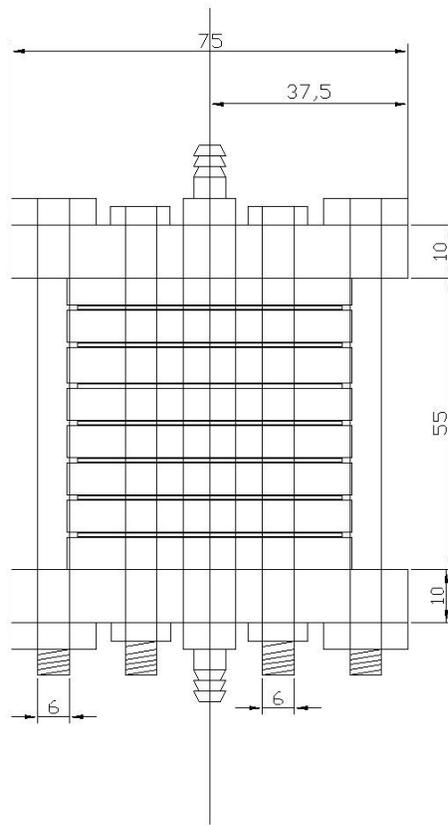
### PLANO DEL GENERADOR HHO

OBSERVACIONES:

DIR. DE TESIS #PROB0	ING. MARIO GRANJA PROYECTO	1°S/N ESCALA	MARZ01/2012 FECHA
INVESTIGADORES REVIS0	MG LEV. CAL.	F.C. DIBUJO	1 DE 1 NOVA
			# DE PÁG.

