

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROLIZADOR DE  
CORRIENTE CONTINUA DE 200 WATIOS CON ENERGÍA SOLAR  
E INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA MEDIR LA  
PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**GERMÁN ELÍAS ACOSTA QUISHPE**

punx\_kp3@hotmail.com

**CHRISTIAN RICARDO SALGADO ROJAS**

omega200467@hotmail.com

**DIRECTOR: Dr. ÁLVARO AGUINAGA B. MSc. PhD.**

alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

**Quito, Diciembre – 2010**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Germán Elías Acosta Quishpe y Christian Ricardo Salgado Rojas, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de propiedad intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Germán Elías Acosta Quishpe

---

Christian Ricardo Salgado Rojas

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que bajo mi dirección el presente proyecto de titulación fue realizado en su totalidad por los señores Germán Elías Acosta Quishpe y Christian Ricardo Salgado Rojas.

---

Dr. Álvaro Aguinaga

**DIRECTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN**

## DEDICATORIAS

Recuerdo un día la gran indecisión que cruzaba por mi vida, la toma de una decisión, mis padres y mis hermanos todos reunidos para ver qué sería de mi futuro, ahora después de esforzados, cansados pero gratificantes años de estudio, quiero dedicar este logro a mi querida familia quienes desde aquel día, con su constante compañía e incondicional respaldo hicieron posible que culminara mi carrera como Ing. Mecánico.

Quiero dedicar en especial a mis padres Germán y Mery, porque son el apoyo, la guía y la razón de mi vida.

GERMÁN ELÍAS ACOSTA QUISHPE

Este trabajo va dedicado a mi familia, por todos los esfuerzos que han contribuido en mi desarrollo personal y profesional.

CHRISTIAN RICARDO SALGADO ROJAS

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme dado la salud y vida para alcanzar una más de mis metas.

A mi familia Mery, Germán, Daniel, Raquel, Karlita y Thomas quienes fueron el pilar fundamental de este logro, también a mis tíos primos y demás.

Quiero agradecer al Dr, Álvaro Aguinaga, al Ing. Patricio Vallejo, a la Señora Sarita Garzón y a la Señora Glorita quienes con su ayuda hicieron posible que llegara hasta estas instancias.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, a los INTERNOUS, MERCA, xex, berries.

A todos mis amigos que son innumerables, hice tantas amistades buenas en mi paso por esta carrera, agradezco a todos porque supieron portarse como tales, en especial a Miguel E., Santiago V., Jose Luis A, Jorge U.

A Christian Salgado porque a lo largo de este proyecto pude descubrir que a más de ser un buen estudiante y compañero es un gran ser humano.

GERMÁN ELÍAS ACOSTA QUISHPE

Agradezco a Dios por cada una de las bendiciones y oportunidades brindadas en mi vida.

Agradezco a mi familia por la educación, el cariño y la comprensión entregados. A mi padre por sus sabios consejos, a mi madre por el ejemplo de esfuerzo y superación para llegar a lo que uno desea.

De igual manera a mis profesores que han colaborado en mi formación personal y profesional, especialmente al Dr. Álvaro Aguinaga por su valioso aporte en la realización y culminación de este proyecto.

Como también a cada uno de las personas y amigos que han contribuido de forma desinteresada para la realización del proyecto.

CHRISTIAN RICARDO SALGADO ROJAS

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
DEDICATORIAS .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
CONTENIDO.....	VI
LISTADO DE FIGURAS .....	XVI
LISTADO DE TABLAS .....	XIX
RESUMEN .....	XXV
PRESENTACIÓN.....	XXVI
CAPÍTULO 1 .....	1
1. GENERALIDADES .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	3
CAPÍTULO 2 .....	5
2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 ENERGÍA.....	5
2.1.1 DEFINICIÓN DE ENERGÍA.....	6
2.1.2 FORMAS DE LA ENERGÍA.....	8
2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE ENERGÍA.....	8
2.2 ENERGÍAS ALTERNATIVAS.....	10
2.2.1 EL SOL .....	10
2.2.1.1 Energía Solar .....	11
2.2.1.2 Radiación Solar.....	11
2.2.1.3 El Espectro Electromagnético .....	13

2.2.1.4	Aplicaciones de la Energía Solar .....	21
2.2.1.5	Electricidad Del Sol .....	21
2.2.1.5.1	Estructura del Átomo.....	21
2.2.1.5.2	Efecto Fotoeléctrico .....	24
2.2.1.5.3	Funcionamiento de la Celda Solar .....	25
2.2.1.5.4	Unión n-p .....	27
2.2.1.5.5	Efecto de la Luz en la Unión n-p .....	29
2.2.1.5.6	Circuito Equivalente de la Celda Solar.....	31
2.2.1.5.7	Curva Corriente-Voltaje de la Celda Solar .....	32
2.2.1.5.8	Efectos de la Radiación y la Temperatura .....	33
2.2.1.5.9	Eficiencia de la Celda Solar .....	34
2.2.1.5.10	Tipos de Celdas Solares .....	35
2.2.1.5.11	Conexión de Celdas Solares.....	37
2.2.2	HIDRÓGENO.....	39
2.2.2.1	Caracterización del Hidrógeno .....	39
2.2.2.1.1	Poderes caloríficos superior e inferior.....	42
2.2.2.1.2	Inflamabilidad.....	43
2.2.2.1.3	Temperatura de autoignición .....	44
2.2.2.1.4	Energía mínima de la chispa para la ignición.....	44
2.2.2.1.5	Franja de extinción.....	45
2.2.2.1.6	Detonación.....	45
2.2.2.1.7	Transición de la deflagración a la detonación .....	46
2.2.2.1.8	Densidad variable .....	47
2.2.2.1.9	Llama del Hidrógeno .....	47
2.2.2.1.10	Coeficiente de Joule-Thomson .....	49
2.2.2.1.11	Propiedades características del hidrógeno líquido.....	49
2.2.2.2	Métodos de producción de hidrógeno .....	50
2.2.2.2.1	Reformado a vapor de agua .....	50
2.2.2.2.2	Gasificación .....	52
2.2.2.2.3	Electrólisis.....	53
2.2.2.2.4	Energía termal.....	54

2.2.2.2.5	Electrólisis a alta temperatura.....	54
2.2.2.2.6	Biofotólisis.....	55
2.2.2.3	Almacenamiento y distribución del hidrógeno.....	55
2.2.2.3.1	Hidrógeno en estado gaseoso .....	56
2.2.2.3.2	Hidrógeno en estado líquido .....	58
2.2.2.3.3	Hidrógeno en estado sólido .....	59
2.2.2.4	Celdas de Combustible .....	62
2.2.2.4.1	Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC) 62	
2.2.2.4.2	Celda de Combustible Alcalinas (AFC).....	63
2.2.2.4.3	Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC) .....	64
2.2.2.4.4	Celda de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC).....	65
2.2.2.4.5	Celda de Combustible de Óxido Sólido (SOFC) .....	66
2.2.2.4.6	Celda de Combustible de Metanol (DMFC) .....	67
2.2.2.5	Aplicaciones del hidrógeno .....	69
2.3	LA ELECTROQUIMICA.....	70
2.4	LA ELECTROLISIS .....	73
2.4.1	ELECTOLISIS (REACCIONES QUÍMICAS).....	76
2.4.2	TIPOS DE ELECTROLIZADORES.....	77
2.5	TEORÍA IÓNICA.....	79
2.6	LEYES DE FARADAY .....	80
2.7	LA LEY DE OHM .....	82
2.8	FEM.....	83
2.9	ENERGÍA ELÉCTRICA .....	83
2.9.1	DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE MÍNIMO PARA INICIAR LA ELECTRÓLISIS .....	84
2.9.2	VOLTAJE TOTAL NECESARIO PARA INICIAR LA ELECTRÓLISIS 87	
2.9.3	EFICACIA DE POTENCIAL.....	89
2.9.4	EFICACIA DE CORRIENTE .....	89
2.9.5	CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	90
2.10	ELECTRODOS .....	91

2.10.1	TIPOS DE ELECTRODOS ELECTROCATALÍTICOS.....	91
2.10.2	REQUISITOS DE LOS ELECTRODOS ELECTROCATALÍTICOS	92
2.10.2.1	Capacidad electro-catalítica .....	92
2.10.2.2	Estabilidad química .....	97
CAPÍTULO 3 .....		98
3.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.....	98
3.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	98
3.1.1	SITUACIÓN INICIAL.....	98
3.1.2	SITUACIÓN FINAL .....	99
3.2	ESPECIFICACIONES DEL ELECTROLIZADOR: .....	99
3.2.1	DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DEL ELECTROLIZADOR .....	101
3.3	PRESENTACIÓN DE ALTERNATIVAS DEL ELECTROLIZADOR.....	101
3.3.1	PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO .....	101
3.3.1.1	Alternativa 1 (Cuerpo Redondo).....	102
3.3.1.1.1	Características .....	102
3.3.1.1.2	Ventajas: .....	102
3.3.1.1.3	Desventajas: .....	103
3.3.1.2	Alternativa 2 (Recipiente Hermético).....	103
3.3.1.2.1	Características .....	103
3.3.1.2.2	Ventajas: .....	103
3.3.1.2.3	Desventajas: .....	104
3.3.1.3	Alternativa 3 (Electrolizador Por Domos) .....	104
3.3.1.3.1	Características .....	104
3.3.1.3.2	Ventajas: .....	105
3.3.1.3.3	Desventajas: .....	105
3.3.1.4	Criterios de Diseño del Sistema de Producción y Distribución de Hidrógeno.....	105
3.3.1.5	Evaluación de los Criterios del Sistema de Producción y Distribución de Hidrogeno .....	106
3.3.1.6	Selección del Sistema de Producción y Distribución de Hidrogeno	107

3.3.2	PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO .....	110
3.3.2.1	Alternativa 1 (Recipiente Hermético Con Tapa Rosca).....	111
3.3.2.1.1	Características .....	111
3.3.2.1.2	Ventajas:.....	111
3.3.2.1.3	Desventajas: .....	111
3.3.2.2	ALTERNATIVA 2 (RECIPIENTE CÓNICO HERMÉTICO CON TAPA DE POLIETILENO) .....	112
3.3.2.2.1	Características .....	112
3.3.2.2.2	Ventajas:.....	112
3.3.2.2.3	Desventajas: .....	112
3.3.2.3	ALTERNATIVA 3 (RECIPIENTE CÓNICO DE PRESIÓN).....	113
3.3.2.3.1	Características .....	113
3.3.2.3.2	Ventajas:.....	113
3.3.2.3.3	Desventajas: .....	113
3.3.2.4	CRITERIOS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.....	114
3.3.2.5	EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.....	114
3.3.2.6	Selección del sistema de alimentación del electrolito .....	117
3.3.3	PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROLIZADOR.....	117
3.3.3.1	Alternativa 1 (Circuito Eléctrico Cargador De Batería).....	118
3.3.3.1.1	Características .....	118
3.3.3.1.2	Ventajas:.....	118
3.3.3.1.3	Desventajas: .....	119
3.3.3.2	Alternativa 2 (Circuito Eléctrico Transformador-Rectificador)...	119
3.3.3.2.1	Características .....	119
3.3.3.2.2	Ventajas:.....	119
3.3.3.2.3	Desventajas: .....	120
3.3.3.3	Alternativa 3 (Circuito Eléctrico Variac).....	120
3.3.3.3.1	Características .....	120
3.3.3.3.2	Ventajas:.....	120

3.3.3.3	Desventajas: .....	121
3.3.3.4	Criterios De Diseño Del Sistema Eléctrico Del Electrolizador. .	121
3.3.3.5	Evaluación De Los Criterios Del Sistema Eléctrico Del Electrolizador.....	122
3.3.3.6	Selección Del Sistema Eléctrico Del Electrolizador.....	124
3.3.4	PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA PRODUCCIÓN HIDRÓGENO .....	125
3.3.4.1	Alternativa 1 (Flujómetro Volumétrico Con Compensación De Presión Y Temperatura) .....	125
3.3.4.1.1	Características .....	125
3.3.4.1.2	Ventajas:.....	126
3.3.4.1.3	Desventajas: .....	126
3.3.4.2	Alternativa 2 (Flujómetro Másico De Tipo Coriolis O Tipo Dispersión Térmica) .....	126
3.3.4.2.1	Características .....	126
3.3.4.2.2	Ventajas:.....	126
3.3.4.2.3	Desventajas: .....	126
3.3.4.3	Alternativa 3 (Medidor De La Producción De Hidrógeno A Volumen Constante).....	127
3.3.4.3.1	Características .....	127
3.3.4.3.2	Ventajas:.....	127
3.3.4.3.3	Desventajas: .....	127
3.3.4.4	Criterios De Diseño Del Sistema De Medición De L A Producción De Hidrogeno. ....	127
3.3.4.5	Evaluación De Los Criterios Del Sistema De Medición De La Producción De Hidrogeno .....	128
3.3.4.6	Selección Del Sistema De Medición De La Producción De Hidrogeno.....	130
3.3.5	PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS ELEGIDAS PARA LOS SISTEMAS DEL ELECTROLIZADOR .....	131
3.3.6	PRESENTACIÓN DE ALTERNATIVAS DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS .....	132
3.3.6.1	Requisitos de los electrodos .....	133

3.3.6.2	Evaluación electrocatalítica de los materiales de los electrodos anódicos y catódicos. ....	133
3.3.6.2.1	Consideraciones: .....	134
3.3.6.3	Evaluación del criterio de Estabilidad Química de los materiales de los electrodos anódicos y catódicos. ....	140
3.3.6.4	Evaluación del criterio de Mínima Resistencia Eléctrica de los materiales de los electrodos anódicos y catódicos.....	142
3.3.6.5	Evaluación del criterio de Disponibilidad y Costos de los materiales de los electrodos anódicos y catódicos.....	144
3.3.6.6	Evaluación de los criterios de los materiales para los electrodos. 146	
3.3.6.7	Selección de los materiales para los electrodos. ....	147
3.3.6.7.1	Selección de los materiales para los electrodos anódicos... ..	147
3.3.6.7.2	Selección de los materiales para los electrodos catódicos. .	148
3.3.6.8	Presentación de las materiales elegidos para los electros anódicos y catódicos. ....	148
CAPÍTULO 4	.....	149
4.	CÁLCULO, SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LA MÁQUINA. ....	149
4.1	INTRODUCCIÓN .....	149
4.2	CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DEL ELECTROLIZADOR .....	149
4.2.1	CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO.....	149
4.2.2	CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO .....	150
4.3	CÍRCULO DE MOHR.....	150
4.4	FACTOR DE SEGURIDAD.....	155
4.5	PERNOS.....	155
4.5.1	ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA.....	158
4.5.2	PRECARGA DE PERNOS: CARGA ESTÁTICA .....	159
4.5.3	JUNTAS CON EMPAQUETADURA .....	160
4.6	DETERMINACIÓN DEL pH DEL ELECTROLÍTO.....	161
4.7	LEY DE FARADAY .....	163

4.8	CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS CONSTITUIDOS DEL ELECTROLIZADOR.....	164
4.8.1	CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR.....	164
4.8.1.1	Cálculo del espesor del cuerpo del electrolizador necesario para soportar la presión de producción de hidrógeno.....	164
4.8.1.2	Determinación de las cargas internas ha las que va estar sometido el cuerpo del electrolizador.....	165
4.8.1.3	Determinación de las cargas externas a las que va estar sometido el cuerpo del electrolizador.....	170
4.9	CÁLCULO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO. .	174
4.9.1	CONCENTRACIÓN DEL ELECTROLITO .....	174
4.9.2	CÁLCULO DEL pH EN LA SOLUCIÓN .....	175
4.9.3	DETERMINACIÓN DEL pH DE LA SOLUCIÓN EN LA ESCALA... ..	176
4.9.4	DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DIVERSOS MATERIALES DE LOS ELECTRODOS ANÓDICOS Y CATÓDICOS EN LA SOLUCIÓN ELECTROLÍTICA.....	177
4.10	CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIDRÓGENO.....	177
CAPÍTULO 5 .....		183
5.	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL ELECTROLIZADOR DE CORRIENTE CONTINUA DE 200 WATIOS CON ENERGÍA SOLAR .....	183
5.1	INTRODUCCIÓN .....	183
5.2	SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO .....	183
5.2.1	OPERACIONES REALIZADA .....	183
5.2.2	ENSAMBLE DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO.....	188
5.3	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.....	189
5.3.1	RESERVORIO DEL ELECTROLITO.....	189
5.3.2	ACOPLES Y ACCESORIOS .....	189
5.3.3	ENSAMBLE DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.....	190
5.4	SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROLIZADOR .....	191
5.4.1	BATERÍA DE 12 VOLTIOS.....	192
5.4.2	CARGADOR DE BATERÍA.....	192

5.4.3	PANELES SOLARES .....	193
5.5	SISTEMA DE MEDICIÓN DEL FLUJO DE HIDROGENO.....	194
5.5.1	MULTÍMETRO .....	194
5.5.2	MEDICIÓN DEL CAUDAL .....	195
5.5.3	CRONÓMETRO .....	196
5.5.4	ESTANTE DE PRODUCCIÓN.....	196
5.6	ANÁLISIS ECONOMICO.....	197
5.6.1	COSTO DE DISEÑO .....	198
5.6.2	COSTO DE MATERIA PRIMA.....	198
5.6.3	COSTO PROCESOS DE FABRICACIÓN .....	201
5.6.4	COSTO TOTAL DEL EQUIPO.....	201
CAPÍTULO 6 .....		202
6.	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	202
6.1	INTRODUCCIÓN .....	202
6.2	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	202
6.3	PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	206
6.3.1	MEDIDA DEL TIEMPO DE REACCIÓN .....	206
6.3.2	MEDIDA DEL VOLTAJE Y CORRIENTE .....	207
6.3.2.1	Determinación del voltaje y corriente en los módulos del electrolizador. ....	207
6.3.2.2	Medida del caudal.....	220
6.4	CÁLCULOS.....	224
6.4.1	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA MASA DE HIDRÓGENO 224	
6.4.2	DETERMINACIÓN TEÓRICA DEL CONSUMO DE ENERGÍA. ....	227
6.4.3	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ENERGÍA PRODUCIDA. 227	
6.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	232
6.5.1	PRODUCCIÓN DE MÁXIMA DE HIDRÓGENO .....	232
CAPÍTULO 7 .....		233
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	233
7.1	CONCLUSIONES.....	233

7.2 RECOMENDACIONES .....	234
BIBLIOGRAFÍA .....	236
8. ANEXOS.....	239
ANEXO I: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA DEL ELECTROLITO .....	240
ANEXO II: DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE EN LOS MÓDULOS DEL ELECTROLIZADOR CON LA SOLUCIÓN ELECTROLÍTICA AL 20% DE SOSA CAUSTICA (NAOH). .....	241
ANEXO III: PLANOS .....	242
ANEXO IV: FOTOS.....	243

## LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 2.1 FUENTES DE ENERGÍA .....	9
FIGURA 2.2 DISTANCIA TIERRA-SOL.....	12
FIGURA 2.3 LONGITUD DE ONDA.....	14
FIGURA 2.4 ESPECTRO DE LA LUZ.....	16
FIGURA 2.5 ESPECTRO SOLAR EN EL EXTERIOR DE LA ATMOSFERA Y EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA COMPARADO CON LA RADIACIÓN DE UN CUERPO NEGRO DE $T = 5780 \text{ K}$ ....	17
FIGURA 2.6 COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR .....	19
FIGURA 2.7 VARIACIÓN ANUAL Y DIARIA DE LA MASA DE AIRE.....	20
FIGURA 2.8 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR .....	21
FIGURA 2.9 MATERIALES CONDUCTORES .....	23
FIGURA 2.10 MATERIALES AISLANTES.....	23
FIGURA 2.11 MATERIALES SEMICONDUCTORES .....	24
FIGURA 2.12.- ESTRUCTURA ATÓMICA DEL SILICIO INTRÍNSECO O PURO Y BANDAS DE VALENCIA Y CONDUCCIÓN.....	25
FIGURA 2.13 ESTRUCTURA ATÓMICA DEL SILICIO DOPADO CON FÓSFORO, SEMICONDUCTOR TIPO N .....	26
FIGURA 2.14 ESTRUCTURA ATÓMICA DEL SILICIO DOPADO CON BORO, SEMICONDUCTOR TIPO P .....	27
FIGURA 2.15 UNIÓN P-N, LOS NIVELES DE FERMI SE IGUALAN .....	28
FIGURA 2.16 APLICACIÓN DE VOLTAJE EXTERNO Y EFECTO EN LA CORRIENTE .....	28
FIGURA 2.17 CORRIENTES ACTUANTES EN UNA CELDA SOLAR.....	29
FIGURA 2.18 CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE LA CELDA SOLAR .....	31
FIGURA 2.19 CURVA CORRIENTE VOLTAJE Y POTENCIA DE LA CELDA SOLAR.....	32
FIGURA 2.20 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA RADIACIÓN EN LA CURVA I-V DE LA CELDA SOLAR.....	33
FIGURA 2.21 CELDA MONOCRISTALINA .....	35
FIGURA 2.22 CELDA POLICRISTALINA.....	36
FIGURA 2.23 CELDA DE SILICIO AMORFO.....	36
FIGURA 2.24 CONEXIÓN EN SERIE Y CONEXIÓN EN PARALELO DE CELDAS SOLARES EN UN PANEL FOTOVOLTAICO .....	38
FIGURA 2.25 DENSIDAD DE VARIOS GASES A TPN ( $25^{\circ}\text{C}$ Y $101.3 \text{ kPa}$ ).....	40

FIGURA 2.26 DENSIDAD DE VARIOS LÍQUIDOS A PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	41
FIGURA 2.27 CALOR DE COMBUSTIÓN DE VARIOS COMBUSTIBLES .....	41
FIGURA 2.28 CALOR DE COMBUSTIÓN POR UNIDAD VOLUMÉTRICA .....	42
FIGURA 2.29 LÍMITES DE INFLAMABILIDAD DE LA MEZCLA HIDRÓGENO-OXÍGENO- NITRÓGENO.....	44
FIGURA 2.30 LÍMITES DE DETONACIÓN DE UNA MEZCLA DE HIDRÓGENO Y AIRE DEPENDIENDO DEL TIPO DE CONFINAMIENTO .....	46
FIGURA 2.31 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA A UN FUEGO DE HIDRÓGENO PAR UNA EXPOSICIÓN A UNA RADIACIÓN TÉRMICA DE 2CAL/CM <sup>2</sup> PARA UN TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE 10S.....	48
FIGURA 2.32 PROCESO DE REFORMADO A VAPOR DE AGUA .....	51
FIGURA 2.33 PROCESO DE GASIFICACIÓN .....	52
FIGURA 2.34 PROCESO DE ELECTRÓLISIS .....	53
FIGURA 2.35 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO. ....	55
FIGURA 2.36 PORCENTAJE DE ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA PARA COMPRIMIR EL GAS .....	57
FIGURA 2.37 CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM .....	63
FIGURA 2.38 CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PAFC.....	65
FIGURA 2.39 CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO MCFC CON REFORMADO INTERNO .....	66
FIGURA 2.40 CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO DMFC .....	67
FIGURA 2.41 SISTEMA ELÉCTRICO BÁSICO DE UN ELECTROLIZADOR .....	86
FIGURA 2.42 CONTRIBUCIONES AL ECELDA EN LA ELECTROLISIS DE AGUA EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE.....	88
FIGURA 3.1 CUERPO REDONDO .....	102
FIGURA 3.2 RECIPIENTE HERMÉTICO.....	103
FIGURA 3.3 ELECTROLIZADOR POR DOMOS .....	104
FIGURA 3.4.- RECIPIENTE HERMÉTICO CON TAPA ROSCA .....	111
FIGURA 3.5 RECIPIENTE HERMÉTICO CON TAPA ROSCA .....	112
FIGURA 3.6 RECIPIENTE CÓNICO DE PRESIÓN.....	113
FIGURA 3.7 CIRCUITO ELÉCTRICO CARGADOR DE BATERÍA.....	118
FIGURA 3.8 CIRCUITO ELÉCTRICO TRANSFORMADOR-RECTIFICADOR .....	119
FIGURA 3.9 CIRCUITO ELÉCTRICO CARGADOR DE BATERÍA.....	120
FIGURA 3.10 REPRESENTACIÓN EN 3D DEL ELECTROLIZADOR. ....	131
FIGURA 4.1 ESQUEMA DEL ESFUERZO PLANO O BIAXIAL.....	151

FIGURA 4.2 ESQUEMA DEL ESFUERZO DE CORTE .....	152
FIGURA 4.3 DIAGRAMA DEL CÍRCULO DE MOHR .....	154
FIGURA 4.4 ESQUEMA DEL ESFUERZO NORMAL PRINCIPAL MÁXIMO.....	154
FIGURA 4.5 ESQUEMA DE LA UNIÓN DEL PERNO .....	156
FIGURA 4.6 TIPOS DE EMPAQUETADURAS .....	160
A) EMPAQUE NO COLOCADO EN RANURA; B) ANILLO "O" EN RANURAS EN EL QUE EL SELLADO SE REALIZA POR LA PRESIÓN P, C) EMPAQUE EN RANURAS EN EL QUE EL SELLADO EFECTÚA POR COMPRESIÓN DEL MISMO. ....	160
FIGURA 4.7 ESQUEMA DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR .....	165
FIGURA 4.8 ESQUEMA DE LAS CARGAS INTERNAS DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR. ...	166
FIGURA 4.9 CÍRCULO DE MOHR PARA LAS CARGAS INTERNAS DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR .....	169
FIGURA 4.10 ELEMENTO PRINCIPAL NORMAL DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR .....	169
FIGURA 4.11 VISTA FRONTAL Y CORTE DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR.....	172
FIGURA 4.12 DIMENSIONES DEL PERNO 3/8" x 6".....	173
FIGURA 4.13 ESQUEMA DEL CIRCUITO ELÉCTRICO PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	179
FIGURA 4.14 PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIDRÓGENO VERSUS VOLTAJE APLICADO.....	182
FIGURA 5.1 SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO .....	188
FIGURA 5.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO .....	190
FIGURA 5.3 BATERÍA DE 12 VOLTIOS. ....	192
FIGURA 5.4 CARGADOR DE BATERÍA DE 12 VOLTIOS.....	193
FIGURA 5.5 PANELES SOLARES.....	194
FIGURA 5.6 MULTÍMETRO. ....	195
FIGURA 5.7 ADAPTACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE GAS PRODUCIDO. ....	195
FIGURA 5.8 ESTANTE DE PRODUCCIÓN. ....	197
FIGURA 6.1 ESQUEMA DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLIZADOR. ....	205
FIGURA 6.2 ESQUEMA DEL ELECTROLIZADOR. ....	205
FIGURA 6.3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VS. CORRIENTE ELÉCTRICA A 2CM DE DISTANCIA.....	226
FIGURA 6.4 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VS. CORRIENTE ELÉCTRICA A 2.5CM DE DISTANCIA.....	226
FIGURA 6.5 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VS. CORRIENTE ELÉCTRICA A 3CM DE DISTANCIA.....	227

## LISTADO DE TABLAS

TABLA 2.1 FORMAS DE ENERGÍA .....	8
TABLA 2.2 REGIONES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....	16
TABLA 2.3 PROPIEDADES FÍSICAS .....	39
TABLA 2.4 ENERGÍA MÍNIMA DE LA CHISPA PARA LA IGNICIÓN DE UNA MEZCLA DE HIDRÓGENO-AIRE .....	44
TABLA 2.5 TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO. ....	60
TABLA 2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLES..	68
TABLA 2.7 COMPROBACIÓN DE LA ECUACIÓN DE LA VELOCIDAD Y LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS TIPOS DE CATALIZADOR, QUÍMICO (O TÉRMICOS) Y ELECTROCATALIZADORES..	96
TABLA 3.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	99
TABLA 3.2 TABLA DE EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO. ....	106
TABLA 3.3 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE GEOMETRÍA DE LA CELDA. ....	107
TABLA 3.4 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE TRABAJO CONTINUO.....	107
TABLA 3.5 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE DISTANCIA VARIABLE ENTRE ELECTRODOS. ....	107
TABLA 3.6 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE FACILIDAD EN EL CAMBIO DE LOS ELECTRODOS. ....	108
TABLA 3.7 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DEL VOLUMEN DEL ELECTROLITO. ....	108
TABLA 3.8 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE FACILIDAD DE DESMONTAJE. ....	108
TABLA 3.9 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE COSTO. ....	110
TABLA 3.10 TABLA DE CONCLUSIONES DE LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVA PARA EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO N° 3. ....	110
TABLA 3.11 TABLA DE EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.....	114
TABLA 3.12 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO FACILIDAD DE VERIFICACIÓN DEL NIVEL DEL ELECTROLITO.....	115
TABLA 3.13 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE ALTA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO. ....	115
TABLA 3.14 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE ALTO GRADO DE AUTOMATIZACIÓN.	115
TABLA 3.15 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE DISPONIBILIDAD DE MATERIALES Y FÁCIL CONSTRUCCIÓN.....	116

TABLA 3.16 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE COSTO.....	116
TABLA 3.17 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE MANTENIMIENTO REDUCIDO. ....	116
TABLA 3.18 TABLA DE CONCLUSIONES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.	117
TABLA 3.19 TABLA DE EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROLIZADOR. ....	122
TABLA 3.20 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DEL USO DE LA ENERGÍA SOLAR Y ENERGÍA ELÉCTRICA COMERCIAL.....	122
TABLA 3.21 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DEL BAJO GRADO DE AUTOMATIZACIÓN.	123
TABLA 3.22 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE VOLTAJE VARIABLE PARA ENTREGA A SUS TERMINALES. ....	123
TABLA 3.23 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE FACILIDAD DE DESMONTAJE Y MANTENIMIENTO. ....	123
TABLA 3.24 TABLA DE EVALUACIÓN DE MANIPULACIÓN DE ALTAS CORRIENTES. ....	124
TABLA 3.25 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DEL COSTO. ....	124
TABLA 3.26 TABLA DE CONCLUSIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROLIZADOR.	124
TABLA 3.27 TABLA DE EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO. ....	128
TABLA 3.28 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE FLUJÓMETROS PARA GASES.....	129
TABLA 3.29 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE MEDICIÓN DE FLUJO MÁSSICO DE GASES. ....	129
TABLA 3.30 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE ALTO GRADO DE EXACTITUD.....	129
TABLA 3.31 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE SEÑAL ANALÓGICA DE SALIDA. ....	130
TABLA 3.32 TABLA DE EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE BAJO COSTO. ....	130
TABLA 3.33 TABLA DE CONCLUSIONES DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE PRODUCCIÓN DE HIDROGENO. ....	130
TABLA 3.34 TABLA DE PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS ELEGIDAS PARA LOS SISTEMAS DEL ELECTROLIZADOR.....	131
TABLA 3.35 TABLA DE LOS ELEMENTOS CONSIDERADOS PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS Y CATÓDICOS. ....	132
TABLA 3.36 TABLA DE CONSIDERACIONES APLICADAS A LA ECUACIÓN BUTLER – VOLMER.	135
TABLA 3.37 CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA DEL ÁNODO LITIO PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES CATÓDICOS .....	135
TABLA 3.38 CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA DEL ÁNODO ZINC PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES CATÓDICOS .....	136

TABLA 3.39 CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA DEL ÁNODO ALUMINIO PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES CATÓDICOS.....	136
TABLA 3.40 CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA DEL ÁNODO HIERRO PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES CATÓDICOS.....	137
TABLA 3.41 CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA DEL ÁNODO PLOMO PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES CATÓDICOS .....	137
TABLA 3.42 CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA DEL ÁNODO ESTAÑO PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES CATÓDICOS.....	138
TABLA 3.43 CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA DEL ÁNODO CARBONO PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES CATÓDICOS.....	138
TABLA 3.44 CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA DEL ÁNODO NÍQUEL PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES CATÓDICOS .....	139
TABLA 3.45 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS.....	139
TABLA 3.46 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS.....	140
TABLA 3.47 ESTABILIDAD QUÍMICA PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS .....	140
TABLA 3.47 ESTABILIDAD QUÍMICA PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS.....	141
TABLA 3.48 TABLA DE EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS ELECTRODOS ANÓDICOS.....	141
TABLA 3.49 TABLA DE EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS ELECTRODOS CATÓDICOS.....	142
TABLA 3.50 TABLA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS ELECTRODOS ANÓDICOS.....	142
TABLA 3.51 TABLA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS ELECTRODOS CATÓDICOS .....	143
TABLA 3.52 EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS .....	143
TABLA 3.53 EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS.....	144
TABLA 3.54 COSTO Y DISPONIBILIDAD PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS.....	145
TABLA 3.55 COSTO Y DISPONIBILIDAD PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS .....	145
TABLA 3.56 EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE DISPONIBILIDAD PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS.....	146
TABLA 3.57 EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE DISPONIBILIDAD PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS.....	146

TABLA 3.58 MATRIZ DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS Y CATÓDICOS .....	147
TABLA 3.59 PONDERACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS .....	147
TABLA 3.60 PONDERACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS .....	148
TABLA 3.61 MATERIALES ELEGIDOS PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS Y CATÓDICOS ....	148
TABLA 4.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES DE EMPAQUETADURAS .....	161
TABLA 4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PERNO SAE GRADO 1 .....	171
TABLA 4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACRÍLICO COMERCIAL .....	172
TABLA 4.4 TABLA DE ESCALA DEL PH DE ALGUNAS SUBSTANCIAS Y SOLUCIONES .....	176
TABLA 4.4 VALORES DE LAS RESISTENCIAS DEL CIRCUITO ELÉCTRICO. ....	180
TABLA 4.5 VALORES DE LAS RESISTENCIAS DEL CIRCUITO ELÉCTRICO. ....	180
TABLA 4.6 VALORES DE LAS RESISTENCIAS DEL CIRCUITO ELÉCTRICO. ....	180
TABLA 4.7 VALORES DE LAS RESISTENCIAS DEL CIRCUITO ELÉCTRICO. ....	180
TABLA 4.8 DETERMINACIÓN DE LA MASA ATÓMICA DEL SOLVENTE. ....	181
TABLA 4.9 TABLA DE EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIDRÓGENO.....	181
TABLA 5.1 OPERACIONES REALIZADAS EN LAS PLANCHAS DE ACRÍLICO (PLANO 1.2688-002, 003 Y 004). ....	184
TABLA 5.2 OPERACIONES REALIZADAS EN LOS EMPAQUES (PLANO 1.2688-009). ....	185
TABLA 5.3 OPERACIONES REALIZADAS EN LOS DIAFRAGMAS (PLANO 1.2688-010).....	185
TABLA 5.4 OPERACIONES REALIZADAS A LOS ESPÁRRAGOS (PLANO 1.2688-012).....	186
TABLA 5.5 OPERACIONES REALIZADAS EN EL CORTE DE ELECTRODOS TIPO MALLA (PLANO 1.2688-011). ....	186
TABLA 5.6 OPERACIONES REALIZADAS PARA LOS ELECTRODOS TIPO PLANCHA (PLANO 1.2688-011). ....	187
TABLA 5.7 OPERACIONES REALIZADAS PARA LOS EMPAQUES DE LOS PORTA ELECTRODOS (PLANO 1.2688-008). ....	187
TABLA 5.8 ACOPLÉS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO .....	188
TABLA 5.9 OPERACIONES REALIZADAS PARA EL RESERVORIO DEL ELECTROLITO (PLANO 1.2688-013). ....	189
TABLA 5.10 ACOPLÉS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO ....	190
TABLA 5.11 COSTO DEL DISEÑO.....	198
TABLA 5.12 MATERIALES E IMPLEMENTOS USADOS .....	198
TABLA 5.13 COSTO PROCESOS DE FABRICACIÓN .....	201

TABLA 5.14 COSTO TOTAL DEL EQUIPO .....	201
TABLA 6.1 PRUEBAS DEL TIEMPO DE REACCIÓN DE LA SOLUCIÓN. ....	206
TABLA 6.2 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 1.....	207
TABLA 6.3 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 1.....	207
TABLA 6.4 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 2.....	208
TABLA 6.5 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 2.....	209
TABLA 6.6 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 3.....	209
TABLA 6.7 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 3.....	210
TABLA 6.8 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 4.....	210
TABLA 6.9 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 4.....	211
TABLA 6.10 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 5.....	211
TABLA 6.11 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 5.....	212
TABLA 6.12 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 6.....	212
TABLA 6.13 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 6.....	213
TABLA 6.14 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 7.....	213
TABLA 6.15 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 7.....	214
TABLA 6.16 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 8.....	214
TABLA 6.17 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 8.....	215
TABLA 6.18 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 9.....	215

TABLA 6.19 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 9.....	216
TABLA 6.20 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 10.....	216
TABLA 6.21 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 10.....	217
TABLA 6.22 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 11.....	217
TABLA 6.23 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 11.....	218
TABLA 6.24 PARÁMETROS DETERMINADOS PARA LA MEDICIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE, EN LA PRUEBA 12.....	218
TABLA 6.25 VOLTAJE Y AMPERAJE EN CADA MÓDULO DEL ELECTROLIZADOR, EN LA PRUEBA 12.....	219
TABLA 6.26 NIVELES DE VARIACIÓN EN EL TANQUE DE HIDRÓGENO DE LA PRUEBA 1, 2 Y 3.....	220
TABLA 6.27 NIVELES DE VARIACIÓN EN EL TANQUE DE HIDRÓGENO DE LA PRUEBA 4, 5 Y 6.....	221
TABLA 6.28 NIVELES DE VARIACIÓN EN EL TANQUE DE HIDRÓGENO DE LA PRUEBA 7, 8 Y 9.....	222
TABLA 6.29 NIVELES DE VARIACIÓN EN EL TANQUE DE HIDRÓGENO DE LA PRUEBA 10, 11 Y 12.....	223
TABLA 6.30 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN LA SOLUCIÓN AL 20% DE KOH.....	225
TABLA 6.31 DIFERENCIA ENTRE EL CONSUMO DE ENERGÍA Y LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	228
TABLA 6.32 DIFERENCIA ENTRE EL CONSUMO DE ENERGÍA Y LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	229
TABLA 6.33 DIFERENCIA ENTRE EL CONSUMO DE ENERGÍA Y LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	230
TABLA 6.34 DIFERENCIA ENTRE EL CONSUMO DE ENERGÍA Y LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	231
TABLA 6.35 FLUJO MÁSIKO POR HORA DE HIDRÓGENO.....	232

## RESUMEN

Este proyecto propone la posibilidad de diseñar, construir equipos y dispositivos que puedan aprovechar el hidrógeno como vector energético, es decir, como una fuente potencial de energía renovable, que evitará el deterioro del medio ambiente y en un futuro podrá transformar las relaciones energéticas y económicas en el planeta hacia la conquista de una economía energética sostenida.

Este documento comprende el diseño, construcción, montaje y pruebas de rendimiento de un electrolizador, variando todos los parámetros para llevar a cabo una mejor electrólisis. Para conseguir este objetivo, se requiere de un análisis completo y global de las condiciones de operación, entre las condiciones más importantes para obtener una adecuada electrólisis se encuentra el tipo de electrolito a utilizarse, material y forma de los electrodos, distancia entre electrodos y corriente eléctrica suministrada.

Del análisis teórico, se establecen los criterios y requerimientos necesarios para el dimensionamiento, construcción y montaje de todos los sistemas del electrolizador. Se adaptaron procesos de fabricación y materiales existentes en el mercado local para lograr la viabilidad del proyecto.

Además se detalla cada uno los procesos de fabricación, montaje y normas de seguridad para un adecuado funcionamiento del electrolizador, utilizando la energía solar como fuente principal de generación eléctrica.

Para evaluar el rendimiento real del electrolizador se construyen sistemas de medición, con el fin de obtener un análisis experimental del grado de producción de hidrógeno del electrolizador.

## PRESENTACIÓN

La dramática disminución de las reservas mundiales de petróleo llevará en pocos años, si no se encuentra una solución, a una crisis energética sin precedentes que obligaría a cambiar drásticamente el actual modo de vida. La situación energética actual, con problemas de contaminación, cambio climático, conflictos internacionales motivados por el acceso a los recursos, y agotamiento de combustibles fósiles, precisa nuevas tecnologías. Entre ellas destaca el hidrógeno, al que muchos le asignan el papel de desplazar a los combustibles fósiles para llegar a basar nuestro futuro en la “economía del hidrógeno”.

El hidrógeno, sea que se lo utilice en procesos de combustión o para regenerar energía eléctrica en las pilas de combustible tiene una amplia aplicación en diferentes órdenes del quehacer humano. Entre las ventajas de la utilización del hidrógeno como carburante es la abundancia de este elemento en el universo y su combustión sólo origina vapor de agua y calor, además de ser un sistema energético no contaminante y silencioso. Entre los inconvenientes hay que señalar que es un gas muy inflamable y que sería muy costosa la construcción de las infraestructuras para su distribución y almacenamiento.

En este contexto el presente proyecto busca aportar en la solución de esta necesidad prioritaria, para desarrollar, diseñar y construir un electrolizador híbrido solar y eléctrico.

El mecanismo para obtener hidrógeno que se utilizará es un dispositivo (electrolizador) que utiliza en forma híbrida, energía renovable solar y energía eléctrica de uso doméstico para producir hidrógeno mediante la electrólisis del agua. Ese hidrógeno puede utilizarse como gas natural directamente para cocinar, calentar agua o para climatización del hogar, o en pilas de combustible al regenerar energía eléctrica para usos domésticos comunes.

Por las razones antes mencionadas se justifica el diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 watios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La razón del proyecto se debe principalmente a que buena parte de la energía consumida a nivel mundial es del tipo fósil, que incluye el carbón mineral, el gas natural y derivados del petróleo.

Los primeros seres humanos utilizaron la energía de las plantas para producir fuego y calentar sus sitios de vivienda, cocinar, forjar sus herramientas y armas. La fuerza de los animales fue aprovechada como medio de transporte, para las tareas de carga o fuerza motriz, y para los grandes ejércitos. Las primeras civilizaciones utilizaron la energía del viento y la fuerza del agua. La energía del sol se utilizaba para secar los granos e indirectamente calentar los hogares. El carbón fue ya empleado por los chinos miles de años antes de Cristo. Los griegos conocían sobre las fuerzas del magnetismo y la electricidad.

El requerimiento energético durante la revolución industrial fue satisfecho inicialmente mediante la quema de la madera y posteriormente con el carbón. El gas sirvió como combustible para iluminación y calefacción desde fines del siglo XVIII, mientras que el uso del petróleo se inició efectivamente tras la invención del motor de combustión interna.

El siglo XX trajo consigo una revolución energética y la aplicación de todo tipo de fuentes de energía para los más distintos usos. La invención del generador eléctrico para la producción de electricidad y su aplicación en los motores eléctricos y en las redes eléctricas de distribución marcó el inicio de la era moderna.

La primera vez que se utilizó electricidad para separar un compuesto en sus partes componentes fue en 1800, cuando un científico inglés llamado William Nicholson

hizo pasar una corriente eléctrica desde una Pila de Volta a través de unas gotas de agua. Quedó pasmado al ver que el agua desaparecía, formándose en su lugar burbujas de oxígeno e hidrógeno.

Nuestro trabajo tiene como propósito estudiar la producción del hidrógeno obtenido a partir de electrolisis del agua para consumo local, esto con ayuda de la mayor fuente de energía renovable del mundo que es la radiación solar y por medio de colectores solares.

En general en todo el mundo, el consumo diario de energías no alternativas en los hogares es muy alto, generando un gasto excesivo de dinero por las fuentes energéticas comunes.

La generación de hidrógeno a partir de electricidad por colectores solares es una opción importante a explorar en el país, con el objeto de buscar nuevos usos para las energías alternativas en el hogar, el comercio o la industria.

La combustión del hidrógeno prácticamente no produce gases de invernadero, y además su obtención a partir de la electrólisis del agua lo convierte en un recurso importante con el fin de buscar nuevas formas para la generación de la electricidad que de paso a la electrolisis.

El Sol es la fuente de energía primaria de nuestro planeta, y lo seguirá siendo por millones de años más, entonces estudiar la posibilidad de utilizar este tipo de electricidad disponible para generar hidrógeno y utilizarlo por ejemplo en el hogar es un asunto de gran interés.

Dadas las importantes ventajas ambientales del hidrógeno, sus posibilidades, beneficios y restricciones tecnológicas y económicas, se dan aspectos que pretenden a ser analizados en el presente trabajo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar, diseñar y construir un electrolizador alimentado por corriente continua con una potencia de 200 vatios e instalar instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno generado por el electrolizador.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar las mejores alternativas posibles para la construcción de un electrolizador que genere una máxima producción de hidrógeno.
- Analizar e implementar instrumentación necesaria para la medición y utilización del hidrógeno en particular para el hogar.
- Diseñar y construir un modelo confiable de electrolizador alimentado por energía solar, analizar ventajas, desventajas y viabilidad.
- Valorar la importancia de la conservación energética y ambiental a través del uso de energías alternativas.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

En el último cuarto del siglo pasado y los inicios del siglo XXI se ha percibido una creciente preocupación por el abastecimiento energético, por el agotamiento de las principales fuentes de energía actuales y por la sostenibilidad del modelo energético con un mínimo impacto social, económico y ambiental, así como por la creciente subida del precio de las principales fuentes de energía actuales en los últimos años.

Por otro lado el precio de los derivados del petróleo ha aumentado considerablemente, y el aumento en la demanda ha hecho que las reservas probadas de petróleo hayan disminuido en los últimos años.

Debido al efecto invernadero, gran problema por el que atraviesa el mundo entero surge la necesidad de reimpulsar el uso de fuentes energéticas alternativas y de estrategias de ahorro energético, que además permitan un desarrollo sostenible y amigable con el medio ambiente.

El hidrógeno presenta un enorme beneficio sobre las demás energías alternativas, ya que puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes, y entre ellas, las renovables, de producción local e inagotable.

Principalmente en los últimos años han venido creciendo las expectativas en la energía renovable y en torno al hidrógeno como vector energético en el Ecuador, para una combustión limpia, ya que es un proyecto sostenible con un bajo impacto social, económico y ambiental.

La razón principal de la investigación está dirigida a Universidades e Instituciones de nuestro país que pueden asimilar y transferir los nuevos conocimientos generados e iniciar proceso de investigación aplicada en el aprovechamiento del hidrógeno como vector energético.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ENERGÍA

La naturaleza es un gran reservorio de almacenamiento de energía, a través de las plantas, los animales y todos los elementos, ya sean estos vivos o inanimados.

Podemos citar varios ejemplos. Si vemos una caída de agua y la fuerza con que esa masa choca con la base del río nos impresionamos por la energía que se produce.

En una tormenta de rayos nos mantenemos temerosos por la energía que tiene un rayo y los daños que puede ocasionar.

Un huracán nos muestra la gran energía que los vientos pueden producir en la tierra o en el mar.

Las olas al chocar con toda su fuerza en un acantilado o al llegar a la playa nos mantienen alejados.

Qué decir de la energía que libera un volcán al erupcionar o cuando despierta de su letargo con una explosión de lava y ceniza. Al ver el Sol y esas imágenes de explosiones de miles de kilómetros que se producen en la superficie podemos imaginarnos la cantidad de energía que se produce y que a pesar de la distancia, llega a la Tierra.

Asimismo, los seres humanos son también un mecanismo que transforma la energía de los alimentos para sobrevivir. Cuando una persona está decaída o cansada decimos que no tiene energía. La energía se asocia entonces con el movimiento, la actividad, o la fuerza vinculada a la actividad que podría generarse.

### 2.1.1 DEFINICIÓN DE ENERGÍA

Cuando hablamos de energía pensamos en el concepto de fuerza y muchas veces empleamos ambos términos indistintamente. Mientras más fuerza ejerce un cuerpo se requiere más energía, y si una misma fuerza se mantiene durante un mayor tiempo esto igualmente demanda mayor energía. Por ejemplo, al empujar un carro, estamos ejerciendo una fuerza en una dirección. Mientras mayor es la distancia a la que movemos el carro estamos haciendo un mayor trabajo.

La definición clásica de trabajo es una fuerza por una distancia, simbólicamente:

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

**Donde:**

<b>F</b>	<b>: Fuerza</b>	<b>[N]</b>
<b>D</b>	<b>: Distancia</b>	<b>[m]</b>
<b>W</b>	<b>: Trabajo</b>	<b>[J]</b>

La energía se define como la capacidad para producir trabajo. De aquí que la unidad de la energía es la misma que la del trabajo, el Joule [J]. Si jugamos un poco con las unidades  $J = \text{kg m/s}^2$ .  $m = \text{kg m}^2/\text{s}^2$ ; como velocidad es igual a distancia sobre tiempo  $v = \text{m/s}$ , entonces  $J = \text{kg} \cdot V^2$ .

Fue Albert Einstein (1879 – 1955) quien descubrió que esta velocidad no es otra que la de la luz y dedujo su famosa fórmula:

$$E = mc^2 \quad (2.2)$$

**Donde:**

<b>E</b>	<b>: Energía</b>	<b>[J]</b>
<b>M</b>	<b>: Masa y se mide en kilogramos</b>	<b>[kg]</b>
<b>C</b>	<b>: Velocidad de la luz (3x10<sup>8</sup>)</b>	<b>[m/s]</b>

Esta fórmula nos muestra que la energía y la materia son intercambiables, siempre y cuando se produzca a la velocidad de la luz.

El científico inglés Thomas Young (1773 – 1829) introdujo por primera vez el término “energía” tomando la palabra griega *energeia*, que quiere decir “eficacia”.

El agua al caer puede mover la rueda de un molino o una turbina que produce un movimiento. Este movimiento permite moler los granos entre dos ruedas de piedra o mover un generador eléctrico.

El trabajo final es el resultado de la liberación de energía. Por ejemplo, en el caso de un motor de combustión interna la energía proviene del combustible que se quema, mientras que el motor es un mecanismo que permite realizar un trabajo.

Es importante tomar en cuenta que la energía de una planta, un animal o un combustible no es energía potencial, sino energía química,

La masa de agua que fluye en un río a cierta velocidad, la masa de aire que impacta en un molino de viento o el vapor que mueve una turbina tienen una energía cinética. Es decir, energía en movimiento que es la que efectivamente produce el trabajo.

### 2.1.2 FORMAS DE LA ENERGÍA

La energía se manifiesta de las siguientes formas como se indica en la tabla N°2.1:

Tabla 2.1 Formas de Energía <sup>1</sup>

Forma	Origen	Producción	Uso
<b>Térmica</b>	Fricción, combustión, energía cinética	Solar, geotérmica, electricidad, química	Cocinar, calefacción, vapor
<b>Radiante</b>	Sol, electricidad, radiación	Solar, electricidad, química	Iluminación, comunicaciones, medicina
<b>Mecánica</b>	Energía Potencial	Eólica, Hidráulica, Mareomotriz, resortes	Iluminación, comunicaciones, medicinas
<b>Eléctrica</b>	Electromagnetismo, piezoelectricidad, electricidad estática, pilas y baterías	Centrales térmicas, centrales hidráulicas, fotovoltaica, celdas de combustible, pilas y baterías	Motores, electrónica, calentamiento, almacenamiento de energía
<b>Química</b>	Combustibles, plantas, animales, elementos químicos, biomasa	Biomasa, petróleo, gas, carbón	Motores de combustión interna, cocinar alimentos, transformación química
<b>Gravitacional</b>	Tierra	Hidráulico	Mover máquinas
<b>Magnética</b>	Tierra, imanes	Electricidad	Electromagnetismo
<b>Nuclear</b>	Átomo	Centrales nucleares	Centrales nucleares, electromedicina, radiología

### 2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE ENERGÍA

Las fuentes de energía se clasifican en 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.

<sup>1</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 5

Se forman por la descomposición producida durante millones de años de 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 y su disponibilidad no disminuye con el tiempo. El Sol y la Tierra seguirán proveyendonos de energía durante algunos millones de años más, y con él los vientos, la fotosíntesis de las plantas, el ciclo de agua, las fuerzas del mar y el calor al interior de la Tierra.

La figura N°2.1.- Resume las diversas fuentes de energía:

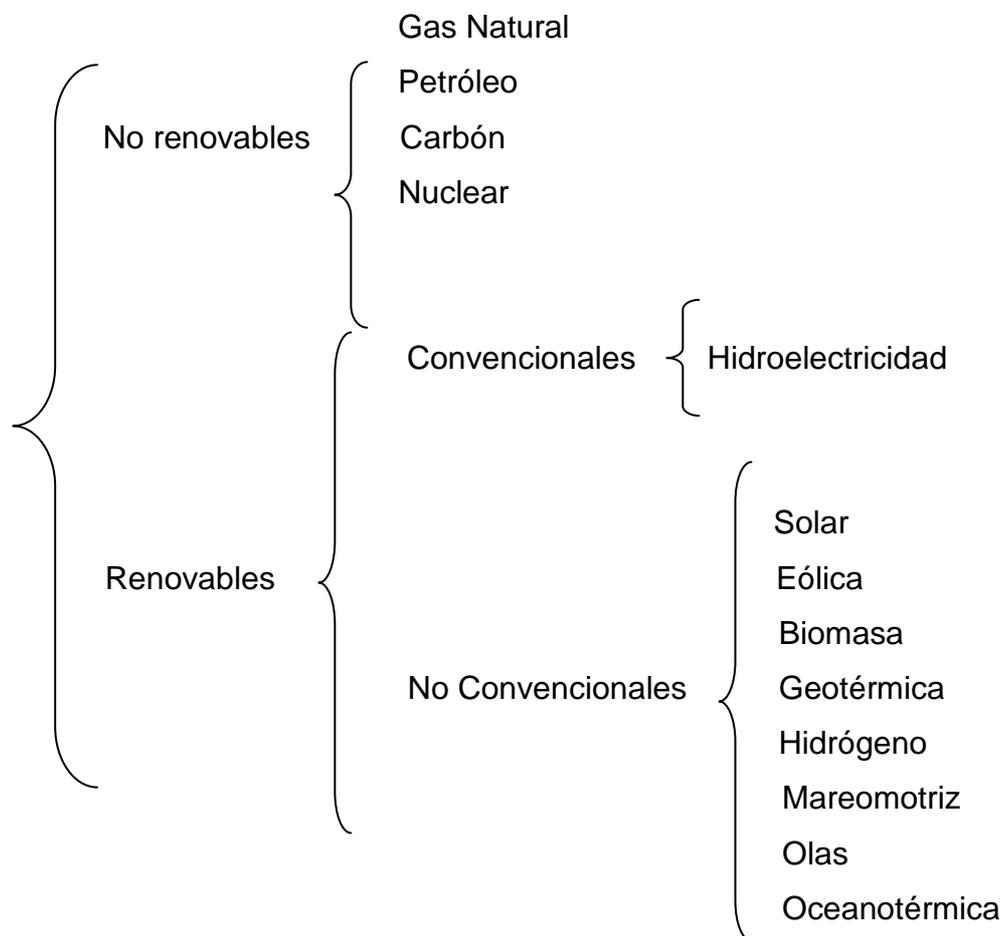


Figura 2.1 Fuentes de Energía<sup>2</sup>

A las fuentes de energía renovable se las conoce también como alternativas, pues ofrecen una solución diferente o alternativa a las tecnologías tradicionales.

