

108

26



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

DISEÑO TERMODINÁMICO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA CON CAPACIDAD DE 1kW PARA USO EN UN PROTOTIPO PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD UTILIZANDO HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

T E S I S

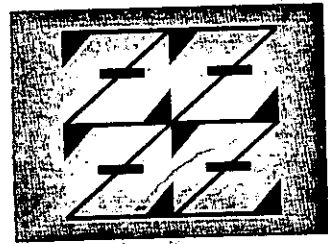
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

JENNIFER ^{Lorena} PÉREZ RAMOS

ASESOR: I.Q. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO



298810

MÉXICO D.F.

NOVIEMBRE 2001.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/517/01

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNA: PEREZ RAMOS JENNIFER LORENA
Presente.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| Presidente: | I.Q. Alejandro Rogel Ramírez |
| Vocal: | I.Q. Rafael Sánchez Dirzo |
| Secretario: | I.Q. Hugo H. Martínez Rojas |
| Suplente: | I.Q. Roberto Ramírez Torres |
| Suplente: | I.Q. Espiridión Muñoz Rivera |

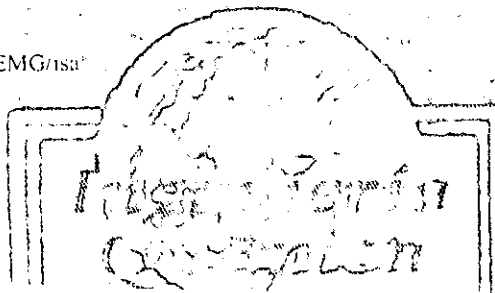
Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., 9 de Julio del 2001.

EL JEFE DE LA CARRERA

I.Q. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ

AEMG/isa





INDICE

| | |
|-------------------------|------|
| RESUMEN | I |
| INDICE | IV |
| INDICE DE FIGURAS | VIII |
| INTRODUCCIÓN | XII |

CAPÍTULO I. SISTEMAS DE POTENCIA QUE UTILIZAN LAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES VÍA HIDRÓGENO

| | |
|---|----|
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Fuentes alternas de Energía | 2 |
| 1.3. Prototipo de 7.7 kW para producir Electricidad utilizando Hidrógeno como Combustible | 7 |
| 1.4. Celdas de Combustible | 11 |
| 1.4.1. Funcionamiento | 11 |
| 1.4.2. Tipos de Celdas de Combustible | 12 |
| 1.5. Ciclos de Potencia Termodinámicos | 18 |
| 1.5.1. Ciclo Rankine | 19 |
| 1.5.2. Ciclos de Potencia Chan K'in | 21 |
| Conclusiones | 24 |

Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 7.7 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando hidrógeno como combustible.

[Handwritten signature and date]
 1980

**CAPITULO II. DISEÑO TERMODINÁMICO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA**

| | | |
|------------|---|----|
| 2.1 | Introducción | 25 |
| 2.2 | Características de Diseño | 27 |
| 2.1 | Panel Solar | 27 |
| 2.2 | Sistema Electrolizador Bipolar | 28 |
| 2.3 | Memoria de Cálculo para la celda Electrolítica | 29 |
| | Conclusiones | 33 |

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA

| | | |
|------------|---|----|
| 3.1 | Electrólisis y Leyes de Faraday | 34 |
| 3.1.1 | Electrólisis | 34 |
| 3.1.2 | Leyes de Faraday | 35 |
| 3.2 | Celdas Electroquímicas | 37 |
| 3.2.1 | Fundamentos | 37 |
| 3.2.2 | Principios electroquímicos para el rompimiento del agua | 38 |
| 3.2.3 | Celdas electrolíticas | 40 |
| 3.3 | Termodinámica de la electrólisis del agua | 43 |
| 3.4 | Técnica de ejecución para la electrólisis del agua | 48 |
| 3.4.1 | Celda de voltaje | 48 |
| 3.4.2 | Componentes de la celda | 50 |

Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 77 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible.