### ANEXO 3.

## VISTA LATERAL



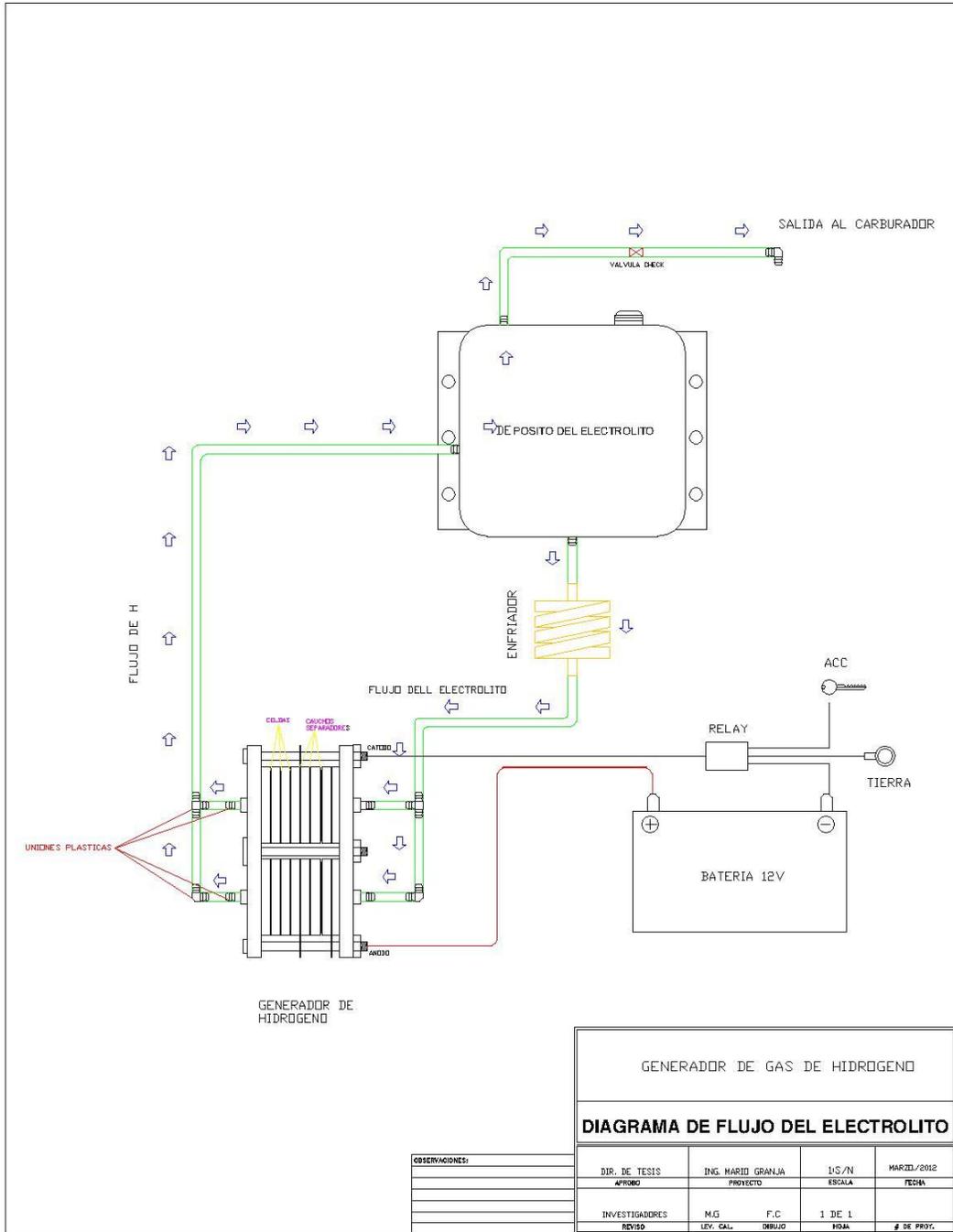
ESQUEMA DEL GENERADOR

### PLANO DEL GENERADOR HHO

OBSERVACIONES:

DIR. DE TESIS APROBO	ING. MARIO GRANJA PROYECTO	1:5/N ESCALA	MARZO/2012 FECHA
INVESTIGADORES REVISO	M.G. F.C. LEV. CAL. DIBUJO	1 DE 1 HOJA	# DE PROJ.

## ANEXO 4.



## ANEXO 5.





## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	<b>DE</b>	100356034-7	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	<b>Y</b>	QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO	
<b>DIRECCIÓN:</b>		Ibarra: Calle Mazacota Puento y Av. Atahualpa	
<b>EMAIL:</b>		hento-stev@hotmail.com	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	<b>062652368</b>	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	<b>059113501</b>

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	“CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA ”
<b>AUTOR (ES):</b>	QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO
<b>FECHA: AAAAMMDD</b>	<b>2012/05/07</b>
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mantenimiento Automotriz.
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Mario Granja

## 2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO, con cédula de identidad Nro.100356034-7, en calidad de autor (es) y titular (es) de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 143.

## 3. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al 07 día del mes de Mayo del 2012

### EL AUTOR:

(Firma).....  
Nombre: QUELAL MANOSALVAS  
HENRY RUPERTO  
C.C.: 100356034-7

### ACEPTACIÓN:

(Firma).....  
Nombre: **XIMENA VALLEJO**  
Cargo: **JEFE DE BIBLIOTECA**

Facultado por resolución de Consejo Universitario

---



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO, con cédula de identidad Nro. 100356034-7 manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominado: **“CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA”** que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mantenimiento Automotriz., en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

(Firma) .....

Nombre: QUELAL MANOSALVAS HENRY RUPERTO

Cédula: 100356034-7

Ibarra, 07 del mes de Mayo del 2012



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 4. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	<b>DE</b>	040120843-4	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	<b>Y</b>	CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO	
<b>DIRECCIÓN:</b>		Ibarra: Sánchez y Cifuentes 8-88 y Oviedo	
<b>EMAIL:</b>		cando_fernando@hotmail.com	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	<b>062962300</b>	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	<b>089703223</b>

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	“CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA ”
<b>AUTOR (ES):</b>	CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO
<b>FECHA: AAAAMMDD</b>	<b>2012/05/07</b>
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mantenimiento Automotriz.
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Mario Granja

## 5. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO con cédula de identidad Nro. 040120843-4, en calidad de autor (es) y titular (es) de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 143.

## 6. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al 07 día del mes de Mayo del 2012

**EL AUTOR:**

**ACEPTACIÓN:**

(Firma).....

(Firma) .....

Nombre: CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO

Nombre: **XIMENA VALLEJO**

C.C.: 040120843-4

Cargo: **JEFE DE BIBLIOTECA**

Facultado por resolución de Consejo Universitario

---



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO, con cédula de identidad Nro. 040120843-4 manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominado: **“CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA ”** que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mantenimiento Automotriz., en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

(Firma) .....

Nombre: CANDO PIARPUEZAN HUGO FERNANDO

Cédula: 040120843-4

Ibarra, 07 del mes de Mayo del 2012