<sup>2</sup> SANCHEZ SANTIAGO,(2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 13

## **2.2 ENERGIAS ALTERNATIVAS**

### **2.2.1 EL SOL**

El Sol siempre ha cautivado el interés de las civilizaciones. Los primeros habitantes de la Tierra atribuían al Sol grandes poderes y lo consideraban la principal fuente de vida.

Civilizaciones avanzadas de América describían con gran exactitud los movimientos del Sol y su importancia para los ciclos de siembra y cosecha, y en la fiesta del Inti Raymi, los Incas ofrecían adoración al dios Sol.

El inmenso progreso científico de los dos últimos siglos nos ha llevado a confirmar el criterio de nuestros antepasados sobre la importancia del Sol y sus fenómenos asociados que son: la radiación electromagnética y, como parte de ella, la luz, el magnetismo, y la atracción de la gravedad. Estos aspectos físicos del Sol se complementan con los fenómenos sociales y síquicos y su efecto en la salud, el crecimiento y en el estado de ánimo de los seres vivos.

Para ilustrar lo anteriormente mencionado, citemos algunos ejemplos:

Si nos encontramos dentro de un vehículo en un día soleado, y más aún en el Ecuador donde los rayos del Sol caen perpendicularmente, apreciamos en poco tiempo el incremento de la temperatura y podemos de alguna forma medir la energía recibida. Caso similar ocurre en un invernadero.

Los vientos se originan por la diferencia de presión debido al calentamiento solar de las masas de aire en las zonas cálidas que ascienden y chocan con el aire frío de las zonas más altas.

Las plantas reciben la radiación solar y en la fotosíntesis producen los azúcares para su subsistencia; la energía de los fotones es parte vital de esta transformación química que se revierte al alimentarnos, devolviéndonos esa energía.

El descubrimiento del efecto fotovoltaico, que veremos más adelante, transforma la energía del fotón al impactar en un material semiconductor en una corriente eléctrica.

Los combustibles fósiles deben su energía a la que recibieron del Sol en sus años de vida como plantas y animales.

### **2.2.1.1 Energía Solar**

Para comprender de dónde procede la energía del Sol debemos transportarnos al interior de esta estrella gaseosa de casi 700 mil km de radio.

Debido a la inmensa fuerza de gravedad y a temperaturas de 16 millones de grados en el interior del Sol, dos átomos de hidrógeno se fusionan en uno de helio y la diferencia de masa se convierte en energía.

La temperatura exterior del Sol, que en realidad es la de la fotosfera que es la parte del Sol que vemos desde la Tierra, es de 5.780°K. Cero grados Kelvin (0 K) es la temperatura del cero absoluto, es decir ningún elemento puede ser más frío que ese límite, y equivale a -273°C.

La órbita que describe la Tierra alrededor del Sol es una elipse, con el Sol en uno de sus vértices. El 21 de diciembre la Tierra está más alejada del Sol, mientras el 21 de junio está más cerca. La distancia media entre el Sol y la Tierra es de aproximadamente  $150 \times 10^6$  km, y se llama una unidad astronómica.

### **2.2.1.2 Radiación Solar**

La radiación que emite un cuerpo en función de la temperatura viene dada por la ley de Stefan-Boltzman:

$$M = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

**Donde:**

<b>M</b>	: Densidad total de flujo radiante emitida por cuerpo.	[W/m <sup>2</sup> ]
<b><math>\sigma</math></b>	: Constante de Stefan-Boltzman $5,67 \times 10^{-8}$ .	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]
<b>T</b>	: Temperatura del cuerpo.	[K]

El Sol irradia energía en todas las direcciones y parte de este flujo llega a la Tierra a través del espacio vacío como se muestra en la figura N°2.2. Esta energía se emite en dos formas, como:

1. Radiación electromagnética, que incluye: los rayos ultravioletas, los rayos X, la luz visible, las radiaciones infrarrojas, las microondas y las ondas de radio;
2. Viento solar, compuesto de partículas atómicas energizadas: neutrinos y protones.

La atmósfera de la Tierra es una capa protectora de esta radiación y del viento solar.

La disminución en la capa de ozono de la Tierra reduce el grado de protección contra la radiación, especialmente de los rayos ultravioleta.

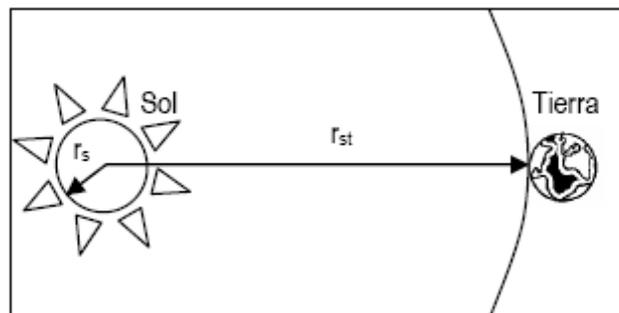


Figura 2.2 Distancia tierra-sol

La cantidad total de radiación en la superficie del Sol debe ser igual a la radiación en la órbita de la Tierra (la energía no se destruye).

Para medir la radiación solar se dispone principalmente de dos tipos de medidores:

- El piranómetro, que mide la radiación hemisférica en un plano y consiste de una serie de termocuplas que es una unión de dos placas metálicas de diferente material y conductividad térmica.

El cambio en temperatura en estas placas metálicas produce un cambio de voltaje que es proporcional a la radiación. Para su lectura, debe conectarse una resistencia en paralelo (shunt) y hay que tomar en cuenta el valor de ajuste por voltaje, propio de cada piranómetro. La ventaja del piranómetro es que permite medir tanto la radiación directa como la reflejada.

- La celda fotoeléctrica con compensación por temperatura, la cual genera una corriente eléctrica. La precisión de este medidor es mucho menor que la del piranómetro y solo mide la radiación global.

### **2.2.1.3 El Espectro Electromagnético**

En el caso de las energías renovables, nuestro interés se centra en aprovechar la energía que nos llega del Sol en forma de radiación electromagnética.

La radiación electromagnética puede ser descrita como un flujo de fotones, que son partículas sin masa, que se desplazan en forma de ondas a la velocidad de la luz y transportan la energía de un punto a otro. Cada fotón contiene una cantidad fija de energía (o paquete de energía); dependiendo de la energía de un fotón podemos ir desde las ondas de radio, que son las de menor energía hasta los rayos gamma.

Los fotones con mayor energía tienen una menor longitud de onda, que es igual a decir que tienen una mayor frecuencia. Veamos algunos de estos conceptos:

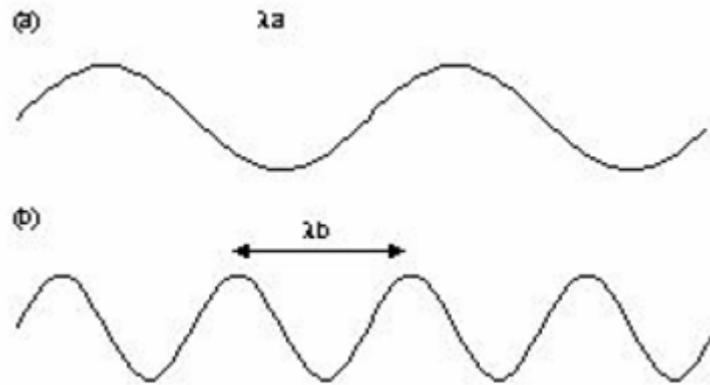


Figura 2.3 Longitud de onda

La figura N° 2.3.- muestra dos ondas, que son como las olas que se forman en un estanque al lanzar una piedra, o como las olas del mar. El agua es más alta en unos sitios que en otros. Mientras en la onda (a) tenemos dos picos, en la onda (b) hay cuatro a igual distancia.

El ciclo de la onda es el recorrido de un pico (o valle) al siguiente. La onda (b) recorre cuatro ciclos mientras que la recorre dos. Decimos que la longitud de la onda (a) es más larga que la (b). Entonces, la longitud de onda es la distancia que recorre la onda en un ciclo y se representa por la letra griega lambda  $\lambda$ .

Si medimos el tiempo que toma una onda en un ciclo hablamos de la frecuencia de la onda, y se representa por la letra griega  $\nu$ . La frecuencia de la onda nos permite conocer el número de ciclos por segundo y se mide en Hertz [Hz] (1 Hertz = 1 ciclo por segundo).

La onda (b) tiene una mayor frecuencia que la onda (a). La unidad de medida de la longitud de onda para las ondas electromagnéticas es el nanómetro, es decir  $0,000000001 \text{ m}$  ( $1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ) y se representa como [nm]. Es común utilizar también las unidades micrómetro o micras [ $\mu\text{m}$ ] ( $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) o el ángstrom [Å] ( $1 \times 10^{-8} \text{ m}$ ).

Recordemos que las ondas son fotones que se mueven a la velocidad de la luz  $c$ , por lo que la frecuencia de la onda puede obtenerse como  $\nu = c/\lambda$ .

La altura de la onda desde la línea media entre un pico y un valle, se denomina amplitud de la onda, y determina la intensidad de la onda. De allí que cuando aumentamos el volumen de una radio estamos aumentando la intensidad de la onda; mientras que, cuando cambiamos de emisora estamos variando la frecuencia.

La intensidad de la onda es proporcional al cuadrado de la amplitud de onda y es lo que conocemos normalmente como brillo.

La cantidad de energía que transporta un fotón viene dada por la ecuación:

$$E = hv \quad (2.4)$$

**Donde:**

<b>E</b>	<b>: Energía de un fotón</b>	<b>[J]</b>
<b>H</b>	<b>: Constante de Planck <math>6.624 \cdot 10^{-34}</math></b>	<b>[J/s]</b>
<b>N</b>	<b>: Frecuencia</b>	<b>[Hz]</b>

Como veremos más adelante, esta ecuación, que es la base de la teoría cuántica, nos ayudará a comprender la forma en que se liberan los electrones en un panel fotovoltaico.

La energía de un fotón se mide en electrón voltios [eV],  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

Mientras más energía tiene una onda, mayor es su frecuencia y menor su longitud de onda.

Se puede determinar las siguientes regiones del espectro electromagnético en la tabla N°2.2, ordenadas de menor a mayor energía:

Tabla 2.2 Regiones del Espectro Electromagnético<sup>3</sup>

Onda	Longitud de onda [m]	Frecuencia [Hz]	Energía [J]
Radio	$>1 \times 10^{-1}$	$<3 \times 10^9$	$<2 \times 10^{-24}$
Microondas	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-24} - 2 \times 10^{-22}$
Infrarrojas	$7 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{-22} - 3 \times 10^{-19}$
Luz visible	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-19} - 5 \times 10^{-19}$
Ultravioleta	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{-19} - 2 \times 10^{-17}$
Rayos x	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-14}$
Rayos Gamma	$<1 \times 10^{-11}$	$>3 \times 10^{19}$	$>2 \times 10^{-14}$

La luz es solo una pequeña parte del espectro electromagnético y va desde los 400 a los 700 nm. El color de la luz depende de su longitud de onda, desde el rojo hasta el violeta, figura N°2.4.

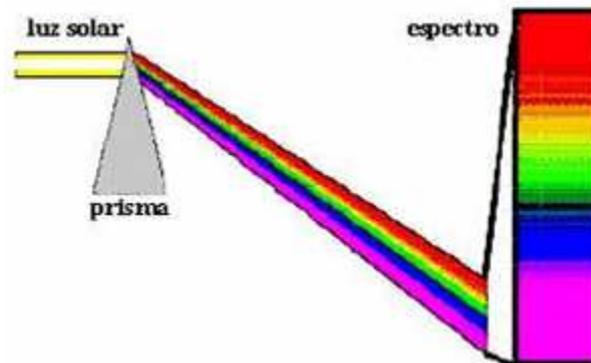


Figura 2.4 Espectro de la Luz

Fue Sir Isaac Newton quien descubrió en 1666 que la luz del Sol es una mezcla de diferentes partículas de colores y lo denominó el “espectro” (del inglés “ghost”, fantasma). Cada elemento tiene sus propias líneas espectrales y es así como podemos saber solo con la luz de las estrellas o de un cuerpo los elementos que las componen. Las radiaciones emitidas por los cuerpos calientes tienen una longitud de onda cercana al color rojo. Los fotones que emiten una radiación de color azul tienen más energía que aquellos de color rojo.

<sup>3</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), “Energías Renovables, conceptos y aplicaciones”, Pág. 24

La luz, tanto la natural que nos viene del Sol, como aquellas artificiales con focos incandescentes, fluorescentes, de descarga, o los últimos con elementos semiconductores (LEDs) son un flujo de fotones de diversas longitudes de onda que se ubican en el espectro de la luz visible, y por ende sensibles al ojo humano.

Habíamos visto que la energía radiante de un cuerpo depende de su temperatura  $T$  y ahora sabemos que también depende de la longitud de onda de los fotones de esa radiación a lo largo de todo el espectro electromagnético. Estos conceptos se unifican en la denominada Ley de Planck, que determina la energía radiante de un cuerpo en función de  $T$  y  $\lambda$ .

Cuando un cuerpo emite toda su radiación y al mismo tiempo absorbe toda la radiación de los demás cuerpos, decimos que se trata de un “cuerpo negro”. El Sol puede considerarse como un cuerpo negro.

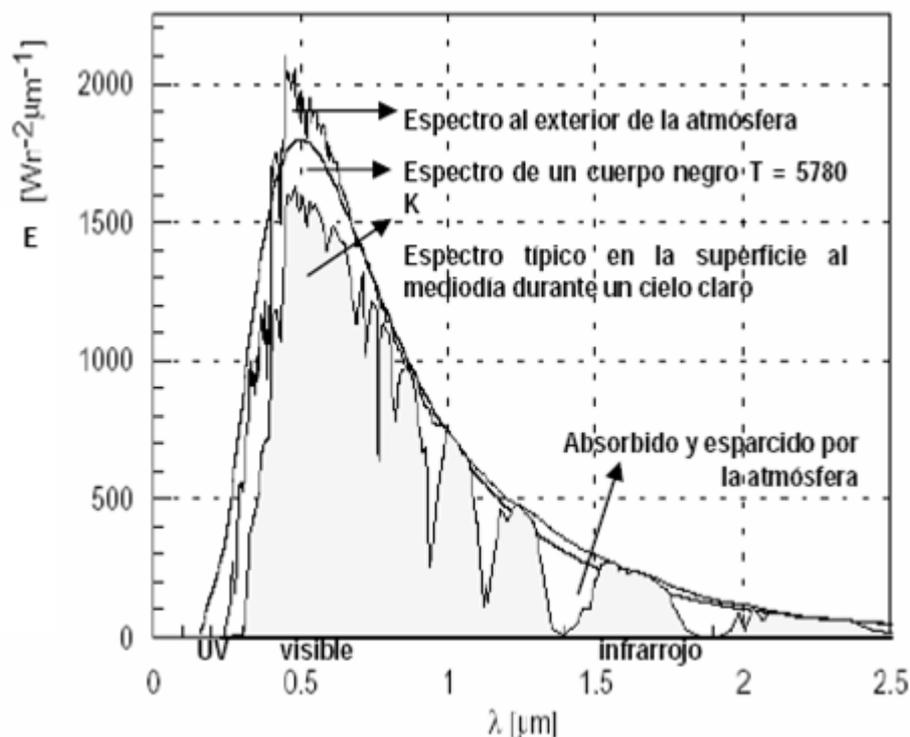


Figura 2.5 Espectro solar en el exterior de la atmósfera y en la superficie de la Tierra comparado con la radiación de un cuerpo negro de  $T = 5780 \text{ K}$ <sup>4</sup>

<sup>4</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), “Energías Renovables, conceptos y aplicaciones”, Pág. 25

La curva de la figura N° 2.5.- muestra la energía radiante del Sol (o su distribución espectral) en el exterior de la atmósfera de la Tierra y en la superficie de la Tierra en función de la longitud de onda.

Este gráfico corresponde a la temperatura del Sol de 5800 K. Aquí se observa lo siguiente:

- 1) La radiación que llega a la Tierra es menor que la que incide sobre la parte exterior de la atmósfera. Por tanto, hay una pérdida de energía.
- 2) La parte de la luz visible del espectro tiene la mayor energía.
- 3) Las radiaciones de mayor longitud de onda (menor frecuencia) se ubican en la zona infrarroja y son absorbidas en su mayor parte en la atmósfera. Son estos fotones los que al impactar con el aire de la atmósfera producen el calentamiento de nuestro planeta.
- 4) Ciertas frecuencias son absorbidas en la atmósfera más que otras.

La radiación solar, a su paso por la atmósfera, sufre algunos procesos de extinción: se refleja en las nubes y vuelve al espacio; es esparcida y cambia de dirección; se absorbe por el vapor de agua y los aerosoles; llega directamente sin afectarse; se difunde particularmente los fotones de alta energía y por eso el cielo se ve azul; o se refleja en el suelo.

Es importante anotar que se conoce como radiación solar global o total a la suma de los componentes de radiación directa más la difusa más la reflejada en el suelo, como se muestra en la figura N° 2.6.

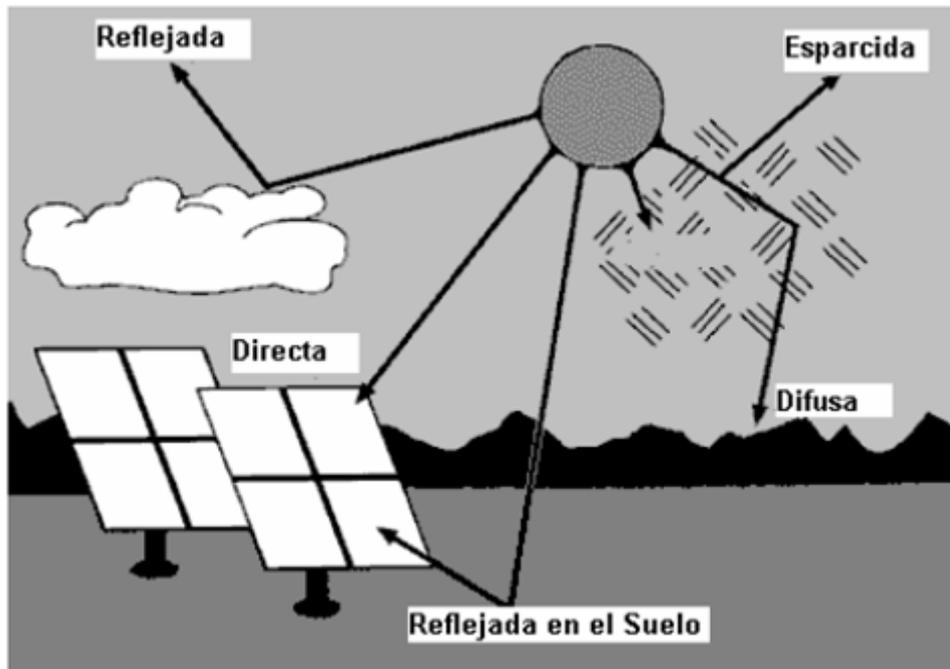


Figura 2.6 Componentes de la radiación solar

El espesor de la atmósfera determina igualmente cuánta energía se pierde hasta llegar a la superficie de la Tierra. **La masa de aire** (abreviada AM por sus siglas en inglés "air mass") es la distancia entre el suelo, usualmente al nivel del mar y la parte exterior de la atmósfera. En el espacio exterior la masa de aire es cero AM0.

Un rayo de sol perpendicular al suelo tiene una AM1, es decir una atmósfera de distancia. Esto no es lo común, pues dependiendo de la posición del Sol durante el día o el año, esta masa se incrementa y la radiación debe recorrer una mayor distancia hasta el suelo.

Mientras el ángulo ACB aumenta, la AM también aumenta. Este ángulo de inclinación varía entre 0 y 90 grados. Cuando el Sol está en el Cenit, es decir perpendicular a la tierra (al mediodía), el ángulo es cero y la AM=1; y, cuando el Sol se oculta este ángulo, se acerca a 90° y la AM=36,5 .

Las **condiciones estándar de prueba** (STC) para productos y equipos que utilizan la energía del Sol (por ejemplo, paneles fotovoltaicos, colectores termo solares) asumen la AM = 1,5; es decir, el Sol tiene una inclinación de 28,2 grados respecto

de la vertical, una temperatura de 25°C, una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> y una velocidad del viento de 1 m/s.

Si bien la radiación que llega a la tierra es menor que la que llega a la parte extraterrestre de la atmósfera, ésta actúa como un filtro de los rayos de alta energía (rayos gamma, rayos x, rayos ultravioleta), que destruirían la vida existente.

Algunos fabricantes definen las condiciones normales de operación, más reales que las STC y son: AM=1,5, radiación 800 W/m<sup>2</sup>, temperatura 20°C, y velocidad del viento 1 m/s.

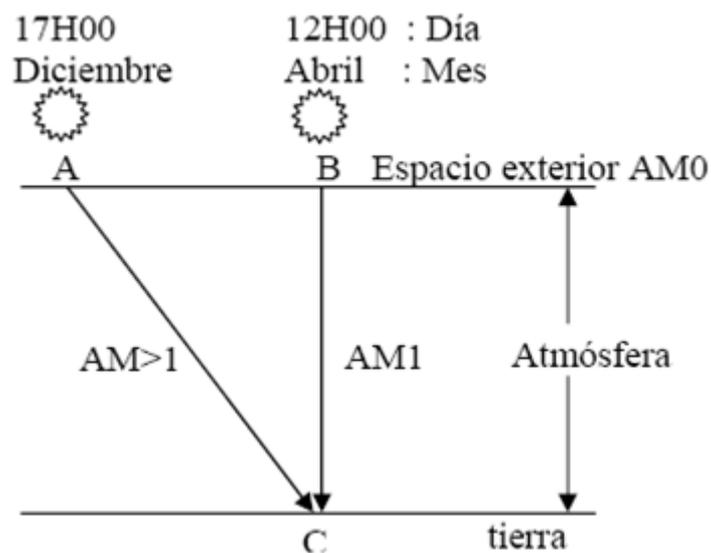


Figura 2.7 Variación anual y diaria de la masa de aire<sup>5</sup>

La figura N°2.7.- muestra la variación de la masa de aire.

<sup>5</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 26

### 2.2.1.4 Aplicaciones de la Energía Solar

El desarrollo tecnológico actual permite aprovechar la energía del Sol para los usos más diversos. Las aplicaciones pueden ser agrupadas como indica la figura N° 2.8:

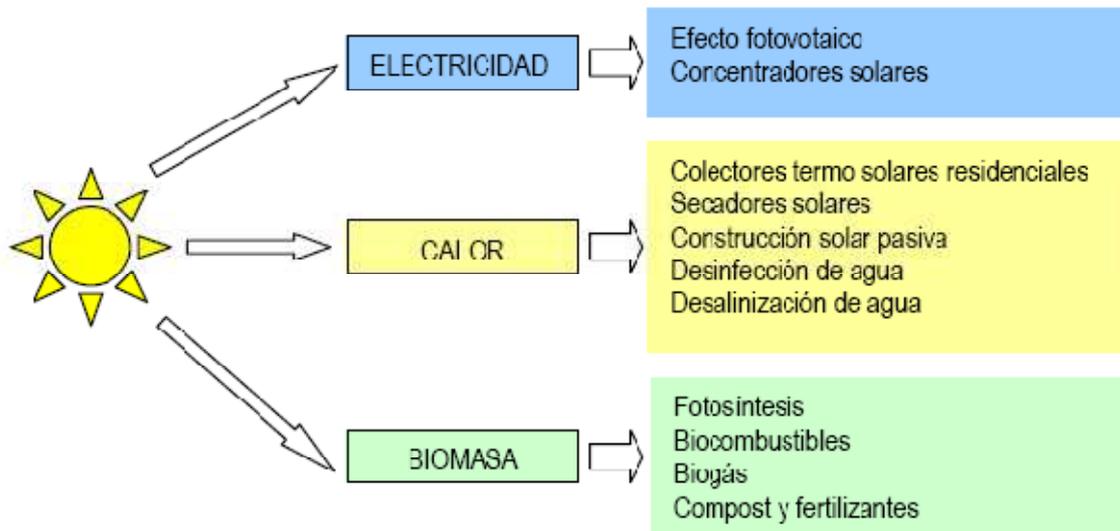


Figura 2.8 Aplicaciones de la energía solar

En los capítulos siguientes revisaremos las más importantes aplicaciones de la energía solar en diversas áreas.

### 2.2.1.5 Electricidad Del Sol

#### 2.2.1.5.1 Estructura del Átomo

Recordemos que el átomo está constituido por un núcleo, con protones de carga positiva, neutrones de carga neutra y electrones con carga negativa que giran alrededor del núcleo.

Uno de los descubrimientos más importantes en la física atómica fue que el número de electrones que ocupan las órbitas de un átomo es fijo y viene determinado por su número cuántico, siendo mayor en las órbitas más exteriores.

Una tabla periódica de los elementos nos permite conocer los orbitales (o niveles de energía) de los átomos por su número cuántico. La energía del átomo, entonces, no es continua sino discreta, es decir que aumenta a “saltos” o en paquetes, los denominados “**cuanta**” de energía, de donde se origina el estudio de la **física cuántica**.

Para que un electrón se mueva de una órbita interna a otra más externa necesita recibir una cierta cantidad de energía. Si esta es insuficiente, permanece en su orbital; y, si la energía es suficiente puede saltar al orbital siguiente o quedar libre. Si la energía es excesiva puede liberarse más de un electrón o eliminarse como pérdidas en forma de calor. El caso contrario ocurre si un electrón de un orbital exterior salta a uno interior, en este caso libera energía. Por lo general esa energía adicional proviene de los fotones.

Cuando la luz impacta sobre un objeto, el efecto que ocurre depende de tres factores:

1. De la cantidad de energía que trae el fotón;
2. De la frecuencia natural en que los electrones vibran en el material; y,
3. De la fuerza con que el núcleo (los protones) atrae a los electrones.

Los procesos que se producen al impactar la luz en el objeto pueden ser uno o varios de los siguientes: reflexión o dispersión, absorción, refracción, o pueden pasar a través del material, sin afectarse.

Cada nivel energético del átomo, determinado por sus niveles orbitales tiene una franja vacía (“gap” de energía, brecha de energía o zona prohibida) limitada en su parte superior por la llamada **banda de conducción** y en su parte inferior por la llamada **banda de valencia**. Cuando un electrón se encuentra en la banda de conducción es libre para moverse en el material.

La corriente eléctrica es justamente un flujo de electrones libres en un circuito eléctrico. Al liberarse un electrón de un átomo, queda un “**hueco**” (falta de un

electrón) y el átomo se convierte en un ión de carga positiva, por ello se dice que se genera una **pareja electrón-hueco**.

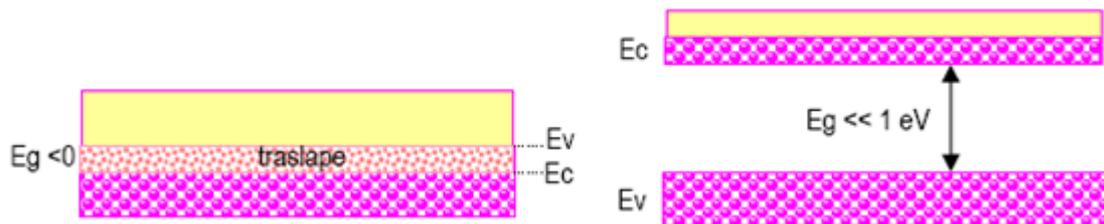


Figura 2.9 Materiales conductores

Los materiales conductores tienen facilidad para liberar electrones, pues en la última órbita tienen un solo electrón (el electrón de valencia) y al estar más alejado del núcleo la fuerza de atracción es mínima.

Los elementos conductores son los metales como el oro, la plata, el cobre o el aluminio. En estos las bandas de conducción y de valencia están muy juntas, haciendo posible que fotones o alguna excitación de otro tipo como un campo eléctrico, un campo magnético o el calor, generen electrones fácilmente. El gap o brecha de energía en estos materiales es cero o mucho menor que 1 eV, como se muestra en la figura N° 2.9.

Otros elementos se conocen como aislantes, figura N° 2.10, es decir que no tienen electrones de valencia. Un material aislante, por ejemplo, es la cerámica ya que no permite la circulación de una corriente eléctrica.

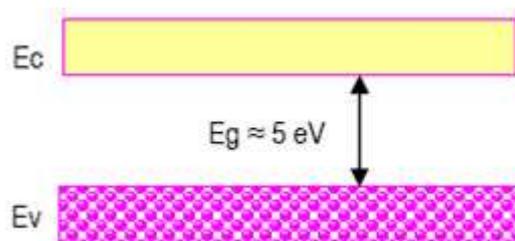


Figura 2.10 Materiales aislantes

En un material aislante la franja entre las bandas de conducción y de valencia es muy grande y no hay fotones con la suficiente energía para “cargar” a un electrón para que salte. La brecha de energía en los aislantes está cercana a los 5eV.

Hay elementos que permiten la circulación de corriente eléctrica en determinadas condiciones y se llaman semiconductores. Los elementos semiconductores son cristales como el Silicio, el Germanio, o el Arsenuro de Galio, que se utilizan en la fabricación de elementos electrónicos como los circuitos integrados, el transistor o el diodo.

La celda solar es un tipo de diodo fabricado con materiales semiconductores. En los semiconductores típicos como el Silicio, la brecha de energía es de 1,11 eV, como se muestra en la figura N°.11.

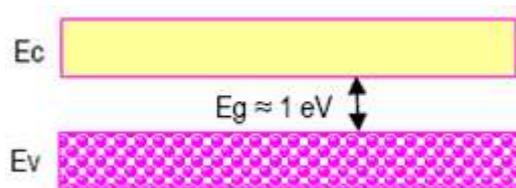


Figura 2.11 Materiales semiconductores

#### 2.2.1.5.2 Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico explicado por Albert Einstein en 1905, que le hizo acreedor al Premio Nobel en 1921 y dio origen a la teoría de la física cuántica, se produce al incidir la luz en un metal. Al impactar en el metal, los fotones liberan electrones y se genera una corriente eléctrica en un circuito.

La cantidad de electrones liberados es función de la frecuencia de los fotones que inciden más que de la intensidad de la luz.

Solo fotones de ciertas frecuencias tienen la cantidad de energía requerida para liberar los electrones.

Obviamente una mayor intensidad (número) de fotones de esa frecuencia liberará más electrones. Este concepto nos ayudará a explicar el funcionamiento de la celda solar.

### 2.2.1.5.3 Funcionamiento de la Celda Solar

El átomo de silicio tiene un número atómico 14. Es decir, tiene 14 electrones y 14 protones, con sus dos primeras capas orbitales llenas (2 y 8 electrones respectivamente).

La tercera capa orbital puede tener hasta 8 electrones pero el silicio solo ocupa cuatro, quedando cuatro "huecos" libres. En un cristal de silicio los átomos "enlazan" sus electrones con los huecos del átomo contiguo formando una unión muy sólida entre sí. Un cristal de silicio puro es un aislante pues no tiene electrones libres. Este se conoce como **silicón intrínseco**, figura N°2.12.

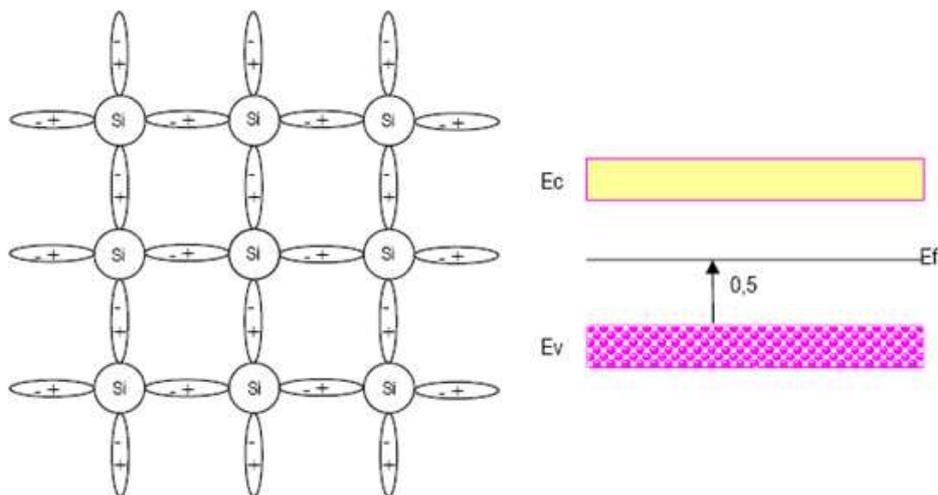


Figura 2.12.- Estructura atómica del silicio intrínseco o puro y bandas de valencia y conducción

La probabilidad de encontrar un electrón entre la banda de valencia y la de conducción es de 0,5 pues el elemento se encuentra en equilibrio, lo cual viene determinado por el **Nivel de Energía de Fermi** de ese material.

Para comprender este concepto imaginemos que los electrones, dependiendo de su energía van ocupando los niveles orbitales de energía desde el de menor energía hasta el de mayor energía. A la temperatura del cero absoluto, la capa más exterior de estos niveles, es decir la de máxima energía es el Nivel de Energía de Fermi.

Con el aumento de la temperatura o por la acción de los fotones, la probabilidad de que los electrones pasen a la banda de conducción aumenta.

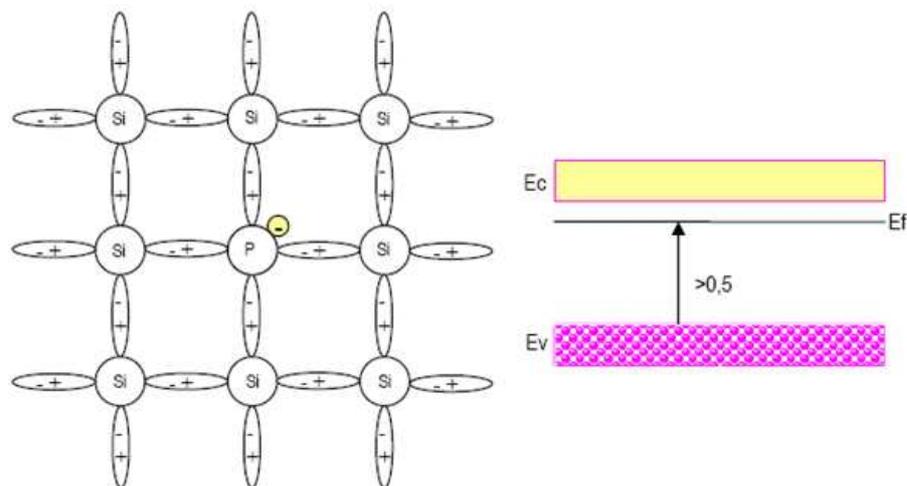


Figura 2.13 Estructura atómica del silicio dopado con fósforo, semiconductor tipo n

Si al silicón intrínseco introducimos impurezas combinándolo con otro elemento, podemos cambiar las propiedades del material y favorecer la creación de electrones o huecos libres. Esto se denomina dopar el material.

Dos elementos son los preferidos para este propósito: el fósforo (símbolo químico P), que tiene 5 electrones de valencia y el boro (símbolo químico B) que tiene 3 electrones de valencia. El silicio así dopado se lo conoce como **silicio extrínseco**.

Al introducir un átomo de fósforo tenemos un electrón adicional, el material es un donante de electrones y se llama **material tipo n** (por ser negativo). El nivel de energía de Fermi se acerca a la banda de conducción, figura N°2.13.

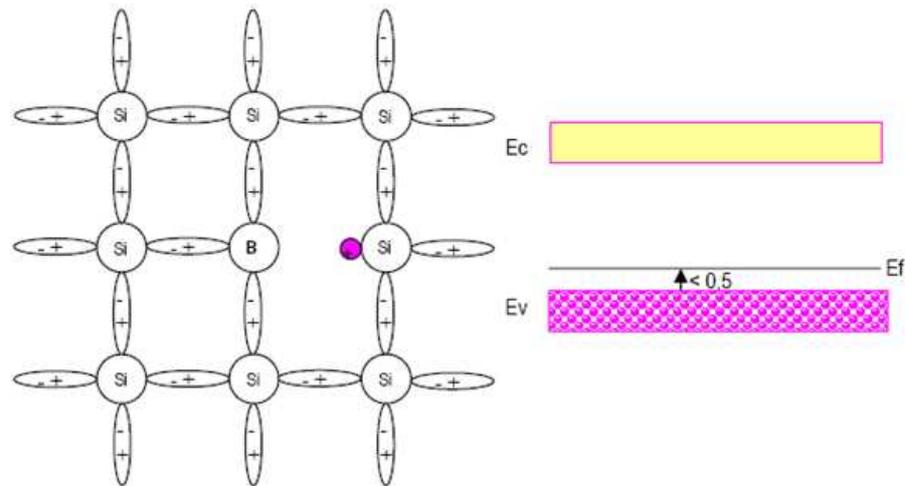


Figura 2.14 Estructura atómica del silicio dopado con boro, semiconductor tipo p

En el caso del boro queda un hueco libre, el material es un receptor de electrones y se lo conoce como **material tipo p** (por positivo). El nivel de energía de Fermi se acerca a la banda de valencia, figura N°2.14.

#### 2.2.1.5.4 Unión n-p

Al unir los dos tipos de semiconductores n y p los niveles de Fermi se alinean y se produce en una primera instancia un intercambio rápido de iones (positivos y negativos) entre los dos materiales.

Los niveles de Fermi iniciales de los materiales separados se mueven: en el caso del material tipo p asciende hacia la banda de conducción, adquiriendo un potencial negativo (de  $E_{fo-p}$  a  $E_f'$ ); y para el material tipo n desciende a la banda de valencia, con un potencial positivo (de  $E_{fo-n}$  a  $E_f'$ ).

Se ha formado en la unión una diferencia de potencial o campo eléctrico entre los dos materiales. El nivel de energía (o voltaje) en la zona prohibida  $E_g$  se reduce por los voltajes  $V_n$  y  $V_p$ . Para el caso de una unión n-p con silicón dopado  $V_n + V_p \approx 0,3$  V, por lo que el voltaje de la unión  $V_B$  sin aplicar una corriente externa es de aproximadamente 0,8 V.

Debido a la temperatura, en la zona de intercambio se produce un flujo de electrones desde el material n hacia el p y por ende una corriente de generación  $I_g$ . Para mantener el equilibrio eléctrico en el material, se crea una corriente de recombinación  $I_r$  de igual magnitud y sentido opuesto a  $I_g$ , figura N°2.15.

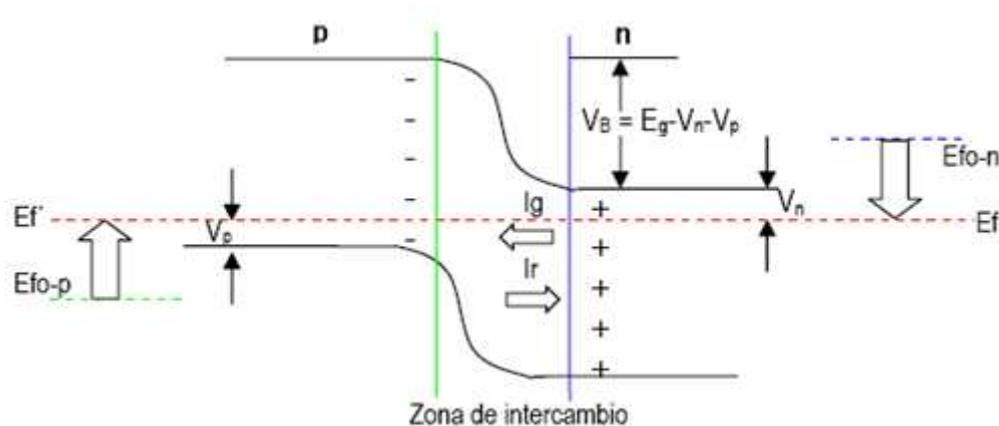


Figura 2.15 Unión p-n, los niveles de Fermi se igualan<sup>6</sup>

Si aplicamos un voltaje hacia delante (forward bias)  $V$  a los extremos del material p-n, se incrementa el voltaje  $V_p$  y, por ende, la corriente  $I_r$ . Si se aplica un voltaje hacia atrás (reverse bias) se aumenta el voltaje  $V_n$  y se reduce la corriente  $I_r$  hasta cero. Se forma entonces una especie de compuerta electrónica que solo permite el paso de la corriente en un sentido: es decir un diodo, figura N°2.16.

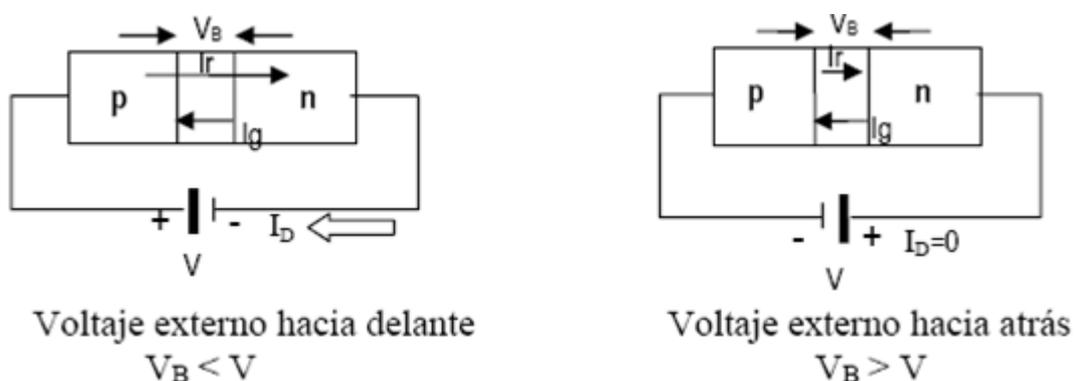


Figura 2.16 Aplicación de voltaje externo y efecto en la corriente<sup>7</sup>

<sup>6</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 32

<sup>7</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 33

La corriente resultante del diodo es:

$$I_D = I_r - I_g \quad (2.5)$$

#### 2.2.1.5.5 Efecto de la Luz en la Unión n-p

Hasta ahora hemos analizado la unión n-p en la oscuridad, es decir sin el efecto de la luz.

Sabemos que la energía de los fotones puede hacer saltar los electrones hacia la banda de conducción. Como se ha reducido la banda de energía y creado un campo eléctrico que atrae a los electrones en la zona de intercambio, al impactar los fotones en los electrones de la zona de intercambio los hace saltar hacia el lado p y se crea una **corriente de generación por fotones  $I_L$**  que se suma a la corriente de generación  $I_g$ . Se produce un efecto similar al del diodo con un voltaje externo hacia delante pero en este caso el “voltaje externo” proviene del Sol: hemos generado así una corriente eléctrica en un semiconductor extrínseco, como se muestra en la figura N°2.17.

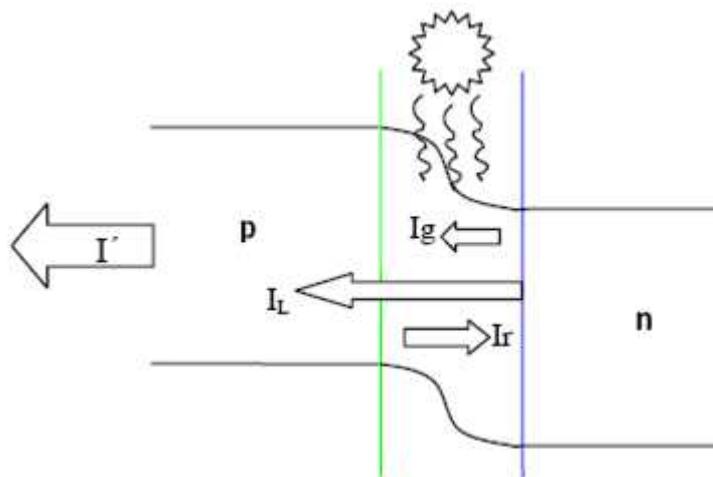


Figura 2.17 Corrientes actuantes en una celda solar

La corriente resultante de la celda solar:

$$I = I_L + I_g - I_r = I_D - I_L \quad (2.6)$$

La corriente  $I$  que genera una celda solar viene dada por la ecuación:

$$I = I_L - I_s \exp\left(\frac{V}{V_T}\right)^{-1} \quad (2.7)$$

**Donde:**

<b>I</b>	<b>: Corriente de la celda solar en el circuito eléctrico</b>	<b>[A]</b>
<b>I<sub>L</sub></b>	<b>: Corriente generada por los fotones en la celda solar</b>	<b>[A]</b>
<b>I<sub>s</sub></b>	<b>: Corriente de saturación con voltaje externo hacia atrás máximo antes de la ruptura de avalancha</b>	<b>[A]</b>
<b>V</b>	<b>: Voltaje externo de la celda solar</b>	<b>[V]</b>
<b>V<sub>T</sub></b>	<b>: Voltaje propio de la celda en función de la temperatura</b>	<b>[V]</b>

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.8)$$

**Donde:**

<b>q</b>	<b>: Carga del electrón 1,6 x 10<sup>-19</sup></b>	<b>[C]</b>
<b>k</b>	<b>: Constante de Boltzman 1,38x10<sup>-23</sup></b>	<b>[J K<sup>-1</sup>]</b>
<b>T</b>	<b>: Temperatura absoluta de la celda solar</b>	<b>[K]</b>

### 2.2.1.5.6 Circuito Equivalente de la Celda Solar

La celda solar real puede ser representada por el siguiente circuito eléctrico equivalente, en la figura 2.18,

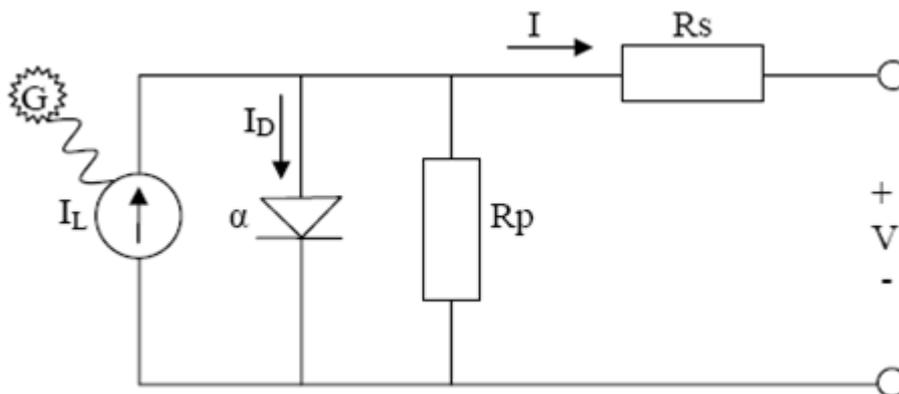


Figura 2.18 Circuito eléctrico equivalente de la celda solar<sup>8</sup>

Resolviendo el circuito para la corriente  $I$  de la celda solar tenemos:

$$I = I_L - I_D - \frac{(V - IR_s)}{R_p} \quad (2.9)$$

**Donde:**

- $R_s$**  : Resistencia en serie y representa las pérdidas de los contactos superior e inferior entre la celda y los terminales de corriente [Ω]
- $R_p$**  : Resistencia en paralelo y representa los defectos estructurales al interior de la celda que producen pérdidas. [Ω]
- $I_L$**  : Corriente generada por los fotones en la celda solar [A]
- $I_D$**  : Corriente del diodo que depende de las características y calidad de la celda y de la radiación solar [A]
- $V$**  : Voltaje externo de la celda solar [V]

<sup>8</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 34

### 2.2.1.5.7 Curva Corriente-Voltaje de la Celda Solar

El funcionamiento de una celda solar se puede representar por una **curva de corriente-voltaje I-V** como la de la figura N° 2.19. Cuando la celda no está conectada tenemos un voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$ , y cuando la celda está en cortocircuito la corriente es  $I_{sc}$ . Para un incremento en el voltaje desde 0 hasta  $V_{oc}$  la corriente es casi constante hasta un voltaje máximo  $V_{max}$  y de allí desciende rápidamente. Como  $P=V \times I$ , en cualquier punto podemos calcular la potencia  $P$ , lo cual se muestra en la curva de segmentos.

Lo que nos interesa es obtener la máxima potencia, es decir cuando el área del rectángulo  $V \times I$  es máxima. El punto  $P_{max}$  se conoce también como **punto de máxima potencia (MPP)**.

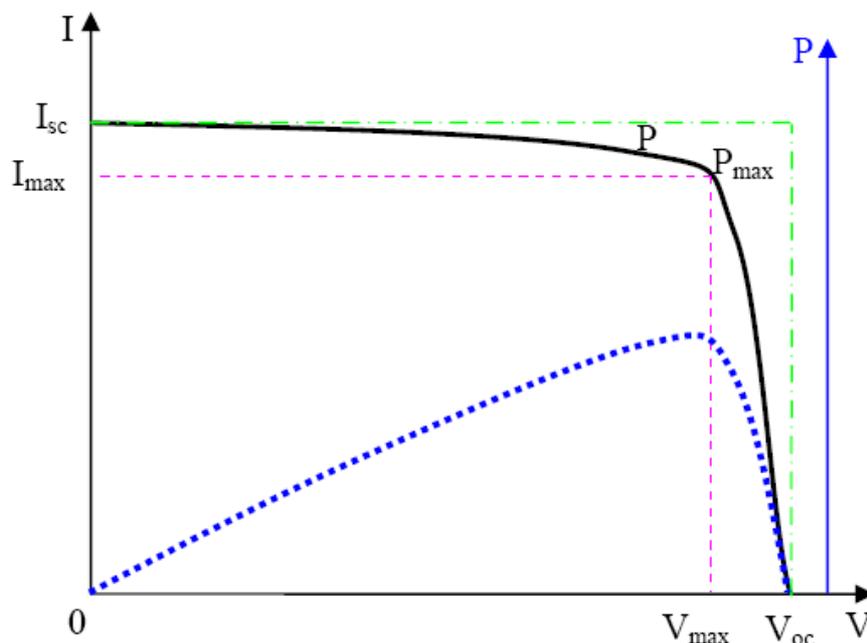


Figura 2.19 Curva corriente voltaje y potencia de la celda solar<sup>9</sup>

La calidad de una celda solar se determina por la relación entre el área del rectángulo  $V_{oc} \times I_{sc}$  y el área del rectángulo  $V_{max} \times I_{max}$  y se conoce como **factor de cuadratura** (fill factor).

<sup>9</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 35

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.10)$$

### 2.2.1.5.8 Efectos de la Radiación y la Temperatura

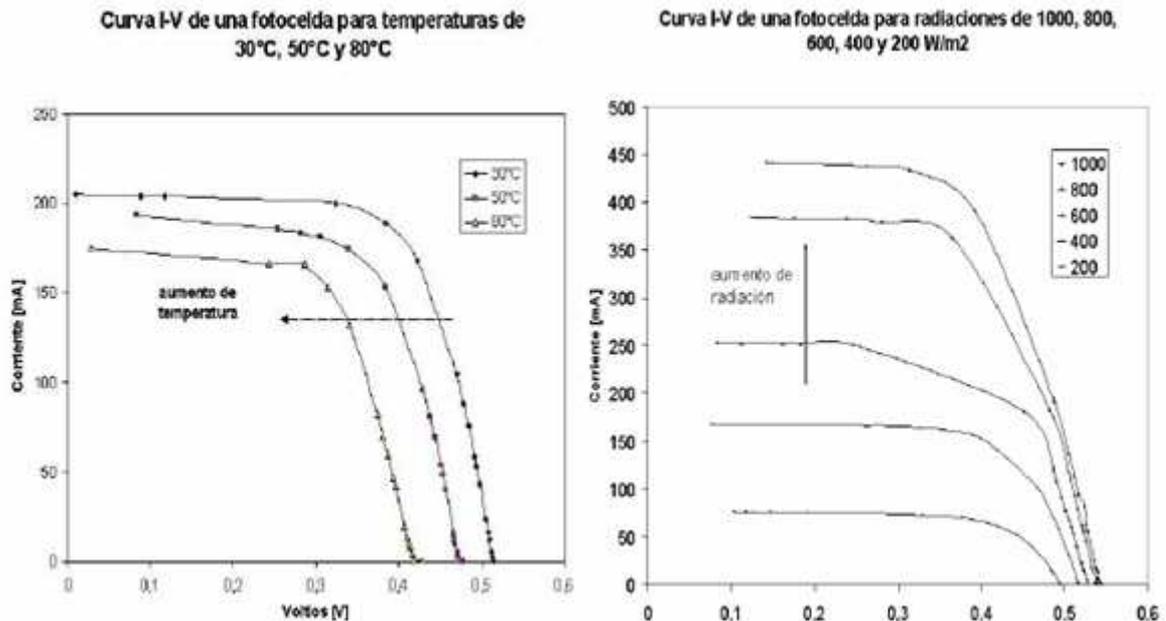


Figura 2.20 Efectos de la variación de la temperatura y la radiación en la curva I-V de la celda solar<sup>10</sup>

Las gráficas de la Figura N°2.20, tomadas de un fabricante de paneles fotovoltaicos nos muestran las curvas I-V para diferentes valores de radiación solar y temperatura en condiciones estándar de prueba (STC).