| | |
|---|----|
| 3.4.2.1 Configuración de la celda | 50 |
| 3.4.2.2 Materiales de la celda | 52 |
| 3.4.2.3 Separadores y diafragmas..... | 53 |
| 3.4.2.4 Modificación de electrodos | 55 |
| 3.4.3 Celdas bipolares y monopolares | 57 |
| 3.4.3.1 Descripción general de electrolizadores monopolares y bipolares | 57 |
| 3.4.3.2 Distribución de densidad de corriente en celdas monopolares y bipolares | 59 |
| 3.4.3.3 Desviación electrolítica de corrientes en la pila de las celdas bipolares | 64 |
| 3.4.3.4 Electrolizador monopolar y bipolar bajo condiciones de operación discontinuas | 68 |
| 3.5 Plantas Industriales para la Electrólisis del Agua | 70 |
| 3.5.1 Observaciones generales | 70 |
| 3.5.2 Tanques tipo celdas monopolares | 72 |
| 3.5.3 Celda bipolar con filtro comprimido | 74 |
| 3.5.3.1 Brown Boberi y celdas CIE | 75 |
| 3.5.3.2 Celdas Krebskomo | 78 |
| 3.5.3.3 Celdas Norsk Hydro | 80 |
| 3.5.3.4 Celdas deNora S.P.A. | 83 |
| 3.5.3.5 Celdas LURGI GMBH | 84 |
| 3.6 Condiciones básicas de seguridad | 87 |
| Conclusiones | 88 |
| CONCLUSIONES | 89 |
| BIBLIOGRAFÍA | 92 |
| GLOSARIO | 95 |
| ABREVIATURAS | 97 |



ANEXO 1

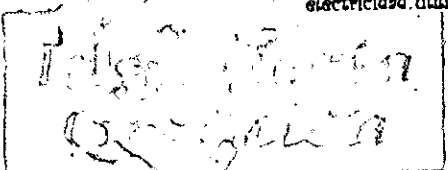
- Diagrama de Flujo para obtener los Flujos Másicos 99
- Algoritmo para obtener los Flujos Másicos 101
- Balance de Masa para la entrada al electrolizador 102

ANEXO 2

- Balance de Masa General del Prototipo 104
- Lista de Equipo 106

ANEXO 3

- Simbología de Instrumentación 107
- Símbolos de líneas e Instalaciones de Instrumentación 108





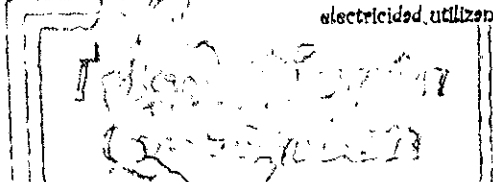
ÍNDICE DE FIGURAS

DIAGRAMAS

| | |
|---|---|
| Diagrama 1. Cadenas de Transformación de las Fuentes Renovables | 2 |
| Diagrama 2. El Ciclo del Hidrógeno Solar | 7 |
| Diagrama 3. Cálculo del área requerida para la Celda Solar | 9 |

CAPÍTULO I

| | |
|---|----|
| 1. Fuentes alternas que son convertidas a electricidad | 3 |
| 2. Esquema de la electrólisis del agua | 4 |
| 3. Forma de almacenamiento del Hidrógeno y Oxígeno | 5 |
| 4. Símbolo para la combustión química del Hidrógeno en medio acuoso | 6 |
| 5. Componentes de una celda de Combustible | 12 |
| 6. Celda de Combustible de Membrána de Intercambio Protónico | 16 |
| 7. Ciclo de Potencia Rankine en el Diagrama T-S..... | 18 |
| 8. Equipos principales del Ciclo de Potencia Rankine | 19 |
| 9. Ciclo de Potencia Chan K'iiin | 21 |
| 10. Diagrama T-S del ciclo de Chan K'iiin | 22 |



CAPÍTULO III.