Como vemos, el voltaje es inversamente proporcional a la temperatura y la corriente  $I$  es proporcional a la radiación solar  $G$ , es decir que la potencia de este panel se reduce con el incremento de la temperatura y se incrementa con la radiación. La temperatura es la de la celda y no la del ambiente.

Los paneles pueden llegar a temperaturas superiores a los 75°C, y la pérdida de potencia respecto de las STC (a 25°C) puede llegar hasta un 25% de la potencia nominal. Este es un factor muy importante a tomar en cuenta en el diseño de sistemas solares fotovoltaicos especialmente en zonas cálidas como el Ecuador.

<sup>10</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 36

La pérdida relativa de potencia con el cambio de radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $200 \text{ W/m}^2$  es del 10%.

#### 2.2.1.5.9 Eficiencia de la Celda Solar

Conocemos que la eficiencia es la relación entre la potencia de entrada y la potencia (o trabajo) de salida. La eficiencia se puede determinar para una celda o para el módulo fotovoltaico con las ecuaciones siguientes:

$$\eta_c = \frac{P_M}{G \cdot A_c \cdot N_c} \quad (2.11)$$

$$\eta_M = \frac{P_M}{G \cdot A_M} \quad (2.12)$$

**Donde:**

$\eta_c$	: Eficiencia de una celda de un panel fotovoltaico	
$P_M$	: Potencia nominal del panel fotovoltaico	[Wp]
$G$	: Radiación solar	[W/m <sup>2</sup> ]
$A_c$	: Área de la celda	[m <sup>2</sup> ]
$N_c$	: Número de celdas en el panel	
$\eta_M$	: Eficiencia del panel fotovoltaico	
$A_M$	: Área total del módulo	[m <sup>2</sup> ]

Como podemos notar, la eficiencia de una celda es obviamente mayor que la del módulo debido al espacio que hay entre las celdas del módulo. La relación de áreas muestra que un 20% del módulo no está cubierto por celdas.

#### 2.2.1.5.10 Tipos de Celdas Solares

Existen básicamente tres tipos de celdas solares dependiendo del proceso de fabricación: monocristalino, policristalino y de película delgada o de silicio amorfo (thin film).

La **celda monocristalina** se fabrica de un solo cristal “crecido” que va formándose poco a poco hasta formar un bloque. Las celdas son luego cortadas en rodajas delgadas de 250 a 350  $\mu\text{m}$ , figura N°2.21.

El límite de eficiencia de la celda cristalina es de alrededor del 25%. Actualmente este tipo de celdas llegan a eficiencias del 15% a 17%. Se las diferencia porque tienen un color uniforme y generalmente son circulares o cortadas en sus bordes.

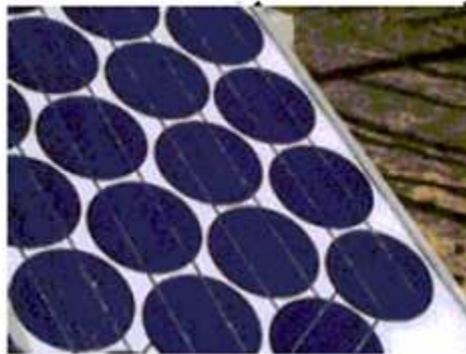


Figura 2.21 Celda monocristalina

La **celda policristalina** se fabrica con cristal de silicio fundido que se pone en un molde. Es más barata que la celda monocristalina, pero su eficiencia límite es del 20%. Se la reconoce porque su color es irregular y más claro que la monocristalina y tiene una forma rectangular sin cortes en los bordes, figura N°2.22.

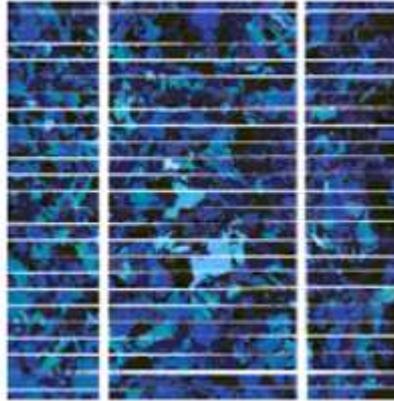


Figura 2.22 Celda policristalina

La **celda de película delgada o silicón amorfo** utiliza una nueva tecnología que consiste en una película delgada de cristal de silicio puro sobre un sustrato de vidrio o cerámica, figura N°2.23.

Esta capa no supera los 20  $\mu\text{m}$ , es decir casi un tercio de grueso que un cabello. El espesor de toda la celda es de 300 a 800  $\mu\text{m}$ . El sustrato también puede ser plástico lo cual permite obtener un panel flexible. Actualmente la eficiencia de estas celdas está en alrededor del 10% aunque en laboratorios se ha logrado llegar a niveles del 19%<sup>14</sup>. La ventaja de esta tecnología es que es mucho más barata que las celdas cristalinas y en el proceso de fabricación no se utilizan elementos contaminantes.

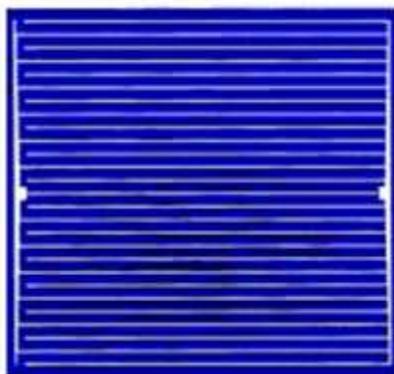


Figura 2.23 Celda de silicio amorfo

Otras tecnologías son las **celdas contrachapadas o multicapa** que consisten en poner una capa sobre otra con distintos materiales y diferentes niveles de energía para aprovechar la mayor parte de las frecuencias del espectro electromagnético.

Los materiales que se emplean para la fabricación de celdas solares son principalmente: varios tipos de silicio, arsenuro de galio, cobre indio diselenuro y telurio de cadmio. Su uso depende de la aplicación a la que estarán destinados y de la fuente de luz.

El color azulado de la celda se debe a la película antirreflejo que se coloca para optimizar la absorción de la luz solar.

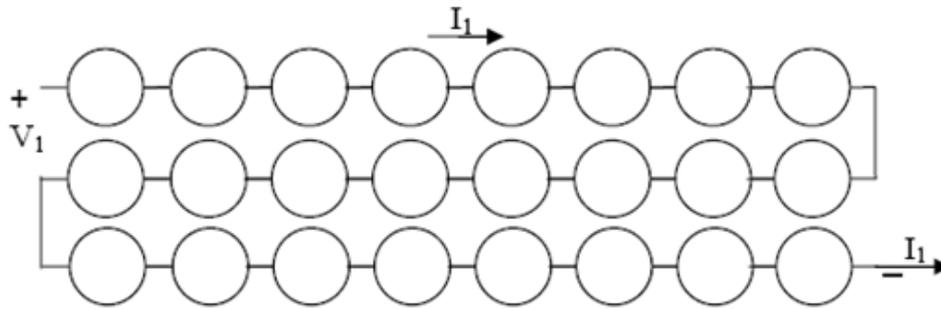
Se está investigando también en celdas orgánicas, que funcionan como un proceso reverso de fotosíntesis. La eficiencia en laboratorios ha llegado a 1,5%.

#### *2.2.1.5.11 Conexión de Celdas Solares*

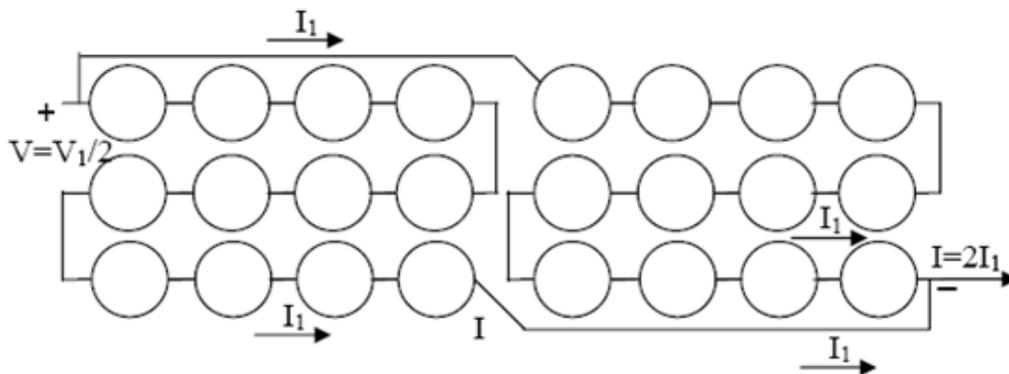
Un panel fotovoltaico se compone de varias celdas conectadas entre sí. Generalmente es el nivel de voltaje el que determina la unión de celdas en serie, hasta llegar a valores estandarizados de 6V, 12V, 24V, 36V, o 48V. Cada celda tiene 0,5 V. Para un panel de 12 V conectamos 24 celdas en serie, figura N°2.24.

La corriente en una conexión en serie es la misma, pues hay un solo camino para el circuito.

Para incrementar la corriente debemos hacer una conexión serie – paralelo en un panel, aunque lo que se prefiere es unir varios paneles en paralelo para llegar a la corriente requerida, figura N°2.24.



Módulo de conexión en serie de 24 celdas, panel de 12 V, corriente 3,8 A, potencia 45,6W,  $I_{\text{panel}} = I_{\text{celda}}$ ,  $V_{\text{panel}} = \text{suma } V_{\text{celdas}}$



Módulo de conexión en serie-paralelo de 2 x 12 celdas, panel de 6 V, corriente 7,6 A, potencia 45,6 W. El voltaje es la mitad, la corriente el doble, la potencia es la misma que la conexión en serie anterior.

Figura 2.24 Conexión en serie y conexión en paralelo de celdas solares en un panel fotovoltaico<sup>11</sup>

Si una celda se daña, o si no incide luz por efecto de una sombra, o si está cubierta, las demás celdas están activas y se produce un voltaje alto (negativo) en los terminales de la celda afectada, lo que se conoce como **corriente de fuga o avalancha** que puede destruir la celda. Para evitar esto se utiliza diodos puente (bypass diode) para juegos de algunas celdas y para permitir un paso alternativo de la corriente.

<sup>11</sup> SANCHEZ SANTIAGO, (2003), "Energías Renovables, conceptos y aplicaciones", Pág. 39

## 2.2.2 HIDRÓGENO

### 2.2.2.1 Caracterización del Hidrógeno

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido, no es detectable en ninguna concentración por los sentidos humanos, no es tóxico pero puede resultar asfixiante al diluir el oxígeno necesario en el aire respirable y es altamente inflamable y reactivo; es el elemento de menor masa atómica y es más liviano que el aire.

Un átomo de hidrógeno tiene únicamente un protón y un electrón. Además es el elemento químico más abundante en el universo, con un 90% del universo en peso, y el tercero más abundante en la Tierra.

El hidrógeno puro se presenta en forma de moléculas diatómicas ( $H_2$ ); sin embargo, en la naturaleza se encuentra principalmente en forma combinada debido a su gran reactividad, formando una gran cantidad de compuestos que incluyen el agua, hidrocarburos, proteínas, ácidos, etc.

En la Tabla N°2.3.- se muestra las principales propiedades físicas del hidrógeno.

Tabla 2.3 Propiedades Físicas del Hidrógeno.<sup>12</sup>

<b>Símbolo Químico</b>	H <sub>2</sub>
<b>Peso Molecular</b>	2.016
<b>T. Ebullición (1atm)</b>	-252.8 °C
<b>T. Crítica</b>	-239.9 °C
<b>Presión Crítica</b>	12.98 atm
<b>Densidad en estado Gaseoso (20°C, 1atm)</b>	0.08342 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidad en estado líquido (p.e. 1atm)</b>	70.96 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Peso Específico (aire=1)</b>	0.0696

La temperatura crítica corresponde a la máxima temperatura a la cual es posible mantener una sustancia en forma líquida, en el caso del hidrógeno, la temperatura crítica corresponde a -239,9 °C, apenas 33,1 °C por encima del cero absoluto (0 K).

<sup>12</sup> <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=22598402d2d44e239a30144fbf884328&ckck=1>

El punto de ebullición a presión atmosférica es el segundo más bajo en la naturaleza y solo el helio posee un punto de ebullición menor.

Como se puede observar en la Figura N° 2.25, la densidad del hidrógeno a condiciones ambientales es tan baja que equivale apenas a un 7% de la densidad del aire. Esta característica presenta una desventaja, ya que implica que se almacene menos energía por unidad de volumen que con otros gases comprimidos. Por esa razón, el almacenamiento del hidrógeno requiere de grandes volúmenes y altas presiones.

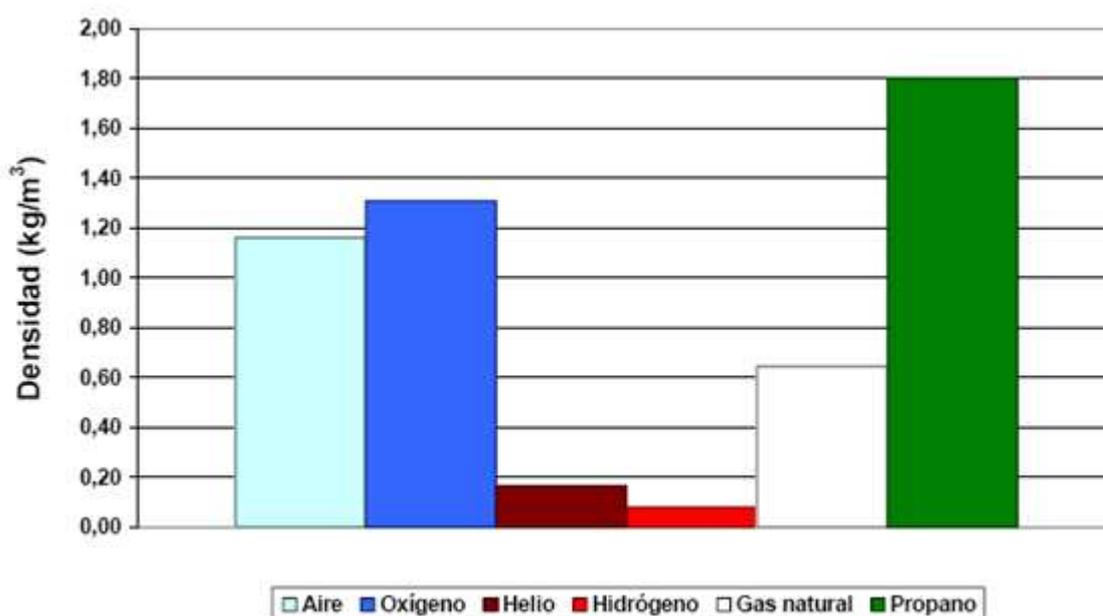


Figura 2.25 Densidad de varios gases a TPN (25°C y 101.3 kPa) <sup>13</sup>

Por su parte, aunque el hidrógeno líquido es otra alternativa de almacenamiento, pues en ese estado su densidad aumenta considerablemente, se requiere de una gran cantidad de energía para mantener el hidrógeno a temperatura y presiones muy bajas con el fin de mantener el hidrógeno en forma líquida.

En la siguiente figura N°2.26.- se muestra la densidad de algunos líquidos a presión atmosférica.

<sup>13</sup> INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD, (2006), "Análisis Actual y Tendencias Futuras de la Producción de Electricidad a partir del uso del Hidrógeno"

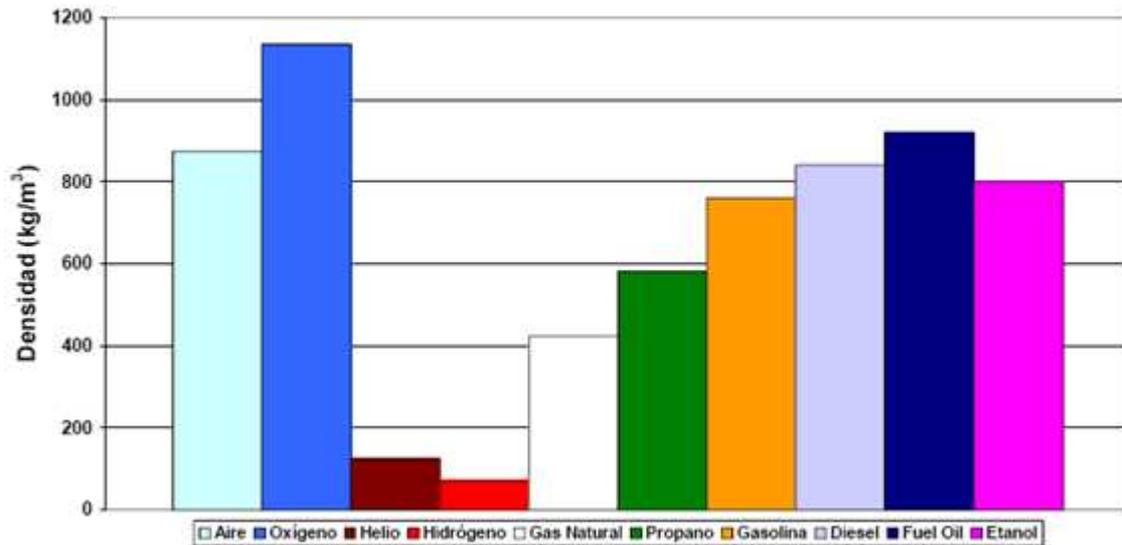


Figura 2.26 Densidad de varios líquidos a presión atmosférica<sup>14</sup>

El calor de combustión de una sustancia es la cantidad de calor que se libera en la combustión completa de un gramo o de una mole de la sustancia, comenzando y terminando la combustión a temperatura y presión normal (TPN). El calor superior de combustión o HHV1 corresponde al valor cuando se aprovecha la energía de vaporización del agua producida durante dicho proceso.

Tal y como se observa en la Figura N° 2.27, el hidrógeno posee un HHV mucho mayor que los combustibles convencionales.

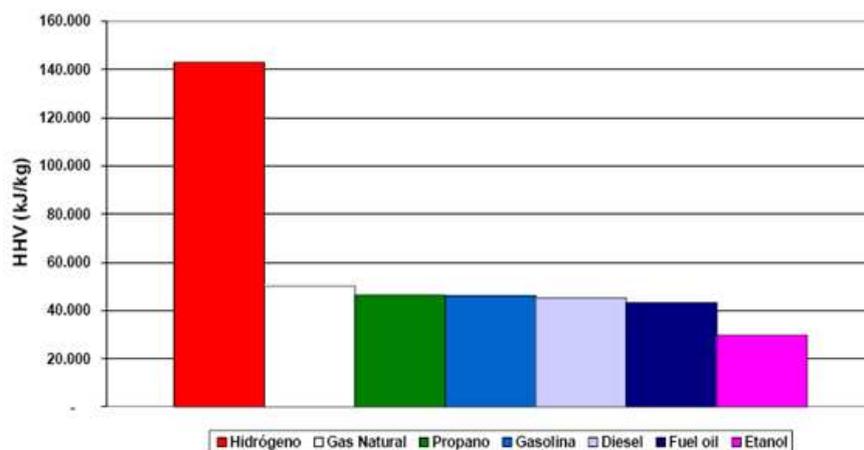


Figura 2.27 Calor de combustión de varios combustibles<sup>15</sup>

<sup>14</sup> PERRY R., (1950), "Handbook del Ingeniero Químico", 3era Edición

Sin embargo, es necesario tomar en cuenta el calor de combustión por unidad volumétrica para comparar los combustibles en el caso de almacenamiento. Tal y como se observa en la Figura N° 2.28, el hidrógeno (tanto líquido como gaseoso) continúa teniendo una gran desventaja con respecto a los combustibles convencionales.

Al ser mayor la densidad del hidrógeno líquido en comparación con el hidrógeno gaseoso, es de esperar que el calor de combustión por unidad volumétrica sea mayor cuando se utiliza hidrógeno en estado líquido.

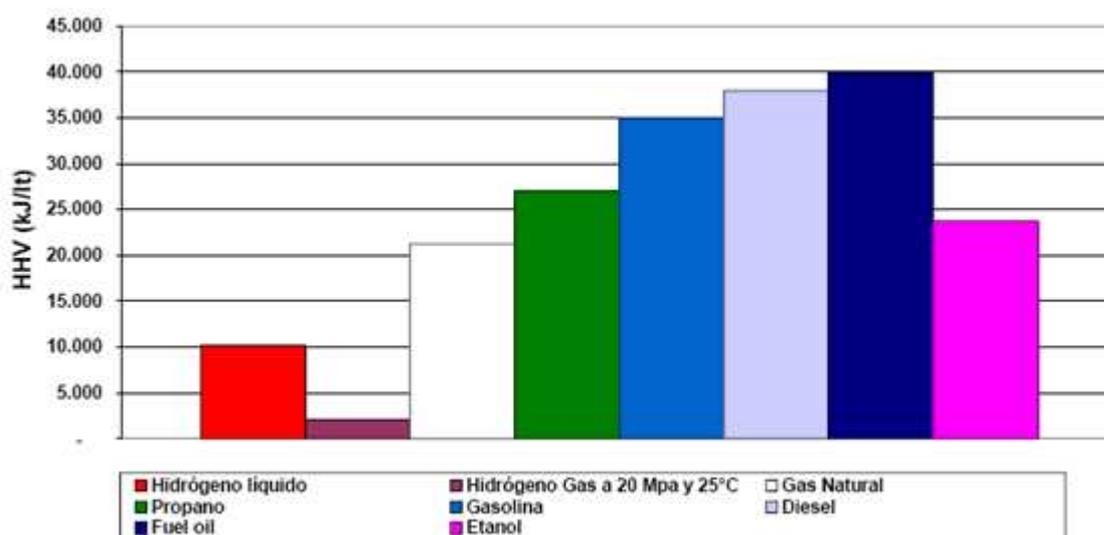


Figura 2.28 Calor de combustión por unidad volumétrica<sup>16</sup>

### 2.2.2.1.1 Poderes caloríficos superior e inferior

Tiene un alto contenido de energía por unidad de masa con unos poder calorífico superior de 141 MJ/kg e inferior de 119 MJ/kg. Estos valores son muy superiores a los de los otros combustibles convencionales, siendo el poder calorífico inferior del hidrógeno del orden de tres veces superior al de la gasolina. Debido a su baja densidad en condiciones normales, tiene una baja densidad energética por unidad de volumen con un poder calorífico inferior por unidad de volumen de 10.79MJ/m<sup>3</sup>. La densidad energética por unidad de volumen puede aumentarse al aumentar la presión o disminuir la temperatura.

<sup>15</sup> PERRY R., (1950), "Handbook del Ingeniero Químico", 3era Edición

<sup>16</sup> NATIONAL AERONAUTIC AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), (2002), Safety Standard for Hydrogen

#### 2.2.2.1.2 *Inflamabilidad*

El hidrógeno no es explosivo, es una molécula estable, y a diferencia de los explosivos, el hidrógeno necesita una fuente de ignición externa para que se produzca la ignición.

Para que el hidrógeno arda son necesarias tres condiciones: que el hidrógeno se mezcle con un oxidante, que la mezcla este dentro de los límites de inflamabilidad y que esté presente una fuente apropiada de ignición.

Las mezclas de hidrógeno con aire, oxígeno, u otros oxidantes son altamente inflamables en un amplio rango de composiciones. Los límites de inflamabilidad, en porcentaje en volumen, definen el rango en el cual los combustibles gaseosos se incendian cuando están expuestos a una fuente de ignición con suficiente energía.

Los límites de inflamabilidad son dependientes de la energía de ignición, de la temperatura, de la presión de la presencia de diluyentes y del tamaño y configuración del equipo, instalaciones o aparatos. El rango de inflamabilidad de las mezclas hidrógeno–aire e hidrógeno–oxígeno se amplía si la propagación de la llama es hacia arriba y se estrechan si la propagación de la llama es hacia abajo.

Los límites de inflamabilidad del hidrógeno en aire seco a una presión de 101.3kPa y a una temperatura de 298K son de 4.1% y 74.8%, para los límites inferior y superior respectivamente. Para el caso de la mezcla hidrógeno-oxígeno son de 4.1% y 94%. Una reducción en la presión por debajo de 101.3kPa tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, aumentando el límite inferior y disminuyendo el superior.

Una mezcla inflamable puede ser diluida con sus propios componentes hasta que la concentración de la mezcla caiga fuera de los límites de inflamabilidad (límites inferior y superior). En la siguiente figura N° 2.2 9.- se muestran los límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno.

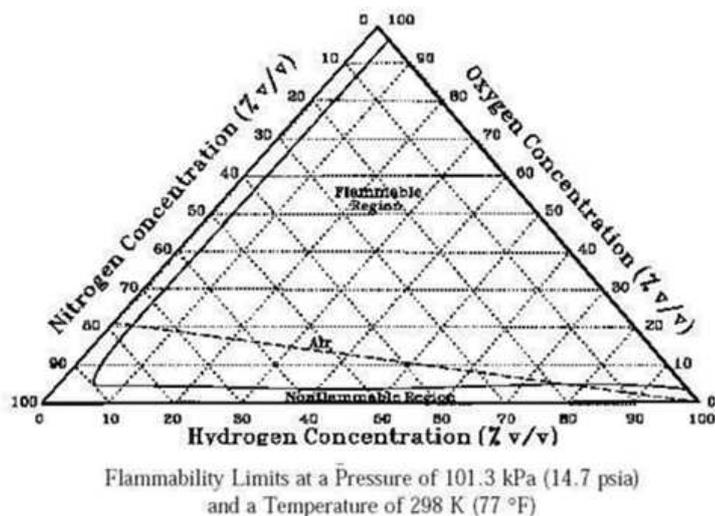


Figura 2.29 Límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno<sup>17</sup>

### 2.2.2.1.3 Temperatura de autoignición

Las temperaturas de ignición son dependientes de la concentración y presión del hidrógeno gaseoso y del tratamiento superficial de los contenedores. Las temperaturas obtenidas son muy dependientes del sistema y de los valores seleccionados y solo se deben aplicar a sistemas similares. A una presión de 101.3 KPa el rango de temperaturas de autoignición para hidrógeno estequiométrico en aire está entre 773 a 850 K; en oxígeno estequiométrico está entre 773 a 833 K.

### 2.2.2.1.4 Energía mínima de la chispa para la ignición

La mínima energía de la chispa para la ignición se define como la mínima energía de la chispa requerida para incendiar la concentración más fácilmente incendiabile del combustible en aire u oxígeno. En la siguiente tabla N° 2.4.- se muestra la mínima energía de la chispa del hidrógeno en aire para diferentes presiones:

Tabla 2.4 Energía mínima de la chispa para la ignición de una mezcla de hidrógeno-aire<sup>18</sup>

Energía mínima de la chispa (mJ)	Presión (kPa)
0.017	101.3
0.09	5.1
0.56	2.03

<sup>17</sup> COWARD H. F. and C. W. JONES, (1952), "Limits of Flammability of Gases and Vapors", Pág. 503

<sup>18</sup> NATIONAL AERONAUTIC AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), (2002), Safety Standard for Hydrogen

La mínima energía de chispa requerida para incendiar el hidrógeno es considerablemente inferior que la del metano (0.29mJ) o la de la gasolina (0.24mJ); sin embargo, la energía de ignición de estos tres combustibles es lo suficientemente baja que es relativamente cierto en presencia de cualquier fuente de ignición débil; como chispas, cerillas, superficies calientes, electricidad estática de un cuerpo humano puede ser suficiente para incendiar cualquiera de estos combustibles en aire.

#### *2.2.2.1.5 Franja de extinción*

La franja de extinción del hidrógeno a temperatura y presiones normales (NTP) del aire es de 0.6mm. Este valor depende de la temperatura, presión y composición de la mezcla del combustible gaseoso.

#### *2.2.2.1.6 Detonación*

El peor suceso resultante de la liberación del hidrógeno, es que se mezcle con un oxidante (normalmente aire), que la mezcla se sitúe dentro de las concentraciones de detonación, y que por lo tanto produzca una mezcla detonante.

La flotabilidad positiva y la rápida difusión molecular del hidrógeno gaseoso hacen que cualquier escape se mezcle rápidamente con el gas de los alrededores.

Si se produce la detonación, el resultado en la zona de reacción es una onda de choque y la onda expansiva que le acompaña que tiene un gran potencial para causar daños personales o de los equipos.

Los límites de detonación varían considerablemente con la naturaleza y dimensiones del confinamiento y no pueden ser especificadas para ninguna mezcla combustible-oxidante a menos que la naturaleza y dimensiones del confinamiento estén también especificadas.

En la siguiente figura N° 2.30.- se muestran las mínimas dimensiones de la mezcla hidrógeno-aire para la detonación en tres tipos de confinamiento a una presión de

101.3kPa, se observa a gran influencia que el tipo de confinamiento tiene en los límites de detonación.

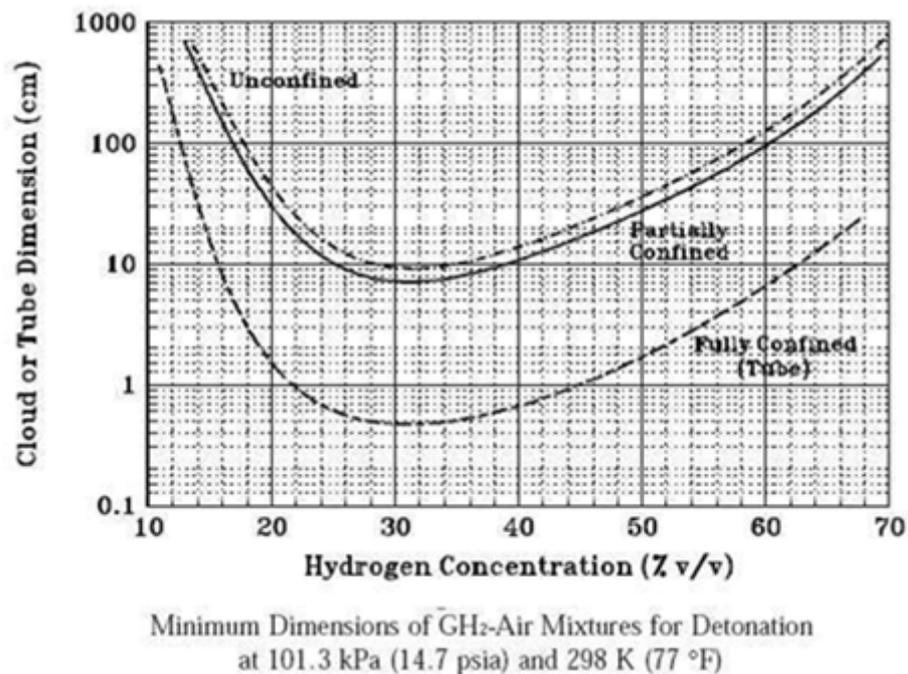


Figura 2.30 Límites de detonación de una mezcla de hidrógeno y aire dependiendo del tipo de confinamiento<sup>19</sup>

La energía de detonación aumenta para mezclas pobres y ricas; sin embargo es posible producir detonaciones sobre conducidas si se introduce gran energía de ignición. Por lo tanto los límites de detonación que se encuentran en la literatura deben ser usados con cautela.

#### 2.2.2.1.7 Transición de la deflagración a la detonación

Una combustión hidrógeno-aire puede comenzar como una detonación o como una deflagración y luego transformarse en una detonación después de que la llama haya viajado una cierta distancia.

El rango de composición en el cual se puede desarrollar una detonación es más estrecho que el de una deflagración. El rango normalmente citado para la detonación de la mezcla hidrógeno-aire es de 18.5 al 59% de hidrógeno. Sin embargo con mayores energías de ignición estos límites se pueden ampliar.

<sup>19</sup> LEE J. H. R., KYNSTANTUS, C. M. GUIRAO W. A. BENEDICK and J. E. SHEPHERD, (2002), "Hydrogen-Air Detonations",

Se necesita una fuente energética de iniciación para que una combustión comience como una detonación.

Para que una deflagración pase a ser una detonación es necesario un mecanismo de aceleración de la llama.

#### 2.2.2.1.8 *Densidad variable*

El hidrógeno es más ligero que el aire en condiciones normales (NTP) y tiende a subir a temperaturas superiores a 23 K. El vapor saturado es más pesado que el aire y permanece cerca del suelo hasta que aumenta la temperatura.

Las velocidades de flotabilidad están relacionadas con la diferencia de densidades entre el combustible y el aire; por lo tanto, el combustible gaseoso frío y denso producido por los escapes de hidrógeno líquido subirán más lentamente que aquellos a temperatura y presión estándar. La velocidad de elevación del hidrógeno en condiciones normales (NTP) en aire está entre 1.2 a 9 m/s.

#### 2.2.2.1.9 *Llama del Hidrógeno*

La llama hidrógeno-aire-oxígeno es incolora. Cualquier visibilidad de la misma es causada por impurezas. A presiones reducidas puede presentarse en un azul o morado pálidos.

- **Temperatura de la llama en aire**

La temperatura de la llama para un porcentaje en volumen de hidrógeno de 19.6% es de 2321 K.

- **Velocidad de combustión en aire en condiciones normales**

Definida como la velocidad subsónica a la que la llama se propaga a través de una mezcla de aire combustible, es de 2.7 a 3.5 m/s. Las velocidades de

combustión dependen de la presión, temperatura y composición de la mezcla. La alta velocidad de combustión del hidrógeno indica su alto potencial explosivo y la dificultad de confinar las llamas y explosiones de hidrógeno.

- **Energía térmica radiante de la llama**

La exposición a fuegos de hidrógeno puede resultar significativamente dañina por radiación térmica. La radiación térmica depende de la cantidad de vapor de agua en la atmosfera. La humedad atmosférica absorbe la energía térmica radiada desde un fuego y puede reducir los valores. Este efecto es significativo en los fuegos de hidrógeno.

La intensidad de la radiación desde una llama de hidrógeno a una distancia determinada depende fuertemente de la cantidad de vapor de agua presente en la atmosfera.

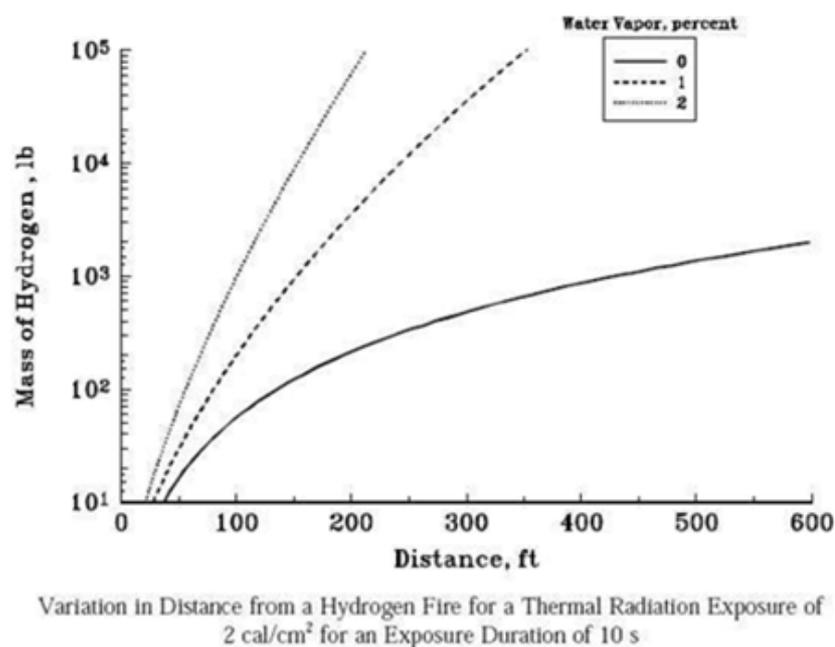


Figura 2.31 Variación de la distancia a un fuego de hidrógeno par una exposición a una radiación térmica de 2cal/cm<sup>2</sup> para un tiempo de exposición de 10s<sup>20</sup>

El coeficiente de difusión para el hidrógeno en condiciones normales es de 0.61 cm<sup>2</sup>/s

<sup>20</sup> ZEBETAKIS M. G. and D. S. BURGESS, (1961), "Research on the Hazards Associated with the Production and Handling of liquid Hydrogen"

#### 2.2.2.1.10 *Coeficiente de Joule-Thomson*

El hidrógeno tiene un coeficiente de Joule-Thomson negativo. Esto significa que el hidrógeno ante una expansión isentálpica se calienta. Aunque este calentamiento no aumenta el peligro de ignición de forma significativa.

#### 2.2.2.1.11 *Propiedades características del hidrógeno líquido*

Todos los peligros que existen con el hidrógeno gaseoso también existen con el hidrógeno líquido debido a la facilidad con la que este último se evapora. Las propiedades características del hidrógeno líquido de particular preocupación por los peligros que suponen se analizan a continuación.

- **Bajo punto de evaporación**

El hidrógeno líquido tiene el punto de ebullición a 20.3K a la presión del nivel del mar. Cualquier hidrógeno líquido aplicado en la piel o en los ojos puede producir serias quemaduras por congelación o hipotermia. Inhalar gas o vapor frío produce dificultades respiratorias que pueden tener como resultado la asfixia.

- **Formación de hielo**

Las aperturas y las válvulas de los tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido pueden bloquearse por la acumulación de hielo formado de la humedad del aire.

- **Evaporación continua**

La continua evaporación del hidrógeno líquido en las aperturas genera hidrógeno gaseoso que debe ser purgado hasta un lugar seguro o temporalmente confinado de forma segura. Los tanques de almacenamiento se deben mantener sobrepresión para prevenir que el aire entre en ellos.

El hidrógeno líquido es objeto de contaminación con aire condensado y solidificado de la atmosfera. Esta mezcla es fácilmente incendiable y puede entonces detonar.

- **Alta densidad**

La alta densidad del vapor saturado puede causar que la nube de hidrógeno fluya horizontalmente o de forma descendente inmediatamente después de liberarse en un escape de hidrógeno líquido.

### **2.2.2.2 Métodos de producción de hidrógeno**

La obtención del hidrógeno puede realizarse de varias formas y todos los procesos utilizados industrialmente son del tipo endotérmicos (requieren energía). Dado que se necesita consumir una considerable cantidad de energía en el proceso de extracción, el hidrógeno debería ser considerado como un transmisor de energía más que como una fuente de energía. Los siguientes son los principales métodos de obtención del hidrógeno.

#### *2.2.2.2.1 Reformado a vapor de agua*

Actualmente, el 5% de la producción mundial de hidrógeno se realiza a partir de gas natural y agua mediante un proceso conocido como reformado a vapor de agua. El proceso químico se realiza con la combinación de agua y una base de hidrocarburo, normalmente el gas natural, que está constituido principalmente de metano.

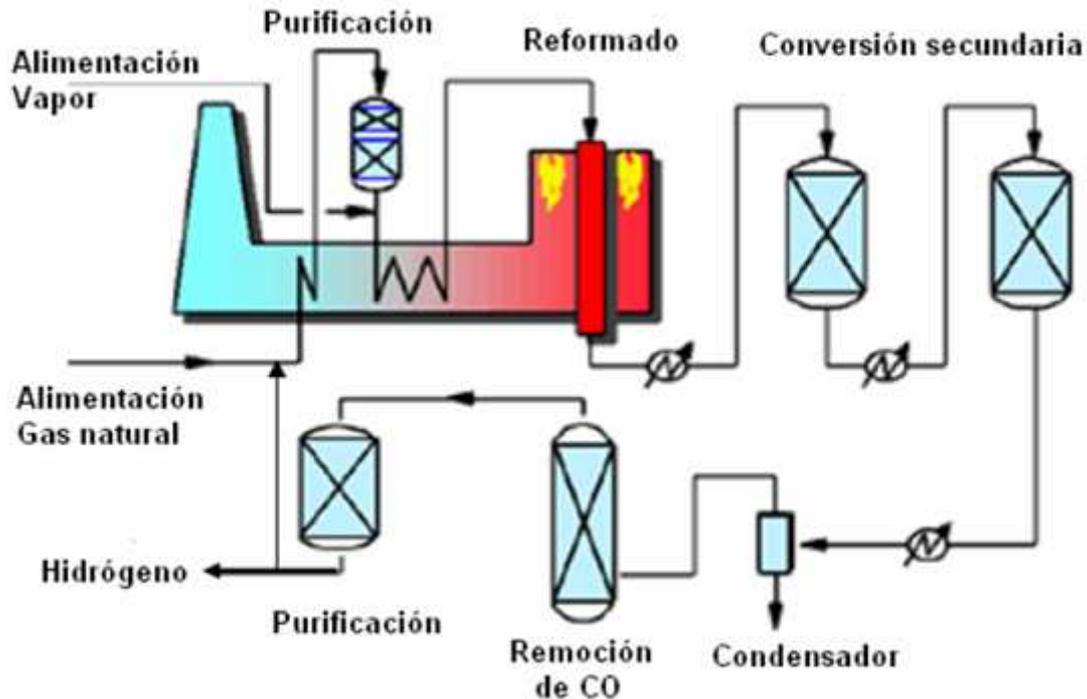


Figura 2.32 Proceso de reformado a vapor de agua

Tal y como se observa en la Figura N° 2.32, el proceso incluye tres etapas, primero se combina el vapor y el metano a alta presión (3MPa) y temperatura (entre 550 y 900°C), para producir una mezcla de hidrógeno, dióxido de carbono y otras impurezas, conocida como gas sintético.



Seguido a esto, se debe extraer el dióxido de carbono del gas sintético, y por último purificar el hidrógeno obtenido.

El rendimiento neto de conversión es típicamente de un 83%; el hidrógeno producido con éste procedimiento puede costar unos 75 centavos de dólar por kilogramo.

Una alternativa en el reformado a vapor es utilizar como materia prima un bioaceite que se obtiene a partir de biomasa por medio de pirólisis.

Existen algunos procesos alternativos al proceso de reformado con vapor que están siendo desarrollados actualmente, entre ellos cabe mencionar la oxidación parcial, donde el gas natural es oxidado parcialmente con el fin de obtener directamente gas sintético y el reformado auto térmico, en el cual se combina el proceso de reformado a vapor con el de oxidación parcial. Sin embargo, ambos procesos tienen el inconveniente de que son menos eficientes que el de reformado a vapor.

#### 2.2.2.2 Gasificación

Otras bases de hidrocarburo se pueden transformar con vapor, no obstante, hay sustancias que por sus características, no pueden ser reformadas con vapor debido al daño que provocarían a los catalizadores. El método de gasificación, no requiere el uso de catalizadores, por lo tanto, es posible utilizar una amplia variedad de materia primas que van desde líquidos de alta viscosidad como el fuel oil, hasta sólidos como el carbón mineral y la biomasa. El proceso se puede observar en la Figura N° 2.33.

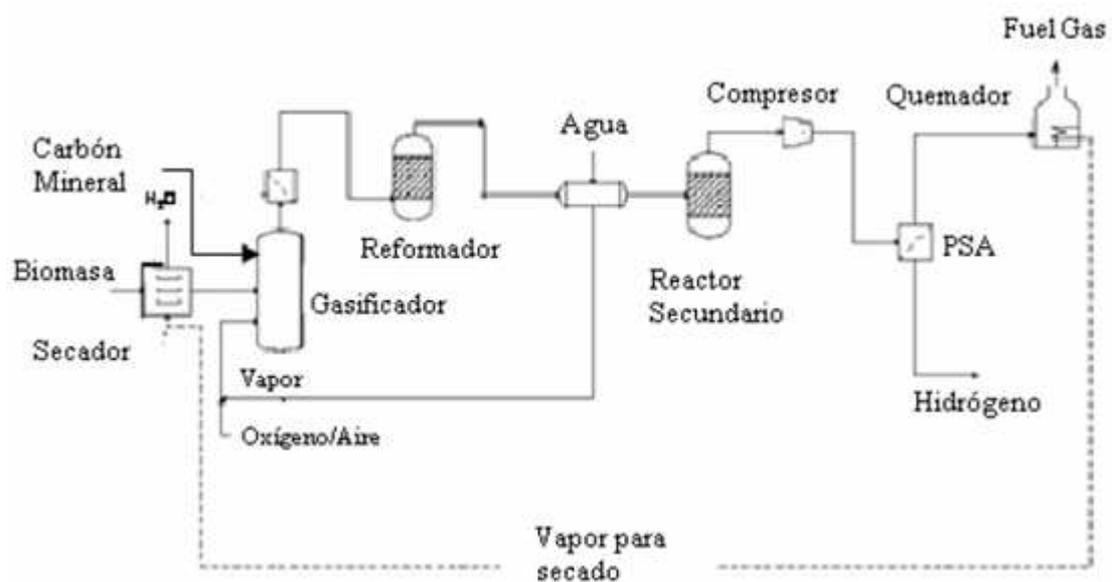


Figura 2.33 Proceso de gasificación

La gasificación se lleva a cabo a temperaturas superiores a los 1300°C para que el carbón mineral o la biomasa reaccionen con el agua y se forme gas sintético.



Al igual que el método de reformado a vapor de agua, se extrae el dióxido de carbono de la mezcla y se eliminan las impurezas.

El rendimiento neto de conversión es típicamente de un 63%; el hidrógeno producido con éste procedimiento puede costar unos 92 centavos de dólar por kilogramo.

### 2.2.2.2.3 *Electrólisis*

El tercer método más utilizado es la electrólisis, proceso mediante el cual se hace pasar una corriente eléctrica entre electrodos inertes sumergidos en agua, y así separar sus moléculas en sus elementos constitutivos: hidrógeno y oxígeno. El proceso se puede observar en la Figura N° 2.34.

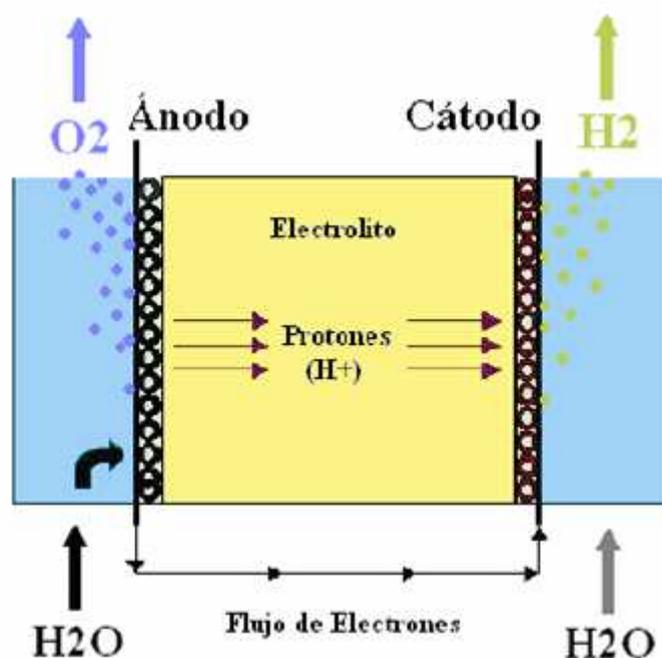


Figura 2.34 Proceso de electrólisis

Dado que el agua es virtualmente un aislante eléctrico, se le agrega un electrolito para hacerla un medio conductor; el hidrógeno se libera en el cátodo y una cantidad equivalente de oxígeno se libera en el ánodo. El líquido mismo y los separadores porosos usados en la celda electrolítica evitan que se mezclen los gases liberados, que pueden recogerse a presiones convenientes.



El rendimiento promedio durante la electrólisis viene siendo de un 65%, sin embargo, los dispositivos más modernos para la electrólisis pueden alcanzar un rendimiento entre el 80 y el 85%. En la actualidad, ésta técnica se utiliza solamente en plantas relativamente pequeñas, a un costo de entre 2,40 y 3,60 dólares por kilogramo de hidrógeno producido.

#### *2.2.2.2.4 Energía termal*

La energía termal es una tecnología que produce hidrógeno convirtiendo energía térmica en energía eléctrica para realizar la separación de las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno. Las altas temperaturas se pueden obtener en plantas nucleares, paneles solares o alguna fuente de energía fósil.

#### *2.2.2.2.5 Electrólisis a alta temperatura*

El proceso de la electrólisis a alta temperatura es una variación de la electrólisis convencional. Al proceso de descomposición del agua se le agrega calor para así utilizar menos energía eléctrica, y por ende mejorar la eficiencia del proceso. Sin embargo, desde el punto de vista térmico, el proceso es menos eficiente, es por esto que se aprovecha cuando se tienen excedentes de energía térmica.

### 2.2.2.2.6 Biofotólisis

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.

En la figura N° 2.35.- se presenta un resumen de las tecnologías de generación de hidrógeno

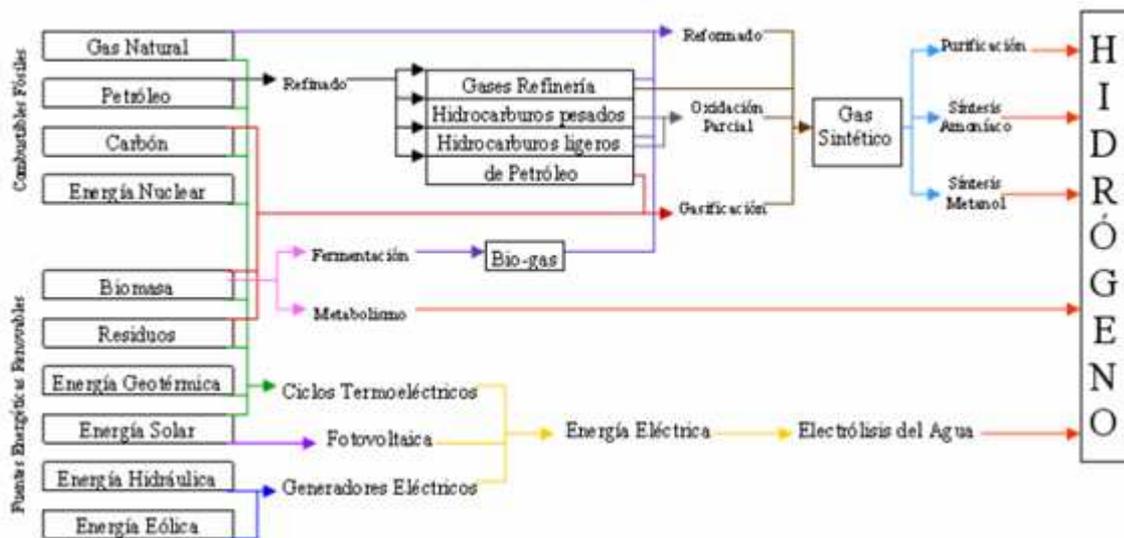


Figura 2.35 Tecnologías de generación de hidrógeno.

### 2.2.2.3 Almacenamiento y distribución del hidrógeno

El desarrollo de una economía basada en el hidrógeno dependerá de los avances logrados en la eficiencia del almacenamiento y distribución del mismo. Las tecnologías existentes presentan varias desventajas debido a las propiedades físico-químicas del hidrógeno, tal y como se detalló en la Sección 2.2.2.1.

Existen varias formas para almacenar el hidrógeno, ya sea en estado gaseoso, líquido o sólido, dependiendo de la utilización final del mismo.

#### *2.2.2.3.1 Hidrógeno en estado gaseoso*

La desventaja principal del hidrógeno en estado gaseoso es que, debido a su baja densidad, es poca la cantidad de hidrógeno por unidad de volumen que se puede almacenar.

Adicionalmente, para lograr un almacenamiento eficaz se requieren altas presiones para comprimir el gas. Actualmente, el hidrógeno se puede almacenar y distribuir como gas en contenedores y tuberías de alta presión, pero para el almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno, es preferible la utilización de minas abandonadas y cavernas subterráneas.

Otra desventaja es que el material utilizado para este tipo de almacenaje es sometido a grandes esfuerzos que pueden ocasionar fatiga, provocando grietas y volviéndolo quebradizo, debido a que el hidrógeno se introduce en el material en el que están hechos.

- **Energía necesaria para comprimir el hidrógeno**

Se necesita energía para comprimir los gases. El trabajo de compresión depende del proceso termodinámico de compresión.

La compresión isotérmica ideal no puede realizarse. De las potencias de compresión de gases surge que para compresores grandes la potencia requerida por el compresor es  $\sim 1,75$  x Potencia de Compresión Isotérmica en máquinas grandes y  $\sim 2,5$  veces en máquinas chicas. Dada la potencia de los motores eléctricos utilizados, se puede suponer un rendimiento del 85% con lo que la potencia consumida, en forma de energía, oscilará entre 2,1 y 3 veces la energía de compresión isotérmica.

Los volúmenes de 1 kg de sustancia son:

Hidrógeno  $V_0 = 11,11 \text{ m}^3/\text{kg}$

Metano  $V_0 = 1,39 \text{ m}^3/\text{kg}$

Para una presión de trabajo de  $p_0 = 1,0135 \text{ bar}$

La Figura N° 2.36 muestra la cantidad total de energía necesaria gastar para comprimir hidrógeno y metano, incluyendo compresor, motor eléctrico, grupo generador, transformadores y transmisión eléctrica en alta tensión y en baja, ambas a corta distancia.

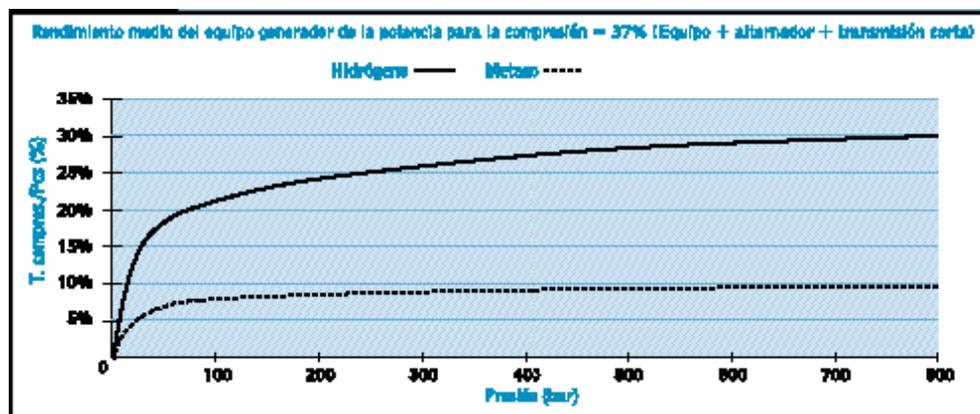


Figura 2.36 Porcentaje de energía total consumida para comprimir el gas<sup>21</sup>

- **Tuberías de alta presión**

Cuando se tiene un sistema centralizado, el hidrógeno se debe distribuir por medio de gasoductos. El gas se envía por tuberías de acero hacia los sitios de consumo, con un método similar al usado con el gas natural. Actualmente, se están investigando nuevos tipos de tuberías no metálicas como las fabricadas con polímeros reforzados por fibras de vidrio o de carbono (FRP) que han demostrado su factibilidad tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista económico.

<sup>21</sup> MUÑIZ A. H., (2009), "El Hidrogeno: Consideraciones sobre su aplicación"

- ***Cilindros de alta presión***

El transporte de hidrógeno se puede realizar con cilindros de alta presión, ya sea en vehículos convencionales o en camiones para su distribución, dependiendo del material utilizado. Actualmente, existen cilindros de acero, aluminio y plástico.

Los cilindros de acero son los más resistentes y pesados por lo que se utilizan para el transporte en camiones. El aluminio y el plástico son más livianos que el acero por lo que se consideran adecuados para el almacenaje en vehículos, pero a pesar de estar recubiertos con fibra de vidrio, no son tan resistentes como el acero.

- ***Camiones de tubos de alta presión***

Una manera más eficiente de transportar hidrógeno gaseoso es en un tube trailer, que consiste en un trailer de tubos en el que se puede almacenar más hidrógeno en comparación con los cilindros de alta presión.

#### *2.2.2.3.2 Hidrógeno en estado líquido*

- ***Contenedores criogénicos***

El hidrógeno líquido se puede almacenar en depósitos criogénicos en el que las necesidades de espacio se ven enormemente reducidas en comparación con el hidrógeno gaseoso, debido a que en esta forma el hidrógeno requiere menos volumen que el requerido para almacenar la misma cantidad de hidrógeno en estado gaseoso.

Sin embargo, su principal inconveniente es que, debido a la baja temperatura necesaria para mantener el hidrógeno en estado líquido (menor a  $-240^{\circ}\text{C}$ ), el proceso de licuefacción es muy intensivo energéticamente hablando, que supone el 30-40% de la energía que se utiliza en la producción.

### 2.2.2.3.3 *Hidrógeno en estado sólido*

Actualmente, se están investigando nuevas tecnologías para optimizar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en vehículos. El almacenaje en estado sólido se refiere a la capacidad del hidrógeno de absorberse en un material, ya sea en hidruros metálicos, en materiales de acumulación química, o en nanoestructuras.

La liberación del hidrógeno se puede realizar tanto reversible como irreversiblemente. En el proceso reversible se controla la temperatura y la presión para almacenar o liberar el hidrógeno. En el proceso irreversible, el hidrógeno se libera por reacción química con otro elemento, como el agua.

El principal inconveniente de este tipo de almacenaje es su elevado peso, sin embargo, permite almacenar más hidrógeno por unidad de volumen que en forma líquida.

- ***Hidruros Metálicos***

Los hidruros metálicos son combinaciones de aleaciones metálicas con capacidad de almacenar y liberar hidrógeno con gran seguridad; trabajan a temperatura ambiente y a presión atmosférica.

Tiene la ventaja de ser almacenadores muy seguros, pues en caso de producirse una pérdida de presión en caso de ruptura, se enfría el hidruro metálico y se inhibe la liberación adicional de hidrógeno.

Este tipo de almacenamiento es del tipo atómico, ya que la molécula de hidrógeno ( $H_2$ ) se descompone en sus dos átomos (H-H) para enlazarse con la red atómica del medio sólido formando precisamente, el hidruro metálico.

Un inconveniente que posee este tipo de materiales es que pueden deteriorarse debido al cambio de volumen que produce la emisión y absorción de calor asociadas al almacenamiento y liberación del hidrógeno.

- **Materiales Nanoestructurados**

La abundancia del carbono, su peso molecular relativamente bajo y su afinidad química con el hidrógeno le convierten en un absorbedor de hidrógeno muy conveniente. El hidrógeno interactúa con los materiales a base de carbono de una manera más efectiva que con los hidruros metálicos.

Este tipo de almacenamiento es del tipo molecular, ya que la molécula de hidrógeno queda almacenada por medio de enlaces débiles con la estructura del medio sólido.

Los nanotubos de carbono son estructuras moleculares más resistentes que el acero (de 10 a 100 veces), y están constituidos por cilindros compuestos de estructuras hexagonales de átomos de carbono. Las moléculas de hidrógeno son absorbidas en los poros de los nanotubos, ya sea dentro de la estructura del tubo o en su superficie.

**Tabla 2.5 Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.**

<b>Tecnología de almacenamiento de hidrógeno</b>	<b>Beneficios</b>	<b>Carreras</b>
Cilindros de gas comprimido.	Proceso bien comprendido hasta presiones de 200 bares accesible; puede ser un sistema de bajo coste.	A 200 bares solo pueden almacenarse pequeñas cantidades de hidrógeno; las densidades de energía a presiones más elevadas (700 bares) son comparables a las del hidrogeno líquido, pero todavía menores que la de los combustibles fósiles líquidos; el almacenamiento a altas presiones está en desarrollo.

Tanques de hidrógeno líquido.	Tecnología bien comprendida; buena densidad de almacenamiento.	Se requiere un aislamiento muy eficaz para tener temperaturas muy bajas; el coste puede ser elevado; pérdidas de hidrógeno por evaporación; el proceso de producción de hidrógeno líquido requiere mucha energía; la densidad de energía todavía es menor que la de los combustibles fósiles líquidos.
Hidruros metálicos.	Algunas tecnologías accesibles; almacenamiento en estado sólido; el sistema puede adoptar distintas formas; los efectos térmicos pueden emplearse en subsistemas; muy seguro.	Sistemas pesados; pueden degradarse con el tiempo; actualmente son muy caros; su llenado requiere un enfriamiento del sistema.
Hidruros químicos.	Las reacciones se conocen muy bien.	Cambios en la logística de gestión de residuos y en los requerimientos de infraestructuras.
Estructuras de carbono.	Pueden permitir elevadas densidades de almacenamiento; pueden ser sistemas baratos.	Ni se comprenden bien ni se han desarrollado sistemas adecuados; las expectativas iniciales no se han cumplido.

#### 2.2.2.4 Celdas de Combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico de conversión de energía química en energía eléctrica, es decir, produce electricidad a partir de un combustible y de oxígeno.

Análogamente a las baterías y acumuladores, las celdas de combustible están diseñadas para el relleno continuo de los reactivos consumidos, sus electrodos son relativamente estables, por lo que las celdas no se descargan.

En una celda de combustible de hidrógeno los reactivos utilizados son hidrógeno en el lado del ánodo y oxígeno, en el lado del cátodo; existen varios tipos, tanto tecnologías comerciales como en investigación.

##### 2.2.2.4.1 Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC)

Actualmente, las celdas tipo PEMFC5 son las más desarrolladas y consideradas las más apropiadas para el uso en vehículos convencionales.

Este tipo de celdas utilizan una membrana polimérica como electrolito, para separar el ánodo del cátodo. Cuando está sumergida en agua, la membrana polimérica es conductora de protones pero no de electrones.

El proceso para generar energía eléctrica es el inverso al de un electrolizador. El hidrógeno en el ánodo catalizador se descompone en protones y electrones que fluyen hacia el cátodo, los protones través del electrolito, y los electrones por un circuito externo.

El único residuo de éste proceso es agua, que se forma una vez que el oxígeno reacciona con los protones y electrones que llegan al cátodo. El flujo de electrones por el circuito externo es precisamente la producción de energía.

El rango de temperatura de operación en este tipo de celdas es de 70 a 200°C, y el de eficiencia de 50 a 70%. Tiene un costo cercano a los US\$ 3000/kW [3], debido al platino que se utiliza en el catalizador.

En la siguiente figura N°2.37.- se muestra los componentes de una celda tipo PEM:

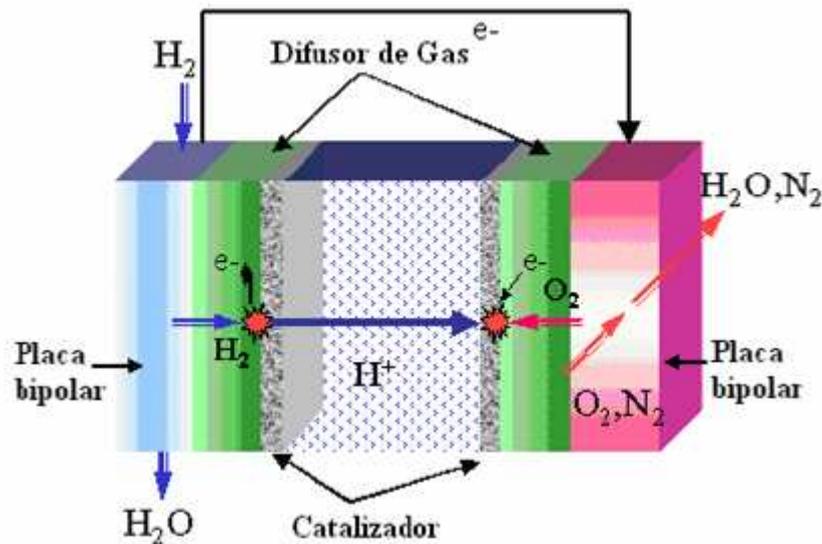


Figura 2.37 Celda de Combustible tipo PEM<sup>22</sup>

#### 2.2.2.4.2 Celda de Combustible Alcalinas (AFC)

Las celdas AFC6 tienen un electrolito de tipo alcalino, generalmente de hidróxido de potasio (KHO). El potasio puede estar circulando en el electrolito o ser inmóvil (membrana impregnada de potasio). El catalizador en el ánodo es de níquel, pero el del cátodo es a base de carbón activado.

La reacción en el ánodo con un catalizador de níquel, es de la forma:



<sup>22</sup> LÓPEZ P. N.,(2006),“Usos de la electricidad para la dotación de hidrógeno a través de la electrólisis del agua”

Y en el cátodo con un catalizador a base de carbón activado:



En este tipo de celdas, la temperatura de funcionamiento es inferior a 80° C, y la eficiencia varía de 60 a 70%.

Su principal inconveniente es que los iones de hidrógeno en el electrolito son susceptibles al dióxido de carbono, lo que implica que se debe purificar el hidrógeno y el oxígeno antes de utilizarlos, para no reducir la conductividad de iones. Además, al ser el electrolito líquido, existe riesgo de derrames.

#### 2.2.2.4.3 Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)

El electrolito de las celdas tipo PAFC es de ácido fosfórico (PO<sub>4</sub>H<sub>3</sub>), y los electrodos son películas delgadas a base carbón activado cubierto con platino.

El hidrógeno en el ánodo se disocia en protones y electrones bajo influencia del platino según la ecuación:



Y en el lado del cátodo, el oxígeno se oxida según:



Finalmente, el agua se evacua en forma de vapor.

Para que el hidrógeno y el oxígeno reaccionen en los electrodos, se utilizan unas placas de interconexión porosas o con ranuras para introducir los gases, tal y como se muestra en la figura N°2.38.

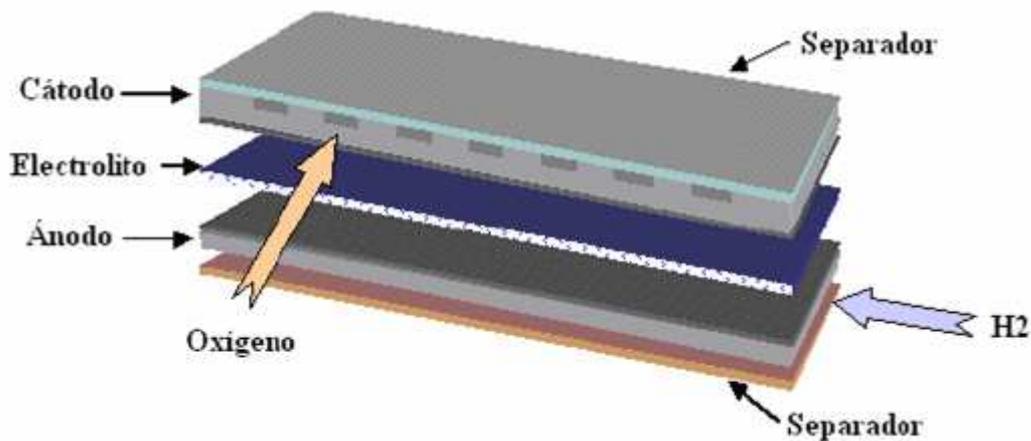


Figura 2.38 Celda de Combustible tipo PAFC<sup>23</sup>

Este tipo de celdas opera a temperaturas desde 180 a 210°C, y poseen eficiencia de 36 a 55%. Sin embargo, la eficiencia disminuye con el tiempo, debido a la evaporación del electrolito y la corrosión de los electrodos. Tiene un costo cercano a los US\$ 4500/kW.

#### 2.2.2.4.4 Celda de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)

Las celdas tipo MCFC8 utilizan como electrolito una mezcla de carbonato de litio y carbonato de potasio. Estos compuestos tienen características muy interesantes, buena conductividad iónica entre 600 y 700°C, un punto de fusión bajo y no son tóxicos.

Los iones que cruzan el electrolito son los carbonatos CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. En el ánodo, la reacción de la oxidación es:



<sup>23</sup> LÓPEZ P. N.,(2006),“Usos de la electricidad para la dotación de hidrógeno a través de la electrólisis del agua”

Y en el cátodo:



Este tipo de celda se puede alimentar con combustibles como metano, biogas, e incluso carbón gasificado. El proceso de reformado que permite obtener la mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono puede realizarse en la misma celda, tal y como se puede observar a continuación en la figura N° 2.39:

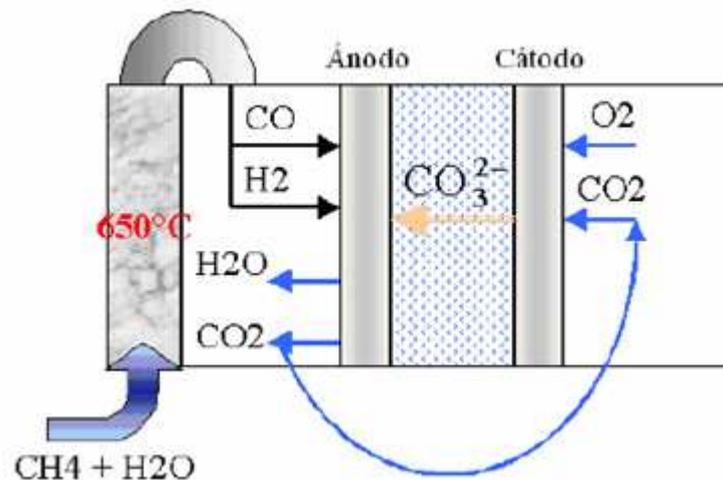


Figura 2.39 Celda de Combustible tipo MCFC con reformado interno<sup>24</sup>

La temperatura de operación en este tipo de celdas es de 650°C, y el rango de eficiencia es de 48 a 56%. Debido al nivel de la temperatura, no es necesario utilizar platino u otros metales nobles. Generalmente se utiliza níquel mezclado con cromo en el ánodo, y con iones de litio en el cátodo, reduciendo los costos de la celda.

Uno de los inconvenientes que no se han podido resolver en las celdas de carbonato fundido reside en los problemas de estabilidad de los materiales utilizados, como lo es la corrosión en los electrolitos.

#### 2.2.2.4.5 Celda de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)

Las celdas tipo SOFC utilizan como electrolito un material cerámico (de itria y óxido de zirconio sólido) que transmite los iones de oxígeno cargados negativamente a elevadas temperaturas (entre 800 y 1000°C).

<sup>24</sup> LÓPEZ P. N.,(2006),“Usos de la electricidad para la dotación de hidrógeno a través de la electrólisis del agua”

Los iones de oxígeno ( $O^{2-}$ ) son los que cruzan el electrolito. En el ánodo, la reacción de la oxidación es:



Y en el cátodo:



Al igual que las celdas de carbonato fundido, este tipo de celdas se pueden alimentar con combustibles como metano y carbón gasificado, y además, el proceso de reformado puede ser interno.

El rango de temperatura de operación en este tipo de celdas es de 800 a 1000°C, y el de eficiencia desde 50 a 70%.

#### 2.2.2.4.6 Celda de Combustible de Metanol (DMFC)

A diferencia de las otras celdas de combustible donde el hidrógeno se oxida con el ánodo, las celdas tipo DMFC se alimentan de metanol. El electrolito que se utiliza es una membrana polimérica, figura N°2.40.

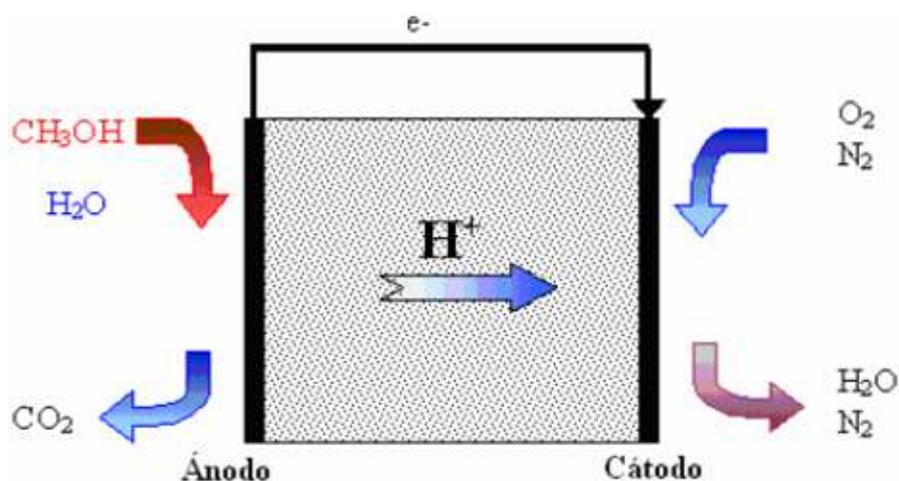


Figura 2.40 Celda de Combustible tipo DMFC<sup>25</sup>

<sup>25</sup> LÓPEZ P. N.,(2006), "Usos de la electricidad para la dotación de hidrógeno a través de la electrólisis del agua"

La ventaja de estas celdas es su funcionamiento a temperatura baja o media, debido a que el metanol es un combustible líquido a temperatura normal. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el metanol es producto del gas natural, y no se estaría evitando el uso de combustibles fósiles para la disminución de las emisiones de gases de invernadero.

El rango de temperatura de operación en este tipo de celdas es de 60 a 120°C, y el de eficiencia desde 20 a 30%.

**Tabla 2.6 Características de los diferentes tipos de celdas de combustibles<sup>26</sup>**

Tipo celda		T (°C)	Electrolito	Combustible	Eficiencia (%)	Utilización
<b>AFC</b>	Alcalina	<80	Solución Alcalina	Hidrógeno	60-70	Transporte, espacial
<b>PEMFC</b>	Membrana de Intercambio Protónico	70-200	Polímero Sólido	Hidrógeno	50-70	Transporte, generación, doméstico, portátil
<b>PAFC</b>	Ácido Fosfórico	180-210	Ácido Fosfórico	Hidrógeno, Gas Natural	36-55	Generación: Ciclo combinado y residencial
<b>MCFC</b>	Carbonato Fundido	650	Carbonato de Litio + Potasio	Hidrógeno, Gas Natural	48-56	Generación: Ciclo combinado y residencial
<b>SOFC</b>	Oxido Sólido	800-1000	Oxido de Zirconio Sólido + Itria	Hidrógeno, Gas Natural	50-70	Transporte, cogeneración, producción, centralizada de electricidad, domestico
<b>DMFC</b>	Metanol Directo	60-120	Polímero Sólido	Metanol	20-30	Portátil, transporte

<sup>26</sup> LÓPEZ P. N.,(2006),“Usos de la electricidad para la dotación de hidrógeno a través de la electrólisis del agua”

### 2.2.2.5 Aplicaciones del hidrógeno

El hidrógeno se utiliza en la industria para la obtención de amoníaco, peróxido de hidrógeno, ácido clorhídrico, alcohol metílico, y otros. Si se combina con metales, forma hidruros metálicos. Además, el hidrógeno reacciona con azufre, cloro, oxígeno y con compuestos orgánicos insaturados para formar los correspondientes compuestos saturados.

Se puede emplear en la hidrogenación catalítica de grasas, margarinas y aceites, y también como agente reductor con el fin de extraer el contenido de oxígeno en gases o en óxidos metálicos, debido a que, como es más fácil extraer el agua que el oxígeno, el gas o el óxido metálico se combina con hidrógeno para que al reaccionar con el oxígeno se forme el agua y así obtener el metal o el gas en estado puro.

Por otra parte, el hidrógeno se puede utilizar en sopletes para corte, fusión y soldadura de metales, quemando el hidrógeno con oxígeno en una llama concentrada de alta temperatura. Además se emplea en la combustión catalítica del hidrógeno para quemadores y calentadores.

Otra aplicación es el uso del hidrógeno como reductor del contenido de azufre en combustibles con el fin de disminuir los efectos contaminantes. También se utiliza en el enfriamiento de rodamientos y generadores eléctricos, en la producción de metanol y de vidrio flotado, como combustible de cohetes espaciales, y como gas de relleno en globos y dirigibles.

El hidrógeno serviría como almacenador de energía para la generación electroquímica de la electricidad mediante celdas de combustible, ya sea para el transporte o para contrarrestar el carácter intermitente de otras fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica. En el caso del transporte, el hidrógeno se emplea en motores de combustión interna obteniendo mejor eficiencia de la conversión de energía que la gasolina.

## 2.3 LA ELECTROQUIMICA

La Electroquímica representa un campo de importancia dentro de la Química general o Química física. Los procesos que tienen lugar en la naturaleza inanimada en dos grupos, uno constituido por aquellos en los cuales sólo varía el estado de la disposición o distribución de los cuerpos que toman parte en el proceso, pero conservando las características de sus materiales, y el otro que comprende los procesos en los cuales aparecen variaciones radicales en cuyo curso las sustancias presentes originariamente se han transformado en otras con propiedades completamente distintas.

La investigación de los procesos del primer grupo citado es el objeto de la Física, mientras los del otro grupo se tratan en la Química. Una y otra ciencia se diferencian además en la forma de considerar los fenómenos naturales, la Química ocupa el primer plano de interés, la peculiaridad y cantidad de cada una de las sustancias que reaccionan ó que se forman, por lo cual sólo se tratan de modo secundario las relaciones energéticas.

El objetivo primordial de la Electroquímica es el investigar los procesos en los cuales se verifica la transformación inmediata de la energía química en eléctrica y, viceversa, de la energía eléctrica en energía química. Para concretar esta limitación del campo de esta ciencia frente al de las ciencias afines se deben hacer las siguientes aclaraciones:

La mayor parte de la energía eléctrica producida por el hombre se obtiene del carbón, o sea a partir de energía química. En los métodos corrientes se transforma la energía química latente en el carbón y en el oxígeno en primer lugar en calor, luego este en energía mecánica y, finalmente, ésta en energía eléctrica.

Se trata aquí pues de un proceso en el cual la energía química se ha transformado en eléctrica dando un rodeo. Su estudio no está por ello dentro del campo de acción de la Electroquímica. Por el contrario, la producción inmediata de energía eléctrica a partir de carbón \ oxígeno, es un proceso en el que, ha puesto interés la electroquímica.

Los procesos en los cuales se transforma la energía eléctrica en química, para lo cual hay que diferenciar también como no pertenecientes a la Electroquímica aquellos en los que esta transformación no se efectúa de modo inmediato.

Se suele excluir de la Electroquímica las variaciones químicas que se observan en mezclas gaseosas en que se producen descargas eléctricas. En esencia, estos procesos se producen o bien por el fuerte calentamiento del gas o radiaciones corpusculares emitidas por la descarga. La investigación de estos fenómenos es, por misión de la Termoquímica y de la Fotoquímica, respectivamente.

En cambio se consideran como procesos electroquímicos todas las variaciones químicas que se observan en el paso de la corriente eléctrica por líquidos, en particular soluciones, mezclas de fusión o incluso algunas sustancias sólidas, como consecuencia inmediata de dicho paso de corriente. Estos fenómenos se designan con el nombre de electrólisis. El paso de corriente eléctrica se debe a un estado especial del llamado medio "electrolito", preferentemente en el caso de soluciones acuosas.

De no menor importancia para la Electroquímica son las consideraciones de tipo energético. En este aspecto hay que esclarecer sobre todo el paradero y la participación de cada tipo de energía en los procesos electroquímicos.

Los fenómenos electroquímicos se pueden clasificar en dos grupos principales:

1. Electrólisis = Transformación de energía eléctrica en energía química.
2. Galvanismo = Transformación energía eléctrica.

Cuando a un sistema cualquiera es decir un dispositivo, ni se agrega ni se sustrae energía se observará siempre que su contenido total de energía en todas las circunstancias sigue siendo invariablemente el mismo, independientemente cuáles procesos puedan tener lugar. Para ello todas las clases de energía que participen en cualquier transformación deben ser medidas en un sistema de medidas determinado.

Esta ley es conocida como la Ley de la Conservación de la energía, o Primer principio de la Termodinámica, fue enunciada por primera vez por Robert Mayer (1842). En ningún proceso puede desaparecer energía en la nada ni crearse de la nada. Es imposible la existencia de una máquina que sin recibir energía pueda rendir continuamente.

En general resulta lo más cómodo en la práctica la medición de la cantidad de energía que se encuentra a disposición en una forma cualquiera, determinar la cantidad de calor que se forma en su transformación pérdidas a la energía calorífica correspondiente. Así también, en general, la energía química que puede liberarse o desprenderse en cualquier reacción química se mide en la unidad ordinaria de la energía térmica, es decir, en calorías.

En la realización de estas mediciones hay que preocuparse cuidadosamente de que en el curso de la reacción no se produzcan en otras formas de energía que puedan pasar inadvertidas, ya sea una radiación o un trabajo de expansión que venza la resistencia a la presión del recipiente de reacción ensanchándolo una cantidad determinada.

Sólo con la eliminación de estas posibilidades de error se logra la medición de la cantidad total de calor que se puede obtener en las condiciones experimentales correspondientes, esto es, la energía química del proceso. La materia original desaparece y aparece una nueva materia con propiedades completamente diferentes.

Por consiguiente, en todos los procesos químicos se verifica la ley de la conservación de la masa (o sea de los elementos químicos) que fue reconocida primeramente por A. L. Lavoisier (1774) y que puede formularse también modo siguiente:

En cualesquier proceso químico que puede verificarse en un sistema encerrado siempre quedaría invariable el contenido total de masa, así como la masa de cada uno de los elementos químicos que han intervenido en el sistema, siempre que a este sistema no se le agregara ni se le sustrajera masa.

Sólo la energía desprendida (o absorbida) en las reacciones químicas caracterizadas simultáneamente por esta ley en la transformación completa en energía térmica puede considerarse como energía de origen químico, esto es, como energía química y sólo de la liberación de esta energía, en lo que se refiere a sus relaciones con la energía eléctrica, ha de ocuparse la Electroquímica.

El reconocimiento de que los elementos químicos, que antes se tenían por indivisibles en virtud de la ley de conservación de la masa, ya no son todos realmente estables y de que también los que no se desintegran libremente pueden sufrir transformaciones por la acción de ciertas radiaciones ricas en energía, ha hecho necesaria una revisión del concepto de elemento químico.

Hoy ya no se entiende por tal la sustancia fundamental, última e indivisible, de la materia, sino únicamente sustancias que simplemente están constituidas por átomos que en su comportamiento químico son de la misma clase (igual número de carga nuclear).

De los elementos químicos así definidos, y de los cuales se componen el inagotable número de todas las sustancias conocidas, hay en conjunto 102 clases o especies distintas conocidas hoy y que se pueden colocar en el conocido sistema periódico de los elementos formado según el orden creciente de sus pesos atómicos.

## **2.4LA ELECTROLISIS**

La electrolisis es una parte de la química que trata las relaciones 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 electrolisis 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.

La electrolisis es el proceso de descomposición de una sustancia por medio de la electricidad. La palabra electrólisis significa "destrucción por la electricidad".

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 especies químicas cargadas positiva y negativamente que tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica.

Si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrolito (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 electrolito puede entenderse con un ejemplo sencillo con la electrolisis del agua. Si el agua se disuelve en bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), sulfato de cobre II ( $\text{CuSO}_4$ ), u otro compuesto que mejore la conductividad del electrolito ( $\text{H}_2\text{O}$ ), que disocia en iones oxígeno positivos e iones hidrógeno negativos.

Al aplicar una diferencia de potencial a los electrodos, los iones oxígeno se mueven hacia el electrodo positivo, se descargan, y se depositan en el electrodo como átomos de oxígeno. Los iones hidrógeno, al descargarse en el electrodo negativo, se convierten en átomos de hidrógeno. Esta reacción de 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 electrolito sigue la ley enunciada por el químico físico británico Michael Faraday.

Cuando se aplica una diferencia de potencial a soluciones de ácidos, bases o sales, o a ciertas sustancias en estado de fusión, la conducción eléctrica se presenta acompañada por cambios de naturaleza química o física. Tal conducción se llama electrolítica, y el proceso, que se conoce con el nombre de electrólisis, se distingue

por el hecho de que los productos de la reacción química que lo acompañan aparecen separados uno del otro en las láminas conductoras o electrodos, a través de las cuales la corriente entra o sale del líquido o electrolito. Se distingue, además, por estar sujeto a las leyes de Faraday, que, condensadas en una sencilla expresión, enseñan que la cantidad de sustancia química descompuesta, expresada en equivalentes gramo, es proporcional a la cantidad de corriente que ha pasado por el electrolito.

Todo flujo de corriente eléctrica tiene inevitablemente como consecuencia los cambios químicos correspondientes o, por lo menos, un transporte de partículas materiales (y no solamente de partículas elementales de electricidad). Este fenómeno se designa como electrólisis y los conductores de segunda clase se llaman electrolitos. Entre ellos se cuentan principalmente las soluciones de sales, bases y ácidos o estas mismas sustancias fundidas.

Estas sustancias por sí solas cuando se presentan en forma cristalina son en la inmensa mayoría de los casos no conductoras. También en estado líquido la mayoría de los ácidos puros, es decir, anhídros, no son conductores o son malos conductores. En cambio, las sales y las bases, especialmente a temperatura alta, a veces en estado sólido, aunque en general sólo en estado de fusión, son en gran parte son conductoras de la corriente eléctrica.

Su conductividad varía entre amplios límites y en algunas sales fundidas especialmente buenas conductoras alcanza, a temperatura alta, valores del orden de magnitud 10 (resistencia específica del cubo de 1 cm de lado =  $1/10 \Omega \text{ cm}$ ) esto es, aún 3 órdenes de magnitud por debajo de la conductividad que tienen los peores conductores de los metales (Bi, Hg) a la temperatura ambiente.

Una conductividad parecida, aunque esencialmente peor (orden de magnitud más alto =  $1 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) se observa en las soluciones a temperatura ordinaria y sobre todo en las soluciones acuosas de ácidos, bases y sales.

La designación electrolito es corriente para estas soluciones y sustancias fundidas conductoras, lo mismo que para las propias sustancias disueltas por cuanto éstas

aumentan la conductividad del disolvente, o sea del agua, que en estado puro es mal conductora. A causa de su vaguedad no suele darse este doble sentido al término electrolito.

Así resulta posible definir un número que da la cantidad de electricidad que liberará simultáneamente una unidad equivalente en cada electrodo, y que es independiente de la naturaleza del electrolito.

La conducción electrolítica se distingue, además, de la metálica por el hecho de que la conductancia específica o conductividad, aunque variable, de un electrolito a otro, dentro de amplios límites, es de orden menor que el de la conductividad metálica.

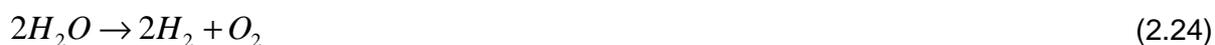
El electrodo a través del cual entra la corriente positiva, o en que la corriente negativa sale del electrolito, se conoce por el nombre de ánodo; aquel por el cual entra la corriente negativa, o la corriente positiva deja el electrolito, se llama cátodo.

Los términos polo positivo y polo negativo son ambiguos. El primer término se aplica usualmente al electrodo a través del cual la corriente positiva sale del electrolito, en el caso de una batería; pero en el caso de una vasija de electrólisis, se da este nombre al electrodo a través del cual entra en el electrolito.

#### **2.4.1 ELECTOLISIS (REACCIONES QUÍMICAS)**

El agua está compuesta por dos elementos químicos: hidrógeno y oxígeno. La separación de éstos mediante la utilización de la electricidad se llama electrólisis del agua.

En la electrólisis del  $H_2O$  (agua) se forman hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) en estado gaseoso, según la siguiente reacción:



Esta reacción no se produce espontáneamente. Para que tenga lugar es necesario aportar energía eléctrica mediante una pila galvánica o un generador de corriente continuo. Es por este motivo que la reacción se lleva a cabo en una celda electrolítica, que es un sistema electroquímico generador de sustancias, por la acción de un flujo de electrones suministrado por la fuente de voltaje externa. El hidrógeno obtenido por electrólisis del agua es muy puro pero también es muy caro debido al importante gasto eléctrico que comporta.

La electrolisis del agua puede considerarse como una fuente de energía secundaria producida a partir de la combustión de combustibles fósiles o biológicos por medio de ciclos térmicos, a partir de la energía solar por conversión foto-voltaica o a partir de la energía cinética utilizando la conversión mecánica.

La electrólisis del agua es un proceso muy común utilizado para pequeñas aplicaciones del hidrógeno. Sin embargo, si el hidrógeno va a ser usado para aplicaciones energéticas, la conversión eléctrica y la eficiencia del transporte, sumadas a la eficiencia de la conversión de la electrólisis del agua, hacen que se aproveche menos del 30% del contenido energético de la fuente de energía primaria.

#### **2.4.2 TIPOS DE ELECTROLIZADORES**

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

- **Polymer Electrolyte Membrane (PEM)**

En un electrolizador tipo PEM 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.

- **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 monoplares 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.

- **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

## 2.5 TEORÍA IÓNICA

Según la teoría iónica, las moléculas de los electrolitos están parcial o totalmente disociadas en partículas cargadas o iones, siendo la carga de cada equivalente gramo igual a la constante de Faraday, de 96500 culombios.

Así, las moléculas del cloruro sódico disuelto se componen, en gran parte de cationes de sodio cargados positivamente, indicados al principio por el símbolo Na ahora, usualmente, (Na<sup>+</sup>), y un, número igual de aniones de cloro cargados negativamente, indicados por Cl o por Cl<sup>-</sup>; mientras que el sulfato sódico disuelto se compone, análogamente, de cationes de sodio y la mitad de su número de aniones sulfato bivalente, indicada por SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> o por SO<sub>4</sub><sup>- -</sup>.

La carga de 23 g de ion sodio es de 96500 culombios de electricidad positiva, mientras que 35,5 g de ion cloro o 48 g de ion sulfato llevan una carga negativa similar. Lo que, en un tiempo, fue probablemente la dificultad más seria presentada la teoría iónica, ha sido resuelto por las teorías modernas de la estructura atómica.

## 2.6 LEYES DE FARADAY

El aspecto cuantitativo, referente a la relación entre la cantidad de electricidad que pasa por una solución, respecto al material y los fenómenos electrolíticos que fue investigado primeramente con precisión por M. Faraday (1834), físico y químico inglés.

Sus dos leyes, designadas en su honor como leyes de Faraday y que son las leyes fundamentales que expresan las reglas que rigen en la electrólisis, se pueden formular de la siguiente fórmula.

- 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, o en sentido inverso.
- Las cantidades de sustancias puestas en libertad en los distintos electrodos por las mismas cantidades de electricidad (o en cualquier forma transformadas químicamente), guardan entre si la misma relación de sus pesos equivalentes o equivalentes químicos, es decir, a sus masas atómicas divididas por sus valencias.

Las leyes enunciadas en esta forma sólo se verifican rigurosamente en el caso de que la corriente eléctrica sólo produzca siempre un proceso único en cada uno de los electrodos considerados sin que aparezca otro simultáneamente, como, por ejemplo, una depositación de metal al lado de un desprendimiento de hidrógeno.

Por este motivo la ecuación final de Faraday se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{m}{Pe} = \frac{I \times t}{F} \quad (2.29)$$

Donde:

<b>m</b>	: Masa del gas	[kg]
<b>Pe</b>	: Peso equivalente del electrolito	[kg/ kmol]
<b>I</b>	: Corriente eléctrica	[A]
<b>t</b>	: Tiempo	[s]
<b>F</b>	: Constante de Faraday $9.65 \times 10^7$	[C/ kmol]

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.

Aunque esta fórmula puede ser expresada en razón del flujo másico del gas que se va a obtener.

$$\dot{m} = \frac{I}{F} \times Pe \quad (2.30)$$

Donde :

<b><math>\dot{m}</math></b>	: Flujo másico del gas	[kg / s]
<b>Pe</b>	: Peso equivalente del electrolito	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$
<b>I</b>	: Corriente eléctrica	[A]
<b>F</b>	: Constante de Faraday $9.65 \times 10^7$	$\left[ \frac{\text{C}}{\text{kmol}} \right]$

$$\dot{m} = \frac{V}{R \times F} \times Pe \quad (2.31)$$

Donde:

<b>V</b>	: Voltaje aplicado en el electrolito	[V]
<b>R</b>	: Resistencia del electrolito	[ $\Omega$ ]

## 2.7 LA LEY DE OHM

Según esta ley, la tensión  $E$ , que existe entre los extremos de un conductor de resistencia eléctrica  $R$  por el cual fluye una corriente de la intensidad  $I$ , está relacionada con la resistencia y la intensidad, por la expresión:

$$I \frac{E}{R} \quad (2.32)$$

La resistencia eléctrica  $R$  del conductor depende de su sección  $s$  de su longitud  $l$  (cm) además de su resistencia específica,  $\rho$  ( $\Omega$ ) y es precisamente:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (2.33)$$

La resistencia específica representa una característica del material que se define por la resistencia de un cubo de 1 cm de lado de la sustancia correspondiente, cuando por toda sección de este fluye uniformemente una corriente eléctrica en dirección perpendicular a dos caras opuestas. En un conductor (hilo metálico) de sección uniforme,  $s$  (cm<sup>2</sup>) y de longitud  $l$  (cm) se puede calcular sencillamente  $\rho$  a partir de la caída de potencial  $E$  (V) que produce entre sus extremos la intensidad de corriente  $I$  (A). Se obtiene entonces a partir de los valores particulares medidos:

$$\rho = \frac{s \times E}{l \times I} \quad (2.34)$$

Todos los metales puros tienen, por consiguiente, un coeficiente de temperatura de la resistencia positivo, es decir, su resistencia aumenta siempre al elevarse su temperatura, sucede lo mismo, en general en las aleaciones.

En vez de la resistencia específica se opera frecuentemente con la magnitud recíproca, la conductividad específica,  $\kappa$ :

$$K = \frac{1}{\rho} \quad (2.35)$$

La ley de Ohm se verifica sin limitaciones en los conductores metálicos.

## 2.8 FEM

Es la magnitud que determina la energía necesaria para mover una unidad de carga (sea cual sea la unidad que hayamos elegido para medirla) entre dos puntos o regiones del espacio entre las cuales haya que mover a dicha carga.

La fuerza electromotriz  $E$ , en un circuito cerrado se encarga de establecer una diferencia de potencial con lo cual se crea corriente en un circuito, su origen se encuentra a partir de un campo eléctrico no conmutativo denominado campo electromotor  $E_m$ .

En un circuito las cargas siempre navegan de mayor o menor potencial pero al pasar por la fuente de fuerza electromotriz o FEM son impulsadas de un potencial menor a uno mayor. El valor de la FEM  $E$  está expresado en voltios y nos indica el potencial entre el polo positivo (+) de la batería con respecto al negativo (-).

## 2.9 ENERGÍA ELÉCTRICA

El conocimiento de la f.e.m. es indispensable cuando se trata de deducir de ella la máxima energía eléctrica que puede suministrar una fuente de corriente. En el flujo ó circulación, de una corriente de intensidad  $I$  amperios por un hilo de resistencia  $R$  ohmios, se transforma la energía eléctrica en calor.

En los extremos del hilo, durante este flujo de corriente, existe, con arreglo a la ley de Ohm, la diferencia de potencial  $E = I \cdot R$ .

Si la corriente fluye durante  $t$  en segundos, se calcula la energía tomada o absorbida por el hilo, y cedida en forma de calor, por:  $A = E \cdot I \cdot t$  en el sistema de unidades prácticas. Se obtendría una cantidad de energía correspondiente en forma de energía mecánica cuando la de cantidad de electricidad  $I \cdot t$ , utilizando las fuerzas de atracción eléctrica, fuera transportada por un conductor a otro cuyo potencial fuera  $E$  voltios más bajo.

La unidad práctica, de potencia eléctrica (energía/s.), de las dimensiones: amperio - voltio, se ha designado por 1 vatio y, de modo correspondiente, a la de energía eléctrica de las dimensiones: amperio - voltio • segundo, con la que se mide la cantidad de trabajo antes indicada, por 1 vatio segundo o 1 julio.

La energía máxima que puede suministrar una fuente de corriente viene dada por ello por el producto de su FEM y la cantidad de electricidad máxima que puede entregar,  $I \cdot t$ , o sea:

$$A_{\max} = FEM \times I \times t \quad (2.36)$$

### 2.9.1 DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE MÍNIMO PARA INICIAR LA ELECTRÓLISIS

La reacción de descomposición del agua para dar hidrógeno y oxígeno gaseosos no se produce de manera espontánea, sino que es necesario aplicar una energía correspondiente al cambio de energía libre de Gibbs, que en condiciones estándar toma el valor:



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

$$\Delta G = -n_{mol} \times F \times E_{equilibrio} \quad (2.38)$$

En la siguiente figura N°2.41.- puede verse un esquema de un sistema electrolítico básico. Consta de una fuente de alimentación encargada de generar una 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).

Así, gracias al potencial eléctrico aplicado por la fuente se 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 pérdida de electrones por parte de un elemento se produce en el ánodo.

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 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 N°2.41.

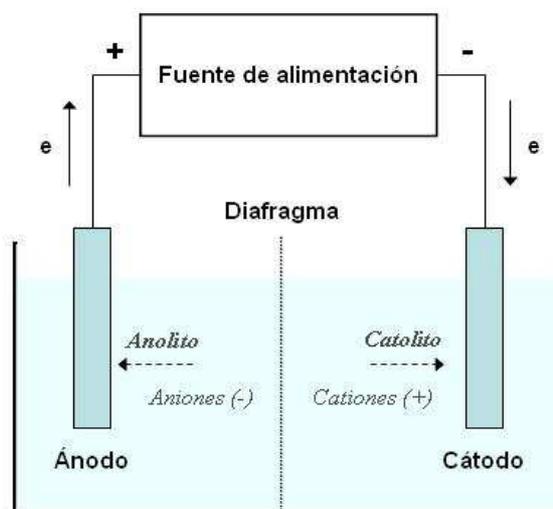
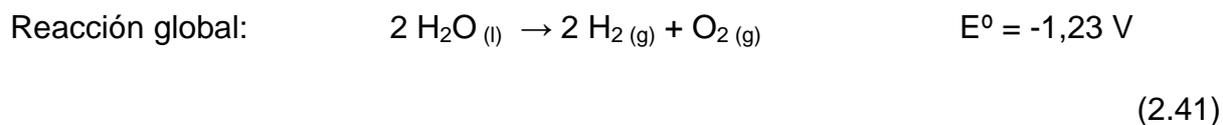
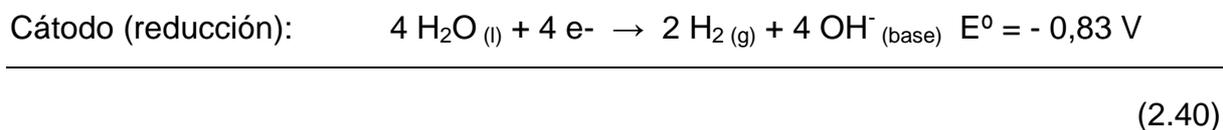
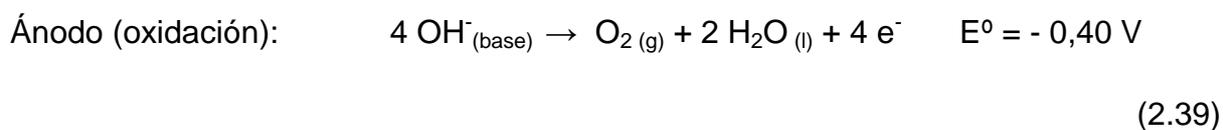


Figura 2.41 Sistema eléctrico básico de un electrolizador

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 producen en ambos electrodos son:



## 2.9.2 VOLTAJE TOTAL NECESARIO PARA INICIAR LA ELECTRÓLISIS

El voltaje de una celda electrolítica es la diferencia de potencial (en voltios) entre los dos electrodos extremos. Dicho potencial unitario de celda ( $E_{\text{celda}}$ ) debe alcanzar un valor mínimo para producir la reacción, que resulta de la suma de varias contribuciones:

$$E_{\text{celda}} = E_{\text{equilibrio}} + \eta \quad (2.42)$$

Donde:

$$\eta = \eta_c + \eta_a + \eta_{\Omega} + \eta_{\text{sist}} \quad (2.43)$$

-  **$E_{\text{equilibrio}}$** : 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:

$$E^{\circ}_{\text{equilibrio}} = -0,83V + (-0,40)V = -1,23V \quad (2.44)$$

**$\eta$  (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 hidrógeno gas.

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

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

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

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

$$E^{\circ}_{celda} = E^{\circ}_{equilibrio} + \eta_c + \eta_a + \eta_{\Omega} + \eta_{sist} \quad (2.45)$$

$$E^{\circ}_{celda} = - (1,23 + 0,30 + 0,30 + 0,25 + 0,11) = -2,19V$$

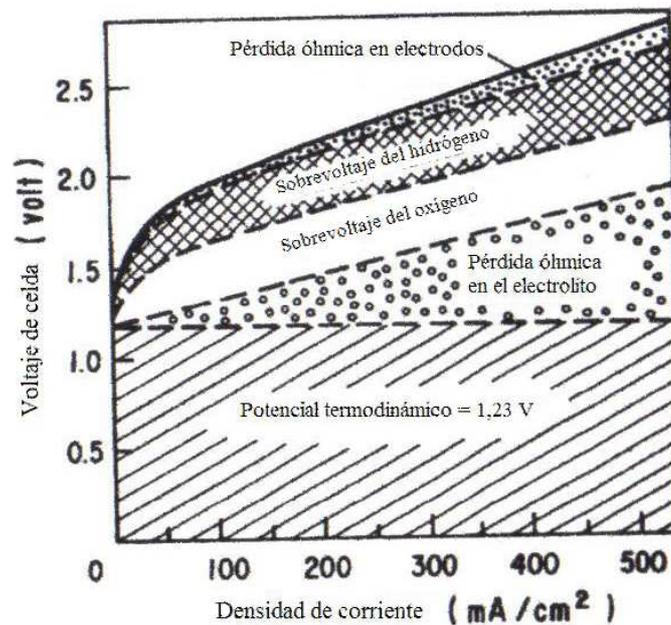


Figura 2.42 Contribuciones al Ecelda en la electrolisis de agua en función de la densidad de corriente<sup>27</sup>

Por otra parte, la magnitud de estos sobrevoltajes va a depender de diversos factores que determinarán el funcionamiento del equipo: naturaleza química de sus componentes (electrodos, 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>27</sup> R. L. LE ROY, (1983), "Industrial Water Electrolysis, Present and Future", Pág. 8

### 2.9.3 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:

$$\Phi_E = \frac{E_{\text{equilibrio}}}{E_{\text{celda}}} \quad (2.46)$$

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 útil en ingeniería electroquímica para la optimización de los 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.

### 2.9.4 EFICACIA DE CORRIENTE

La eficacia de la corriente ( $\Phi_I$ ) relaciona la cantidad de corriente que se ha empleado en producir la reacción, la corriente consumida, (calculada aplicando la ley de Faraday) con la cantidad de corriente que circula por el circuito, corriente del circuito.

$$\Phi_I = \frac{I_{\text{consumida}}}{I_{\text{circuito}}} \quad (2.47)$$

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.

### 2.9.5 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Como se ha mencionado, 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). Dicha potencia se define como:

$$W = V \times I \quad (2.48)$$

Donde V es el potencial aplicado por la fuente e I la intensidad de corriente que circula por el 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 a:

$$V = I \times R \quad (2.49)$$

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 -y, por tanto, su producción y rendimiento- vendrá 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 crucial importancia en los procesos industriales de electrolisis, pues puede constituir una fracción importante del coste total del producto. Un parámetro útil como dato de análisis de la operación es el consumo

específico de energía ( $W_{\text{específico}}$ ), que se obtendría de dividir la potencia eléctrica consumida por la fuente ( $W_{\text{eléct}}$ ) entre el caudal de moles producido ( $n_{\text{prod}} / t$ ):

$$W_{\text{específico}} = \frac{W_{\text{elect}}}{n_{\text{prod}} / t} = \frac{E_{\text{celda}} I_{\text{circuito}}}{I_{\text{consumida}} / n_e F} = E_{\text{equilibrio}} \frac{n_e F}{\Phi_I \Phi_E} \quad (2.50)$$

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 corriente y eficacia de potencial descritos anteriormente.

Así, es claro que un aumento en la eficacia de corriente o en la eficacia del potencial significa un ahorro de energía eléctrica por unidad de producto.

## 2.10 ELECTRODOS

### 2.10.1 TIPOS DE ELECTRODOS ELECTROCATALÍTICOS

Los electrodos pueden dividirse en tres grupos, de acuerdo con las fases que se ponen en contacto.

- **Electrodos de primera especie:** Incluye los electrodos cuyos iones son determinantes del potencial. Entre ellos se cuentan los electrodos metálicos. Ejemplo:



- **Electrodos de segunda especie:** Consisten en tres fases. El metal se halla cubierto de una sal poco soluble y sumergido en una disolución que

contiene un ion de esa sal. Aquí, éste es el determinante del potencial. Ejemplo, el electrodo de Calomel,



La reacción de electrodo es:



- **Electrodos de oxidación-reducción:** En estos electrodos los estados oxidado y reducido de un par redox se encuentran como iones en la disolución y el intercambio de electrones se produce en la superficie del metal inerte. Ejemplo:



## 2.10.2 REQUISITOS DE LOS ELECTRODOS ELECTROCATALÍTICOS

- Capacidad electro-catalítica
- Estabilidad química
- Mínima resistencia eléctrica

### 2.10.2.1 Capacidad electro-catalítica

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

El electrodo también actúa como el lugar o sustrato de una reacción electródica. Además permanece inalterado durante el proceso de la reacción. Por tanto, un

electrodo es un catalizador de las reacciones de transferencia de carga; es un catalizador de transferencia de carga o electrocatalizador.