| | |
|---|----|
| 11. Electrólisis del agua en un electrolito alcalino. | 39 |
| 12. Electrólisis de agua con un electrolito ácido. | 40 |
| 13. Temperatura dependiente de las contribuciones de IR y sobrepotencia corregida del voltaje de la celda | 45 |
| 14. Presión de Vapor Parcial de soluciones acuosas de Hidróxido de Potasio en bar. | 47 |
| 15. Presión de Vapor Parcial Logarítmica de soluciones acuosas de KOH. | 47 |
| 16. Componentes de la Celda de Voltaje en una Celda Electrolítica | 48 |
| 17. Presentación esquemática del voltaje de la celda/densidad de corriente. | 50 |
| 18. Celdas geométricas | 51 |
| 19. Dominio de Corrosión, Protección Catódica y Pasividad Anódica del acero ... | 52 |
| 20. Estructura del Nafión. | 55 |
| 21. Celda Unipolar tipo tanque | 57 |
| 22. Celda Bipolar filtro-presión. | 57 |
| 23. Dirección del Flujo de Corriente en un electrodo con la función monopolar ... | 59 |
| 24. Dirección del flujo de corriente en un Electrodo con la función Bipolar. | 62 |
| 25. Comparación de espesores de electrodos monopolares y bipolares. | 63 |
| 26. Esquema de la pila de una electrólisis bipolar | 66 |

a) desviaciones de corriente a través de la interconexión electrolítica;

b) Análogo eléctrico de la pila de la celda;

Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 7.7 kW. para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible



c) corriente desquebrajadamente derramada.

27. Distribución de la presión hidrodinámica en un electrolizador bipolar. 67

28. Descarga para electrolítico/metálico, cortos circuitos en electrolizadores bipolares. 68

29. 18 000 amperes en la celda monopolar Stuart tipo tanque. 73

30. Ruta de corriente esquemática para electrolizadores monopolares convencionales y avanzados. 74

31. Esquema de la sección transversal de un electrolizador BBC. 75

32. Estructura de la celda básica de un electrolizador BBC. 76

33. Electrolizador BBC con una capacidad de producción de $10 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ 77

34. Electrólisis de agua en la Planta BBC en Asswan. 78

35. Sección transversal esquemática de un Electrolizador de agua Krebskosmo de las series WE. 79

36. Dos Electrolizadores Bipolares de agua Krebskosmo 80

37. Electrolizador Norsk Hydro vista exlotada de una celda electrolizadora. 81

38. Planta Generadora de Hidrógeno Norsk Hydro. 82

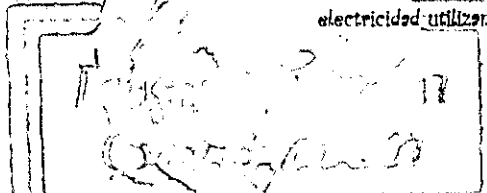
39. Transformador y diagrama rectificador incluyendo una batería de electrolizadores. 82

40. Vista seccional de la celda electrolizadora LURGI. 85

41. Vista seccional y final del Electrolizador LURGI. 86

42. Fotografía del Electrolizador LURGI instalado en la compañía. 86

Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 7.7 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible.



TABLAS

| | |
|---|----|
| 1. Tipo de Celdas de Combustible | 13 |
| 2. Flujos Másicos por Celda | 31 |
| 3. Parámetros típicos de operación para las celdas | 71 |
| 4. Plantas de Hidrógeno por diferentes manufactureras | 72 |



INTRODUCCIÓN

Llegará el momento en el que las fuentes de energía utilizadas actualmente que son las energías no renovables o fósiles se agotarán, por lo que se debe buscar su paulatina sustitución.

Tampoco el uranio es la alternativa toda vez que los residuos (plutonio) de su uso se encuentran entre los más tóxicos y peligrosos que existen.

En el mundo industrializado existe una febril actividad por hacer del sol, el viento, las mareas y las olas las fuentes primarias de energía que alimentarán a un mundo cada vez más ávido de energía, específicamente energía eléctrica.

Este proyecto propone a dichas fuentes alternas vía Hidrógeno para sustituir a las fuentes de energía fósiles en la generación de electricidad. El Hidrógeno como combustible presenta mejores características tanto en eficiencia, costo, seguridad en su uso, como en compatibilidad con el medio ambiente por sólo mencionar algunas de ellas, para la sustitución de dichas fuentes convencionales de energía en su tarea de producir potencia eléctrica.

**ABSTRACT**

Due to the limitless use of the energy sources used at the moment like they are the petroleum, the natural gas, the coal, the biomass and the uranium, being these non renewable energy sources, the moment will arrive in that will be drained, this without mentioning the great damage that burns it of these fuels causes in our planet.

The climatic change will be the main environmental problem of the XXI century that is impelled by the continuous increase of the emissions of gases of effect hothouse.

For him which the concern arises of looking for new alternatives for the substitution of this energy sources. We know of the absolute presence that the petroleum exercises are, but we know that it is the moment to think of its substitution, he/she stops this way to stop to burn it absurdly in form of fuel and to only be input of the industries of petrochemical transformation.

The Hydrogen has the potential to serve so much in means of energy storage and as an energy payee inside the system of renewable energy.

Proposing a generating prototype of electricity via Hydrogen, like a possible solution, with a focus to what will be the heart of this prototype that is, the electrolytic unit, standing out the state of the art of the electrolysis of the water, including a review of the components of the different electrolytic cells, as well as of the industrial plants that are in the market.

This thesis tries to give a wide panorama about the Production of Hydrogen starting from the electrolysis, for the possible inform of the readers waiting is developed every time with a bigger peak, to be able to have a better world.

RESUMEN

Debido al uso desmedido de las fuentes de energía utilizadas actualmente como son el petróleo, el gas natural, el carbón, la biomasa y el uranio, siendo estas fuentes de energía no renovables, llegará el momento en que se agotarán, esto sin mencionar el gran daño que la quema de estos combustibles provoca en nuestro planeta pero también el gran beneficio que se tiene en el funcionamiento de las ciudades y pueblos tecnificados que consumen electricidad, comunicaciones, autos T.V, teléfonos etc.

El cambio climático será el principal problema ambiental del siglo XXI, que está impulsado por el continuo aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, como CO₂, CH₄ y NO_x. Al CO₂ se debe más del 60% del efecto invernadero, este gas se encuentra normalmente en la atmósfera, pero la quema de carbón, petróleo y gas natural entre otros esta liberando el carbono almacenado en esos combustible fósiles a un ritmo sin precedentes en la historia del hombre.

Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 177 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible.



Por lo cuál surge la preocupación de buscar nuevas alternativas para la sustitución de dichas fuentes de energía, de aquí que especialmente los países industrializados se estén enfocando al estudio y desarrollo de nuevas tecnologías basadas en la utilización de energías renovables.

Estamos concientes de las presencia absoluta que el petróleo ejerce, pero sabemos que es el momento de pensar en su reemplazo, para así dejar de quemarlo absurdamente en forma de combustible y pase a ser únicamente insumo de las industrias de transformación petroquímica.

El Hidrógeno tiene el potencial para servir tanto en medios de almacenamiento de energía y como un portador de energía dentro del sistema de energías renovables.

Cuando las fuentes de energías renovables tales como solar o eólicas son usadas para producir potencia eléctrica, la salida puede ser dependiente de las condiciones climáticas.

Pero utilizando las energías renovables para producir Hidrógeno, un combustible el cual puede ser almacenado y transportado, confiable y continuamente es un suministro de energía realmente aprovechable, con un promedio de salida predecible.

Proponiendo como objetivo general un prototipo generador de electricidad vía Hidrógeno al cual integra modularmente los adelantos en la captación de las fuentes de energía renovables y las tecnologías para el almacenamiento, distribución y uso del Hidrógeno, como una posible solución, apoyándose en los ciclos termodinámicos y en las celdas de combustible como demostración de la efectividad de esta propuesta.

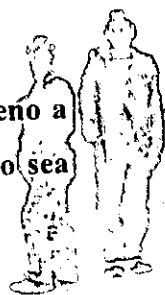
Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 17.7 kW. para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrogeno como combustible.



Con un enfoque a lo que será el corazón de este prototipo que es, la unidad electrolítica, haciendo un diseño termodinámico de esta celda, incluyendo los balances necesarios, así como utilizando las herramientas necesarias para su elaboración tales como la generación del Diagrama de Flujo del Proceso (DFP) para la producción de Hidrógeno, donde se acoplará la Unidad electrolítica, y la generación de un esbozo del Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI), para conocer la instrumentación necesaria de este proceso.