El aspecto catalítico de un electrodo no es inmediatamente obvio en la ecuación de Butler-Volmer correspondiente a una reacción de múltiples pasos. mediante esta ecuación del coeficiente de transferencia,  $\alpha$ , que se indica en la siguiente ecuación 2.55, comporta un factor de simetría,  $\beta$ , el índice o numero estequiométrico,  $\nu$  y el número de electrones transferidos en pasos diferentes del rds, además escribe la relación densidad de corriente-sobre tensión en la región no lineal para una reacción de electrolización.

$$i = i_o \left[ \exp\left(\frac{\alpha_A \times F}{R \times T} \eta\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_C \times F}{R \times T} \eta\right) \right] \quad (2.55)$$

**Donde:**

$i_o$	: Densidad de corriente de intercambio	[A]
$\alpha_A$	: Coeficiente de transferencia de carga del ánodo	
$\alpha_C$	: Coeficiente de transferencia de carga del cátodo	
$\eta$	: Sobre potencial	[V]
$R$	: Constante de los gases 8.314	[J/ mol K]
$F$	: Constante de Faraday $9.65 \times 10^7$	[C/ kmol]
$T$	: Temperatura absoluta	[k]

### Ecuación de la Densidad de corriente de intercambio ( $A/m^2$ )

$$i_o = zFk_c c_A \exp\left(-\frac{\alpha_c F}{RT} E_e\right) \quad (2.56)$$

**Donde:**

<b><math>i_o</math></b>	<b>: Densidad de corriente de intercambio</b>	<b>[A]</b>
<b><math>z</math></b>	<b>: Número de electrones en relación global</b>	
<b><math>K_c</math></b>	<b>: Constante de velocidad catódica</b>	<b>[1/s]</b>
<b><math>c_A</math></b>	<b>: Concentración superficial de A (aceptor)</b>	<b>[mol /m<sup>2</sup>]</b>
<b><math>E_e</math></b>	<b>: Voltaje de equilibrio</b>	<b>[V]</b>

### Ecuación del Sobre potencial

$$\eta = E - E_e \quad (2.57)$$

**Donde:**

<b><math>\eta</math></b>	<b>: Sobre potencial</b>	<b>[V]</b>
<b><math>E</math></b>	<b>: Voltaje aplicado</b>	<b>[V]</b>
<b><math>E_e</math></b>	<b>: Voltaje de equilibrio</b>	<b>[V]</b>

### Ecuación del Coeficiente de Transferencia de Carga del Ánodo N° 4

$$\alpha_A = \frac{z-s}{v} - r \times \beta \quad (2.58)$$

**Donde:**

$\alpha_A$  : Coeficiente de transferencia de carga del ánodo

$s$  : Número de electrones transferidos antes del paso limitante de la velocidad reacción.

$v$  : Número de veces que debe ocurrir el paso limitante para la reacción global que ocurra una vez.

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

$\beta$  : Factor de simetría ( $\beta = 0.5$ )

### Ecuación del Coeficiente de Transferencia de Carga del Cátodo N° 5

$$\alpha_C = \frac{s}{v} + r \times \beta \quad (2.59)$$

**Donde:**

$\alpha_C$  : Coeficiente de transferencia de carga del cátodo

$s$  : Número de electrones transferidos antes del paso limitante de la velocidad reacción.

$v$  : Número 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 reacción electródica depende, en primer lugar, de la diferencia de potencial 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 depende de la diferencia de potencial) y uno químico (considerando el término  $\eta$ ).

**Tabla 2.7** Comprobación de la ecuación de la velocidad y las características de dos tipos de catalizador, químico (o térmicos) y electrocatalizadores.<sup>28</sup>

	<b>Catálisis química</b>	<b>Electrocatalisis</b>
<b>La velocidad depende de</b>	$e^{-\Delta\sigma^{0\pm}iRT}$	$e^{-\Delta\sigma^{0\pm}iRT} e^{-\frac{\alpha}{RT} F\Delta\phi}$
<b>Dependiente del potencial</b>	No	Si
<b>Dependiente de la temperatura</b>	Si	Si
<b>Escala de temperatura de operación</b>	Usualmente por encima de 150°C	Usualmente por debajo de 150°C
<b>Energía de activación, Kcal mol<sup>-1</sup></b>	10-100	5-35

No obstante, podemos sugerir que hay una distinción en un sentido entre la catálisis química y electrocatálisis. La velocidad de una reacción electrocatalítica depende del potencial, mientras que es independiente de ella la velocidad de una reacción química catalizada.

<sup>28</sup> R. L. LE ROY, (1983), "Industrial Water Electrolysis, Present and Future", Pág. 24

### 2.10.2.2 Estabilidad química

La estabilidad química se determina por la resistencia que opone el material a la corrosión y a la erosión, es decir al efecto químico corrosivo y al efecto 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 a 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 corroerse es medida por la variación de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ). Cuanto más negativo es el valor de  $\Delta G$ , mayor es la tendencia a realizarse la reacción de oxidación o corrosión.

Hay que destacar que la tendencia a la corrosión no es una medida de la velocidad de reacción. Un gran valor negativo  $\Delta G$  puede o no estar acompañado por una elevada velocidad de corrosión, pero cuando  $\Delta G$  es positivo se puede afirmar con certeza que, bajo las condiciones particulares descritas, la reacción no se realizará en absoluto. Si  $\Delta G$  es negativo, la velocidad de reacción puede ser rápida o lenta, lo que dependerá de diversos factores.

Puesto que la energía eléctrica se expresa como el producto de Voltios por Culombios (Julios), la relación entre  $\Delta G$  en julios y  $E$  en voltios se define por  $\Delta G = -E n F$ , donde  $n$  es el número de electrones (o equivalentes químicos) que toman parte en la reacción y  $F$  es la constante de Faraday (96 500 C por equivalente químico). El término  $\Delta G$  se puede pasar de calorías a julios por medio del factor: 1 cal = 4,184 J absolutos.

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

$$\Delta G^\circ = -E^\circ n F \quad (2.60)$$

**Donde:**

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

## CAPÍTULO 3

### 3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

#### 3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La situación energética mundial actual, implica graves problemas de contaminación, cambios climáticos, conflictos internacionales motivados por el acceso a los recursos y al agotamiento de combustibles fósiles, debido a estos antecedentes se precisa el desarrollo de nuevas tecnologías, con el objetivo de reducir el impacto ambiental.

Entre las nuevas tecnologías se destaca la utilización del hidrogeno como energía renovable no contaminante ya que en su utilización como carburante solo origina vapor de agua y calor, además es un elemento que se encuentra en grandes cantidades en nuestro entorno.

La tecnología del hidrogeno tiene una amplia gama de aplicación tanto para diferentes ordenes del quehacer humano, como en el sector de la transportación, industrial y doméstico. Para nombrar algunas aplicaciones que tiene el hidrogeno se lo puede utilizar como gas natural para cocinar, calentar agua, para la climatización del hogar o en pilas de combustible para regenerar energía eléctrica.

El presente proyecto se va a diseñar y construir un electrolizador híbrido solar con aplicación doméstica que sirva para la producción de hidrogeno que será parte de la Planta Dispensadora de Hidrógeno del Proyecto de Investigación Semilla PIS 02-09.

#### 3.1.1 SITUACIÓN INICIAL

La Escuela Politécnica Nacional como una de sus acciones para fomentar la investigación tecnológica realiza un concurso para Proyectos de investigación Semilla (PIS), financiados con fondos institucionales. Se está desarrollando el Proyecto **Diseño y Construcción de un Electrolizador de corriente continua de**

**200 watos con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno.** El presente proyecto de titulación desarrolla el electrolizador para dicho prototipo.

### 3.1.2 SITUACIÓN FINAL

Como situación final se tiene que el electrolizador producirá hidrogeno mediante el uso de energía solar o el uso de la corriente eléctrica comercial y por medio de la electrolisis se obtendrá la descomposición de moléculas de una solución acuosa electrolítica, tanto hidrogeno como oxigeno de forma separada, además constará con equipos adecuados para la medición y la determinación de la tasa de producción de hidrogeno.

### 3.2 ESPECIFICACIONES DEL ELECTROLIZADOR:

**Tabla 3.1 Especificaciones Técnicas**

<b>Empresa cliente:</b> Proyecto de Investigación Semilla (PIS No. 02-09) EPN		<b>Producto:</b> ELECTROLIZADOR	<b>Fecha inicial:</b> 08/02/2010 <b>Última Revisión:</b> 08/02/2010	
<b>Empresa de Ingeniería:</b> SALACO S.A.			Página 1/2	
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	08/02/2010	C	R	Producción de hidrógeno al 90% de pureza mediante electrólisis.
		C	R	Producción interrumpida de hidrogeno.
		D	D	Disponibilidad de trabajo continuo durante todo el día, mediante el uso de diferentes tipos de energía.
		C	R	Medición de la producción de hidrogeno.

Dimensiones	08/02/2010	C	D	Dimensiones máximas de (200 x 400 x 200), H x L x D respectivamente. Capacidad máxima de almacenamiento del electrolito 5l.
		C	R	
<b>Empresa cliente:</b> Proyecto de Investigación Semilla (PIS No. 09-02) EPN		<b>Producto:</b> ELECTROLIZADOR		<b>Fecha inicial:</b> 08/02/2010 <b>Última Revisión:</b> 08/02/2010
<b>Empresa de Ingeniería:</b> SALACO S.A.				Página 2/2
<b>Especificaciones</b>				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Energía	08/02/2010	D	R	Alimentación eléctrica de corriente continua mediante paneles solares y corriente alterna.
Materiales	08/02/2010	D	R	Materiales que soporten la corrosión producida por el electrolito, (Aceros inoxidable, polímeros).
		C	R	
Señales y Control	08/02/2010	D	D	Medidor de la producción de hidrogeno. Medidor del nivel del electrolito presente en el electrolizador.
Vida Útil	08/02/2010	C+D	R	8 años

**Propone:** C=Cliente

D=Diseño

**R/D:** R= Requerimiento D= Deseo

### **3.2.1 DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DEL ELECTROLIZADOR**

Para propósitos de diseño se han considerado los siguientes sistemas que debe poseer el electrolizador:

- Sistema de producción y distribución de hidrógeno
- Sistema de alimentación del electrolito
- Sistema eléctrico del electrolizador
- Sistema de medición de la producción de hidrogeno

### **3.3PRESENTACIÓN DE ALTERNATIVAS DEL ELECTROLIZADOR**

Para cada uno de los sistemas se planteará 3 alternativas deberá formar parte de las diferentes alternativas de solución del electrolizador, estas serán descritas y además contendrán sus ventajas y desventajas. La selección de las alternativas obedecerá al criterio de ponderación formulado para cada una de las alternativas.

#### **3.3.1 PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO**

Es el sistema encargado de la producción y distribución de hidrogeno, obtenido mediante un proceso de electrólisis que posteriormente será confinado a un tanque de almacenamiento, este sistema está conformado por el cuerpo del electrolizador, diafragmas, electrodos anódicos y catódicos.

Para el planteamiento de soluciones para el Sistema de Producción y Distribución de Hidrogeno además de considerar las especificaciones del electrolizador se deben establecer criterios de diseño del cuerpo del electrolizador.

### 3.3.1.1 Alternativa 1 (Cuerpo Redondo)

#### 3.3.1.1.1 Características

Este diseño está constituido por tres celdas cilíndricas comunicadas entre sí, cada uno de los ductos de entrada del electrolito están ubicados de forma axial en la primera y tercera celda respectivamente, los ductos de salida de los gases se encuentran ubicados en la parte superior radial de las celdas, la distancia de los electrodos es regulable mediante rosca y las tres celdas del electrolizador van separadas adecuadamente por diafragmas y sellos que a la vez van unidas mediante tornillos de presión que garantizan la hermeticidad del recipiente. Los electrodos pueden ser contruidos con mallas o placas circulares.

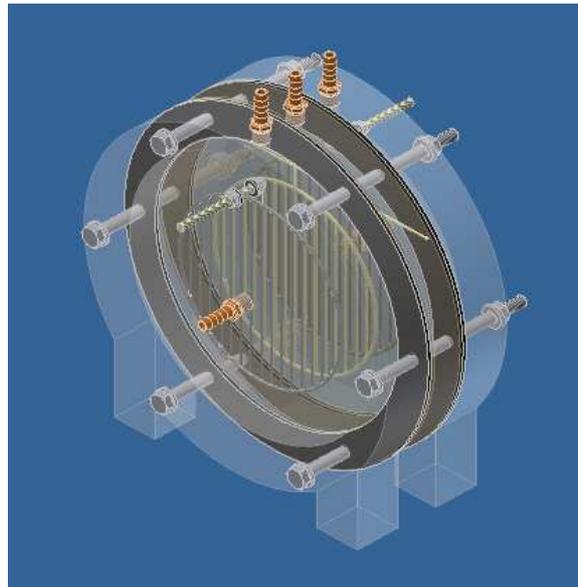


Figura 3.1 Cuerpo Redondo

#### 3.3.1.1.2 Ventajas:

- Diseño modular
- Disponibilidad de trabajo continuo.
- Facilidad de variar las distancias entre electrodos
- Pequeño volumen de trabajo
- Fácil limpieza
- Facilidad de montaje

### 3.3.1.1.3 Desventajas:

- Dificultad en el cambio de electrodos.
- Se incrementa el costo

### 3.3.1.2 Alternativa 2 (Recipiente Hermético)

#### 3.3.1.2.1 Características

Este diseño se basa principalmente en un recipiente hermético a presión por medio de pernos de sujeción, el cual trabaja por cargas de electrolito, la tapa superior cumple la función salida de los gases producidos, soporte para los electrodos y sello del electrolito.

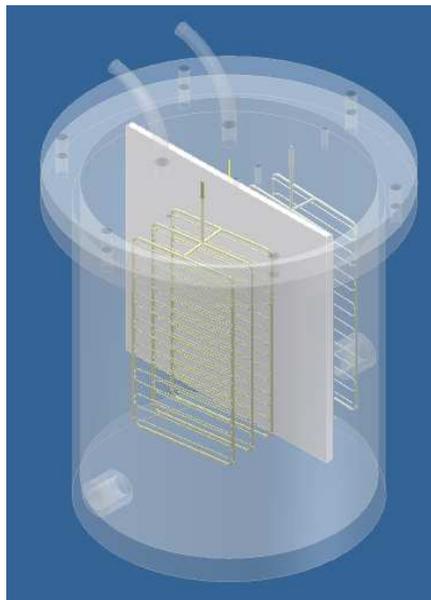


Figura 3.2 Recipiente Hermético

#### 3.3.1.2.2 Ventajas:

- Fácil Construcción
- Fácil limpieza
- Facilidad de montaje
- Bajo Costo

### 3.3.1.2.3 Desventajas:

- Dificultad en el cambio de electrodos.
- Trabajo por cargas.
- Rígida variación de las distancias entre electrodos.
- Celda de producción cuadrada.

### 3.3.1.3 Alternativa 3 (Electrolizador Por Domos)

#### 3.3.1.3.1 Características

Este sistema está basado en dos partes principales; el primero una tapa dividida en tres secciones piramidales truncadas para la separación y direccionamiento adecuado de los gases obtenidos, y el segundo es un cuerpo rectangular el cual abarca al electrolito y a los electrodos los cuales están sujetos al cuerpo mediante tornillos para poder variar su distancia, el cuerpo tiene un ingreso y una salida para el electrolito, ambas partes se sujetan mediante pernos con la ayuda de empaques para evitar algún tipo de fuga.

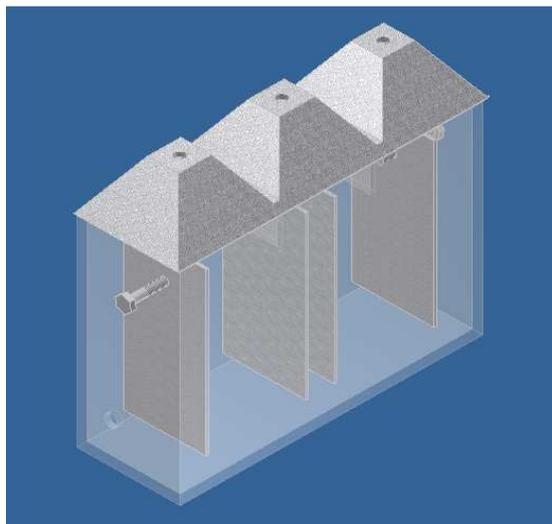


Figura 3.3 Electrolizador por domos

#### 3.3.1.3.2 *Ventajas:*

- Celda de producción adecuada
- Disponibilidad de trabajo continuo.
- Facilidad de variar las distancias entre electrodos
- Fácil limpieza
- Facilidad de montaje
- Facilidad en el cambio de electrodos

#### 3.3.1.3.3 *Desventajas:*

- Dificultad en el cambio de electrodos.
- Se incrementa el costo
- Gran volumen de trabajo

#### **3.3.1.4 Criterios de Diseño del Sistema de Producción y Distribución de Hidrógeno.**

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. Disponibilidad de cambiar fácilmente los electrodos y el electrolito.

4. 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).

### 3.3.1.5 Evaluación de los Criterios del Sistema de Producción y Distribución de Hidrogeno

La forma de evaluación y selección para cada uno de los sistemas del electrolizador se basa en el Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados planteado por el Dr. Carles Riba, mencionado en su libro Diseño Concurrente.

Tabla 3.2 Tabla de Evaluación de los Criterios del Sistema de Producción y Distribución de Hidrógeno.

CRITERIOS	Geometría de la Celda	Trabajo Continuo	Distancia variable entre electrodos	Facilidad en el cambio de los electrodos	Volumen del electrolito	Facilidad de desmontaje	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Geometría de la Celda		1	1	1	0,5	0,5	1	5,00	0,24
Trabajo Continuo	0		1	1	0,5	1	1	4,50	0,21
Distancia variable entre electrodos	0	0		0,5	0	0,5	0,5	1,50	0,07
Facilidad en el cambio de los electrodos	0	0	0,5		0	0,5	0	1,00	0,05
Volumen del electrolito	0,5	0,5	1	1		1	0,5	4,50	0,21
Facilidad de desmontaje	0,5	0	0,5	0,5	0		0,5	2,00	0,10
Costo	0	0	0,5	1	0,5	0,5		2,50	0,12
							<b>Suma</b>	21,00	1,00

Orden de importancia de los criterios para el sistema de producción y distribución de hidrógeno.

Geometría de la Celda > Trabajo Continuo = Volumen del Electrolito > Costo > Facilidad de Desmontaje > Distancia variable entre electrodos > Facilidad en el cambio de los electrodos.

### 3.3.1.6 Selección del Sistema de Producción y Distribución de Hidrogeno

Evaluación del peso específico del criterio de Geometría de la Celda:

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 3.3 Tabla de evaluación del criterio de Geometría de la celda.

Geometría de la Celda	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0.5	1.5	0.50
Alternativa 2	0		0	0	0.00
Alternativa 3	0.5	1		1.5	0.50
			<b>Suma</b>	3	1

Evaluación del peso específico del criterio de Trabajo Continuo:

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 3.4 Tabla de evaluación del criterio de Trabajo continuo.

Trabajo Continuo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0.5	1.5	0.50
Alternativa 2	0		0	0	0.00
Alternativa 3	0.5	1		1.5	0.50
			<b>Suma</b>	3	1

Evaluación del peso específico del criterio de Distancia variable entre electrodos:

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 3.5 Tabla de evaluación del criterio de Distancia variable entre electrodos.

Distancia variable entre electrodos	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	1,5	0,50
Alternativa 2	0		0	0	0,00
Alternativa 3	0,5	1		1,5	0,50
			<b>Suma</b>	3	1

Evaluación del peso específico del criterio de Facilidad en el cambio de los electrodos:

Alternativa 3 = Alternativa 2 > Alternativa 1

Tabla 3.6 Tabla de evaluación del criterio de Facilidad en el cambio de los electrodos.

Facilidad en el cambio de los electrodos	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	1	0.25
Alternativa 2	1		0.5	1.5	0.38
Alternativa 3	1	0.5		1.5	0.38
			<b>Suma</b>	4	1

Evaluación del peso específico del criterio de Volumen del electrolito:

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Tabla 3.7 Tabla de evaluación del criterio del Volumen del electrolito.

Volumen del electrolito	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	1	1.5	0.50
Alternativa 2	0.5		1	1.5	0.50
Alternativa 3	0	0		0	0.00
			<b>Suma</b>	3	1

Evaluación del peso específico del criterio de Facilidad de desmontaje:

Alternativa 2 > Alternativa 1 = Alternativa 3

Tabla 3.8 Tabla de evaluación del criterio de Facilidad de desmontaje.

Facilidad de desmontaje	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0.5	0.5	0.17
Alternativa 2	1		1	2	0.67
Alternativa 3	0.5	0		0.5	0.17
			<b>Suma</b>	3	1

Evaluación del peso específico del criterio de Costo:

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Tabla 3.9 Tabla de evaluación del criterio de Costo.

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	1	1.5	0.43
Alternativa 2	0.5		1	1.5	0.43
Alternativa 3	0.5	0		0.5	0.14
			<b>Suma</b>	3.5	1

Tabla 3.10 Tabla de Conclusiones de la selección de alternativa para el sistema de producción y distribución de hidrógeno N° 3.

Conclusión	Geometría de la Celda	Trabajo Continuo	Distancia variable entre electrodos	Facilidad en el cambio de los electrodos	Volumen del electrolito	Facilidad de desmontaje	Costo	$\Sigma$	Prioridad
Alternativa 1	0,12	0,11	0,04	0,05	0,02	0,03	0,09	0,46	1
Alternativa 2	0,00	0,00	0,00	0,08	0,02	0,14	0,09	0,33	3
Alternativa 3	0,12	0,11	0,04	0,08	0,00	0,03	0,03	0,41	2

### 3.3.2 PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO

Es el sistema encargado de la distribución del electrolito (Solución al 20% de sosa caustica), desde el tanque de almacenamiento principal hacia el electrolizador de forma dosificada para que el nivel óptimo establecido y su producción no varíe.

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.

### 3.3.2.1 Alternativa 1 (Recipiente Hermético Con Tapa Rosca)

#### 3.3.2.1.1 Características

Este recipiente está constituido por un cuerpo cilíndrico de acero inoxidable u otro material que no reaccione con el electrolito, este recipiente debe contar con tapa roscada y además con un terminal ubicada en la parte inferior del cuerpo del tanque, para redirigir el fluido hacia una electroválvula con la finalidad de regular el nivel de electrolito presente en el electrolizador que tendrá dos entradas para la solución garanticen el nivel uniforme del electrolito en el electrolizador.



Figura 3.4.- Recipiente hermético con tapa rosca

#### 3.3.2.1.2 Ventajas:

- Disponibilidad de construcción.
- Facilidad de verificación del nivel de electrolito.
- Fácil limpieza
- Facilidad de montaje
- Gran volumen de trabajo
- Costo relativamente bajo

#### 3.3.2.1.3 Desventajas:

- Dificultad en la evacuación del electrolito.

### 3.3.2.2 ALTERNATIVA 2 (RECIPIENTE CÓNICO HERMÉTICO CON TAPA DE POLIETILENO)

#### 3.3.2.2.1 Características

Este recipiente está constituido por un cuerpo cónico de acero inoxidable 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 electroválvula con la finalidad de regular el nivel de electrolito presente en el electrolizador que tendrá dos entradas para la solución garanticen el nivel uniforme del electrolito en el electrolizador.



Figura 3.5 Recipiente hermético con tapa rosca

#### 3.3.2.2.2 Ventajas:

- Facilidad de verificación del nivel de electrolito.
- Fácil limpieza
- Facilidad de montaje

#### 3.3.2.2.3 Desventajas:

- Dificultad en la construcción.
- Capacidad media de almacenamiento.
- Costo relativamente alto.

### 3.3.2.3 ALTERNATIVA 3 (RECIPIENTE CÓNICO DE PRESIÓN)

#### 3.3.2.3.1 Características

Este recipiente está constituido por un cuerpo cónico de acero inoxidable con tapa a presión del mismo material mediante la acción de pernos, además con un terminal ubicada en la parte inferior del cuerpo del tanque, para redirigir el fluido hacia una electroválvula con la finalidad de regular el nivel de electrolito presente en el electrolizador que tendrá dos entradas para la solución garanticen el nivel uniforme del electrolito en el electrolizador.



Figura 3.6 Recipiente cónico de presión

#### 3.3.2.3.2 Ventajas:

- Fácil limpieza

#### 3.3.2.3.3 Desventajas:

- Costo relativamente alto
- Dificultad en la construcción.
- Dificultad relativa en el montaje.
- Capacidad media de almacenamiento.
- Dificultad de verificación del nivel de electrolito.

### 3.3.2.4 CRITERIOS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.

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.

### 3.3.2.5 EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.

Tabla 3.11 Tabla de Evaluación de los criterios del sistema de alimentación del electrolito.

CRITERIOS	Disponibilidad de materiales y de fácil construcción	Verificación del nivel.	Alto grado de automatización	Mantenimiento reducido	Alta capacidad de almacenamiento	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Disponibilidad de materiales y de fácil construcción		0	1	1	0.5	0.5	3.00	0.22
Facilidad de verificación del nivel del electrolito	1		1	1	0.5	1	4.50	0.33
Alto grado de automatización	0	0		0.5	0.5	0.5	1.50	0.11
Mantenimiento reducido	0	0	0.5		0	0.5	1.00	0.07
Alta capacidad de almacenamiento	0.5	0.5	0.5	1		1	3.50	0.26
Costo	0.5	1	0.5	0.5	0		2.50	0.23
					<b>Suma</b>		13.50	1.00

El orden de importancia de los criterios para el sistema de alimentación del electrolito.

Facilidad de verificación del nivel del electrolito > Alta capacidad de almacenamiento > Costo > Disponibilidad de materiales y de fácil construcción > Alto grado de automatización > Mantenimiento Reducido.

Evaluación del peso específico del criterio de Facilidad de verificación del nivel del electrolito:

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Tabla 3.12 Tabla de Evaluación del criterio facilidad de verificación del nivel del electrolito.

Verificación del nivel.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1	1,5	0,50
Alternativa 2	0,5		1	1,5	0,50
Alternativa 3	0	0		0	0,00
			Suma	3	1,00

Evaluación del peso específico del criterio de la Alta capacidad de almacenamiento:

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 3.13 Tabla de Evaluación del criterio de alta capacidad de almacenamiento.

Alta capacidad de almacenamiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	2	0,67
Alternativa 2	0		0,5	0,5	0,17
Alternativa 3	0	0,5		0,5	0,17
			Suma	3	1

Evaluación del peso específico del criterio de Alto grado de automatización:

Alternativa 1 = Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 3.14 Tabla de Evaluación del criterio de alto grado de automatización.

Alto grado de automatización	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0,5	1	0,33
Alternativa 2	0,5		0,5	1	0,33
Alternativa 3	0,5	0,5		1	0,33
			Suma	3	1,00

Evaluación del peso específico del criterio de Disponibilidad de materiales y de fácil construcción:

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 3.15 Tabla de Evaluación del criterio de disponibilidad de materiales y fácil construcción.

Disponibilidad de materiales y de fácil construcción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	2	0,67
Alternativa 2	0		0,5	0,5	0,17
Alternativa 3	0	0,5		0,5	0,17
			Suma	3	1,00

Evaluación del peso específico del criterio del Costo:

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Tabla 3.16 Tabla de Evaluación del criterio de costo.

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	1	1.5	0.50
Alternativa 2	0.5		1	1.5	0.50
Alternativa 3	0	0		0	0.00
			Suma	3	1

Evaluación del peso específico del criterio de Mantenimiento Reducido:

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Tabla 3.17 Tabla de Evaluación del criterio de mantenimiento reducido.

Mantenimiento reducido	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	1	1.5	0.50
Alternativa 2	0.5		1	1.5	0.50
Alternativa 3	0	0		0	0.00
			Suma	3	1

### 3.3.2.6 Selección del sistema de alimentación del electrolito

Tabla 3.18 Tabla de conclusiones del sistema de alimentación del electrolito.

Conclusión	Disponibilidad de materiales y de fácil construcción	Facilidad de verificación del nivel del electrolito	Alto grado de automatización	Mantenimiento reducido	Alta capacidad de almacenamiento	Costo	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0.15	0.17	0.04	0.04	0.17	0.12	0.67	1
Solución B	0.04	0.17	0.04	0.04	0.04	0.12	0.43	2
Solución C	0.04	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00	0.12	3

### 3.3.3 PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROLIZADOR

Es el sistema encargado de la distribución de la electricidad de corriente continua hacia los electrodos del electrolizador, tanto al ánodo como al cátodo, de sus fuentes, (energía solar y energía eléctrica comercial). El sistema eléctrico debe operar en la presencia de luz solar trabajando con los paneles solares y en la carencia de la luz solar debe ocupar la corriente eléctrica comercial para transformarla y rectificarla.

Tanto el circuito solar y el circuito eléctrico transformador-rectificador debe garantizar un voltaje variable a entregar a sus tres terminales, para establecer el voltaje y concentración del electrolito óptimo para la generación de hidrogeno mediante experimentación.

Para el planteamiento de soluciones para el sistema eléctrico del electrolizador se debe considerar todos los criterios de diseño que satisfagan de forma completa sus requerimientos.

### 3.3.3.1 Alternativa 1 (Circuito Eléctrico Cargador De Batería)

#### 3.3.3.1.1 Características

Este circuito eléctrico utiliza principalmente dos sistemas eléctricos independientes un sistema eléctrico solar (conformado por dos paneles solares de 12 voltios), que alimentan de energía en el día a la batería y un sistema eléctrico complementario conformado por una batería de 12 voltios con su respectivo cargador que utilizan como fuente energía eléctrica comercial, cuando la incidencia de luz solar sobre los paneles sea muy baja o no exista.

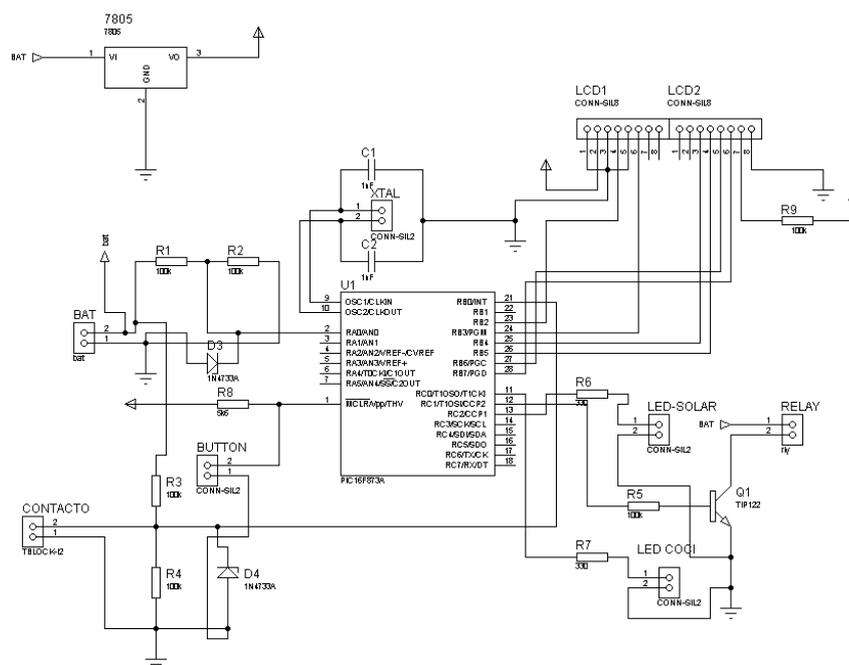


Figura 3.7 Circuito eléctrico cargador de batería

#### 3.3.3.1.2 Ventajas:

- Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.
- Bajo grado de automatización.
- Facilidad de desmontaje y mantenimiento.
- Manipulación de altas corrientes.
- Costo relativamente Bajo.

### 3.3.3.1.3 Desventajas:

- Escala reducida de voltaje variable.

### 3.3.3.2 Alternativa 2 (Circuito Eléctrico Transformador-Rectificador)

#### 3.3.3.2.1 Características

Este circuito eléctrico utiliza principalmente dos sistemas eléctricos independientes un sistema eléctrico solar (conformado por dos paneles solares de 12 voltios con una resistencia que varia el voltaje aplicado a sus terminales), y un sistema eléctrico conformado por un transformador de corriente alterna de 110V a 12V y un circuito eléctrico rectificador para 12V DC que utiliza como fuente energía eléctrica comercial, con una resistencia que varié el voltaje entregado entre 3V y 12V.

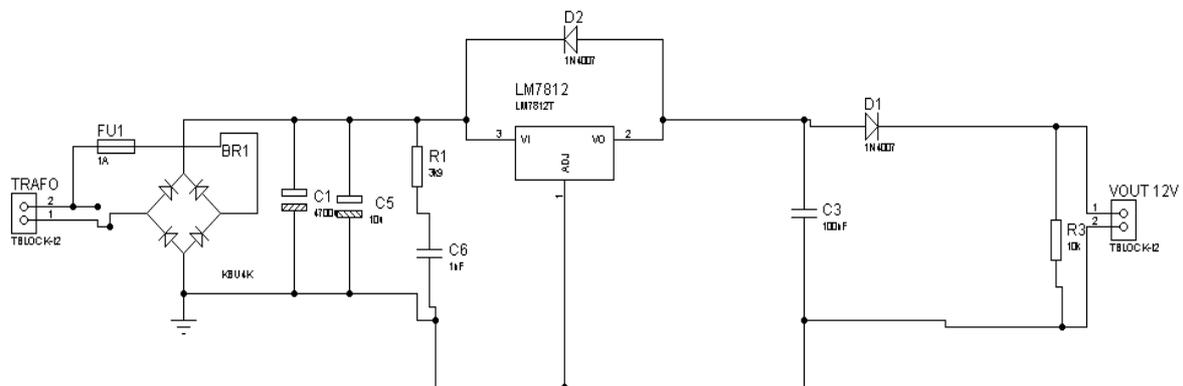


Figura 3.8 Circuito eléctrico transformador-rectificador

#### 3.3.3.2.2 Ventajas:

- Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.
- Costo relativamente Bajo.

### 3.3.3.2.3 Desventajas:

- Escala reducida de voltaje variable.
- Dificultad de desmontaje y mantenimiento.
- Manipulación de corrientes bajas.
- Alto grado de automatización.

### 3.3.3.3 Alternativa 3 (Circuito Eléctrico Variac)

#### 3.3.3.3.1 Características

Este circuito eléctrico utiliza principalmente dos sistemas eléctricos independientes un sistema eléctrico solar (conformado por dos paneles solares de 12 voltios con un equipo que permita variar el voltaje aplicado a sus terminales entre 3V a 12V), y un sistema eléctrico conformado por un transformador variable de corriente alterna de 110V a 30V y un circuito eléctrico rectificador para 30V DC que utiliza como fuente energía eléctrica comercial, con una resistencia que varíe el voltaje entregado entre 3V y 30V.

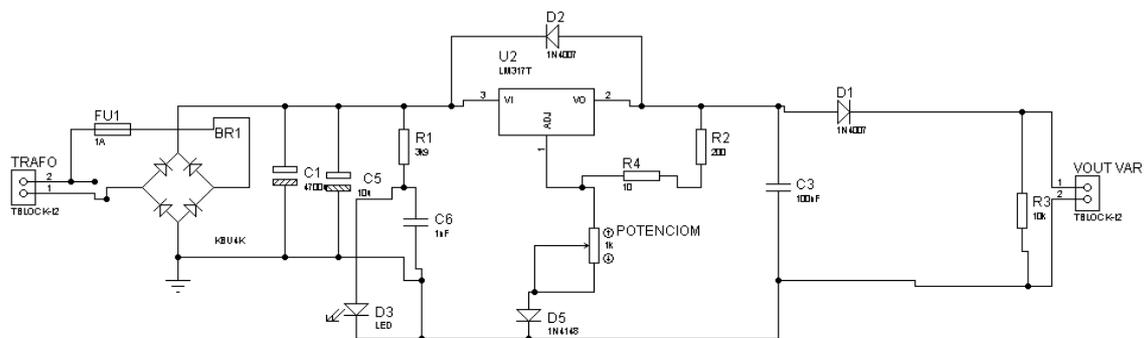


Figura 3.9 Circuito eléctrico cargador de batería

#### 3.3.3.3.2 Ventajas:

- Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.
- Facilidad de desmontaje y mantenimiento.
- Manipulación de altas corrientes.
- Amplio rango de voltaje variable.

#### 3.3.3.3.3 *Desventajas:*

- Costo relativamente Alto.
- Manipulación de corrientes bajas.
- Alto grado de automatización.

#### 3.3.3.4 **Criterios De Diseño Del Sistema Eléctrico Del Electrolizador.**

El principal criterio de diseño del sistema eléctrico del electrolizador es la utilización de la energía solar para convertirla en energía eléctrica continua en presencia de luz solar y en la carencia de luz solar se debe utilizar la corriente eléctrica comercial para garantizar la producción de hidrogeno, estas funciones deben ser reguladas de forma automática.

1. Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.
2. Bajo grado de automatización.
3. Voltaje variable para entrega a sus terminales.
4. Facilidad en el desmontaje y mantenimiento.
5. Manipulación de altas corrientes.
6. Bajo costo.

### 3.3.3.5 Evaluación De Los Criterios Del Sistema Eléctrico Del Electrolizador.

Tabla 3.19 Tabla de evaluación de los criterios del sistema eléctrico del electrolizador.

CRITERIOS	Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.	Bajo grado de automatización.	Voltaje variable para entrega a sus terminales.	Facilidad en el desmontaje y mantenimiento.	Manipulación de altas corrientes.	Costo.	$\Sigma+1$	Ponderación
Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.		1	0.5	1	0.5	1	4.00	0.27
Bajo grado de automatización.	0		0	0.5	0	0.5	1.00	0.07
Voltaje variable para entrega a sus terminales.	0.5	1		1	0.5	1	4.00	0.27
Facilidad en el desmontaje y mantenimiento.	0	0.5	0		0	0.5	1.00	0.07
Manipulación de altas corrientes.	0.5	1	0.5	1		1	4.00	0.27
Costo.	0	0.5	0	0.5	0		1.00	0.07
						<b>Suma</b>	15.00	1.00

El orden de importancia de los criterios para el sistema eléctrico del electrolizador.

Manipulación de altas corrientes = Voltaje variable para entrega a sus terminales =  
 Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial > Bajo grado de automatización = Costo = Facilidad en el desmontaje y mantenimiento.

Evaluación del peso específico del criterio del uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.

Alternativa 1 = Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 3.20 Tabla de evaluación del criterio del uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.

Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	0.5	1.00	0.33
Alternativa 2	0.5		0.5	1.00	0.33
Alternativa 3	0.5	0.5		1.00	0.33
			<b>Suma</b>	3.00	1.00

Evaluación del peso específico del criterio bajo grado de automatización:

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 3.21 Tabla de evaluación del criterio del bajo grado de automatización.

Bajo grado de automatización.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	1,50	0,60
Alternativa 2	0		0,5	0,50	0,20
Alternativa 3	0	0,5		0,50	0,20
			Suma	2,50	1,00

Evaluación del peso específico del criterio del voltaje variable para entrega a sus terminales:

Alternativa 3 > Alternativa 2 = Alternativa 1

Tabla 3.22 Tabla de evaluación del criterio de voltaje variable para entrega a sus terminales.

Voltaje variable para entrega a sus terminales.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	0	0.50	0.17
Alternativa 2	0.5		0	0.50	0.17
Alternativa 3	1	1		2.00	0.67
			Suma	3.00	1.00

Evaluación del peso específico del criterio de facilidad en el desmontaje y mantenimiento.

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 3.23 Tabla de evaluación del criterio de facilidad de desmontaje y mantenimiento.

Facilidad en el desmontaje y mantenimiento.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0.5	1.50	0.50
Alternativa 2	0		0	0.00	0.00
Alternativa 3	0.5	1		1.50	0.50
			Suma	3.00	1.00

Evaluación del peso específico del criterio de manipulación de altas corrientes:

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 3.24 Tabla de evaluación de manipulación de altas corrientes.

Manipulación de altas corrientes.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	2.00	0.67
Alternativa 2	0		0.5	0.50	0.17
Alternativa 3	0	0.5		0.50	0.17
			Suma	3.00	1.00

Evaluación del peso específico del criterio del costo:

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 3.25 Tabla de evaluación del criterio del costo.

Costo.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	1,50	0,50
Alternativa 2	0		0,5	0,50	0,17
Alternativa 3	0,5	0,5		1,00	0,33
			Suma	3,00	1,00

### 3.3.3.6 Selección Del Sistema Eléctrico Del Electrolizador

Tabla 3.26 Tabla de Conclusiones del Sistema Eléctrico del electrolizador.

Conclusión	Uso de la energía solar y energía eléctrica comercial.	Bajo grado de automatización.	Voltaje variable para entrega a sus terminales.	Facilidad en el desmontaje y mantenimiento.	Manipulación de altas corrientes.	Costo.	$\Sigma$	Prioridad
Alternativa 1	0.09	0.04	0.04	0.03	0.18	0.03	0.42	1
Alternativa 2	0.09	0.01	0.04	0.00	0.04	0.01	0.20	3
Alternativa 3	0.09	0.01	0.18	0.03	0.04	0.02	0.38	2

### **3.3.4 PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA PRODUCCIÓN HIDRÓGENO**

El funcionamiento del electrolizador dependerá directamente de la cantidad de hidrogeno producido, ya que esta medida establecerá si se debe cambiar, aumentar o disminuir cada una de las variables que intervienen en la electrólisis. Este sistema es el encargado de la medición de la cantidad de hidrogeno producida por el electrolizador en una unidad de tiempo.

Todos los métodos de medición y determinación la cantidad de hidrogeno producido por el electrolizador serán considerados por un control eléctrico y electrónico, para facilitar la visualización del flujo de hidrogeno producido, mediante una interfaz adecuada entre el usuario y el prototipo.

Los principales métodos de medición de la producción de hidrogeno sean considerado los siguientes:

- Flujómetro volumétrico con compensación de presión y temperatura.
- Flujómetro másico (Flujómetro tipo Coriolis o tipo dispersión térmica).
- Medidor de la producción de hidrógeno a volumen constante.

#### **3.3.4.1 Alternativa 1 (Flujómetro Volumétrico Con Compensación De Presión Y Temperatura)**

##### *3.3.4.1.1 Características*

Estos flujómetros determinan la velocidad de flujo del gas. Esta velocidad, debe ser multiplicada por la sección de flujo y se determina el flujo volumétrico en condiciones de flujo del gas. La compensación puede ser realizada con valores fijos si la presión y la temperatura son estables dentro de los márgenes de error pretendidos, o pueden requerir medidores específicos.

#### 3.3.4.1.2 *Ventajas:*

- Flujómetro para la medición de gases.
- Alto grado de exactitud.
- Señal analógica de salida.

#### 3.3.4.1.3 *Desventajas:*

- Flujómetros incapaz de medir flujo másico del gas.
- Costo relativamente Alto.
- Utilización de equipos complementarios, (manómetros y termómetros).

### **3.3.4.2 Alternativa 2 (Flujómetro Másico De Tipo Coriolis O Tipo Dispersión Térmica)**

#### 3.3.4.2.1 *Características*

Estos flujómetros determinan directamente el flujo másico de gas que circula. Por tal motivo, variaciones de presión o temperatura de flujo no variarán el flujo medido, expresado en masa o en unidades volumétricas en condiciones normalizadas.

#### 3.3.4.2.2 *Ventajas:*

- Flujómetro para la medición de gases.
- Alto grado de exactitud.
- Señal analógica de salida.
- Flujómetros capaz de medir flujo másico del gas.
- Funciona sin la necesidad de la presencia de otros equipos.

#### 3.3.4.2.3 *Desventajas:*

- Costo relativamente Alto.

### **3.3.4.3 Alternativa 3 (Medidor De La Producción De Hidrógeno A Volumen Constante)**

#### *3.3.4.3.1 Características*

Este equipo utiliza como principio de funcionamiento la manometría a volumen constante, la cual mide el cambio en la presión de un gas cuyo volumen y temperatura se mantiene constantes.

Estos manómetros de ben ser de alta precisión en rangos muy pequeños para evitar errores de apreciación, con lo cual es un medidor indirecto de la cantidad de hidrógeno.

#### *3.3.4.3.2 Ventajas:*

- Costo relativamente bajo.
- Señal analógica de salida.

#### *3.3.4.3.3 Desventajas:*

- Determinación indirecta de la producción de hidrógeno.
- Señal digital de salida.
- Bajo grado de exactitud.
- Utilización de equipos complementarios.

### **3.3.4.4 Criterios De Diseño Del Sistema De Medición De L A Producción De Hidrogeno.**

Para una selección adecuada de un medidor de caudal, depende principalmente del tipo de fluido con el cual se va trabajar, las características del fluido, las condiciones de operación (temperatura y presión), las condiciones del sistema, etc. Para nuestra aplicación la selección del medidor de caudal depende de la aplicación y

características del proceso. Entre las principales consideraciones se va a nombrar las siguientes:

1. Flujómetros para gases.
2. Flujómetros que sean capaces de medir flujo másico de gases, para evitar consideraciones de presión y temperatura.
3. Alto grado de exactitud.
4. Señal analógica de salida.
5. Bajo Costo.

### 3.3.4.5 Evaluación De Los Criterios Del Sistema De Medición De La Producción De Hidrogeno

Tabla 3.27 Tabla de Evaluación de los criterios del sistema de medición de la producción de hidrógeno.

CRITERIOS	Equipo para gases.	Medición de flujo másico de gases.	Alto grado de exactitud.	Señal analógica de salida.	Bajo Costo.	$\Sigma+1$	Ponderación
Equipo para gases.		0	0,5	0,5	0,5	1,50	0,16
Medición de flujo másico de gases.	1		0,5	1	0,5	3,00	0,32
Alto grado de exactitud.	0,5	0		1	1	2,50	0,26
Señal analógica de salida.	0	0	0,5		0,5	1,00	0,11
Bajo Costo.	0,5	0,5	0	0,5		1,50	0,16
					<b>Suma</b>	9,50	1,00

El orden de importancia de los criterios para el sistema eléctrico del electrolizador.

Medición de flujo másico de gases > Alto grado de exactitud > Equipo para gases =  
Bajo Costo > Señal analógica de salida

Evaluación del peso específico del criterio de Equipo para gases:

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Tabla 3.28 Tabla de Evaluación del criterio de flujómetros para gases.

Equipo para gases.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	0.5	1.00	0.33
Alternativa 2	0.5		0.5	1.00	0.33
Alternativa 3	0.5	0.5		1.00	0.33
			Suma	3.00	1.00

Evaluación del peso específico del criterio de Medición de flujo másico de gases:

Alternativa 2 > Alternativa 1 = Alternativa 3

Tabla 3.29 Tabla de Evaluación del criterio de medición de flujo másico de gases.

Medición de flujo másico de gases.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0.5	0.50	0.17
Alternativa 2	1		1	2.00	0.67
Alternativa 3	0.5	0		0.50	0.17
			Suma	3.00	1.00

Evaluación del peso específico del criterio de Alto grado de exactitud:

Alternativa 3 > Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 3.30 Tabla de Evaluación del criterio de alto grado de exactitud.

Alto grado de exactitud.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0.5	0.50	0.17
Alternativa 2	1		1	2.00	0.67
Alternativa 3	0	0.5		0.50	0.17
			Suma	3.00	1.00

Evaluación del peso específico del criterio de Señal analógica de salida:

Alternativa 2 = Alternativa 1 = Alternativa 3

Tabla 3.31 Tabla de Evaluación del criterio de señal analógica de salida.

Señal analógica de salida.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	0.5	1.00	0.33
Alternativa 2	0.5		0.5	1.00	0.33
Alternativa 3	0.5	0.5		1.00	0.33
			Suma	3.00	1.00

Evaluación del peso específico del criterio de Bajo Costo:

Alternativa 3 > Alternativa 1 > Alternativa 2

Tabla 3.32 Tabla de Evaluación del criterio de bajo costo.

Bajo Costo.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	1.00	0.33
Alternativa 2	0		0	0.00	0.00
Alternativa 3	1	1		2.00	0.67
			Suma	3.00	1.00

### 3.3.4.6 Selección Del Sistema De Medición De La Producción De Hidrogeno.

Tabla 3.33 Tabla de conclusiones del Sistema de medición de producción de hidrogeno.

Conclusión	Equipos para gases.	Medición de flujo másico de gases.	Alto grado de exactitud.	Señal analógica de salida.	Bajo Costo.	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.24	3
Solución B	0.05	0.21	0.18	0.04	0.00	0.47	1
Solución C	0.05	0.05	0.04	0.04	0.11	0.29	2

El equipo ganador de la ponderación para la medición de la producción de hidrógeno no se lo adquiere en el país y su costo es excesivamente costoso que

supera los 5000 USD, se procedió a utilizar el segundo equipo para la determinación de la producción de hidrógeno del electrolizador. (ANEXO )

### 3.3.5 PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS ELEGIDAS PARA LOS SISTEMAS DEL ELECTROLIZADOR

Tabla 3.34 Tabla de presentación de las alternativas elegidas para los sistemas del electrolizador.

SISTEMAS DEL ELECTROLIZADOR	ALTERNATIVA ELEGIDA
Sistema de producción y distribución de hidrógeno.	Cuerpo Redondo.
Sistema de alimentación del electrolito.	Recipiente Cónico a Presión.
Sistema eléctrico del electrolizador.	Circuito Eléctrico Variac.
Sistema de medición de la producción de hidrogeno	Medidor de la producción de hidrógeno a volumen constante.

Las soluciones de los sistemas elegidos se encuentran acopladas en el siguiente esquema, figura N°3.10.

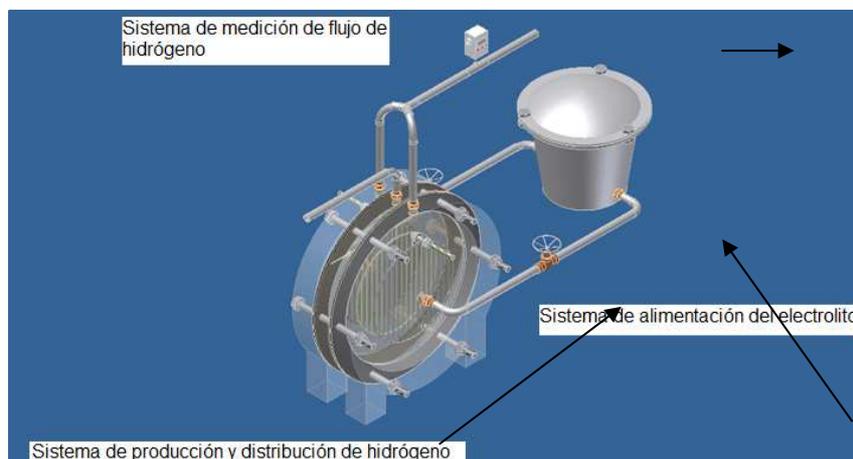


Figura 3.10 Representación en 3D del electrolizador.

**Nota:** El Sistema eléctrico del electrolizador, no forma parte del esquema de la alternativa elegida, porque su representación es electrónica.

### 3.3.6 PRESENTACIÓN DE ALTERNATIVAS DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS

El proceso de electrolisis que se va efectuar en el electrolizador va depender del comportamiento que tengan los electrodos tanto anódicos y catódicos versus la solución acuosa del 20% de Hidróxido de sodio (sosa caustica), además de las características internas de cada material y el comportamiento que tengan frente a la pareja de los electrodos.

Por la gran diversidad de materiales existentes se ha preseleccionado los mismos considerando los elementos nobles (cátodos) y no nobles para los (ánodos), de la serie galvánica, con el fin evaluar los materiales en condiciones más extremas, de corrosión.

El carbono (C) es estupendo para emplearlo como ánodo en electrólisis ya que es buen conductor y no es atacado por las reacciones anódicas. Solo el grafito y otros metales nobles comparten estas propiedades, como son el cobre (Cu), la plata (Ag), oro (Au), platino (Pt), rutenio (Ru), osmio (Os), rodio (Rh), iridio (Ir), y paladio (Pd) [3]. En la tabla N° 3.35.- se muestran los elementos que se van a evaluar:

**Tabla 3.35** Tabla de los elementos considerados para los electrodos anódicos y catódicos.

<b>ELEMENTOS DE LOS ELECTRODOS ANÓDICOS</b>	<b>ELEMENTOS DE LOS ELECTRODOS CATÓDICOS</b>
Litio (Li)	Oro (Au)
Zinc (Zn)	Platino (Pt)
Aluminio (Al)	Iridio (Ir)
Hierro (Fe)	Rodio (Rh)
Plomo (Pb)	Plata (Ag)
Estaño (Sn)	Carbono (C)
Carbono (C)	Osmio (Os)
Níquel (Ni)	Paladio (Pd)
	Rutenio (Ru)
	Cobre (Cu)

### 3.3.6.1 Requisitos de los electrodos

Entre los requisitos más importantes que deben contar los electrodos son:

- Capacidad electro-catalítica
- Estabilidad química
- Mínima resistencia eléctrica
- Disponibilidad y Costos

La capacidad electro-catalítica es aquella que modifica la velocidad de una reacción química pero sin que genere otra reacción química paralela a la principal, este requisito no solo depende del material del electrodo sino depende también del comportamiento que tenga frente a la solución acuosa de 20% de Hidróxido de sodio y la diferencia de potencial galvánico que se obtenga con la pareja del electrodo (ánodo y cátodo).

La estabilidad química se refiere a la resistencia que opone el material a la corrosión y a la erosión que se produce por estar en contacto con la solución electrocatalítica, además del par galvánico producido por los electrodos.

El requisito de mínima resistencia hace referencia a la mínima oposición que encuentra la corriente a su paso por un circuito cerrado, es decir que la atenuación del flujo de cargas eléctricas por el material sea el menor posible.

### 3.3.6.2 Evaluación electrocatalítica de los materiales de los electrodos anódicos y catódicos.

Para evaluar la capacidad electrocatalítica de los diferentes elementos, se toma como referencia la ecuación de Butler – Volmer para determinar el grado de afinidad que poseen cada uno de los elementos, para lo cual se deben hacer las siguientes consideraciones para una evaluación adecuada.

### 3.3.6.2.1 Consideraciones:

1. El electrolito a utilizar será solución acuosa al 20% de sosa caustica.
2. La conductividad de la solución al 20% de Hidróxido de sodio es de 0.18 [s/m] que se estableció de forma experimental ver (ANEXO1.1).
3. El voltaje necesario para la electrólisis del agua asciende teóricamente a 1,23 voltios, en la práctica hacen falta sin embargo voltajes de 1,8 a 3 voltios.
4. La longitud entre los electrodos sin considerar la sección de cada uno de ellos es de 2 cm.
5. Tiempo de referencia dos minutos, es decir 120 segundos.
6. Circuito eléctrico que obedecen a la ley de Ohm.
7. Tanto el ánodo como el cátodo tendrán la misma forma y sección, es decir un volumen circular.
8. El cálculo del área eléctrica efectiva de los electrodos es de 200 cm<sup>2</sup>.
9. La evaluación se hará de forma independiente para cada uno de los elementos pertenecientes al grupo de electrodos anódicos y catódicos respectivamente.
10. Una de las consideraciones más importantes es la resistencia del ánodo que varía conforme el material a analizar, por este motivo se tomo una resistividad promedio de todos los elementos listados por los electrodos catódicos.
11. La serie estándar de los metales por su FEM serán evaluados con el potencial de electrodo contra electrodo normal de hidrógeno a 25°C.
12. La electronegatividad será evaluada según la serie de Pauling.
13. La resistividad de los materiales serán considerados como propiedades internas.

A continuación se evaluarán la capacidad electro-catalítica de los materiales de los electrodos anódicos para cada uno de los materiales catódicos con el objetivo de conocer el comportamiento de los materiales que conforman la pareja de electrodos.

Tabla 3.36 Tabla de consideraciones aplicadas a la Ecuación Butler – Volmer.

CONSIDERACIONES	VALORES
Voltaje aplicado (E) [V]	3
Resistividad Solución NaOH al 20% [ $\Omega$ cm]	555.556
Longitud referencial entre electrodos [cm]	2.00
Resistencia de la solución al 20% [ $\Omega$ ]	5.56
Resistencia del Cátodo [ $\Omega$ ]	1.55E-08
Resistencia del Ánodo [ $\Omega$ ]	8.40E-08
Intensidad [A]	12.000
Tiempo estimado para la prueba [s]	120
Carga entregada al circuito [C]	1.00E-04
Carga entregada al circuito [e]	6.24E+06

### ELEMENTO ANÓDICO LITIO (Li)

Tabla 3.37 Capacidad electro-catalítica del ánodo litio para cada uno de los materiales catódicos

	ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	ELECTRONEGATIVIDAD SERIE DE PAULING	S	RESISTENCIA ELÉCTRICA [ $\Omega$ - cm]	$\alpha_a/\alpha_c$	VOLTAJE DE EQUILIBRIO (Eo) [V]	SOBRE POTENCIAL (η) [V]	$i=i_0 \times A_1 C_N$
Ánodo	Litio (Li)	-3.02	0.98	10	0.0000084	2.68E+05			
Cátodos	Plata (Ag)	0.80	1.93	8	0.00000155	0.57	-3.82	6.42	6.712E+07
	Cobre (Cu)	0.34	1.90	8	0.0000017	0.57	-3.36	5.96	6.232E+07
	Oro (Au)	1.68	2.40	16	0.0000022	0.63	-4.70	7.30	7.634E+07
	Rodio (Rh)	0.80	2.28	16	0.0000043	0.63	-3.82	6.42	6.713E+07
	Iridio (Ir)	1.00	2.20	12	0.0000047	0.60	-4.02	6.62	6.923E+07
	Rutenio (Ru)	0.45	2.20	12	0.0000072	0.60	-3.47	6.07	6.347E+07
	Osmio (Os)	0.70	2.20	16	0.00000812	0.63	-3.72	6.32	6.609E+07
	Paladio (Pd)	0.57	2.20	12	0.00000993	0.60	-3.59	6.19	6.473E+07
	Platino (Pt)	1.20	2.20	12	0.0000106	0.60	-4.22	6.82	7.132E+07
	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	0.60	-3.76	6.36	6.651E+07

### ELEMENTO ANÓDICO ZINC (Zn)

Tabla 3.38 Capacidad electro-catalítica del ánodo zinc para cada uno de los materiales catódicos

	ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	ELECTRONEGATIVIDAD SERIE DE PAULING	S	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA [Ohm - cm]	$\alpha_a/\alpha_c$	VOLTAJE DE EQUILIBRIO (Eo) [V]	SOBRE POTENCIAL ( $\eta$ ) [V]	$i=i_0 \times A_1 \times C_N$
Ánodo	Zinc (Zn)	-0.76	1.65	8	0.000005916	2.68E+05			
Cátodos	Plata (Ag)	0.80	1.93	8	0.00000155	0.57	-1.56	4.16	4.349E+07
	Cobre (Cu)	0.34	1.90	8	0.0000017	0.57	-1.10	3.70	3.869E+07
	Oro (Au)	1.68	2.40	16	0.0000022	0.63	-2.44	5.04	5.270E+07
	Rodio (Rh)	0.80	2.28	16	0.0000043	0.63	-1.56	4.16	4.350E+07
	Iridio (Ir)	1.00	2.20	12	0.0000047	0.60	-1.76	4.36	4.559E+07
	Rutenio (Ru)	0.45	2.20	12	0.0000072	0.60	-1.21	3.81	3.984E+07
	Osmio (Os)	0.70	2.20	16	0.00000812	0.63	-1.46	4.06	4.246E+07
	Paladio (Pd)	0.57	2.20	12	0.00000993	0.60	-1.33	3.93	4.110E+07
	Platino (Pt)	1.20	2.20	12	0.0000106	0.60	-1.96	4.56	4.768E+07
	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	0.60	-1.50	4.10	4.287E+07

### ELEMENTO ANÓDICO ALUMINIO (Al)

Tabla 3.39 Capacidad electro-catalítica del ánodo aluminio para cada uno de los materiales catódicos

	ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	ELECTRONEGATIVIDAD SERIE DE PAULING	S	RESISTENCIA ELÉCTRICA [Ohm - cm]	$\alpha_a/\alpha_c$	VOLTAJE DE EQUILIBRIO (Eo) [V]	SOBRE POTENCIAL ( $\eta$ ) [V]	$i=i_0 \times A_1 \times C_N$
Ánodo	Aluminio (Al)	-1.69	1.65	8	0.0000027	2.68E+05			
Cátodos	Plata (Ag)	0.80	1.93	8	0.00000155	0.57	-2.49	5.09	5.322E+07
	Cobre (Cu)	0.34	1.90	8	0.0000017	0.57	-2.03	4.63	4.842E+07
	Oro (Au)	1.68	2.40	16	0.0000022	0.63	-3.37	5.97	6.243E+07
	Rodio (Rh)	0.80	2.28	16	0.0000043	0.63	-2.49	5.09	5.323E+07
	Iridio (Ir)	1.00	2.20	12	0.0000047	0.60	-2.69	5.29	5.532E+07
	Rutenio (Ru)	0.45	2.20	12	0.0000072	0.60	-2.14	4.74	4.957E+07
	Osmio (Os)	0.70	2.20	16	0.00000812	0.63	-2.39	4.99	5.218E+07
	Paladio (Pd)	0.57	2.20	12	0.00000993	0.60	-2.26	4.86	5.082E+07
	Platino (Pt)	1.20	2.20	12	0.0000106	0.60	-2.89	5.49	5.741E+07
	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	0.60	-2.43	5.03	5.260E+07

### ELEMENTO ANÓDICO HIERRO (Fe)

Tabla 3.40 Capacidad electro-catalítica del ánodo hierro para cada uno de los materiales catódicos

	ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	ELECTRONEGATIVIDAD SERIE DE PAULING	S	RESISTENCIA ELÉCTRICA [Ohm - cm]	$\alpha_a/\alpha_c$	VOLTAJE DE EQUILIBRIO (Eo) [V]	SOBRE POTENCIAL ( $\eta$ ) [V]	$i=i_0 \times A_1 \times C_N$
Ánodo	Hierro (Fe)	-0.04	1.83	8	0.0000089	2.68E+05			
Cátodos	Plata (Ag)	0.80	1.93	8	0.00000155	0.57	-0.84	3.44	3.596E+07
	Cobre (Cu)	0.34	1.90	8	0.0000017	0.57	-0.38	2.98	3.116E+07
	Oro (Au)	1.68	2.40	16	0.0000022	0.63	-1.72	4.32	4.517E+07
	Rodio (Rh)	0.80	2.28	16	0.0000043	0.63	-0.84	3.44	3.597E+07
	Iridio (Ir)	1.00	2.20	12	0.0000047	0.60	-1.04	3.64	3.806E+07
	Rutenio (Ru)	0.45	2.20	12	0.0000072	0.60	-0.49	3.09	3.231E+07
	Osmio (Os)	0.70	2.20	16	0.00000812	0.63	-0.74	3.34	3.493E+07
	Paladio (Pd)	0.57	2.20	12	0.00000993	0.60	-0.61	3.21	3.357E+07
	Platino (Pt)	1.20	2.20	12	0.0000106	0.60	-1.24	3.84	4.015E+07
	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	0.60	-0.78	3.38	3.534E+07

### ELEMENTO ANÓDICO PLOMO (Pb)

Tabla 3.41 Capacidad electro-catalítica del ánodo plomo para cada uno de los materiales catódicos

	ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	ELECTRONEGATIVIDAD SERIE DE PAULING	S	RESISTENCIA ELÉCTRICA [Ohm - cm]	$\alpha_a/\alpha_c$	VOLTAJE DE EQUILIBRIO (Eo) [V]	SOBRE POTENCIAL ( $\eta$ ) [V]	$i=i_0 \times A_1 \times C_N$
Ánodo	Plomo (Pb)	-0.13	1.80	12	0.000047938	2.68E+05			
Cátodos	Plata (Ag)	0.80	1.93	8	0.00000155	0.57	-0.93	3.53	3.686E+07
	Cobre (Cu)	0.34	1.90	8	0.0000017	0.57	-0.47	3.07	3.206E+07
	Oro (Au)	1.68	2.40	16	0.0000022	0.63	-1.81	4.41	4.607E+07
	Rodio (Rh)	0.80	2.28	16	0.0000043	0.63	-0.93	3.53	3.687E+07
	Iridio (Ir)	1.00	2.20	12	0.0000047	0.60	-1.13	3.73	3.896E+07
	Rutenio (Ru)	0.45	2.20	12	0.0000072	0.60	-0.58	3.18	3.321E+07
	Osmio (Os)	0.70	2.20	16	0.00000812	0.63	-0.83	3.43	3.583E+07
	Paladio (Pd)	0.57	2.20	12	0.00000993	0.60	-0.70	3.30	3.447E+07
	Platino (Pt)	1.20	2.20	12	0.0000106	0.60	-1.33	3.93	4.105E+07
	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	0.60	-0.87	3.47	3.624E+07

### ELEMENTO ANÓDICO ESTAÑO (Sn)

Tabla 3.42 Capacidad electro-catalítica del ánodo estaño para cada uno de los materiales catódicos

	ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	ELECTRONEGATIVIDAD SERIE DE PAULING	S	RESISTENCIA ELÉCTRICA [Ohm - cm]	$\alpha_A/\alpha_C$	VOLTAJE DE EQUILIBRIO (Eo) [V]	SOBRE POTENCIAL (η) [V]	$i=i_0 \times A_1 C_N$
Ánodo	Estaño (Sn)	-0.14	1.96	16	0.000022	2.68E+05			
Cátodos	Plata (Ag)	0.80	1.93	8	0.0000155	0.57	-0.94	3.54	3.701E+07
	Cobre (Cu)	0.34	1.90	8	0.0000017	0.57	-0.48	3.08	3.221E+07
	Oro (Au)	1.68	2.40	16	0.0000022	0.63	-1.82	4.42	4.622E+07
	Rodio (Rh)	0.80	2.28	16	0.0000043	0.63	-0.94	3.54	3.702E+07
	Iridio (Ir)	1.00	2.20	12	0.0000047	0.60	-1.14	3.74	3.911E+07
	Rutenio (Ru)	0.45	2.20	12	0.0000072	0.60	-0.59	3.19	3.336E+07
	Osmio (Os)	0.70	2.20	16	0.00000812	0.63	-0.84	3.44	3.597E+07
	Paladio (Pd)	0.57	2.20	12	0.00000993	0.60	-0.71	3.31	3.461E+07
	Platino (Pt)	1.20	2.20	12	0.0000106	0.60	-1.34	3.94	4.120E+07
	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	0.60	-0.88	3.48	3.639E+07

### ELEMENTO ANÓDICO CARBONO (C)

Tabla 3.43 Capacidad electro-catalítica del ánodo carbono para cada uno de los materiales catódicos

	ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	ELECTRONEGATIVIDAD SERIE DE PAULING	S	RESISTENCIA ELÉCTRICA [Ohm - cm]	$\alpha_A/\alpha_C$	VOLTAJE DE EQUILIBRIO (Eo) [V]	SOBRE POTENCIAL (η) [V]	$i=i_0 \times A_1 C_N$
Ánodo	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	2.68E+05			
Cátodos	Plata (Ag)	0.80	1.93	8	0.0000155	0.57	-0.06	2.66	2.779E+07
	Cobre (Cu)	0.34	1.90	8	0.0000017	0.57	0.40	2.20	2.299E+07
	Oro (Au)	1.68	2.40	16	0.0000022	0.63	-0.94	3.54	3.699E+07
	Rodio (Rh)	0.80	2.28	16	0.0000043	0.63	-0.06	2.66	2.780E+07
	Iridio (Ir)	1.00	2.20	12	0.0000047	0.60	-0.26	2.86	2.989E+07
	Rutenio (Ru)	0.45	2.20	12	0.0000072	0.60	0.29	2.31	2.414E+07
	Osmio (Os)	0.70	2.20	16	0.00000812	0.63	0.04	2.56	2.675E+07
	Paladio (Pd)	0.57	2.20	12	0.00000993	0.60	0.17	2.43	2.539E+07
	Platino (Pt)	1.20	2.20	12	0.0000106	0.60	-0.46	3.06	3.198E+07
	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	0.60	0.00	2.60	2.717E+07

## ELEMENTO ANÓDICO NÍQUEL (Ni)

**Tabla 3.44 Capacidad electro-catalítica del ánodo níquel para cada uno de los materiales catódicos**

	ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	ELECTRONEGATIVIDAD SERIE DE PAULING	S	RESISTENCIA ELÉCTRICA [Ohm - cm]	$\alpha_A/\alpha_C$	VOLTAJE DE EQUILIBRIO (Eo) [V]	SOBRE POTENCIAL ( $\eta$ ) [V]	$i=i_0 \times A_1 \times C_N$
Ánodo	Níquel (Ni)	0.25	1.91	8	0.0000064	2.68E+05			
Cátodos	Plata (Ag)	0.80	1.93	8	0.00000155	0.57	-0.55	3.15	3.293E+07
	Cobre (Cu)	0.34	1.90	8	0.0000017	0.57	-0.09	2.69	2.813E+07
	Oro (Au)	1.68	2.40	16	0.0000022	0.63	-1.43	4.03	4.214E+07
	Rodio (Rh)	0.80	2.28	16	0.0000043	0.63	-0.55	3.15	3.294E+07
	Iridio (Ir)	1.00	2.20	12	0.0000047	0.60	-0.75	3.35	3.503E+07
	Rutenio (Ru)	0.45	2.20	12	0.0000072	0.60	-0.20	2.80	2.928E+07
	Osmio (Os)	0.70	2.20	16	0.00000812	0.63	-0.45	3.05	3.189E+07
	Paladio (Pd)	0.57	2.20	12	0.00000993	0.60	-0.32	2.92	3.053E+07
	Platino (Pt)	1.20	2.20	12	0.0000106	0.60	-0.95	3.55	3.712E+07
	Carbono (C)	0.74	2.55	12	0.006	0.60	-0.49	3.09	3.231E+07

Como se muestra en las tablas anteriores la densidad de corriente es la más alta en el caso del Litio y el comportamiento es similar con los otros ánodos (Aluminio Al, Zinc Zn, Acero Inoxidable Fe y Carbono C), se toma como muestra representativa para la evaluación de la capacidad electrocatalítica de los ánodos y cátodos respectivamente se tiene los siguientes resultados:

**Tabla 3.45 Evaluación de la capacidad electro-catalítica para los electrodos anódicos**

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS										
CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA	Litio (Li)	Aluminio (Al)	Zinc (Zn)	Estaño (Sn)	Plomo (Pb)	Hierro (Fe)	Níquel (Ni)	Carbono (C)	$\Sigma$	PONDERACIÓN
Litio (Li)		1	1	1	1	1	1	1	7	0.25
Aluminio (Al)	0		1	1	1	1	1	1	6	0.21
Zinc (Zn)	0	0		1	1	1	1	1	5	0.18
Estaño (Sn)	0	0	0		1	1	1	1	4	0.14
Plomo (Pb)	0	0	0	0		1	1	1	3	0.11
Hierro (Fe)	0	0	0	0	0		1	1	2	0.07
Níquel (Ni)	0	0	0	0	0	0		1	1	0.04
Carbono (C)	0	0	0	0	0	0	0		0	0.00
								<b>TOTAL</b>	28	1.00

Tabla 3.46 Evaluación de la capacidad electro-catalítica para los electrodos catódicos

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS													
CAPACIDAD ELECTRO-CATALÍTICA	Oro (Au)	Platino (Pt)	Iridio (Ir)	Rodio (Rh)	Plata (Ag)	Carbono (C)	Osmio (Os)	Paladio (Pd)	Rutenio (Ru)	Cobre (Cu)	Σ	PONDERACIÓN	
Oro (Au)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	0.20	
Platino (Pt)	0		1	1	1	1	1	1	1	1	8	0.18	
Iridio (Ir)	0	0		1	1	1	1	1	1	1	7	0.16	
Rodio (Rh)	0	0	0		1	1	1	1	1	1	6	0.13	
Plata (Ag)	0	0	0	0		1	1	1	1	1	5	0.11	
Carbono (C)	0	0	0	0	0		1	1	1	1	4	0.09	
Osmio (Os)	0	0	0	0	0	0		1	1	1	3	0.07	
Paladio (Pd)	0	0	0	0	0	0	0		1	1	2	0.04	
Rutenio (Ru)	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1	0.02	
Cobre (Cu)	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0.00	
											<b>TOTAL</b>	45	1.00

### 3.3.6.3 Evaluación del criterio de Estabilidad Química de los materiales de los electrodos anódicos y catódicos.

En cualquier reacción Química, incluida la de un metal con medio agresivo, la tendencia a corroerse es medida por la variación de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ). Cuanto más negativo es el valor de  $\Delta G$ , mayor es la tendencia a realizarse la reacción de oxidación o corrosión.

Tabla 3.47 Estabilidad química para los electrodos anódicos

ESTABILIDAD QUÍMICA PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS			
ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	NÚMERO DE ELECTRONES (n)	ENERGÍA LIBRE DE GIBBS EN (cal) $\Delta G^\circ = -E_n F$
Litio (Li)	-3.020	1	-291430.0
Zinc (Zn)	-0.760	2	-146680.0
Aluminio (Al)	-1.690	3	-489255.0
Hierro (Fe)	-0.040	3	-11580.0
Plomo (Pb)	-0.126	4	-48636.0
Estaño (Sn)	-0.140	4	-54040.0
Carbono (C)	0.740	4	285640.0
Níquel (Ni)	0.250	2	48250.0

Tabla 3.47 Estabilidad química para los electrodos catódicos

ESTABILIDAD QUÍMICA PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS			
ELEMENTO	POTENCIAL DE ELECTRODO CONTRA ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO A 25 C [V]	NÚMERO DE ELECTRONES (n)	ENERGÍA LIBRE DE GIBBS EN (cal) $\Delta G^\circ = -E_n F$
Oro (Au)	-1.680	3	486360
Iridio (Ir)	-1.000	4	386000
Osmio (Os)	-0.700	4	270200
Rodio (Rh)	-0.800	3	231600
Platino (Pt)	-1.200	2	231600
Rutenio (Ru)	-0.450	4	173700
Carbono (C)	-0.740	2	142820
Paladio (Pd)	-0.570	2	110010
Plata (Ag)	-0.799	1	77103.5
Cobre (Cu)	-0.340	2	65620

Tabla 3.48 Tabla de evaluación de la estabilidad química de los electrodos anódicos

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD QUÍMICA PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS										
ESTABILIDAD QUÍMICA	Carbono (C)	Níquel (Ni)	Hierro (Fe)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Zinc (Zn)	Litio (Li)	Aluminio (Al)	$\Sigma$	PONDERACIÓN
Carbono (C)		1	1	1	1	1	1	1	7	0.25
Níquel (Ni)	0		1	1	1	1	1	1	6	0.21
Hierro (Fe)	0	0		1	1	1	1	1	5	0.18
Plomo (Pb)	0	0	0		1	1	1	1	4	0.14
Estaño (Sn)	0	0	0	0		1	1	1	3	0.11
Zinc (Zn)	0	0	0	0	0		1	1	2	0.07
Litio (Li)	0	0	0	0	0	0		1	1	0.04
Aluminio (Al)	0	0	0	0	0	0	0		0	0.00
								<b>TOTAL</b>	28	1.00

Tabla 3.49 Tabla de evaluación de la estabilidad química de los electrodos catódicos

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD QUÍMICA PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS												
ESTABILIDAD QUÍMICA	Oro (Au)	Iridio (Ir)	Osmio (Os)	Rodio (Rh)	Platino (Pt)	Rutenio (Ru)	Carbono (C)	Paladio (Pd)	Plata (Ag)	Cobre (Cu)	Σ	PONDERACIÓN
Oro (Au)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	0.20
Iridio (Ir)	0		1	1	1	1	1	1	1	1	8	0.18
Osmio (Os)	0	0		1	1	1	1	1	1	1	7	0.16
Rodio (Rh)	0	0	0		1	1	1	1	1	1	6	0.13
Platino (Pt)	0	0	0	0		1	1	1	1	1	5	0.11
Rutenio (Ru)	0	0	0	0	0		1	1	1	1	4	0.09
Carbono (C)	0	0	0	0	0	0		1	1	1	3	0.07
Paladio (Pd)	0	0	0	0	0	0	0		1	1	2	0.04
Plata (Ag)	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1	0.02
Cobre (Cu)	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0.00
										<b>TOTAL</b>	45	1.00

### 3.3.6.4 Evaluación del criterio de Mínima Resistencia Eléctrica de los materiales de los electrodos anódicos y catódicos.

Este criterio se considera como una propiedad interna de los materiales, el parámetro para evidenciar la resistencia de un material se tomo la resistividad tanto para los ánodos y cátodos, que se muestra a continuación:

Tabla 3.50 Tabla de resistividad eléctrica de los electrodos anódicos

RESISTENCIA DE LOS MATERIALES DE LOS ELECTRODOS ANÓDICOS		
NUMERACIÓN	ELEMENTO	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA [Ohm - cm]
1	Litio (Li)	0.0000084
2	Zinc (Zn)	0.000005916
3	Aluminio (Al)	0.0000027
4	Hierro (Fe)	0.0000089
5	Plomo (Pb)	0.000047938
6	Estaño (Sn)	0.000022
7	Carbono (C)	0.006
8	Níquel (Ni)	0.0000064

Fuente: <http://www.matweb.com>

Tabla 3.51 Tabla de resistividad eléctrica de los electrodos catódicos

RESISTENCIA DE LOS MATERIALES DE LOS ELECTRODOS CATÓDICOS		
NUMERACIÓN	ELEMENTO	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA [Ohm - cm]
1	Plata (Ag)	0.00000155
2	Cobre (Cu)	0.0000017
3	Oro (Au)	0.0000022
4	Rodio (Rh)	0.0000043
5	Iridio (Ir)	0.0000047
6	Rutenio (Ru)	0.0000072
7	Osmio (Os)	0.00000812
8	Paladio (Pd).	0.00000993
9	Platino (Pt)	0.0000106
10	Carbono (C)	0.006

Fuente: <http://www.matweb.com>

Tabla 3.52 Evaluación del criterio de resistencia de los materiales para los electrodos anódicos

EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS										
MÍNIMA RESISTENCIA ELÉCTRICA	Aluminio (Al)	Zinc (Zn)	Níquel (Ni)	Litio (Li)	Hierro (Fe)	Estaño (Sn)	Plomo (Pb)	Carbono (C)	Σ	PONDERACIÓN
Aluminio (Al)		1	1	1	1	1	1	1	7	0.25
Zinc (Zn)	0		1	1	1	1	1	1	6	0.21
Níquel (Ni)	0	0		1	1	1	1	1	5	0.18
Litio (Li)	0	0	0		1	1	1	1	4	0.14
Hierro (Fe)	0	0	0	0		1	1	1	3	0.11
Estaño (Sn)	0	0	0	0	0		1	1	2	0.07
Plomo (Pb)	0	0	0	0	0	0		1	1	0.04
Carbono (C)	0	0	0	0	0	0	0		0	0.00
								<b>TOTAL</b>	28	1.00

Tabla 3.53 Evaluación del criterio de resistencia de los materiales para los electrodos catódicos

EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS													
MÍNIMA RESISTENCIA ELÉCTRICA	Plata (Ag)	Cobre (Cu)	Oro (Au)	Rodio (Rh)	Iridio (Ir)	Rutenio (Ru)	Osmio (Os)	Paladio (Pd)	Platino (Pt)	Carbono (C)	Σ	PONDERACIÓN	
Plata (Ag)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	0.20	
Cobre (Cu)	0		1	1	1	1	1	1	1	1	8	0.18	
Oro (Au)	0	0		1	1	1	1	1	1	1	7	0.16	
Rodio (Rh)	0	0	0		1	1	1	1	1	1	6	0.13	
Iridio (Ir)	0	0	0	0		1	1	1	1	1	5	0.11	
Rutenio (Ru)	0	0	0	0	0		1	1	1	1	4	0.09	
Osmio (Os)	0	0	0	0	0	0		1	1	1	3	0.07	
Paladio (Pd)	0	0	0	0	0	0	0		1	1	2	0.04	
Platino (Pt)	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1	0.02	
Carbono (C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0.00	
											<b>TOTAL</b>	45	1.00

### 3.3.6.5 Evaluación del criterio de Disponibilidad y Costos de los materiales de los electrodos anódicos y catódicos.

Para evaluar este criterio se va a considerar el precio que se comercializa en el mercado ecuatoriano y la disponibilidad inmediata de contar con estos materiales.

Para ciertos elementos tanto para los electrodos anódicos y catódicos, se realizaron consultas a casa comerciales que venden y distribuyen estos elementos en forma de lámina o como alambre.

Para el caso específico de algunos materiales se realizaron consultas mediante publicaciones del Banco Central del Ecuador, que se muestran a continuación expresando el costo en dólares americanos por kilogramo. En el caso particular del Litio no se lo puede adquirir en el mercado ecuatoriano, como se muestra en la tabla N°3.54.

Tabla 3.54 Costo y disponibilidad para los electrodos anódicos

<b>COSTO Y DISPONIBILIDAD PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS</b>		
<b>NUMERACIÓN</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>COSTO [USD/kg]</b>
1	Litio (Li)	No disponible
2	Zinc (Zn)	4.80
3	Aluminio (Al)	5.38
4	Hierro (Fe)	0.90
5	Plomo (Pb)	1.20
6	Estaño (Sn)	22.00
7	Carbono (C)	0.10
8	Níquel (Ni)	28.76

Tabla 3.55 Costo y disponibilidad para los electrodos catódicos

<b>COSTO Y DISPONIBILIDAD PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS</b>		
<b>NUMERACIÓN</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>COSTO [USD/kg]</b>
1	Oro (Au)	35343.32
2	Platino (Pt)	51434.78
3	Iridio (Ir)	14467.84
4	Rodio (Rh)	73625.23
5	Plata (Ag)	557.17
6	Carbono (C)	0.10
7	Osmio (Os)	13824.82
8	Paladio (Pd).	14776.49
9	Rutenio (Ru)	12860.30
10	Cobre (Cu)	16.68

Tabla 3.56 Evaluación del criterio de disponibilidad para los electrodos anódicos

EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE DISPONIBILIDAD PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS										
DISPONIBILIDAD Y COSTO	Litio (Li)	Aluminio (Al)	Zinc (Zn)	Estaño (Sn)	Plomo (Pb)	Hierro (Fe)	Níquel (Ni)	Carbono (C)	$\Sigma$	PONDERACIÓN
Carbono (C)		1	1	1	1	1	1	1	7	0.25
Hierro (Fe)	0		1	1	1	1	1	1	6	0.21
Plomo (Pb)	0	0		1	1	1	1	1	5	0.18
Zinc (Zn)	0	0	0		1	1	1	1	4	0.14
Aluminio (Al)	0	0	0	0		1	1	1	3	0.11
Estaño (Sn)	0	0	0	0	0		1	1	2	0.07
Níquel (Ni)	0	0	0	0	0	0		1	1	0.04
Litio (Li)	0	0	0	0	0	0	0		0	0.00
								<b>TOTAL</b>	28	1.00

Tabla 3.57 Evaluación del criterio de disponibilidad para los electrodos anódicos

EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE DISPONIBILIDAD PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS													
DISPONIBILIDAD Y COSTO	Oro (Au)	Platino (Pt)	Iridio (Ir)	Rodio (Rh)	Plata (Ag)	Carbono (C)	Osmio (Os)	Paladio (Pd)	Rutenio (Ru)	Cobre (Cu)	$\Sigma$	PONDERACIÓN	
Carbono (C)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	0.20	
Cobre (Cu)	0		1	1	1	1	1	1	1	1	8	0.18	
Plata (Ag)	0	0		1	1	1	1	1	1	1	7	0.16	
Rutenio (Ru)	0	0	0		1	1	1	1	1	1	6	0.13	
Osmio (Os)	0	0	0	0		1	1	1	1	1	5	0.11	
Iridio (Ir)	0	0	0	0	0		1	1	1	1	4	0.09	
Paladio (Pd)	0	0	0	0	0	0		1	1	1	3	0.07	
Oro (Au)	0	0	0	0	0	0	0		1	1	2	0.04	
Platino (Pt)	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1	0.02	
Rodio (Rh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0.00	
											<b>TOTAL</b>	45	1.00

### 3.3.6.6 Evaluación de los criterios de los materiales para los electrodos.

Tanto los criterios de evaluación y la selección para los materiales de los electrodos serán evaluados mediante un matriz de ponderación, evidenciando el grado de importancia para el uso en el electrolizado.

Tabla 3.58 Matriz de los criterios de evaluación para los electrodos anódicos y catódicos

CRITERIOS DE PONDERACIÓN PARA LA EVALUACION DE LOS MATERIALES DE LOS ELECTRODOS CATÓDICOS Y ANÓDICOS							
FACTORES	Capacidad Electro-Catalítica	Estabilidad Química	Mínima Resistencia Eléctrica	Costo - Disponibilidad	$\Sigma$	PONDERACIÓN [%]	ORDEN
Capacidad Electro-Catalítica		0.5	1	0	1.5	30.00	Costo - Disponibilidad
Estabilidad Química	0.5		0.5	0.5	1	20.00	Capacidad Electro-Catalítica
Mínima Resistencia Eléctrica	0	0.5		0.5	0.5	10.00	Estabilidad Química
Costo - Disponibilidad	1	0.5	0.5		2	40.00	Mínima Resistencia Eléctrica
				<b>TOTAL</b>	<b>5</b>	<b>100.00</b>	

### 3.3.6.7 Selección de los materiales para los electrodos.

#### 3.3.6.7.1 Selección de los materiales para los electrodos anódicos.

Tabla 3.59 Ponderación de los materiales para los electrodos anódicos

MATRIZ DE EVALUACIÓN Y PONDERACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS ANÓDICOS						
FACTORES	Capacidad Electro-Catalítica	Estabilidad Química	Mínima Resistencia Eléctrica	Costo - Disponibilidad	$\Sigma$	PRIORIDAD
PONDERACIÓN [%]	30	20	10	40	100	MÁXIMA
Carbono (C)	0.00	0.25	0.00	0.25	0.150	Hierro (Fe)
Hierro (Fe)	0.07	0.18	0.11	0.21	0.154	Carbono (C)
Plomo (Pb)	0.11	0.14	0.04	0.18	0.136	Zinc (Zn)
Zinc (Zn)	0.18	0.07	0.21	0.14	0.146	Plomo (Pb)
Aluminio (Al)	0.21	0.00	0.25	0.11	0.131	Aluminio (Al)
Estaño (Sn)	0.14	0.11	0.07	0.07	0.100	Estaño (Sn)
Níquel (Ni)	0.04	0.21	0.18	0.04	0.086	Litio (Li)
Litio (Li)	0.25	0.04	0.14	0.00	0.097	Níquel (Ni)

## 3.3.6.7.2 Selección de los materiales para los electrodos catódicos.

Tabla 3.60 Ponderación de los materiales para los electrodos catódicos

MATRIZ DE EVALUACIÓN Y PONDERACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LOS ELECTRODOS CATÓDICOS						
FACTORES	Capacidad Electro-Catalítica	Estabilidad Química	Mínima Resistencia Eléctrica	Costo - Disponibilidad	$\Sigma$	PRIORIDAD
PONDERACIÓN [%]	30	20	10	40	100	MÁXIMA
Oro (Au)	0.200	0.200	0.160	0.04	0.132	Iridio (Ir)
Platino (Pt)	0.178	0.111	0.020	0.02	0.086	Oro (Au)
Iridio (Ir)	0.156	0.180	0.200	0.09	0.139	Carbono (C)
Rodio (Rh)	0.133	0.130	0.130	0.00	0.079	Plata (Ag)
Plata (Ag)	0.111	0.020	0.200	0.16	0.120	Osmio (Os)
Carbono (C)	0.089	0.070	0.000	0.20	0.121	Cobre (Cu)
Osmio (Os)	0.067	0.160	0.070	0.11	0.103	Rutenio (Ru)
Paladio (Pd)	0.044	0.040	0.040	0.07	0.053	Platino (Pt)
Rutenio (Ru)	0.022	0.090	0.090	0.13	0.087	Rodio (Rh)
Cobre (Cu)	0.000	0.000	0.180	0.18	0.089	Paladio (Pd)

## 3.3.6.8 Presentación de las materiales elegidos para los electros anódicos y catódicos.

Tabla 3.61 Materiales elegidos para los electrodos anódicos y catódicos

ELEMENTOS DE LOS ELECTRODOS ANÓDICOS	ELEMENTOS DE LOS ELECTRODOS CATÓDICOS
Hierro (Fe)	Iridio (Ir)
Carbono (C)	Oro (Au)
Zinc (Zn)	Carbono (C)
Plomo (Pb)	Plata (Ag)
Aluminio (Al)	Osmio (Os)
Estaño (Sn)	Cobre (Cu)

## **CAPÍTULO 4**

### **4. CÁLCULO, SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LA MÁQUINA.**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se detalla el procedimiento de cálculos, selección y dimensionamiento de los elementos que constituyen al electrolizador, mediante los criterios de cálculos y selección que se establecerán a continuación, además con una publicación clara de resultados.

#### **4.2 CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DEL ELECTROLIZADOR**

Como se mencionó en el capítulo anterior el electrolizador estará conformado por cuatro sistemas independientes que conforman al electrolizador y para los sistemas que requieran un análisis más profundo se desarrollaran criterios propios de diseño.

##### **4.2.1 CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO**

Para establecer los criterios de cálculo y selección de los materiales que conformaran al sistema de producción y distribución de hidrógeno se debe considerar el entorno en el cual se van a desenvolver, por esta razón los criterios más importantes para este sistema son:

- El criterio de Degradación Química es de gran importancia ya que el cuerpo del electrolizador va estar en contacto directo con el electrolito cual es una solución electrolítica acuosa al 20% de Hidróxido de sodio, por este motivo el cuerpo debe garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas del electrolizador.

- El criterio de resistencia mecánica es el cual garantiza que el material soportará la presión de producción de hidrogeno y la compresión por los pernos de sujeción de forma axial, que son seleccionados según las especificaciones, con el fin de evitar que el electrolito drene por las paredes del cuerpo del electrolizador.

#### **4.2.2 CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO**

Este sistema debe garantizar una alimentación adecuada del electrolito, para producción de hidrógeno, por este motivo se considera el siguiente criterio de cálculo:

- Criterio de Degradación Química este sistema consta de un tanque de almacenamiento, mangueras y válvulas, los cuales van a estar contacto constante con el electrolito, existiendo a problemas de degradación química y corrosión.

#### **4.3 CÍRCULO DE MOHR**

Para desarrollar un diseño adecuado se debe relacionar la resistencia de un elemento con las cargas externas a las que va estar sometido dicho elemento, que producirán esfuerzos internos en dicho elemento, lo cual se debe garantizar que esos esfuerzos excedan a la resistencia calculada ya que este elemento ya no brindaría seguridad.

Para asegurar que el elemento diseñado va a satisfacer los requerimientos del trabajo, se realizará un análisis de esfuerzos llamado Círculo de Mohr.

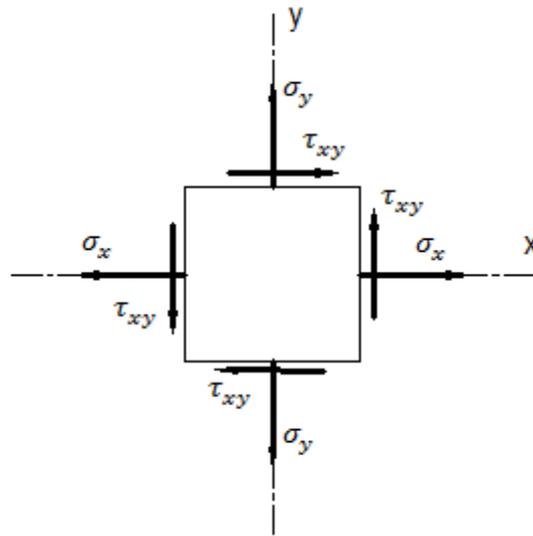


Figura 4.1 Esquema del esfuerzo plano o biaxial

Se considerará el elemento de la Figura N°4.1.- se lo corta en un plano inclinado, el cual tiene un ángulo  $\phi$  con respecto al eje x, como se muestra en la Figura N°4.2.-. Esta sección tratará de los esfuerzos  $\sigma$  y  $\zeta$  que actúan en ese plano. Al sumar las fuerzas correspondientes a todas las componentes del esfuerzo e igualarlas a cero, los esfuerzos  $\sigma$  y  $\zeta$  serán:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \times \cos 2\phi + \tau_{xy} \times \text{sen} 2\phi \quad (4.1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \times \text{sen} 2\phi + \tau_{xy} \times \cos 2\phi \quad (4.2)$$

**Donde:**

$\sigma$  : Esfuerzo principal [KPa]

$\sigma_x$  : Esfuerzo principal en el eje x [KPa]

$\sigma_y$  : Esfuerzo principal en el eje y [KPa]

$\varphi$  : Ángulo de inclinación entre  $\sigma$  y el eje x [rad]

$\tau_{xy}$  : Esfuerzo cortante en el plano xy [KPa]

Derivando la ecuación 4.2 con respecto a  $\varphi$ , nos da como resultado

$$\tan 2\phi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (4.3)$$

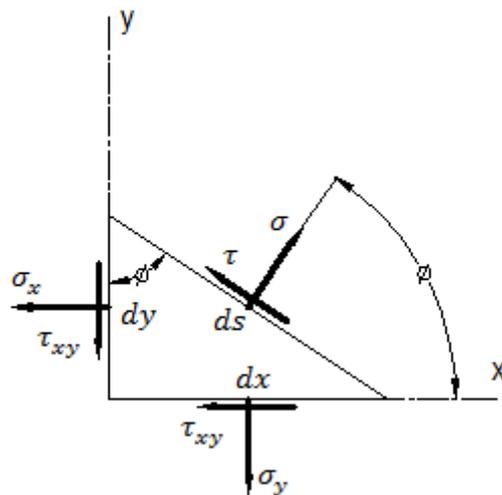


Figura 4.2 Esquema del esfuerzo de corte

De la ecuación anterior se determina los valores particulares de  $2\phi$ , uno de los cuales define el esfuerzo normal máximo  $\sigma_1$ , y el otro, el esfuerzo normal mínimo  $\sigma_2$ . A estos dos esfuerzos se les da el nombre de esfuerzos principales y a sus direcciones se les da el nombre de direcciones principales.

Al derivar la ecuación 4.1 con respecto a  $\phi$ , nos da como resultado

$$\tan 2\phi = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \quad (4.4)$$

Esta última ecuación se define los valores de  $2\phi$ , en los que el esfuerzo cortante  $\tau$  alcanza un valor máximo.

El esfuerzo principal también puede ser representado de la siguiente ecuación

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (4.5)$$

Esta ecuación nos indica que los dos esfuerzos normales ejercidos en las direcciones de los dos esfuerzos cortantes máximos son iguales entre sí.

Las fórmulas de los dos esfuerzos principales se pueden obtener sustituyendo el ángulo  $2\phi$  de la ecuación 4.3.- .El resultado es

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.6)$$

De manera similar para los esfuerzos cortantes máximos serán

$$\tau_1, \tau_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.7)$$

El método gráfico para expresar las relaciones obtenidas en esta sección, denominada diagrama de Mohr, es un medio eficaz para visualizar el estado del esfuerzo en un punto y tener en cuenta la dirección de los diversos componentes asociados al esfuerzo plano. En la Figura N°4.3 se establece un sistema de coordenadas, en el que los esfuerzos normales se presentan como abscisas y los

cortantes, como coordenadas. En el eje de abscisas, los esfuerzos normales de tensión (positivos), se marcan a la derecha del origen O, y los esfuerzos normales de compresión (negativos), a la izquierda. En el eje de las ordenadas los esfuerzos cortantes en el sentido del reloj (s.r.) se trazan hacia arriba, y los esfuerzos cortantes en el sentido contrario al reloj (s.c.r.) se trazan hacia abajo.

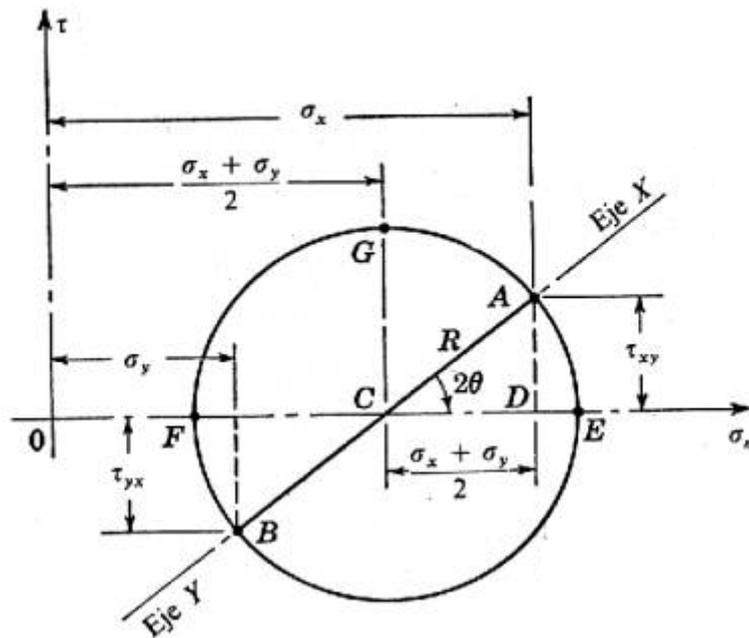


Figura 4.3 Diagrama del círculo de Mohr

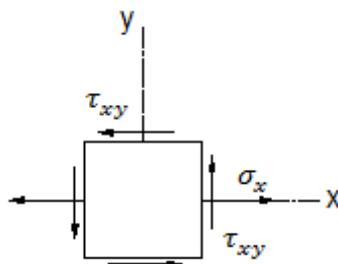


Figura 4.4 Esquema del esfuerzo normal principal máximo

## 4.4 FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad es un índice de la seguridad que cabe esperar de un determinado diseño desde el punto de vista resistente. La forma más usual de definir el coeficiente de seguridad de un diseño mecánico es una de las siguientes:

- Como cociente entre la resistencia del material (S) y la tensión realmente existente ( $\sigma$ ):

$$n = \frac{S}{\sigma} \quad (4.8)$$

**Donde:**

<b>S</b>	<b>: Resistencia de fluencia del material.</b>	<b>[KPa]</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>: Esfuerzo al que va estar sometido el material.</b>	<b>[KPa]</b>
<b>n</b>	<b>: Factor de seguridad</b>	

En el proyecto de elementos mecánicos, existen dos alternativas para incluir un coeficiente de seguridad en el diseño:

- Maximizar las fuerzas realmente esperadas, multiplicándolas por el coeficiente de seguridad (coeficiente de seguridad de maximización de carga).
- Minorar la resistencia realmente esperable del material, dividiéndola por el coeficiente de seguridad (coeficiente de seguridad de minoración de resistencia).

## 4.5 PERNOS

Cuando se desea que una conexión que pueda desensamblarse sin destruirla y que sea lo suficientemente fuerte para resistir cargas externas de tensión y de cortante, o una combinación de ambas, entonces la junta de perno sencilla con rondanas o arandelas templadas es una buena solución.

Para hallar la rigidez de un perno, se debe considerar la ecuación 4.9.  $A$  es el área transversal basada en el diámetro mayor o nominal porque el efecto de la rosca se desprecia. El agarre  $l$  es el espesor total de las piezas que han de sujetarse, que es algo menor que la longitud del perno, como se muestra en la figura N°4.5.

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{AE}{l} \quad (4.9)$$

Donde:

<b>k</b>	: Constante de rigidez	
<b><math>\delta</math></b>	: Deformación total	[m]
<b>F</b>	: Fuerza	[N]
<b>A</b>	: Área transversal	[m <sup>2</sup> ]
<b>E</b>	: Módulo de elasticidad	[Pa]

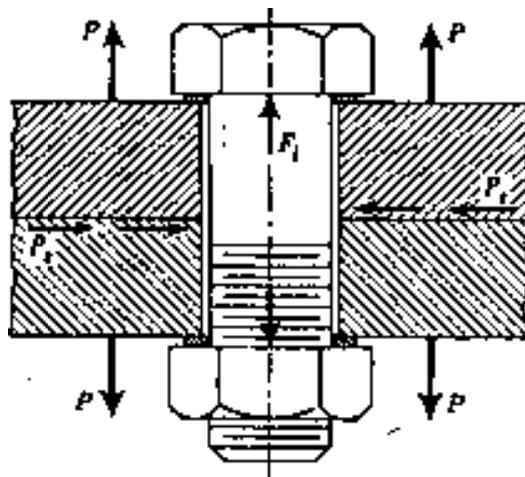


Figura 4.5 Esquema de la unión del perno

Cuando se aplica la carga externa  $P$  al conjunto precargado, hay un cambio en la deformación total del perno y también en la de los elementos unidos. El perno, inicialmente en tensión, se alarga más. Este aumento en la deformación es:

$$\Delta\delta_b = \frac{P_b}{k_b} \quad (4.10)$$

Las piezas sujetadas tienen compresión inicial debido a la precarga. Cuando se aplique la carga externa, esta compresión disminuirá. La reducción en la deformación total de las piezas es

$$\Delta\delta_m = \frac{P_m}{k_m} \quad (4.11)$$

Considerando que los elementos unidos no se han separado, el aumento en la deformación total del perno debe ser igual a la disminución en la deformación de las piezas sujetadas; en consecuencia:

$$\frac{P_b}{k_b} = \frac{P_m}{k_m} \quad (4.12)$$

Puesto que  $P = P_b + P_m$ , se tiene

$$P_b = \frac{k_b P}{k_b + k_m} \quad (4.13)$$

Por tanto, la carga resultante sobre el perno es

$$F_b = P_b + F_i = \frac{k_b P}{k_b + k_m} + F_i \quad (4.14)$$

En la misma forma, la compresión resultante de los elementos de la junta será:

$$F_m = \frac{k_m P}{k_b + k_m} - F_i \quad (4.15)$$

**Donde:**

<b>P</b>	<b>: Carga externa total sobre la unión de perno</b>	<b>[N]</b>
<b>F<sub>i</sub></b>	<b>: Precarga del perno debida al apriete y la cual existe antes que se aplique P</b>	<b>[N]</b>
<b>P<sub>b</sub></b>	<b>: Porción de P tomada por el perno</b>	<b>[N]</b>
<b>P<sub>m</sub></b>	<b>: Porción de P tomada por los elementos unidos</b>	<b>[N]</b>
<b>F<sub>b</sub></b>	<b>: Carga resultante sobre el perno</b>	<b>[N]</b>
<b>F<sub>m</sub></b>	<b>: Carga resultante sobre los elementos</b>	<b>[N]</b>

Las ecuaciones (4.14) y (4.15) se verifican en tanto que se mantenga algo de la compresión inicial en las piezas. Si la fuerza externa es suficiente para eliminar esta compresión por completo, los elementos de la unión se separarán y el perno soportará la carga total.

#### **4.5.1 ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA**

La tabla N° 4.2.-, presenta los grados y especificaciones de los sujetadores roscados en uso. Los grados SAE 1 y 2 sólo deben ser utilizados para conexiones sin carga o poco importantes. Su contenido de carbono es demasiado bajo y la ductilidad, muy alta para el caso de uniones con carga pesada. Esta misma tabla muestra cómo se identifican los grados de los pernos mediante marcas en las partes superior o laterales de la cabeza.

Los términos carga de prueba y resistencia a la prueba aparecen con frecuencia en las publicaciones técnicas.

La carga de prueba de un perno es la fuerza máxima que puede soportar sin que sufra deformación permanente. La resistencia a la prueba es el valor límite del esfuerzo, determinado utilizando la carga de prueba y el área de esfuerzo de tensión.

Aunque la resistencia a la prueba y la resistencia de fluencia tienen algo en común, esta última generalmente es la más alta de las dos, porque está basada en una deformación permanente, de 0.2%.

#### 4.5.2 PRECARGA DE PERNOS: CARGA ESTÁTICA

Anteriormente se expresó que la carga externa  $P$ , tornada por el perno en una junta con carga a tensión, es representada por la ecuación (4.14), se puede establecer la relación de rigidez.

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (4.16)$$

Por lo tanto la ecuación (4.14) puede escribirse como:

$$F_b = CP + F_i \quad (4.17)$$

La condición para la separación de la junta es que

$$CP + F_i = 0 \quad (4.18)$$

Por consiguiente, la precarga  $F$ , debe ser siempre mayor que  $CP$ . Además no debe producir fluencia en el material del perno. En consecuencia, el valor de seguridad de  $F$ , debe estar en el intervalo

$$CP < F_i < A_t S_y \quad (4.19)$$

Utilizando un factor de seguridad  $n$  esta relación puede expresarse en la forma

$$F_i = A_s S_y - CnP \quad (4.20)$$

Por consiguiente, en general, se debe elegir un factor de seguridad  $n > 1.5$  dependiendo de las consideraciones del diseño.

### 4.5.3 JUNTAS CON EMPAQUETADURA

La figura N° 4.6.- muestra tres configuraciones básicas de empaquetadura. En las juntas que tienen empaques en ranuras, los elementos están en contacto metálico directo y, por lo tanto, los métodos ya descritos se aplican en estos casos.

El empaque no confinado de una junta está sujeto a la carga de compresión total entre las piezas. Su rigidez predomina y, por lo tanto, las características de la empaquetadura gobiernan el diseño de la conexión. La tabla N° 4. 1.- proporciona el módulo de elasticidad  $E$  necesario para evaluar la rigidez de algunos tipos y materiales de empaquetaduras.

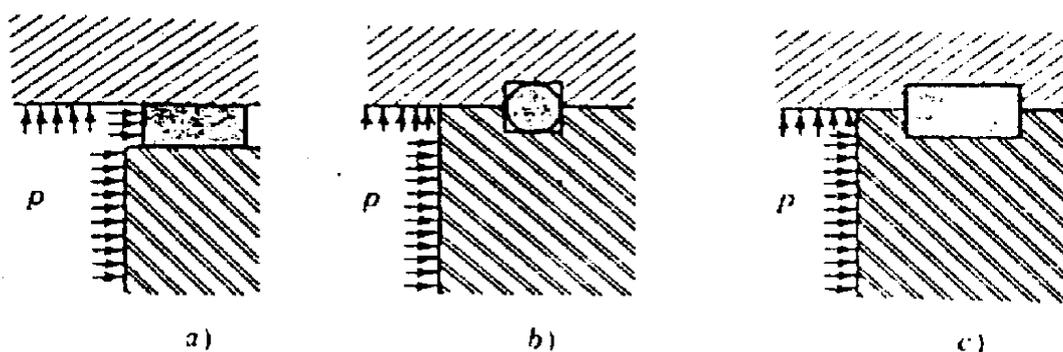


Figura 4.6 Tipos de empaquetaduras

- a) Empaque no colocado en ranura; b) anillo "O" en ranuras en el que el sellado se realiza por la presión  $p$ , c) empaque en ranuras en el que el sellado efectúa por compresión del mismo.

Tabla 4.1 Módulo de elasticidad para materiales de empaquetaduras

Material	Modulo de elasticidad, E	
	kpsi	MPa
Corcho	12.5	86
Asbesto Comprimido	70.0	480
Cobre-asbesto	13.5(10) <sup>3</sup>	93(10) <sup>3</sup>
Caucho(hule) simple	10.0	69
Rollo en espiral	41.0	280
Teflón	35.0	240
Fibra vegetal	17.0	120

Esta acción debe ser lo bastante grande para alcanzar la presión mínima de sellado que se requiere para el material del empaque, de modo que la precarga debe satisfacer la relación

$$F_i \geq A_g p_o \quad (4.21)$$

Donde:

**A<sub>g</sub>** : Área de empaquetadura [m<sup>2</sup>]  
**P<sub>o</sub>** : Presión mínima de sellado [Pa]

#### 4.6 DETERMINACIÓN DEL pH DEL ELECTROLÍTO

Las soluciones acuosas contienen siempre iones hidronio así como iones hidroxilo, como en consecuencia de la disociación del agua:



Algunos solutos, sin embargo, provocan variaciones enormes de las concentraciones de dichas especies, a menudo con efectos profundos en lo que se refiere al comportamiento químico de la solución.

Se dice que una solución es ácida cuando su concentración de iones hidronio supera a la de iones hidroxilo; se dice que es básica si ocurre lo contrario. Estas variaciones aparecen como consecuencia de la presencia de un soluto que reacciona produciendo o consumiendo uno de dichos iones.

Tomando el logaritmo cambiado de signo en los dos miembros de la expresión de la constante de producto iónico se obtiene una relación muy útil. Así:

$$-\log K_w = -\log[H_3O^+][OH^-] = -\log[H_3O^+] - \log[OH^-] \quad (4.23)$$

De lo cual se sigue:

$$-\log K_w = pH + pOH \quad (4.24)$$

A 25°C,  $-\log K_w$  o  $pK_w$  es igual a catorce, por lo que se puede escribir:

$$pH + pOH = 14 \quad (4.25)$$

Las bases fuertes, tales como el hidróxido de sodio, son compuestos iónicos ya en estado sólido, y permanecen en dicha forma iónica al disolverse en un disolvente tal como el agua.

El cálculo del valor del pH o del pOH de las soluciones acuosas de los ácidos fuertes o de las bases fuertes es sencillo y directo, puesto que la concentración de ión hidronio o hidroxilo viene dada directamente por la concentración formal del soluto. En dicho cálculo, el número de iones hidronio o de iones hidroxilo procedentes de la disociación del agua es tan pequeña, en comparación con los introducidos respectivamente por el ácido fuerte o por la base fuerte, que es necesario tener en cuenta aquel equilibrio.

Para calcular el pH de las soluciones de bases, no se sabe en forma directa el número de radicales de hidrógeno [ H<sup>+</sup>]. Se debe recurrir a la expresión de disociación del agua o auto protólisis del agua, en donde:



El sistema, representado por una doble flecha, expresa un equilibrio entre moléculas de agua y sus iones. Este equilibrio es dinámico, no estático. En forma permanente moléculas de agua disocian (hacia la derecha) a la vez que iones H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> se asocian para formar moléculas de agua (hacia la izquierda).

Se sabe que a 25 °C, la concentración de iones H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> es de 1. 10<sup>-7</sup> M respectivamente, lo que indica que muy pocas moléculas de agua estarán disociadas (una de cada 500 millones aprox.), pero las suficientes como para poder contarlas.

$$pHT = pH + pOH \quad (4.27)$$

#### **4.7 LEY DE FARADAY**

Mediante el uso de la ley de Faraday, podemos establecer la producción teórica de hidrógeno mediante los postulados que se menciona a continuación:

- 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, o en sentido inverso.
- Las cantidades de sustancias puestas en libertad en los distintos electrodos por las mismas cantidades de electricidad (o en cualquier forma transformadas químicamente), guardan entre si la misma relación de sus pesos equivalentes o equivalentes químicos, es decir, a sus masas atómicas divididas por sus valencias.

Por este motivo la ecuación final de Faraday se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{m}{P_e} = \frac{I \times t}{F} \quad (4.28)$$

**Donde:**

<b>m</b>	<b>: Masa del gas</b>	<b>[kg]</b>
<b>P<sub>e</sub></b>	<b>: Peso equivalente del electrolito</b>	<b>[kg/ kmol]</b>
<b>I</b>	<b>: Corriente eléctrica</b>	<b>[A]</b>
<b>t</b>	<b>: Tiempo</b>	<b>[s]</b>
<b>F</b>	<b>: Constante de Faraday</b>	<b>9.65×10<sup>7</sup> [C/ kmol]</b>

## **4.8 CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS CONSTITUIDOS DEL ELECTROLIZADOR.**

### **4.8.1 CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR.**

#### **4.8.1.1 Cálculo del espesor del cuerpo del electrolizador necesario para soportar la presión de producción de hidrógeno.**

Para establecer los esfuerzos a los que va estar sometido el cuerpo del electrolizador se debe nombrar las condiciones de trabajo.

La presión de producción de hidrogeno en el cuerpo del electrolizador está relacionada directamente con el peso de la solución electrolítica y los electrodos que están sumergidos en ella, por este motivo se va determinar la presión a la que van

estar sometidas cada una de las paredes del cuerpo del electrolizador, además se considerará para problemas de iteración que el espesor para la construcción del cuerpo del electrolizador será de 10 milímetros.

Mediante estos parámetros el criterio de diseño del cuerpo del electrolizador será mediante la teoría de recipientes de presión de pared delgada, que será desarrollado a continuación.

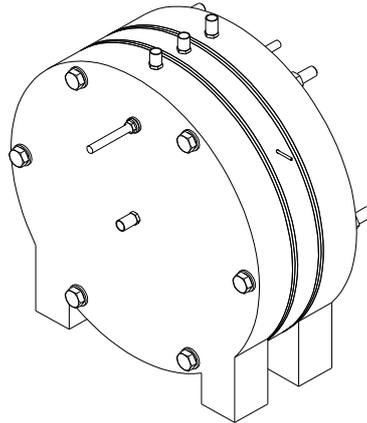


Figura 4.7 Esquema del cuerpo del electrolizador

#### **4.8.1.2 Determinación de las cargas internas a las que va estar sometido el cuerpo del electrolizador.**

El volumen de trabajo del electrolito en el cuerpo del electrolizador será de  $3000\text{cm}^3$ , además se considerará la densidad del agua como sustancia preponderante y el peso de los electrodos no será considerado, debido a que se encuentran suspendidos en el interior del electrolizador, por estas razones se determinó el valor de cada una de las cargas de la siguiente forma:

En la determinación de las cargas se considera un recipiente cilíndrico que se muestra en la Figura N°4.8, en la parte sombreada se representa la solución acuosa al 20% de Hidróxido de Sodio, que está contenida dentro del cuerpo del electrolizador.

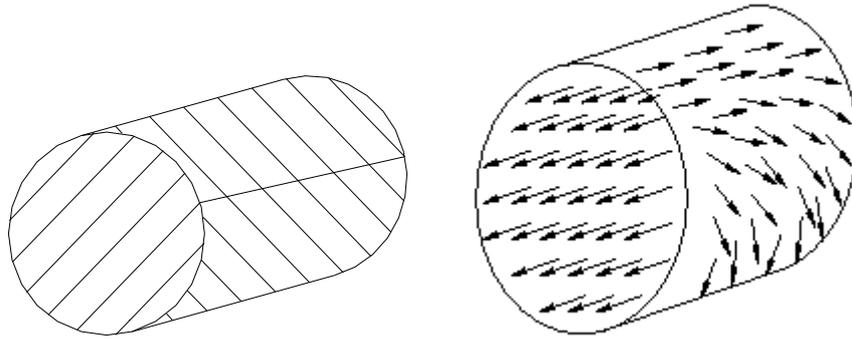


Figura 4.8 Esquema de las cargas internas del cuerpo del electrolizador.

$$V = A_T \times h \quad (4.29)$$

**Donde:**

**V** : Volumen del electrolizador [cm<sup>3</sup>]

**A<sub>T</sub>** : Área transversal del electrolizador [cm<sup>2</sup>]

**h** : Altura total del electrolizador [cm]

$$A_T = \pi r^2$$

$$A_T = \pi \times 12 \text{ cm}^2$$

$$A_T = 452.39 \text{ cm}^2$$

$$V = A_T \times h$$

$$V = 452.39 \text{ cm}^2 \times 9 \text{ cm}$$

$$V = 4071 \text{ cm}^3$$

$$W_{REAL} = V \times \rho \times g \quad (4.30)$$

**Donde:**

$\rho$  : Densidad de la solución [kg/m<sup>3</sup>]

$A_T$  : Gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$$W_{REAL} = 0.00407m^3 \times 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$W_{REAL} = 39.9N$$

$$P_{REAL} = \frac{39.9N}{0.0452m^2}$$

$$P_{REAL} = 882Pa$$

**Esfuerzo Axial**

$$\sigma_a = \frac{p \times r}{2 \times t} \quad (4.31)$$

**Esfuerzo Longitudinal**

$$\sigma_h = \frac{p \times r}{t} \quad (4.32)$$

**Donde:**

$\rho$  : Presión de trabajo [Pa]

$r$  : Radio del cuerpo del electrolizador [Pa]

$t$  : Espesor de las paredes del cuerpo del electrolizador [m]

Ejemplo de cálculo del esfuerzo axial, se asumirán la presión crítica de trabajo del cuerpo del electrolizador.

Datos:

$$\rho: \quad 0.882 \text{ KPa}$$

$$r: \quad 120 \text{ mm} = 0.12 \text{ m}$$

$$t: \quad 10 \text{ mm} = 0.010 \text{ m}$$

$$\sigma_a = 5.3 \text{ KPa}$$

$$\sigma_h = 10.6 \text{ KPa}$$

Tanto  $\sigma_a$  y  $\sigma_b$  son los esfuerzos secundarios a los que va estar sometido el cuerpo del electrolizador. Para encontrar los esfuerzos principales se calculan de la siguiente forma:

$$\sigma_A, \sigma_B = \left( \frac{\sigma_a + \sigma_h}{2} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{\sigma_a + \sigma_h}{2} \right)^2 + \tau_{ah}^2} \quad (4.33)$$

$$\sigma_A = 15.9 \text{ KPa}$$

$$\sigma_B = 0 \text{ KPa}$$

Como no existen fuerzas cortantes sobre la superficie de la sección axial o circunferencial, estos esfuerzos son principales.

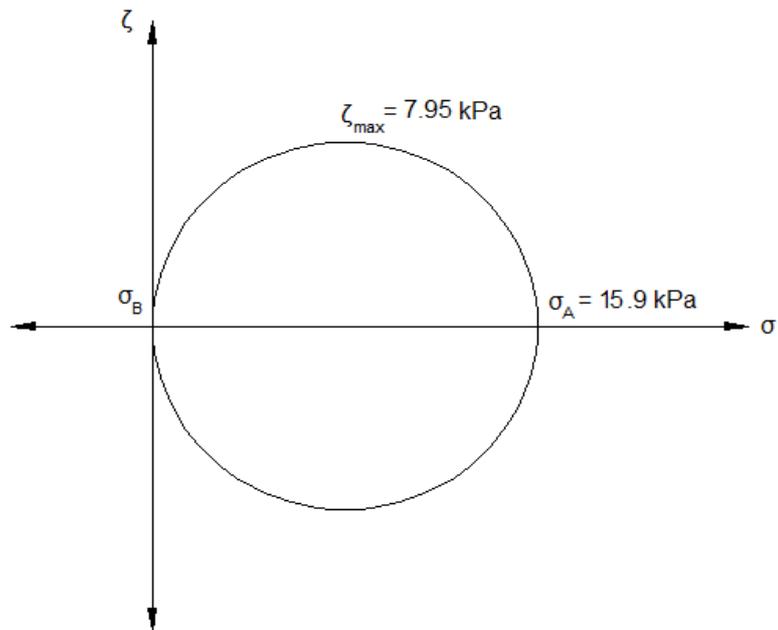


Figura 4.9 Círculo de Mohr para las cargas internas del cuerpo del electrolizador

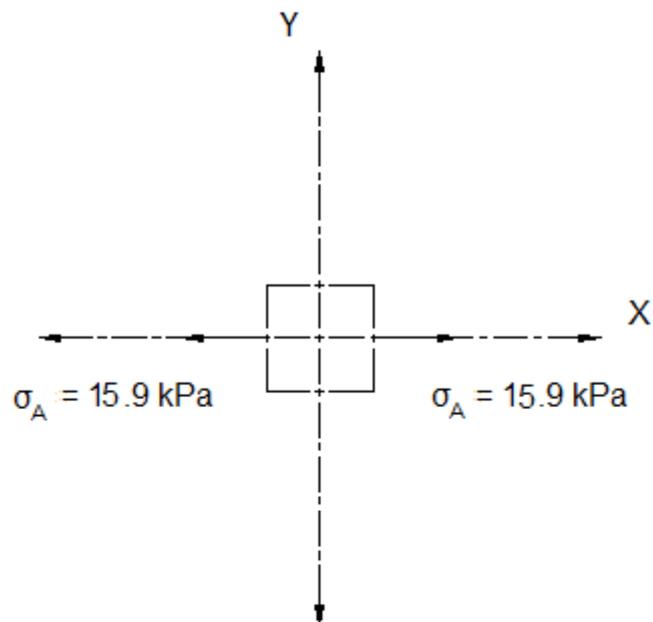


Figura 4.10 Elemento Principal Normal del cuerpo del electrolizador

El material con que será hecho el cuerpo del electrolizador el Acrílico de Oroglas V920.

Cuya resistencia última a la tensión es de 85MPa. Fuente <http://www.matweb.com>

Por lo tanto el factor de diseño utilizando la ecuación 4.8 del cuerpo del electrolizador es de:

$$n=5346$$

Con el espesor de 10 milímetros del cuerpo del electrolizador, el esfuerzo evaluado en las condiciones críticas es menor que el módulo de tensión del material, por lo que se asegura que el cuerpo del electrolizador trabajará de forma adecuada.

#### **4.8.1.3 Determinación de las cargas externas a las que va estar sometido el cuerpo del electrolizador.**

Para el caso de las cargas externas a las que va estar sometido el cuerpo del electrolizador, las únicas existentes se deben a las generadas por parte de los pernos de sujeción que evitan que el electrolito se drene por las paredes, esta presión debería ser igual a la presión que ejerce la solución acuosa al 20% de Hidróxido de Sodio a las paredes del cuerpo del electrolizador.

Para garantizar el trabajo del cuerpo del electrolizador se utilizará 6 pernos SAE de grado 1 de acero ASTM A307 de dimensiones de 130mm de largo y de un diámetro nominal de 10mm. Para verificar si el factor de diseño con el que se va a construir es el adecuado se evaluará mediante la teoría de elementos sujetadores roscados.

Por este motivo se encontrarán cada uno de los factores que intervienen en el cálculo del factor de seguridad.

$$n = \frac{s_y A_t}{F_i + CP} \quad (4.34)$$

Donde:

$F_i$	: Precarga del perno debido al apriete, que existe antes de aplicar la fuerza P.	[N]
$F_p$	: Fuerza de prueba	[N]
$S_y$	: Resistencia de fluencia	[MPa]
$A_t$	: Área de tracción	[m <sup>2</sup> ]
$N$	: Factor de seguridad	
$C$	: Relación de rigidez	
$P$	: Carga externa sobre la unión del perno	[N]
$P_t$	: Carga externa sobre los pernos	[N]
$K_b$	: Constante de rigidez del perno	
$K_m$	: Constante de rigidez de los elementos	
$d$	: Diámetro del perno	[m]
$E$	: Módulo de elasticidad de los elementos	[MPa]
$A$	: Sección del perno	[m <sup>2</sup> ]
$L$	: Longitud del perno sometido	[m]

Tabla 4.2 Propiedades Mecánicas del Perno SAE grado 1

Pernos SAE grado 1 (ASTM A307)		
$S_p$	33Kpsi	227.527MPa
$S_{ut}$	60Kpsi	413.6854MPa
$S_y$	36Kpsi	248.2113MPa

Tabla 4.3 Propiedades Mecánicas del Acrílico Comercial

Acrílico comercial		
<b>E</b>	479Kpsi	3.30GPa
<b>Sy</b>	12.33Kpsi	85MPa

$$p = 15.9 \text{ KPa}$$

$$L = 90 \text{ mm}$$

$$d = 120\text{mm}$$

$$A = 0.0452 \text{ m}^2$$

N = Número de pernos

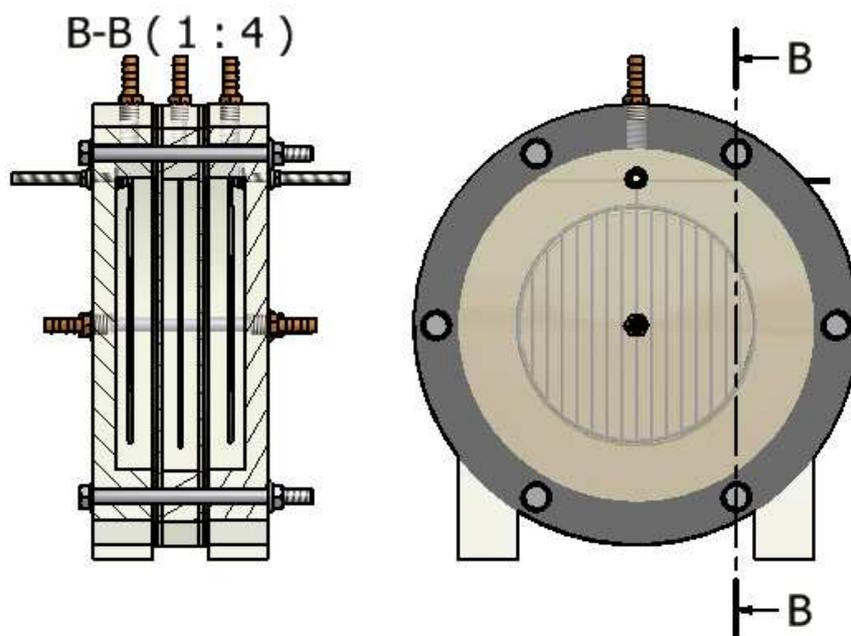


Figura 4.11 Vista frontal y corte del cuerpo del electrolizador

Perno de cabeza hexagonal  
terminado

$\phi = 3/8"$  y 6" de  
longitud  
SAE grado 1  
(ASTM A307)

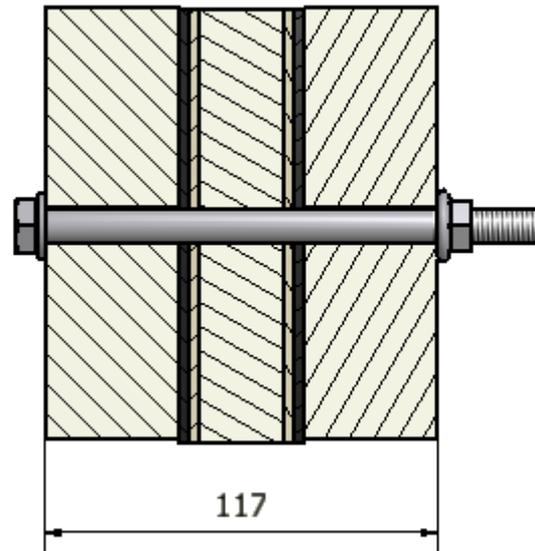


Figura 4.12 Dimensiones del perno 3/8" x 6".

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.35)$$

$$A = 71.26 \text{ mm}^2$$

$$k_b = \frac{A \times E}{l} \quad (4.36)$$

$$k_b = 1.85 \text{ Mpa.m}$$

$$k_m = \frac{\pi \cdot E \cdot d}{2 \ln \left( 5 \frac{l + 0.5 \cdot d}{l + 2.5 \cdot d} \right)} \quad (4.37)$$

$$k_m = 35.48 \text{ MPa}$$

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (4.38)$$

$$C = 0.05$$

$$P_t = A \cdot p \quad (4.39)$$

$$P_t = 719.3N$$

$$P = \frac{Pt}{N} \quad (4.40)$$

$$P = 89.91 N$$

$$0.6F_p \leq F_i \leq 0.9F_p \quad (4.41)$$

$$F_p = A_t \cdot S_p \quad (4.42)$$

$$F_p = 0.016MN$$

$$0.009MN \leq F_i \leq 0.0145MN$$

Por esta razón se establece que el valor de la precarga del perno  $F_i = 0.012MN$ .

$$n = \frac{S_y A_t}{F_i + C \cdot P} \quad (4.43)$$

$$n = 1.473$$

Si el factor de diseño es mayor que 1, se garantiza que el diseño expuesto va a cumplir satisfactoriamente a los criterios que se expusieron en las especificaciones.

## 4.9 CÁLCULO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.

### 4.9.1 CONCENTRACIÓN DEL ELECTROLITO

Se establece la concentración de la solución del electrolito será de  $D \approx 1.2$ , de sosa cáustica es decir: La cantidad agua será de  $4000 \text{ [cm}^3\text{]}$  es decir  $4 \text{ [kg]}$  evaluada a  $25^\circ \text{C}$  y a una atmosfera.

Mediante esta determinación y establecida la concentración de 20% en peso, de la solución se utiliza 800 [g] NaOH del catalizador disuelto. Cómo se muestra a continuación, se va obtener el número de moles de NaOH en la solución:

$$\frac{0.8 \text{ kg NaOH}}{40 \text{ kg NaOH}} \frac{1 \text{ kmol NaOH}}{1 \text{ kmol NaOH}} = 20 \text{ mol NaOH}$$

$$1 \text{ mol NaOH} = 1 \text{ eq NaOH}$$

La solución al 20% de sosa caustica también puede ser conocida como solución 1 molar, por el cálculo anterior.

$$Pe = \frac{\text{Masa atómica del electrolito}}{\text{equivalentes de la base}} \quad (4.44)$$

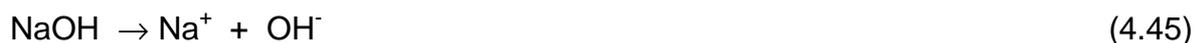
$$Pe = \text{peso equivalente} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

$$Pe = \frac{40 \text{ kg NaOH}}{1 \text{ eq NaOH}}$$

$$Pe = 40 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

## 4.9.2 CÁLCULO DEL pH EN LA SOLUCIÓN

El hidróxido de sodio es una base porque da por ionización y la disociación de la base en agua es:



Con la solución que tiene una concentración  $110^{-4}$  M de NaOH, se va a determinar el pH de esta solución.

Por cada mol de NaOH se obtiene un mol de (OH<sup>-</sup>). Entonces por cada 1 M en NaOH, tendremos una concentración de 1 M en OH<sup>-</sup>. El pOH será:

$$pOH = -\log [OH^-] = -\log (1) = 0$$

Como pH + pOH = 14, el pH será:

$$pH = 14 - pOH = 14 - 0 = 14$$

#### 4.9.3 DETERMINACIÓN DEL pH DE LA SOLUCIÓN EN LA ESCALA.

A continuación se muestran los valores de pH de algunas soluciones de sustancias y mezclas conocidas, tabla N°4.4:

Tabla 4.4 Tabla de escala del pH de algunas sustancias y soluciones

MEDIO	SOLUCIÓN	pH
ÁCIDO	Disolución de HCl 1 M	0
	Jugo gástrico	1
	Gaseosas	1,8
	Jugo de limón	2,1
	Vinagre	2,5
	Vino	3,5
	Zumo de naranja	4
	Cerveza	4,1
	Agua potable	5
	Lluvia ácida	5,6
	Agua corriente	6
	Orina humana	6
	Leche de vaca	6,4
	Agua de lluvia	6,5
	Saliva (reposo)	6,6
Leche	6,9	
NEUTRO	Agua pura	7
BÁSICO	Saliva (al comer)	7,2
	Sangre humana	7,4
	Agua de mar	8,5
	Bicarbonato sódico (Sol. Saturada)	8,4
	Pasta de dientes	9,9
	leche de magnesia	10,5
	Amoníaco (disuelto)	11,8
	Lejía	12
	Disolución de NaOH 1 M	14

#### 4.9.4 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DIVERSOS MATERIALES DE LOS ELECTRODOS ANÓDICOS Y CATÓDICOS EN LA SOLUCIÓN ELECTROLÍTICA.

Químicamente no se conoce como influye el nivel de pH de una solución electrolítica cuando los materiales están sumergidos en ella, por esta razón se lo establecerá de forma experimental la pérdida de masa que tendrán los electrodos al cumplir un tiempo determinado de 4 horas de producción de hidrógeno, mediante el uso de una balanza electrónica.

#### 4.10 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIDRÓGENO

Para el cálculo de la producción de hidrogeno se utilizará la Ley de Faraday que se 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:

$$\dot{m} = \frac{V}{R \times F} \times Pe \quad (4.46)$$

**Donde:**

<b>V</b>	<b>: Voltaje aplicado en el electrolito</b>	<b>[V]</b>
<b>R</b>	<b>: Resistencia del electrolito</b>	<b>[Ω]</b>
<b>F</b>	<b>: Constante de Faraday <math>9.65 \times 10^7</math></b>	<b>[C/ kmol]</b>
<b>Pe</b>	<b>: Peso equivalente</b>	<b>[kg/ kmol]</b>

$$Pe = \frac{\bar{M}}{n} \quad (4.47)$$

**Donde:**

**$\bar{M}$  : Masa atómica [kg]**

**n : Valencia [mol]**

$$\dot{m} = \frac{V}{R \times F} \times \frac{\bar{M}}{n} \quad (4.48)$$

Para establecer la tasa de producción de hidrogeno del electrolizador se lo realizará mediante las siguientes consideraciones, para establecer las variables influyentes:

1. La unidad para determinar la producción de hidrogeno será la masa de hidrógeno por minuto.
2. El circuito eléctrico estará formado por tres cables conductores de la fuente hasta los terminales de los electrodos, por dos electrodos catódicos y un electrodo anódico. Se desprecia la resistencia interna de la fuente.
3. El área de influencia de los electrodos como el electrolito será de 400cm<sup>2</sup> como se indicó anteriormente en el capitulo anterior.
4. La conductividad del electrolito es decir de la solución al 20% de sosa caustica, se considerará la conductividad obtenida mediante experimentación que su valor es de 0.18 [s/m], como se indica en el ANEXO.
5. Peso equivalente será considerado únicamente del electrolito, excluyendo el comportamiento de los electrodos en la solución.

6. El voltaje aplicado en las terminales será de 12 voltios entregado por una batería y el parámetro iterativo para los cálculos es la corriente suministrada, es decir este parámetro va a variar entre 1 y 8 amperios.
7. Al igual que la corriente eléctrica, la distancia entre los electrodos se considerará un parámetro iterativo con valores establecidos de 20, 25 y 30 milímetros de diferencia ente el ánodo y el cátodo.

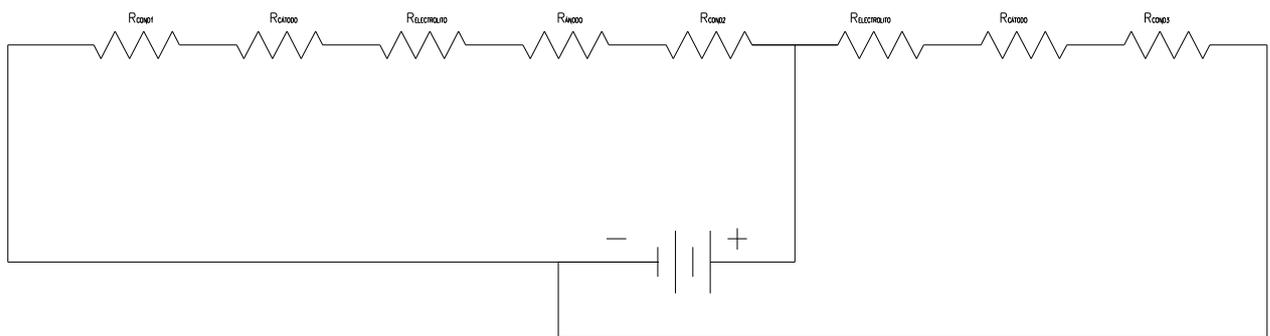


Figura 4.13 Esquema del circuito eléctrico para la producción de hidrógeno

**Donde:**

- $R_{COND1}$  : Resistencia del conductor que comunica al cátodo. [ $\Omega$ ]**
- $R_{CÁTODO}$  : Resistencia del cátodo. [ $\Omega$ ]**
- $R_{ELECTROLITO}$  : Resistencia del electrolito. [ $\Omega$ ]**
- $R_{ÁNODO}$  : Resistencia del ánodo. [ $\Omega$ ]**
- $R_{COND2}$  : Resistencia del conductor que comunica al ánodo. [ $\Omega$ ]**

A continuación se hará un análisis de las resistencias que influyen en el circuito, considerando todo el grupo de los materiales para los electrodos anódicos y el carbono como material para el electrodo catódico por su alta resistencia que presenta.

Tabla 4.4 Valores de las resistencias del circuito eléctrico.

	DISPOSITIVOS	RESISTIVIDAD [ $\Omega$ cm]	ÁREA [cm <sup>2</sup> ]	LONGITUD [cm]	RESISTENCIA [ $\Omega$ ]
10 AWG	3xR <sub>COND</sub>	0.0000017	0.05	10	0.00102
Carbono (C)	2xR <sub>CÁTODO</sub>	0.0060000	200.00	16	0.00096
1.2 NaOH	2xR <sub>ELECTROLITO</sub>	555.5555556	200.00	2	11.11
Zinc (Zn)	R <sub>ÁNODO</sub>	0.0000059	200.00	16	4.7328E-07
				<b>TOTAL</b>	11

Tabla 4.5 Valores de las resistencias del circuito eléctrico.

	DISPOSITIVOS	RESISTIVIDAD [ $\Omega$ cm]	ÁREA [cm <sup>2</sup> ]	LONGITUD [cm]	RESISTENCIA [ $\Omega$ ]
10 AWG	3xR <sub>COND</sub>	0,0000017	0,05	10	0,00102
Carbono (C)	2xR <sub>CÁTODO</sub>	0,0060000	200,00	16	0,00096
1.2 NaOH	2xR <sub>ELECTROLITO</sub>	555,5555556	200,00	2	11,11
Aluminio (Al)	R <sub>ÁNODO</sub>	0,0000027	200,00	16	0,000000216
				<b>TOTAL</b>	11

Tabla 4.6 Valores de las resistencias del circuito eléctrico.

	DISPOSITIVOS	RESISTIVIDAD [ $\Omega$ cm]	ÁREA [cm <sup>2</sup> ]	LONGITUD [cm]	RESISTENCIA [ $\Omega$ ]
10 AWG	3xR <sub>COND</sub>	0.0000017	0.05	10	0.00102
Carbono (C)	2xR <sub>CÁTODO</sub>	0.0060000	200.00	16	0.00096
1.2 NaOH	2xR <sub>ELECTROLITO</sub>	555.5555556	200.00	2	11.11
Hierro (Fe)	R <sub>ÁNODO</sub>	0.0000089	200.00	16	0.000000712
				<b>TOTAL</b>	11

Tabla 4.7 Valores de las resistencias del circuito eléctrico.

	DISPOSITIVOS	RESISTIVIDAD [ $\Omega$ cm]	ÁREA [cm <sup>2</sup> ]	LONGITUD [cm]	RESISTENCIA [ $\Omega$ ]
10 AWG	3xR <sub>COND</sub>	0.0000017	0.05	10	0.00102
Carbono (C)	2xR <sub>CÁTODO</sub>	0.0060000	200.00	16	0.00096
1.2 NaOH	2xR <sub>ELECTROLITO</sub>	555.5555556	200.00	2	11.11
Estaño (Sn)	R <sub>ÁNODO</sub>	0.0000220	200.00	16	0.00000176
				<b>TOTAL</b>	11

Mediante los resultados podemos establecer que la resistencia preponderante en el proceso de electrolisis es la resistencia del electrolito, por esta razón en el cálculo de producción de hidrogeno solamente se considerará esta resistencia.

El proceso para determinar el peso equivalente de la solución se describirá a continuación:

Equivalente de una Base: Es la cantidad de moles de OH – proporcionados por un mol de base cuando se disuelve en agua.

Peso molecular del NaOH es 40 [kg/kmol] mediante la determinación de sus compuestos.

Tabla 4.8 Determinación de la masa atómica del solvente.

ELEMENTO	MASA ATÓMICA [kg/kmol]
Sodio Na	23
Oxigeno O	16
Hidrogeno H	1
<b>Compuesto NaOH</b>	<b>40</b>

$$Pe = \text{peso equivalente} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

$$Pe = 40 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

En la Tabla N° 4.9.- se evaluará la producción teórica que tendría el electrolizador si funcionara con la fuente de 12 voltios, mediante un circuito eléctrico se variará voltaje aplicado desde 3 a 12 voltios y correspondientemente variará la corriente que circulará por el electrolizador.

Tabla 4.9 Tabla de evaluación de la producción teórica de hidrógeno.

	Voltaje aplicado [V]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Longitud de separación entre los electrodos [cm]	Resistencia de la solución 1.2 NaOH [Ω]	Flujo másico [kg/min]									
2,00	24,69	6,04E-06	8,06E-06	1,01E-05	1,21E-05	1,41E-05	1,61E-05	1,81E-05	2,01E-05	2,22E-05	2,42E-05
2,50	30,86	4,83E-06	6,45E-06	8,06E-06	9,67E-06	1,13E-05	1,29E-05	1,45E-05	1,61E-05	1,77E-05	1,93E-05
3,00	37,04	4,03E-06	5,37E-06	6,72E-06	8,06E-06	9,40E-06	1,07E-05	1,21E-05	1,34E-05	1,48E-05	1,61E-05

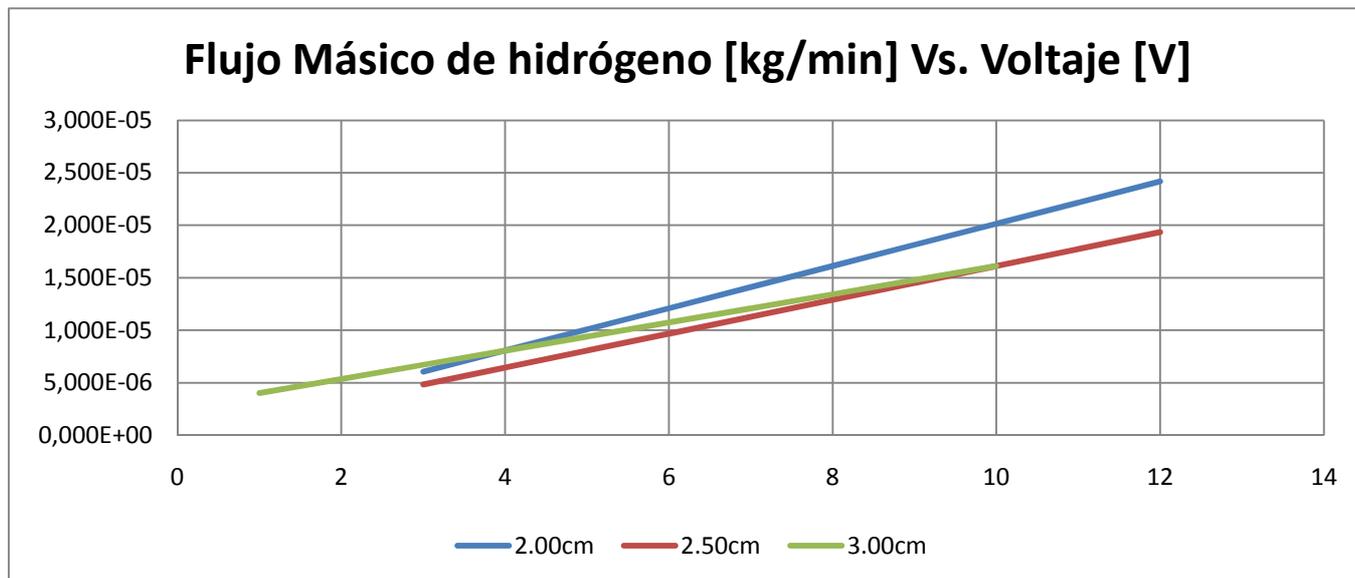


Figura 4.14 Producción teórica de hidrógeno versus voltaje aplicado.

Como se muestra en la figura N° 4.14.- al reducir la distancia entre los electrodos catódicos con el electrodo anódico, y al aumentar el voltaje aplicado a cada uno de los terminales de los electrodos se obtiene una mayor producción de hidrogeno, es decir la producción de hidrógeno es directamente proporcional al voltaje aplicado.

Por esta razón se mostrará la producción teórica de hidrógeno cuando el electrolizador esté conectado a la red eléctrica comercial, es decir cuando alcance su máximo voltaje de operación que es 12 voltios.

## **CAPÍTULO 5**

### **5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL ELECTROLIZADOR DE CORRIENTE CONTINUA DE 200 WATIOS CON ENERGÍA SOLAR**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN**

En la construcción y montaje del electrolizador de corriente continua de 200 Watios con energía solar se utilizan diversos procesos tecnológicos y trabajos realizados para instalación y puesta a punto de cada uno de los sistemas que conforman electrolizador de corriente continua.

En el presente capítulo, se expresan cada uno de los procedimientos para a la consecución de cada uno de los sistemas, para finalmente proceder al montaje de cada uno de los sistemas que forman parte del electrolizador de corriente continua con energía solar. Cada uno de los sistemas del electrolizador está representado en el plano (1.2688 - 001).

#### **5.2 SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO**

##### **5.2.1 OPERACIONES REALIZADA**

En la construcción del sistema de producción y distribución de hidrógeno intervienen cuatro partes del diseño modular del cuerpo del electrolizador: tapa lateral derecha, módulo central, tapa lateral izquierda, diafragmas, empaques y porta electrodos para cada uno de sus módulos. Además el electrolizador tiene 8 pares de electrodos de diferentes materiales intercambiables para garantizar un análisis de la tasa de producción de cada una de las parejas de los electrodos.

Para la construcción de los tres módulos del electrolizador se utilizó como material base planchas de acrílico de 9mm de espesor, en la Tabla N° 5.1 se describe el procedimiento de construcción de los módulos del electrolizador.

**Tabla 5.1 Operaciones realizadas en las planchas de acrílico (Plano 1.2688-002, 003 y 004).**

<b>Operación</b>	<b>Herramientas usadas</b>
Trazado	Flexómetro y rayador
Corte	
Pegado	Cloroformo
Perforado agujeros tipo brida	Taladro y broca $\varnothing$ 3/16", 1/4", 5/16" y 3/8".
Perforado agujeros de los conductos	Taladro y broca $\varnothing$ 3/16", 1/4", 5/16" y 3/8".
Machuelado de los agujeros tipo brida	Machuelo 3/8" normal
Machuelado de los agujeros de los conducto	Machuelo 3/8" NPT
Ensamble de los conductos centrales de 3/8" NPT	Llave hexagonal #14
Verificación	Flexómetro

Para realizar los empaques del cuerpo del electrolizador se toma como molde el módulo central del electrolizador, delimitando adecuadamente el contorno externo e interno, con el uso de una tiza para rayar el hule vulcanizado tabla, N°5,2.

**Tabla 5.2 Operaciones realizadas en los empaques (Plano 1.2688-009).**

<b>Operación</b>	<b>Herramientas usadas</b>
Trazado	Flexómetro, molde y tiza blanca
Corte exterior	Tijeras
Corte interior	Estilete
Perforado agujeros tipo brida	Broca $\varnothing$ 3/8".
Verificación	Flexómetro

Para la construcción de los diafragmas que van a separar a cada uno de los módulos de producción del electrolizador se va a tomar como molde al módulo central al igual que en la construcción de los empaques, delimitando adecuadamente el contorno externo con el uso de un marcador sobre la lámina de teflón, tabla N°5.3.

**Tabla 5.3 Operaciones realizadas en los diafragmas (Plano 1.2688-010).**

<b>Operación</b>	<b>Herramientas usadas</b>
Trazado	Flexómetro, molde y marcador
Corte exterior	Tijeras y estilete
Perforado agujeros tipo brida	Broca $\varnothing$ 3/8".
Verificación	Flexómetro

Para evitar diferencias en el posicionamiento de los agujeros para los módulos del electrolizador, empaques y diafragmas las perforaciones para estos componentes se lo debe hacer de una forma conjunta, es decir al mismo tiempo.

Para la construcción de los espárragos se utiliza como material base un perno de 3/8" de diámetro y 6" de longitud, que serán cortados mediante un disco de corte de la amoladora, tabla N°5.4.

**Tabla 5.4 Operaciones realizadas a los espárragos (Plano 1.2688-012).**

<b>Operación</b>	<b>Herramientas usadas</b>
Trazado	Flexómetro y marcador
Corte	Amoladora y disco de corte.
Verificación	Flexómetro

Para la elaboración de los electrodos tanto de ánodos como de cátodos va a depender directamente del material en el cuál se va a trabajar. Para el caso de la elaboración de los electrodos en mallas de acero inoxidable (MESH 10 y MESH 14), se utilizó un molde circular de 16cm de diámetro elaborado en cartón prensado, tabla N°5.5.

**Tabla 5.5 Operaciones realizadas en el corte de electrodos tipo malla (Plano 1.2688-011).**

<b>Operación</b>	<b>Herramientas usadas</b>
Trazado	Molde y marcador
Corte	Tijeras para acero
Verificación	Flexómetro

Para la elaboración de electrodos en materiales tipo plancha, el procedimiento de construcción consta en trabajar con planchas cuadradas de 20cm de lado y mediante dos moldes circulares de madera de 15cm de diámetro sirvan como soporte en el torno.

**Tabla 5.6 Operaciones realizadas para los electrodos tipo plancha (Plano 1.2688-011).**

<b>Operación</b>	<b>Herramientas usadas</b>
Trazado	Escuadra, flexómetro y marcador
Corte	Tijeras para acero
Verificación	Flexómetro
Trazado	Molde, flexómetro y cuchilla HSS
Corte	Cuchilla HSS y torno
Verificación	Flexómetro

Para realizar los empaques de los porta electrodos se toma como molde la arandela plana del perno de 3/8", delimitando adecuadamente el contorno externo e interno, con el uso de una tiza para rayar el hule vulcanizado, tabla N°5.7.

**Tabla 5.7 Operaciones realizadas para los empaques de los porta electrodos (Plano 1.2688-008).**

<b>Operación</b>	<b>Herramientas usadas</b>
Trazado	Flexómetro, molde y tiza blanca
Corte exterior	Tijeras
Corte interior	Estilete
Perforado agujeros	Estilete y tijeras
Verificación	Flexómetro

### 5.2.2 ENSAMBLE DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO.

Para el ensamble entre los módulos del electrolizador se usa pernos de 3/8 de pulgada de diámetro y 6 pulgadas de largo totalmente roscados, con arandelas planas, tuercas y arandelas de presión, que se puede adquirir en el mercado local.

Para el ensamble de los porta electrodos se debe utilizar un alicate para que el esparrago entre agujero específico y mediante el flexómetro garantice una adecuada posición del espárrago. A continuación se describe los elementos de ensamble utilizados en el sistema de producción y distribución de hidrógeno.

Tabla 5.8 Acoples del sistema de producción y distribución de hidrógeno

Elemento	Cantidad	Diámetro [in]
Boquillas o ductos.	5	3/8
Pernos de sujeción	8	$\varphi = 3/8; l = 6$
Manguera	3m	9/16 OD y 3/8 ID



Figura 5.1 Sistema de producción y distribución de hidrógeno

### 5.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO

El sistema de alimentación del electrolito consta de un reservorio (tanque), mangueras, válvula de bola dos posiciones, sensor del nivel del electrolito y accesorios de ensamble, con el fin de garantizar una producción continua de hidrógeno.

#### 5.3.1 RESERVORIO DEL ELECTROLITO

Debido al uso doméstico que tendrá el electrolizador se utilizó un tanque con tapa hermética de polietileno de 20 litros de capacidad de fácil adquisición en el mercado local, tabla N°5.9.

**Tabla 5.9 Operaciones realizadas para el reservorio del electrolito (Plano 1.2688-013).**

<b>Operación</b>	<b>Herramientas usadas</b>
Trazado	Flexómetro y marcador
Perforado	Taladro y broca 3/8 de pulg.
Verificación	Flexómetro
Ensamble	Boquilla NPT DE 3/8 de pulg.
Sellado	Pistola de silicona fría
Verificación	Agua

#### 5.3.2 ACOPLES Y ACCESORIOS

Cada uno de los acoples utilizados para el sistema de alimentación del electrolito se muestra en la figura N° 5.2 y cada uno de los elementos se muestran en la tabla N°5.10.



Figura 5.2 Sistema de alimentación del electrolito

Tabla 5.10 Acoples del sistema de producción y distribución de hidrógeno

Elemento	Cantidad	Diámetro [in]
Boquillas	2	3/8 NPT y 3/8 manguera
Manguera	3m	9/16 OD y 3/8 ID
Válvula de bola	1	3/8
Abrazaderas metálicas	8	$\frac{3}{4}$ Máx.

### 5.3.3 ENSAMBLE DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO

Para el ensamble entre el reservorio del electrolito con la válvula de bola de dos posiciones y con el electrolizador se utilizó mangueras de vinil de 9/16" OD y 3/8" ID, que están aseguradas mediante abrazaderas metálicas.

Sin embargo estas conexiones entre la manguera y la válvula de bola de dos posiciones se utilizaron boquillas especiales, que tengan dos conexiones

diferentes la primera una conexión roscada NPT de 3/8" y la salida tipo manguera de 3/8", además para conducir y distribuir el electrolito hacia el electrolizador se utiliza una conexión en T de manguera de 3/8", para cada una de las conexiones NPT se utilizó teflón para garantizar la hermeticidad del sistema.

## **5.4 SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROLIZADOR**

Para el sistema eléctrico del electrolizador se utilizará dos circuitos independientes, el circuito de carga el cual se encargará de la carga de la batería de 12 voltios mediante el uso de paneles solares y el segundo circuito llamado variador de voltaje el cual es el encargado de restringir el voltaje aplicado al electrolizador, que varía de 1 a 8 voltios.

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 watos

El variador de voltaje tienes los siguientes datos de funcionamiento:

- Voltaje de alimentación: 12 voltios
- Corriente: 7 amperios
- Potencia: 84 watos
- Rango de variación del voltaje: 0 – 10 voltios
- Rango de variación de la corriente: 0 – 7 amperios
- Tiempo de uso: 30 minutos

### 5.4.1 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 N°5.3, la cual se encuentra instalada en la parte inferior de la mesa de soporte. Sus características son:

- Número de placas: 11 placas
- Amperios hora: 55 amperios hora
- Voltaje: 12 voltios
- C.C.A. : 600



Figura 5.3 Batería de 12 voltios.

### 5.4.2 CARGADOR DE BATERÍA

Este sistema opera de manera complementaria al circuito de carga, es decir el cargador únicamente se encontrará en funcionamiento una vez que la batería se encuentre descargada, y además no exista el voltaje necesario entregado

por los paneles para cargar la batería. El cargador de batería se observa en la figura N°5.4. Las características del cargador de baterías de 12 voltios son:

- Voltaje de alimentación: 120 voltios AC
- Amperios: 3 amperios
- Potencia: 167 Watts



Figura 5.4 Cargador de batería de 12 voltios.

### 5.4.3 PANELES SOLARES

Cada uno de los paneles solares son colocados sobre estructuras de acero que fueron construidas obedeciendo con el grado de inclinación adecuado para la franja equinoccial en la que se encuentra nuestro país, optimizando la radiación solar efectiva sobre cada uno de los paneles.

Además las conexiones eléctricas de cada uno de los paneles se encuentran formando parte de un circuito controlador de carga de la batería, que evita el paso de corrientes parásitas hacia los paneles solares. Los paneles solares se observan en la figura N°5.5, y sus características son:

- Voltaje en circuito abierto: 220 voltios
- Corriente en corto circuito: 6.1 amperios
- Voltaje de operación: 17.5 voltios
- Corriente de operación: 5.7 amperios
- Dimensiones: 1130 x 670 x 35 milímetros



Figura 5.5 Paneles solares.

## **5.5 SISTEMA DE MEDICIÓN DEL FLUJO DE HIDROGENO**

En el electrolizador, es necesario realizar medidas de corriente, voltaje, temperatura, tiempo, longitud, masa y caudal de cada uno de los gases, para determinar la tasa de producción de hidrógeno variando las principales variables de electrólisis.

### **5.5.1 MULTÍMETRO**

Es necesario contar con un amperímetro y un voltímetro con un gran rango de medición, además con un alto grado de confiabilidad, para determinar la cantidad de energía que ingresa al electrolizador. Además es importante incluir un termómetro digital para determinar si no existen cambios bruscos de temperatura.

El multímetro tiene las siguientes características:

- Tipo: digital.
- Rango de lectura (Corriente continua): 1mA – 20A.
- Rango de lectura (Voltaje continua): 1mA – 1000V.
- Termocupla tipo K (°C): 0 – 1000 °C.



Figura 5.6 Multímetro.

### 5.5.2 MEDICIÓN DEL CAUDAL

Para la medición de la producción de hidrógeno y oxígeno se realizaron adaptaciones en los ductos de salida tanto del hidrógeno como para el oxígeno, facilitar la apreciación de la cantidad de gas producido por el electrolizador, llevándoles hacia pequeños contenedores llenos de electrolito para almacenar y medir indirectamente la cantidad de hidrógeno como de oxígeno producido en un determinado tiempo, mediante el volumen del líquido desplazado.



Figura 5.7 Adaptación para la medición de gas producido.

### 5.5.3 CRONÓMETRO

El uso de cronómetro es fundamental debido a que mediante este equipo se determinará el tiempo de respuesta que tendrá la solución electrocatalítica una vez iniciada la electrólisis, como también la determinación de la tasa de producción de cada uno de los gases producidos por el electrolizador.

El cronómetro tiene las siguientes características:

- Tipo: Digital
- Rango de lectura: 0 – 99 horas
- Apreciación: 1/100 segundos

### 5.5.4 ESTANTE DE PRODUCCIÓN

El estante de producción es donde se asientan el electrolizador como cada uno de sus sistemas para la producción de hidrógeno con el fin de facilitar la operación, manipulación y control.

El estante no estará sometido a ningún tipo de esfuerzo mecánico, sin embargo la única carga aplicada es el peso de cada uno de los sistemas. Los perfiles DEXION del estante son de acero A36, en L de 1½ pulgadas, con sus respectivas planchas de acero A36 y para la sujeción se utiliza pernos de ¼ de pulgada de 6mm de largo.



Figura 5.8 Estante de producción.

## 5.6 ANÁLISIS ECONOMICO

En el costo del equipo se consideraran:

- Tiempo de diseño
- Materia prima(materiales e implementos usados)
- Procesos de manufactura con el número de horas – hombre (incluyendo el montaje)

Se presentan cuadros de cada uno de los rubros anteriormente mencionados y de esta forma se obtiene un valor total referencial en USD americanos de la construcción del intercambiador de calor de placas para laboratorio.

### 5.6.1 COSTO DE DISEÑO

Tabla 5.11 Costo del diseño

No.	Personal	Tiempo de trabajo (hr)	Valor/Hora (dolares)	Total (USD)
1	Diseñador	160	6	960
1	Ayudante	50	3	150
<b>Total (USD)</b>				<b>1110</b>

### 5.6.2 COSTO DE MATERIA PRIMA

Para la construcción del proyecto se utilizan diferentes tipos de materiales, tanto para el electrolizador, para el sistema de alimentación del electrolito, el sistema de alimentación energético y el ensamble del sistema total.

Tabla 5.12 Materiales e implementos usados

Materiales	Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
<b>Sistema de alimentación energética</b>			
Panel Solar Exmork 100W	2	390,00	780,00
Estructura metálicas de soporte	2	50,00	100,00
Circuito cargador de batería	1	200,00	200,00
Batería 12V 55Ahora 11 placas	1	100,00	100,00
Circuito regulador de voltaje	1	260,00	260,00
Juego de cables Booster	1	6,25	6,25
Cables	10	2,00	20,00
<b>Electrolizador</b>			
Plancha de acrílico 2,40x1,20	1	300,00	300,00

Perno de acero inoxidable 6"x3/8"	10	2,72	27,20
Tuerca de acero inoxidable 3/8"	12	0,27	3,24
Arandelas de acero inoxidable 3/8"	12	0,13	1,56
Arandelas de presión de acero inoxidable 3/8"	10	0,13	1,30
Machuelo HSS SAE RG KEX 3/8"	1	25,11	25,11
Machuelo NPT 3/8"	1	31,15	31,15
Brocas en juego MM1 A 10MM. 19 PZAS. KEX	1	25,11	25,11
Prensa en C	3	12,47	37,41
Lamina de acero inoxidable	2	57,38	114,76
Plancha de Asbesto 1m2	1	93,75	93,75
Plancha de Teflón de 1m2	1	106,25	106,25
Plancha de hule de 1m2	1	25,00	25,00
Plancha de grafito reforzado 1m2	1	138,75	138,75
Malla de acero inoxidable #14	1	26,00	26,00
Malla de acero inoxidable #10	1	32,00	32,00
Tijera para tol 145-12"	1	35,72	35,72
Cautín 120V/25W	1	20,00	20,00
Pasta para soldar 2sz	1	3,24	3,24
Carrete de estaño de 100gr de 1.0 mm	1	6,48	6,48
Soporte para el cautín de hierro	1	5,18	5,18
Metros de cable TW 10 AWG 600V	20	1,13	22,68
Tarro de 200ml de cemento de contacto	2	4,86	9,72
Conexiones Lagartos	2	0,50	1,00
Válvula Check horizontal 1/2" NPT	1	19,44	19,44
Bushing SS-304 1/2" x 3/8"	2	2,49	4,97
Sellador IPS plus 25cm3	1	6,96	6,96
Neplos en T de 3/8"	3	2,61	7,84
Válvula de bola de 3/8"	1	5,42	5,42
Cable Gemelo AWG 10 (metros)	5	2,84	14,20
Neplos 441-6-6	2	2,58	5,17
Manómetro (0-15psi) 2-1/2"	1	156,80	156,80
Boquilla 3/8"	6	3,50	21,00
Pistola silicona	1	7,55	7,55

<b>Sistema de alimentación del electrolito</b>			
Tanque reservorio 1600cc	1	5,00	5,00
Botellones de agua destilada 750cc	20	3,24	64,80
Kg. Sosa cáustica	2	5,68	11,36
Kg. Potasa cáustica	2	4,26	8,52
Recipientes plásticos 750cc	3	1,14	3,42
Manguera plástica 10m	1	21,00	21,00
Botellones plásticos 1500cc	2	3,00	6,00
Boquilla 3/8"	3	3,50	10,50
Neplos 441-6-6	2	2,58	5,17
Caja de guantes quirúrgicos	1	6,25	6,25
Mascarillas	6	0,63	3,78
<b>Sistema total</b>			
Estructura DEXION 115 x 45 x 240	1	150	150,00
Cargador de Bateria	1	100	100
Galones de Pintura Esmalte	2	33,75	67,50
Galones de Tinner	8	7,50	60,00
Brocha dorada de 2"	1	3,50	3,50
Abrazaderas	30	0,30	9,00
Adaptador 1029-4-4	1	3,50	3,50
<b>Total</b>			<b>3.347,51</b>

### 5.6.3 COSTO PROCESOS DE FABRICACIÓN

Existieron algunos procesos de manufactura utilizados en el proyecto:

Tabla 5.13 Costo procesos de fabricación

Operación	No. Personas	Tiempo de hora (hr)	Valor/hora	Subtotal
Trazado	1	6	6	36
Cortado	2	10	6	120
Limado	1	2	4	8
Pegado	1	4	4	16
Taladrado	2	6	2	24
Machuelado	1	2	2	4
Soldado	1	2	2	4
Torneado	2	10	2	40
Pintado	1	2	2	4
Armado	2	10	2	40
<b>Total (USD)</b>				<b>296</b>

### 5.6.4 COSTO TOTAL DEL EQUIPO

Para el costo final del electrolizador se consideraron todos los valores totales descritos con anterioridad.

Tabla 5.14 Costo total del equipo

Insumo	Total (USD)
Diseño	1110,00
Materiales	3.347,51
Mano de obra	296,00
<b>Total</b>	<b>4753.51</b>

## **CAPÍTULO 6**

### **6. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **6.1 INTRODUCCIÓN**

Una vez concluida la construcción del electrolizador de corriente continua de 200 vatios y todos los sistemas de medición de la producción de hidrógeno, se realizan diferentes pruebas variando los cuatro parámetros fundamentales de los que dependen la electrólisis el primer parámetro a considerar será la distancia entre cada uno de los electrodos, el segundo parámetro es la cantidad de corriente entregada por la fuente hacia el electrolizador, el tercer parámetro es la composición química de la solución electrolítica en la que van estar sumergidos los electrodos y el cuarto parámetro es el material de cada uno de los electrodos, que afectarán directamente la producción de hidrógeno, tomando a consideración el tiempo de reacción de la electrólisis, temperatura y caudal de producción.

Verificando su funcionamiento, interpretando y analizando los resultados teóricos y experimentales, encontrando una relación entre los resultados.

#### **6.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

El primer paso para poner en funcionamiento el electrolizador se debe establecer la concentración química de la solución electrolítica, tomando en cuenta que la cantidad de agua necesaria para llenar el electrolizador y los tanques de nivel es de 5 litros, la concentración de la solución electrolítica se lo hace en peso, para las pruebas a realizarse se trabajará con una solución al 20% de sosa potásica, 20% de sosa caustica, 20% de cloruro de sodio, agua desmineralizada y agua potable.

El peso del soluto (1000 gramos), es decir el compuesto con el que se va a trabajar, que debe ser pesado en una balanza electrónica para garantizar la concentración de la solución. Una vez pesado el soluto se procede a mezclarlo con los 5 litros de agua destilada o agua potable en un recipiente de boca ancha, para luego verter el contenido en el tanque de almacenamiento del electrolizador (TL1).

De una manera paralela a la actividad anterior se coloca los electrodos (mallas o placas), en cada uno de los módulos del electrolizador, sujetos en la parte superior por un lagarto y en la parte inferior sujetos por rendijas en cada uno de los módulos.

Para el caso de los módulos catódicos se tiene delimitadas 3 rendijas y cada una de ellas se encuentra separada por 5 milímetros. Es decir la distancia efectiva entre el ánodo y cátodo es mayor, para poner un ejemplo si el cátodo ocupa la primera posición la distancia efectiva es de 20mm, si ocupa la segunda rendija la distancia efectiva será de 25mm y si ocupa la tercera rendija será de 30mm.

Una vez asegurados los electrodos se procede al montaje del electrolizador mediante el uso de 8 pernos de acero inoxidable de 6 pulgadas con sus respectivos sellos, arandelas planas, arandelas de presión y tuercas, hasta que el electrolizador quede completamente hermético con el uso de llave de tuerca.

A continuación se colocarán cada una de las mangueras de ingreso del electrolito en los ductos de los módulos catódicos de forma axial y asegurándolos adecuadamente con abrazaderas (DL1 y DL2), de forma similar se asegurará las mangueras de los tanques de almacenamiento de los gases mediante abrazaderas (DG1 y DG2), como se muestra en la figura N°6.1 y la figura N°6.2.

Seguidamente se debe comprobar que cada una de las abrazaderas y partes del conjunto estén adecuadamente aseguradas y una vez comprobado esto se procede a abrir la válvula del electrolito (VL1).

Los cinco litros de la solución electrolítica deben ingresar completamente al electrolizador (TE), y a los tanques de almacenamiento de los gases (TGH y TGO), los cuales estarán llenos parcialmente que deberán ser compensados con agua desmineralizada o agua potable hasta su totalidad, en el momento que el tanque de almacenamiento de electrolito (TL1), se encuentre vacío se cierra la válvula de paso del electrolito (VL1), para impedir que el electrolito regrese.

Se debe comprobar que el electrolizador se encuentre copado de electrolito y una vez realizado se procede a tomar las pinzas de conducción eléctrica que van desde la batería de 12 voltios con los polos negativo y positivo hacia el electrolizador, conectando adecuadamente como se muestra en el electrolizador, con cada uno de los polos sin juntarlos.

El primer polo que tiene que hacer contacto con el electrolizador es el polo positivo de la batería que se conecta con el cable rojo (EEP), mediante el uso de pinzas eléctricas y el segundo polo (negativo), tiene que hacer contacto con el electrolizador con los espárragos que están conectados entre sí (EENP).

Seguidamente de poner en contacto el segundo polo de la batería se debe tomar el tiempo de respuesta, es decir el tiempo en que tarda en iniciarse la electrólisis, que tarda pocos segundos. Este procedimiento se lo debe repetir 6 veces hasta obtener un grupo de datos homogéneos.

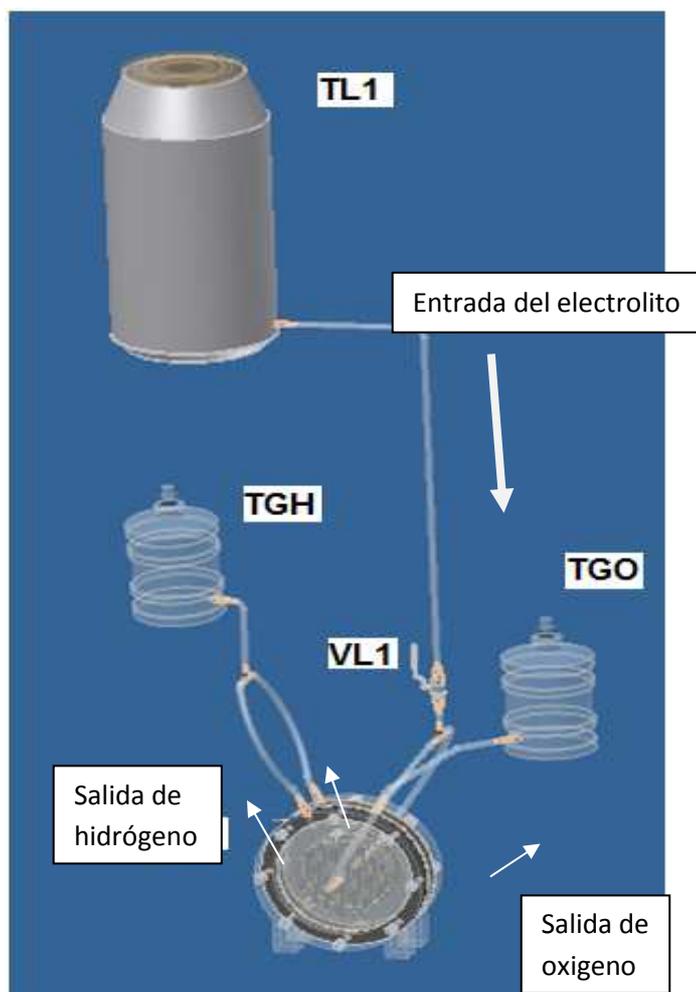


Figura 6.1 Esquema del sistema de alimentación del electrolizador.

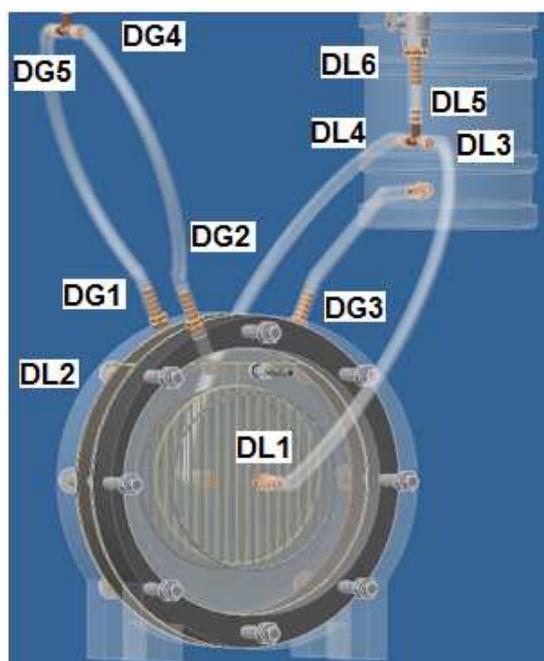


Figura 6.2 Esquema del electrolizador.

### 6.3 PROTOCOLO DE PRUEBAS

El protocolo de pruebas permite tomar el tiempo de reacción, voltaje, corriente eléctrica y caudal de hidrógeno producido. El caudal de hidrógeno producido por el electrolizador se determina por nivel del líquido desplazado, tomando el tiempo a considerarse para realizar las pruebas.

Se realizan 9 pruebas estableciendo parámetros determinables como la concentración de la solución, distancia entre electrodos y materiales de los electrodos, para establecer cuál es la tasa de producción de hidrógeno.

#### 6.3.1 MEDIDA DEL TIEMPO DE REACCIÓN

Para determinar el tiempo en que toma en empezar la electrólisis se lo debe realizar de una manera manual, con el uso de un cronómetro y la activación del interruptor. Se debe conectar únicamente para esta prueba de manera directa la batería al tablero de control, con el fin de trabajar con un voltaje constante y la corriente más alta. Esta prueba se realiza para determinar el tiempo de respuesta que tiene la solución electrolítica y así escoger cual de las soluciones es la más adecuada para trabajar, tomando 6 valores similares, tabla N°6.1.

Tabla 6.1 Pruebas del tiempo de reacción de la solución.

Solución	Al 20% NaOH	Al 20% KOH	Al 20% NaCl
<b>Prueba</b>	<b>Tiempo de reacción [s]</b>		
1	0.19	0.33	0.65
2	0.17	0.28	0.67
3	0.20	0.26	0.55
4	0.17	0.19	0.54
5	0.18	0.23	0.56
6	0.17	0.18	0.57
<b>Promedio</b>	0.18	0.25	0.59

### 6.3.2 MEDIDA DEL VOLTAJE Y CORRIENTE

Para realizar las medidas del voltaje en electrolizador previamente se debe conectar los polos de la batería hacia el circuito variador de voltaje, con el objetivo de permitir una variación homogénea de la carga suministrada por la batería. Además se debe establecer, la solución electrolítica, el material y la distancia efectiva entre cada uno de los electrodos.

#### 6.3.2.1 Determinación del voltaje y corriente en los módulos del electrolizador.

Para la medición del voltaje como para la corriente se utilizará como equipo un multímetro digital para corriente continua.

Tabla 6.2 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 1.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de acero inoxidable MESH 10
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de acero inoxidable MESH 10

Tabla 6.3 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 1.

Tiempo [min]	Voltaje circuito [V]	Corriente circito [A]	Corriente <sub>1-2</sub> [A]	Corriente <sub>2-3</sub> [A]
1	2.19	2.63	1.30	1.33
2	2.43	2.69	1.33	1.36
3	2.43	2.77	1.37	1.40
4	2.78	5.50	2.72	2.78
5	2.78	5.42	2.68	2.74
<b>Promedio</b>	2.52	3.80		
Tiempo [min]	Voltaje circuito [V]	Corriente circito [A]	Corriente <sub>1-2</sub> [A]	Corriente <sub>2-3</sub> [A]
1	3.22	5.00	2.48	2.53
2	3.36	5.67	2.81	2.86
3	3.34	5.54	2.74	2.80
4	3.35	5.58	2.76	2.82
5	3.33	5.48	2.71	2.77
<b>Promedio</b>	3.32	5.45		
Tiempo [min]	Voltaje circuito [V]	Corriente circito [A]	Corriente <sub>1-2</sub> [A]	Corriente <sub>2-3</sub> [A]
1	4.63	7.58	3.75	3.83
2	4.66	7.72	3.82	3.90
3	4.74	7.65	3.79	3.86
4	4.70	7.61	3.77	3.84
5	4.65	7.74	3.83	3.91
<b>Promedio</b>	4.68	7.66		
Tiempo [min]	Voltaje circuito [V]	Corriente circito [A]	Corriente <sub>1-2</sub> [A]	Corriente <sub>2-3</sub> [A]
1	5.65	9.20	4.55	4.65
2	5.47	9.30	4.60	4.70
3	5.26	9.50	4.70	4.80
4	5.42	9.94	4.92	5.02
5	5.36	9.30	4.60	4.70
<b>Promedio</b>	5.43	9.45		

Tabla 6.4 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 2.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de acero inoxidable MESH 10
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.50	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.50	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de acero inoxidable MESH 10

Tabla 6.5 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 2.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.22	0.42	0.21	0.21
2	2.20	0.33	0.16	0.17
3	2.27	0.41	0.20	0.21
4	2.26	0.48	0.24	0.24
5	2.25	0.42	0.21	0.21
<b>Promedio</b>	<b>2.24</b>	<b>0.41</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.15	6.70	3.32	3.38
2	3.04	6.68	3.31	3.37
3	3.86	6.93	3.43	3.50
4	3.97	7.04	3.48	3.56
5	3.85	7.03	3.48	3.55
<b>Promedio</b>	<b>3.57</b>	<b>6.88</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	4.00	11.60	5.74	5.86
2	4.10	11.20	5.54	5.66
3	4.04	10.60	5.25	5.35
4	4.08	10.46	5.18	5.28
5	4.12	10.30	5.10	5.20
<b>Promedio</b>	<b>4.07</b>	<b>10.83</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	4.92	13.70	6.78	6.92
2	5.15	14.00	6.93	7.07
3	5.00	14.40	7.13	7.27
4	4,98	13.84	6.85	6.99
5	5.10	14.15	7.00	7.15
<b>Promedio</b>	<b>5.04</b>	<b>14.02</b>		

Tabla 6.6 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 3.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de acero inoxidable MESH 10
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	3.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	3.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de acero inoxidable MESH 10

Tabla 6.7 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 3.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.20	0.23	0.11	0.12
2	2.22	0.25	0.12	0.13
3	2.26	0.37	0.18	0.19
4	2.50	0.43	0.21	0.22
5	2.31	0.31	0.15	0.16
<b>Promedio</b>	<b>2.30</b>	<b>0.32</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.10	2.84	1.41	1.43
2	4.00	5.73	2.84	2.89
3	4.13	6.03	2.98	3.05
4	4.10	5.81	2.88	2.93
5	4.10	6.12	3.03	3.09
<b>Promedio</b>	<b>3.89</b>	<b>5.31</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	4.00	4.76	2.36	2.40
2	4.31	5.59	2.77	2.82
3	4.36	5.75	2.85	2.90
4	4.39	5.80	2.87	2.93
5	4.35	5.79	2.87	2.92
<b>Promedio</b>	<b>4.28</b>	<b>5.54</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.17	8.52	4.22	4.30
2	5.35	8.10	4.01	4.09
3	5.40	8.76	4.34	4.42
4	5.30	8.70	4.31	4.39
5	5.01	8.63	4.27	4.36
<b>Promedio</b>	<b>5.25</b>	<b>8.54</b>		

Tabla 6.8 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 4.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Lámina de acero inoxidable 316
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Lámina de acero inoxidable 316

Tabla 6.9 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 4.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.22	0.34	0.17	0.17
2	2.26	0.43	0.21	0.22
3	2.23	0.50	0.25	0.25
4	2.21	0.46	0.23	0.23
5	2.25	0.62	0.31	0.31
<b>Promedio</b>	<b>2.23</b>	<b>0.47</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.28	4.26	2.11	2.15
2	3.69	6.29	3.11	3.18
3	3.58	6.63	3.28	3.35
4	3.79	6.32	3.13	3.19
5	3.58	5.87	2.91	2.96
<b>Promedio</b>	<b>3.58</b>	<b>5.87</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.99	8.80	4.36	4.44
2	3.89	9.34	4.62	4.72
3	4.27	9.81	4.86	4.95
4	4.07	9.33	4.62	4.71
5	4.10	9.23	4.57	4.66
<b>Promedio</b>	<b>4.06</b>	<b>9.30</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.04	11.94	5.91	6.03
2	5.24	12.70	6.29	6.41
3	5.25	12.74	6.31	6.43
4	5.20	12.36	6.12	6.24
5	5.08	12.21	6.04	6.17
<b>Promedio</b>	<b>5.16</b>	<b>12.39</b>		

Tabla 6.10 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 5.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Lámina de acero inoxidable 316
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.50	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.50	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Lámina de acero inoxidable 316

Tabla 6.11 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 5.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.29	0.42	0.21	0.21
2	2.34	0.40	0.20	0.20
3	2.19	0.46	0.23	0.23
4	2.25	0.45	0.22	0.23
5	2.35	0.55	0.27	0.28
<b>Promedio</b>	<b>2.28</b>	<b>0.46</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.13	5.02	2.48	2.54
2	3.28	5.83	2.89	2.94
3	3.32	5.84	2.89	2.95
4	3.38	5.74	2.84	2.90
5	3.40	5.63	2.79	2.84
<b>Promedio</b>	<b>3.30</b>	<b>5.61</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.98	8.76	4.34	4.42
2	3.94	8.96	4.44	4.52
3	4.00	8.92	4.42	4.50
4	4.05	9.03	4.47	4.56
5	4.01	9.94	4.92	5.02
<b>Promedio</b>	<b>4.00</b>	<b>9.12</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.17	12.27	6.07	6.20
2	5.19	12.40	6.14	6.26
3	4.83	11.93	5.91	6.02
4	5.03	12.07	5.97	6.10
5	5.10	12.20	6.04	6.16
<b>Promedio</b>	<b>5.06</b>	<b>12.17</b>		

Tabla 6.12 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 6.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Lámina de acero inoxidable 316
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	3.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	3.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Lámina de acero inoxidable 316

Tabla 6.13 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 6.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.64	0.53	0.26	0.27
2	2.46	0.37	0.18	0.19
3	2.49	0.34	0.17	0.17
4	2.39	0.44	0.22	0.22
5	2.59	0.51	0.25	0.26
<b>Promedio</b>	<b>2.51</b>	<b>0.44</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.28	5.36	2.65	2.71
2	3.35	6.67	3.30	3.37
3	3.37	5.89	2.92	2.97
4	3.36	5.91	2.93	2.98
5	3.35	5.90	2.92	2.98
<b>Promedio</b>	<b>3.34</b>	<b>5.95</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.92	8.36	4.14	4.22
2	3.99	8.85	4.38	4.47
3	4.10	9.20	4.55	4.65
4	3.86	8.15	4.03	4.12
5	3.87	8.20	4.06	4.14
<b>Promedio</b>	<b>3.95</b>	<b>8.55</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.31	11.81	5.85	5.96
2	5.14	11.64	5.76	5.88
3	4.91	11.30	5.59	5.71
4	5.20	12.15	6.01	6.14
5	5.33	12.28	6.08	6.20
<b>Promedio</b>	<b>5.18</b>	<b>11.84</b>		

Tabla 6.14 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 7.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14

Tabla 6.15 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 7.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.30	2.50	1.24	1.26
2	2.50	1.78	0.88	0.90
3	2.24	1.46	0.72	0.74
4	2.56	1.70	0.84	0.86
5	2.52	1.68	0.83	0.85
<b>Promedio</b>	<b>2.42</b>	<b>1.82</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.00	3.50	1.73	1.77
2	3.27	5.12	2.53	2.59
3	3.13	4.79	2.37	2.42
4	3.39	4.98	2.47	2.51
5	3.44	5.01	2.48	2.53
<b>Promedio</b>	<b>3.25</b>	<b>4.68</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	4.64	9.20	4.55	4.65
2	4.75	8.81	4.36	4.45
3	4.30	8.67	4.29	4.38
4	4.43	8.75	4.33	4.42
5	4.47	8.60	4.26	4.34
<b>Promedio</b>	<b>4.52</b>	<b>8.81</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.00	11.91	5.90	6.01
2	5.30	12.61	6.24	6.37
3	4.70	11.70	5.79	5.91
4	4.60	11.75	5.82	5.93
5	4.40	11.50	5.69	5.81
<b>Promedio</b>	<b>4.80</b>	<b>11.89</b>		

Tabla 6.16 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 8.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.50	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.50	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14

Tabla 6.17 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 8.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.40	2.50	1.24	1.26
2	2.53	2.10	1.04	1.06
3	2.55	2.08	1.03	1.05
4	2.66	2.08	1.03	1.05
5	2.69	2.31	1.14	1.17
<b>Promedio</b>	<b>2.57</b>	<b>2.21</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.13	3.80	1.88	1.92
2	3.28	5.16	2.55	2.61
3	3.32	5.04	2.49	2.54
4	3.38	5.16	2.55	2.61
5	3.40	5.22	2.58	2.64
<b>Promedio</b>	<b>3.30</b>	<b>4.88</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	4.31	8.59	4.25	4.34
2	4.38	8.49	4.20	4.29
3	4.13	8.39	4.15	4.24
4	4.19	8.34	4.13	4.21
5	4.24	8.32	4.12	4.20
<b>Promedio</b>	<b>4.25</b>	<b>8.42</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.05	12.01	5.94	6.06
2	5.18	12.23	6.05	6.18
3	4.93	12.01	5.94	6.06
4	4.81	11.85	5.86	5.98
5	4.70	11.25	5.57	5.68
<b>Promedio</b>	<b>4.93</b>	<b>11.87</b>		

Tabla 6.18 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 9.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	3.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	3.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14

Tabla 6.19 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 9.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2,50	2,50	1,24	1,26
2	2,55	2,42	1,20	1,22
3	2,86	2,70	1,34	1,36
4	2,76	2,45	1,21	1,24
5	2,86	2,94	1,46	1,48
<b>Promedio</b>	<b>2,71</b>	<b>2,60</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3,10	4,10	2,03	2,07
2	3,33	5,20	2,57	2,63
3	3,34	5,28	2,61	2,67
4	3,36	5,34	2,64	2,70
5	3,37	5,43	2,69	2,74
<b>Promedio</b>	<b>3,30</b>	<b>5,07</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3,98	7,98	3,95	4,03
2	4,00	8,17	4,04	4,13
3	3,96	8,11	4,01	4,10
4	3,94	7,92	3,92	4,00
5	4,00	8,03	3,97	4,06
<b>Promedio</b>	<b>3,98</b>	<b>8,04</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5,10	12,10	5,99	6,11
2	5,05	11,85	5,87	5,98
3	5,15	12,31	6,09	6,22
4	5,01	11,94	5,91	6,03
5	5,00	11,00	5,45	5,56
<b>Promedio</b>	<b>5,06</b>	<b>11,84</b>		

Tabla 6.20 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 10.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de grafito reforzado con acero

Tabla 6.21 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 10.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.58	1.07	0.53	0.54
2	2.50	0.98	0.49	0.49
3	2.44	0.77	0.38	0.39
4	2.42	0.74	0.37	0.37
5	2.38	0.66	0.33	0.33
<b>Promedio</b>	<b>2.46</b>	<b>0.84</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.15	3.85	1.91	1.94
2	3.74	5.67	2.81	2.86
3	3.83	5.70	2.82	2.88
4	3.85	5.71	2.83	2.88
5	3.82	5.72	2.83	2.89
<b>Promedio</b>	<b>3.68</b>	<b>5.33</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	4.35	8.31	4.11	4.20
2	4.37	8.29	4.10	4.19
3	4.39	8.42	4.17	4.25
4	4.41	8.52	4.22	4.30
5	4.37	8.35	4.13	4.22
<b>Promedio</b>	<b>4.38</b>	<b>8.38</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.02	11.87	5.88	5.99
2	5.36	12.24	6.06	6.18
3	5.61	12.84	6.36	6.48
4	5.23	12.71	6.29	6.42
5	5.26	12.75	6.31	6.44
<b>Promedio</b>	<b>5.30</b>	<b>12.48</b>		

Tabla 6.22 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 11.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.50	<b>Electrodo Central</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.50	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de grafito reforzado con acero

Tabla 6.23 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 11.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.40	0.80	0.40	0.40
2	2.36	0.68	0.33	0.34
3	2.32	0.56	0.27	0.28
4	2.36	0.59	0.29	0.30
5	2.31	0.59	0.29	0.30
<b>Promedio</b>	<b>2.35</b>	<b>0.64</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.13	3.84	1.90	1.94
2	3.28	4.62	2.28	2.33
3	3.32	4.12	2.04	2.08
4	3.38	4.55	2.25	2.30
5	3.40	4.44	2.20	2.24
<b>Promedio</b>	<b>3.30</b>	<b>4.31</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	4.21	6.47	3.20	3.27
2	4.24	6.50	3.22	3.28
3	4.24	6.54	3.23	3.30
4	4.28	6.61	3.27	3.34
5	4.24	6.50	3.22	3.28
<b>Promedio</b>	<b>4.24</b>	<b>6.52</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.17	10.17	5.03	5.13
2	5.25	10.34	5.12	5.22
3	5.26	10.67	5.28	5.39
4	5.22	10.56	5.23	5.33
5	5.30	10.76	5.33	5.43
<b>Promedio</b>	<b>5.24</b>	<b>10.50</b>		

Tabla 6.24 Parámetros determinados para la medición del voltaje y corriente, en la Prueba 12.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH	<b>Material de los electrodos</b>	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	3.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	3.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de grafito reforzado con acero

Tabla 6.25 Voltaje y amperaje en cada módulo del electrolizador, en la Prueba 12.

<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	2.21	0.53	0.26	0.27
2	2.22	0.37	0.18	0.19
3	2.20	0.34	0.17	0.17
4	2.29	0.44	0.22	0.22
5	2.24	0.51	0.25	0.26
<b>Promedio</b>	<b>2.23</b>	<b>0.44</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	3.80	3.83	1.90	1.93
2	3.76	3.56	1.76	1.80
3	3.61	2.54	1.26	1.28
4	3.58	3.38	1.67	1.71
5	3.00	3.15	1.56	1.59
<b>Promedio</b>	<b>3.55</b>	<b>3.29</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	4.06	4.63	2.29	2.34
2	4.10	4.70	2.33	2.37
3	4.09	4.65	2.30	2.35
4	4.15	4.70	2.33	2.37
5	4.10	4.65	2.30	2.35
<b>Promedio</b>	<b>4.10</b>	<b>4.67</b>		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje circuito [V]</b>	<b>Corriente circito [A]</b>	<b>Corriente<sub>1-2</sub> [A]</b>	<b>Corriente<sub>2-3</sub> [A]</b>
1	5.31	8.46	4.19	4.27
2	5.14	8.43	4.17	4.26
3	4.91	8.50	4.21	4.29
4	5.20	8.41	4.16	4.25
5	5.33	8.77	4.34	4.43
<b>Promedio</b>	<b>5.18</b>	<b>8.51</b>		

### 6.3.2.2 Medida del caudal

Para la medición del flujo de hidrógeno se debe considerar cada uno de los parámetros que intervienen en la electrólisis como la concentración de la solución, el material de los electrodos, distancia entre ellos y la corriente eléctrica suministrada por la fuente.

Debido a la pequeña variación del nivel electrolito en el tanque de hidrógeno y oxígeno por minuto, provocado por la electrólisis, debido esta razón el tiempo de análisis será en un lapso de cinco minutos, para poder apreciar y medir la diferencia de niveles.

Tabla 6.26 Niveles de variación en el tanque de hidrógeno de la Prueba 1, 2 y 3.

Solución	Al 20% KOH	Material de los electrodos	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de acero inoxidable MESH 10
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de acero inoxidable MESH 10
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H<sub>2</sub> [mm]</b>
5	2.52	3.80	5
5	3.32	5.45	7
5	4.68	7.66	10
5	5.43	9.45	15
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.50		
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.50		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H<sub>2</sub> [mm]</b>
5	2.24	0.41	1
5	3.57	6.88	9
5	4.07	10.83	12
5	5.04	14.02	14
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	3.00		
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	3.00		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H<sub>2</sub> [mm]</b>
5	2.22	0.25	0
5	4.00	5.73	1
5	4.31	5.59	3
5	5.35	8.10	7

Tabla 6.27 Niveles de variación en el tanque de hidrógeno de la Prueba 4, 5 y 6.

Solución	Al 20% KOH	Material de los electrodos	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Lámina de acero inoxidable 316
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Lámina de acero inoxidable 316
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.23	0.47	0.5
5	3.58	5.87	3
5	4.06	9.30	10
5	5.16	12.39	14
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.50		
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.50		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.28	0.46	0
5	3.30	5.61	3
5	4.00	9.12	7
5	5.06	12.17	12
<b>D1 -D2 [cm]</b>	3.00		
<b>D2 - D3[cm]</b>	3.00		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.51	0.44	0
5	3.34	5.95	4
5	3.95	8.55	13
5	5.18	11.84	16

Tabla 6.28 Niveles de variación en el tanque de hidrógeno de la Prueba 7, 8 y 9.

Solución	Al 20% KOH	Material de los electrodos	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de acero inoxidable MESH 14
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.42	1.82	2
5	3.25	4.68	4
5	4.52	8.81	20
5	4.80	11.89	23
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.50		
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.50		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.57	2.21	2
5	3.30	4.88	5
5	4.25	8.42	17
5	4.93	11.87	21
<b>D1 -D2 [cm]</b>	3.00		
<b>D2 - D3[cm]</b>	3.00		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.71	2.60	2
5	3.30	5.07	5
5	3.98	8.04	18
5	5.06	11.84	20

Tabla 6.29 Niveles de variación en el tanque de hidrógeno de la Prueba 10, 11 y 12.

Solución	Al 20% KOH	Material de los electrodos	
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		<b>Electrodo Derecho</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Central</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.00	<b>Electrodo Izquierdo</b>	Malla de grafito reforzado con acero
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.46	0.84	1
5	3.68	5.33	5
5	4.38	8.38	12
5	5.30	12.48	20
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.50		
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.50		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.35	0.64	0
5	3.30	4.31	4
5	4.24	6.52	9
5	5.24	10.50	15
<b>D1 -D2 [cm]</b>	3.00		
<b>D2 - D3[cm]</b>	3.00		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Corriente circuito [A]</b>	<b>Nivel del gas H2 [mm]</b>
5	2.23	0.44	0
5	3.55	3.29	4
5	4.10	4.67	7
5	5.18	8.51	14

## 6.4 CÁLCULOS

### 6.4.1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA MASA DE HIDRÓGENO

Con los datos de altura en el tanque producción de hidrógeno, se determina la cantidad de hidrógeno presente mediante la ecuación 6.1:

$$m_{H_2} = \rho_{H_2} \times A_{\text{recipiente}} \times N_{H_2} \quad (6.1)$$

Donde:

$m_{H_2}$	: Masa de hidrógeno	[g]
$\rho_{H_2}$	: Densidad del hidrógeno	[g/cm <sup>3</sup> ]
$A_{\text{recipiente}}$	: Área del recipiente	[cm <sup>2</sup> ]
$N_{H_2}$	: Nivel del electrolito	[cm]

Donde  $\rho_{H_2} = 0.0000820$  [g/cm<sup>3</sup>], que fue establecida en el capítulo 2, por que la densidad de hidrógeno no presenta ninguna variación en el rango de trabajo y será utilizada en todas las pruebas.

El área del recipiente se determina que la superficie translucida del botellón la cual es  $A_{\text{recipiente}} = 122.718$  [cm<sup>2</sup>]. Sin embargo por la gran cantidad de pruebas que se realizaron se tomará las más significativas, es decir variando los materiales de los electrodos con la distancia más corta, a continuación se muestra en la tabla 6.30.

Tabla 6.30 Producción de hidrógeno en la solución al 20% de KOH.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH		
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>		Malla de acero inoxidable MESH 10	
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.00	Malla de acero inoxidable MESH 14	
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.00	Malla de acero inoxidable MESH 10	
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Nivel del gas H<sub>2</sub> [mm]</b>	<b>Masa de H<sub>2</sub> producido [g]</b>
5	2.52	5	5.031E-03
5	3.32	7	7.044E-03
5	4.68	10	1.006E-02
5	5.43	15	1.509E-02
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.50		
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.50		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Nivel del gas H<sub>2</sub> [mm]</b>	<b>Masa de H<sub>2</sub> producido [g]</b>
5	2.24	1	1.262E-03
5	3.57	9	1.136E-02
5	4.07	12	1.515E-02
5	5.04	14	1.767E-02
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	3.00		
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	3.00		
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Voltaje<sub>circuito</sub> [V]</b>	<b>Nivel del gas H<sub>2</sub> [mm]</b>	<b>Masa de H<sub>2</sub> producido [g]</b>
5	2.22	0	0.000E+00
5	4.00	1	1.262E-03
5	4.31	3	3.787E-03
5	5.35	7	8.836E-03

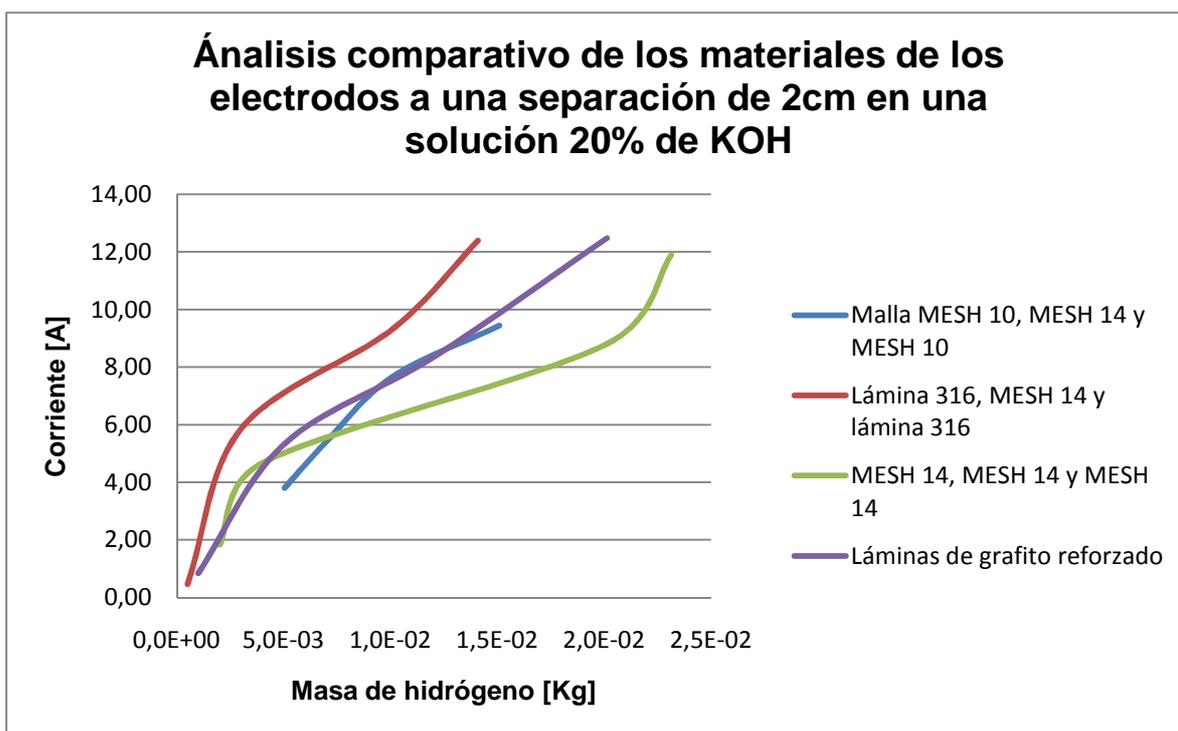


Figura 6.3 Producción de hidrógeno Vs. Corriente Eléctrica a 2cm de distancia.

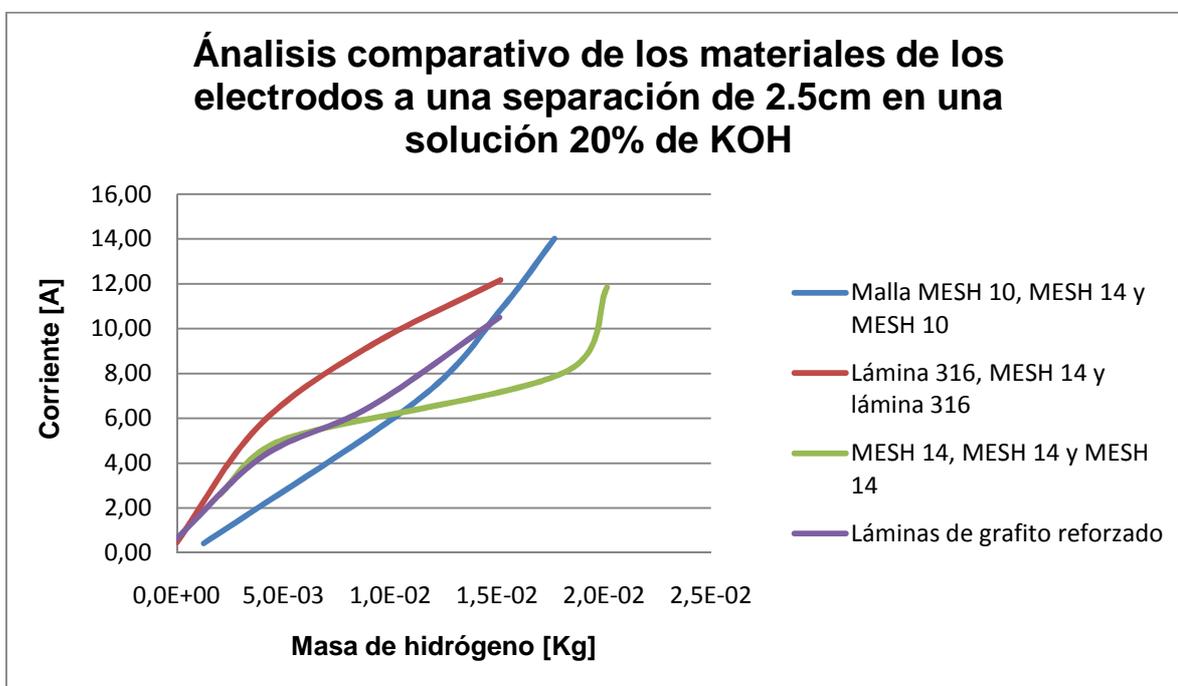


Figura 6.4 Producción de hidrógeno Vs. Corriente Eléctrica a 2.5cm de distancia.

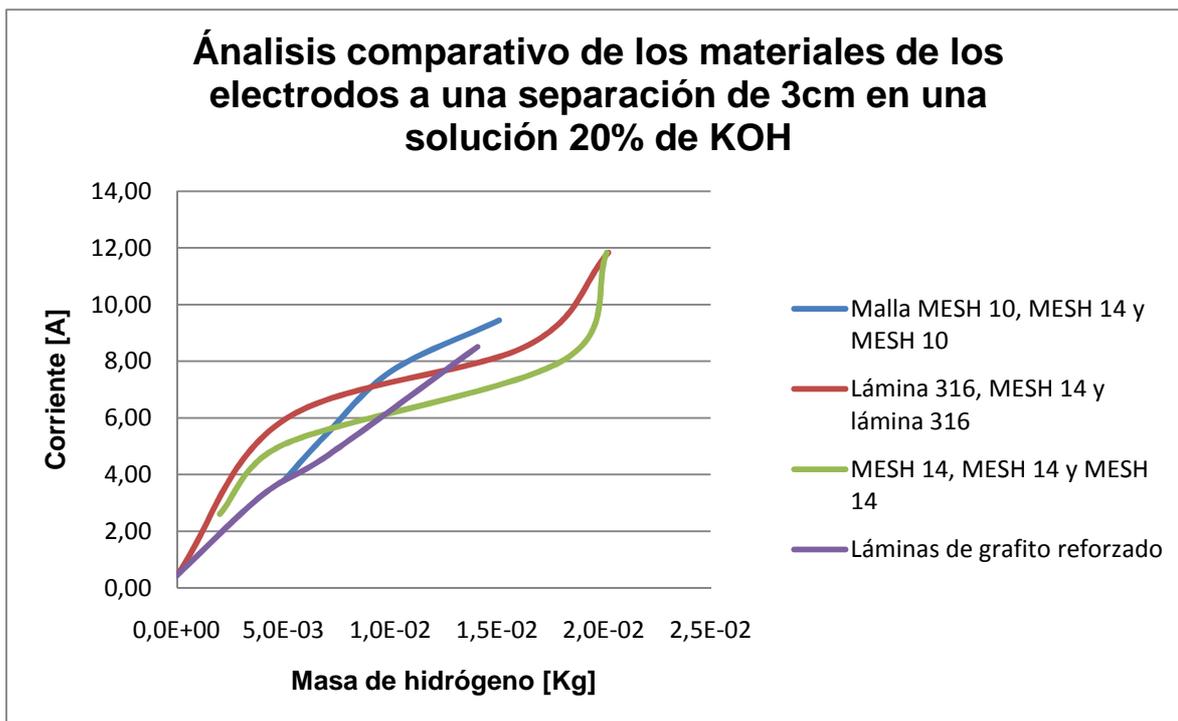


Figura 6.5 Producción de hidrógeno Vs. Corriente Eléctrica a 3cm de distancia.

#### 6.4.2 DETERMINACIÓN TEÓRICA DEL CONSUMO DE ENERGÍA.

En el capítulo 2, se detalla la manera para determinar la energía entregada, mediante la ecuación 2.48. Mediante el uso de un amperímetro para determinar la corriente eléctrica que circula en el electrolizador y el voltaje entre los electrodos será determinado mediante el voltímetro.

#### 6.4.3 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ENERGÍA PRODUCIDA.

Para determinar la energía producida por el electrolizador se utiliza la ecuación de combustión estequiométrica del hidrógeno, considerando el poder calorífico inferior del hidrógeno por no existir un cambio de fase de los productos de la combustión.

$$Q_{\text{útil}} = VC \times \dot{m}_{H_2} \quad (6.2)$$

Donde:

$m_{H_2}$  : Flujo másico de hidrógeno [Kg/s]  
 $VC_{H_2}$  : Valor calorífico = 120011 [KJ/Kg]

Tabla 6.31 Diferencia entre el consumo de energía y la producción de energía.

Solución	Al 20% KOH
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>	
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.00
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.00
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
9.59	2.52
18.11	3.52
35.82	5.03
51.32	7.55
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	2.50
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	2.50
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
0.92	0.63
24.57	5.68
44.06	7.57
70.69	8.84
<b>D<sub>1</sub> -D<sub>2</sub> [cm]</b>	3.00
<b>D<sub>2</sub> - D<sub>3</sub>[cm]</b>	3.00
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
0.73	0.00
20.62	0.63
23.71	1.89
44.81	4.42

Tabla 6.32 Diferencia entre el consumo de energía y la producción de energía.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>	
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.00
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.00
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
1.05	0.25
21.05	1.51
37.80	5.03
63.96	7.04
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.50
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.50
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
1.04	0.00
18.53	1.89
36.45	4.42
61.65	7.57
<b>D1 -D2 [cm]</b>	3.00
<b>D2 - D3[cm]</b>	3.00
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
1.10	0.00
19.87	2.52
33.76	8.21
61.29	10.10

Tabla 6.33 Diferencia entre el consumo de energía y la producción de energía.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>	
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.00
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.00
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
4.42	1.01
15.19	2.01
39.79	10.06
57.09	11.57
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.50
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.50
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
5.68	1.01
16.10	2.52
35.78	8.55
58.52	10.57
<b>D1 -D2 [cm]</b>	3.00
<b>D2 - D3[cm]</b>	3.00
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
7.04	1.01
16.73	2.52
31.97	9.06
59.93	10.06

Tabla 6.34 Diferencia entre el consumo de energía y la producción de energía.

<b>Solución</b>	Al 20% KOH
<b>Distancia efectiva entre los electrodos</b>	
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.00
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.00
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
2.08	0.50
19.60	2.52
36.68	6.04
66.10	10.06
<b>D1 -D2 [cm]</b>	2.50
<b>D2 - D3[cm]</b>	2.50
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
1.51	0.00
14.23	2.01
27.65	4.53
54.98	7.55
<b>D1 -D2 [cm]</b>	3.00
<b>D2 - D3[cm]</b>	3.00
<b>Energía consumda [W]</b>	<b>Energía producida [W]</b>
0.98	0.00
11.69	2.01
19.13	3.52
44.09	7.04

## 6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.5.1 PRODUCCIÓN DE MÁXIMA DE HIDRÓGENO

Con los resultados obtenidos se establece que los electrodos a ocupar para una generación continua de hidrógeno, son los electrodos de malla de acero inoxidable MESH 14, por la facilidad del desprendimiento de las moléculas de hidrógeno y oxígeno.

El análisis de producción por hora de hidrógeno se determina a continuación:

Tabla 6.35 Flujo másico por hora de hidrógeno.

Prueba	Distancia D1 - D2 - D3 [cm] MESH 14	Voltaje circuito [V]	Corriente circuito [A]	Flujo másico de H <sub>2</sub> [g/h]
1	2	12.52	15.40	4.09
2	2	12.13	15.20	3.79
3	2	11.89	14.70	3.64

## CAPÍTULO 7

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

- 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.
- La eficiencia del electrolizador es relativamente baja de un 16% considerando cada uno de los cambios a la que se encuentra sometida la energía, desde energía solar, a energía eléctrica y química para la obtención de hidrógeno.
- A un menor tiempo de respuesta, al empezar la electrólisis en la solución electrolítica aumenta la producción de hidrógeno, por esta razón el medio más adecuada para la electrolisis es una solución al 20% de sosa caustica (NaOH) en agua desmineralizada.
- La producción de hidrógeno depende de forma directa de la distancia que existen entre cada uno de los electrodos como también de los materiales que se encuentran conformados los mismos.
- Al utilizar mallas como electrodos se incrementa la producción de hidrógeno, ya que la geometría de los alambres con los que están hechas las mallas facilitan el desprendimiento de las moléculas de hidrógeno y oxígeno.
- Al utilizar láminas de carbón como electrodos, se aumenta la resistencia del electrolito debido al desprendimiento de partículas de carbón, ocasionado por la producción de hidrógeno y oxígeno en el proceso de electrólisis.

- La solución electrolítica al 20% de cloruro de sodio (NaCl), fue descartada para el análisis de producción de hidrógeno por su tiempo de respuesta alto al empezar la electrólisis y la tasa de deposición tanto del sodio como del cloro en los electrodos es alto.
- La producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua es una tecnología probada en este proyecto y útil como vector energético para remplazar a la energía actual del gas licuado de petróleo.
- La producción de hidrógeno mediante energía solar es una alternativa muy conveniente en estos días, debido a los diferentes problemas ambientales por los que atraviesa nuestro mundo, capaz de satisfacer necesidades sociales.
- 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.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

- Para operar el electrolizador se lo debe hacer en zonas ventiladas y alejado de fuentes inflamables.
- Para una mejor cuantificación de la tasa de producción de hidrógeno se debe utilizar un flujómetro para gases de alta precisión.
- 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.
- Para empezar la electrólisis se debe considerar que los niveles del electrolito cubran completamente a los porta electrodos del electrolizador.

- Se debe verificar cada una de las conexiones eléctricas en el esquema eléctrico, antes de accionar el interruptor.
- El tiempo de funcionamiento utilizando el circuito variador de voltaje no debe superar los cinco minutos de operación, por la temperatura que puede alcanzar el IGBT y se sature este componente.
- Se puede experimentar otro tipo de electrolizadores por ejemplo el tubular.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGUER – MIRANDA, (2005), “*Hidrogeno, el fundamento de un futuro equilibrado*”, Editorial Díaz de Santos, España.
- BENT S, (2005), “*Hydrogen and fuel cells*”, Emerging Technologies and Applications, Editorial Elsevier Academic Press, United States.
- BILURBINA – LIESA, (1990), “*Materiales no metálicos resistentes a la corrosión*”, Editorial Marcombo, Barcelona.
- BOCKRIS - REDDY, (2003), “*Electroquímica moderna*”, Volumen 2, Editorial Reverté, New York.
- CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS, (2003), “*El gas natural y el hidrógeno en automoción*”, Editorial CSIC, España.
- COWARD H F and C W JONES, (1952), “*Limits of Flammability of Gases and Vapors*”, Bureau of Mines Bulletin, New York, Pág. 503, N70-74476: AD-701575.
- DAMASKÍN – PETRI, (1981), “*Fundamentos de la Electroquímica Teórica*”, Editorial MIR, Moscú.
- DASSLER A, (1962), “*Electroquímica y sus fundamentos fisicoquímicos*”, Editorial UTHEA, México.
- DEPARTAMENTO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO, (2003), “*Hidrogeno y Pilas de Combustible Estudio de la técnica y Posibilidades en Aragón*”, España.
- INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD, (2006), “*Análisis Actual y Tendencias Futuras de la Producción de Electricidad a partir del uso del Hidrógeno*”, Ed. ICE, Costa Rica.
- HYDROGEN ENERGY AND FUEL CELLS, (2003), “*A visión of our future*”, Comisión Europea, Bruselas.

- LEE J H R, KYNSTANTUS, C M GUIRAO W A BENEDICK and J E SHEPHERD, (2002), "*Hydrogen-Air Detonations*", Proceedings of the 2nd International Workshop on the Impact of Hydrogen on Water Reactor Safety.
- LÓPEZ P N, (2006), "*Usos de la electricidad para la dotación de hidrógeno a través de la electrólisis del agua*", Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica.
- MANTELL L, (2003), "*Ingeniería Electroquímica*", Cuarta Edición, Editorial Reverté, Barcelona.
- MPR ASSOCIATES INC., (2005), "*Hydrogen Production Methods*".
- MUÑIZ A H, (2009), "*El Hidrogeno: Consideraciones sobre su aplicación*", Art. Energías Alternativas.
- NATIONAL AERONAUTIC AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), (2002), Safely Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, USA.
- PERRY R, (1950), "*Handbook del Ingeniero Químico*", 3era Edición, MC-Graw Hill , New York.
- POSADAS D, (1980), "*Introducción a la electroquímica*", Editorial OEA, Washington.
- PRONTUARIO DE METALES – Tablas para la industria Metalúrgica.
- R DE LEVIE, (1999), "*The Electrolysis of Water*", Journal of Electro Analytical Chemistry, New York.
- R L LE ROY, (1983), "*Industrial Water Electrolysis, Present and Future*", International Journal of Hydrogen Energy, USA.
- SAND H, (1951), "*Electroquímica y análisis electroquímico*", Editorial Aguilar, Madrid.
- SHIGLEY D, (1951), "*Diseño de Elementos de Máquinas*", Editorial Prentice Hall, New York.

- TIMOSHENKO S, (1979), "*Mecánica de materiales*", Editorial UTEHA, México.
- UHLIG H, (1979), "*Corrosión y control de la corrosión*", Editorial Urmo, Bilbao.
- ZEBETAKIS M G and D S BURGESS, (1961), "*Research on the Hazards Associated with the Production and Handling of liquid Hydrogen*", BM-RI-5707 Bureau of Mines Report of Investigation, Washington DC.
- <http://arturobola.tripod.com/content.htm>
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/fichero/2.4+Propiedades+del+Hidr%F3geno.pdf>
- [http://docencia.izt.uam.mx/gtll/procesamiento\\_acuoso/plan\\_de\\_trabajo/clase\\_20\\_25nov.ppt](http://docencia.izt.uam.mx/gtll/procesamiento_acuoso/plan_de_trabajo/clase_20_25nov.ppt).
- <http://es.wikipedia.org>
- <http://fernando1pm1.blogspot.com>
- [http://h2training.eu/documentos/Man\\_es/Capitulo%205\\_La%20tecnologia%20de%20las%20pilas%20de%20combustible\\_Envipark\\_%20ES.ppt](http://h2training.eu/documentos/Man_es/Capitulo%205_La%20tecnologia%20de%20las%20pilas%20de%20combustible_Envipark_%20ES.ppt).
- <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno07/Pagina%20Web/energia.htm>
- <http://www.crisisenergetica.org/saticpages/hidro-tecnopolit>
- [http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/resistencia\\_mecanica.htm](http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/resistencia_mecanica.htm)
- [http://www.jornadastecnicas.com/docpdf/Energía\\_Maria\\_Jaen.pdf](http://www.jornadastecnicas.com/docpdf/Energía_Maria_Jaen.pdf)
- <http://www.lams.cl/flujometros.html>
- <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx>
- <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2006/GCBA/1233/html/index.html>

## **8. ANEXOS**

## **ANEXO I: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA DEL ELECTROLITO**

**ANEXO II: DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE Y  
CORRIENTE EN LOS MÓDULOS DEL  
ELECTROLIZADOR CON LA SOLUCIÓN  
ELECTROLÍTICA AL 20% DE SOSA CAUSTICA  
(NaOH).**

## **ANEXO III: PLANOS**

## **ANEXO IV: FOTOS**