Resaltando el estado del arte de la electrólisis del agua, resumiendo las leyes y conceptos básicos en los que se basa, así como la termodinámica que envuelve la reacción electroquímica. Incluyendo una reseña de los componentes de las diferentes celdas electrolíticas, así como de las plantas industriales que se encuentran en el mercado.

Esta tesis trata de dar un amplio panorama acerca de la Producción de Hidrógeno a partir de la electrólisis, para la posible concientización de los lectores esperando sea desarrollada cada vez con un mayor auge, para lograr tener un mundo mejor.



Capítulo

El

Este capítulo nos muestra las diferentes opciones para la producción de energía eléctrica y la utilización de los combustibles fósiles como alternativa para la generación de energía eléctrica.

Hicimos un viaje al principio en la utilización de los combustibles fósiles como posible sustituto de la energía eléctrica.

La producción de electricidad y demostramos que mediante el uso de los combustibles fósiles se puede generar energía eléctrica.

En este capítulo se muestra la efectividad de la tecnología de hidrógeno para la generación de energía eléctrica.

Se muestra un ejemplo de un sistema de energía eléctrica que utiliza hidrógeno como combustible.

Este sistema de energía eléctrica es un ejemplo de un sistema de energía eléctrica que utiliza hidrógeno como combustible.

Este sistema de energía eléctrica es un ejemplo de un sistema de energía eléctrica que utiliza hidrógeno como combustible.

Este sistema de energía eléctrica es un ejemplo de un sistema de energía eléctrica que utiliza hidrógeno como combustible.

**Tecnología de Hidrógeno,
Para el Siglo XXI**



I.- SISTEMAS DE POTENCIA QUE UTILIZAN LAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES VÍA HIDRÓGENO

1.1 INTRODUCCIÓN

Debido al uso desmedido de las fuentes de energía utilizadas actualmente como son el petróleo, el gas natural, el carbón, la biomasa y el uranio, siendo estas fuentes de energía no renovables, llegará el momento en que se agotarán, esto sin mencionar el gran daño que provoca la quema de estos combustibles en nuestro planeta, y por lo tanto en todo su ecosistema al generar compuestos tales como CO, CO₂, NO_x, SO_x, plutonio entre otros contaminantes que rápidamente han ido acabando con nuestra biosfera.

Teniendo en cuenta que hasta el momento no contamos con otro mundo en donde vivir, surge la preocupación de buscar nuevas alternativas para la sustitución de dichas fuentes de energía, por otras que además de satisfacer las necesidades que nuestra sociedad demanda no dañen nuestro ecosistema.

De aquí que especialmente los países industrializados como Estados Unidos, Japón y Alemania, se estén enfocando al estudio y desarrollo de nuevas tecnologías basadas en la utilización de las energías renovables como lo son: el sol, el viento, las mareas y las olas, para una paulatina sustitución de las fuentes de energía primarias que son actualmente las energías no renovables.

Estamos concientes de la presencia absoluta que sobre nuestra economía y nuestro ánimo ejerce el petróleo, pero sabemos que es el momento de pensar en su reemplazo, para así dejar de quemarlo absurdamente en forma de combustible y que sea únicamente insumo de las industrias de transformación petroquímica.



1.2 FUENTES ALTERNAS DE ENERGÍA.

Las fuentes alternas tienen gran diversidad en su aplicación, pero una es la que nos interesa resaltar que es, su conversión a electricidad por medio de semiconductores para la energía solar, de aerogeneradores para la energía eólica, de turbogeneradores para la energía hidráulica y de dinamos-bicicleta para la energía humana.

Esto se muestra en la Cadena de transformaciones de las fuentes renovables Diagrama 1 y Fig. 1 que describe tales procesos de captación y conversión a electricidad por parte de las fuentes alternas.

DIAGRAMA 1

CADENAS DE TRANSFORMACIÓN PROPUESTO PARA LAS FUENTES RENOVABLES

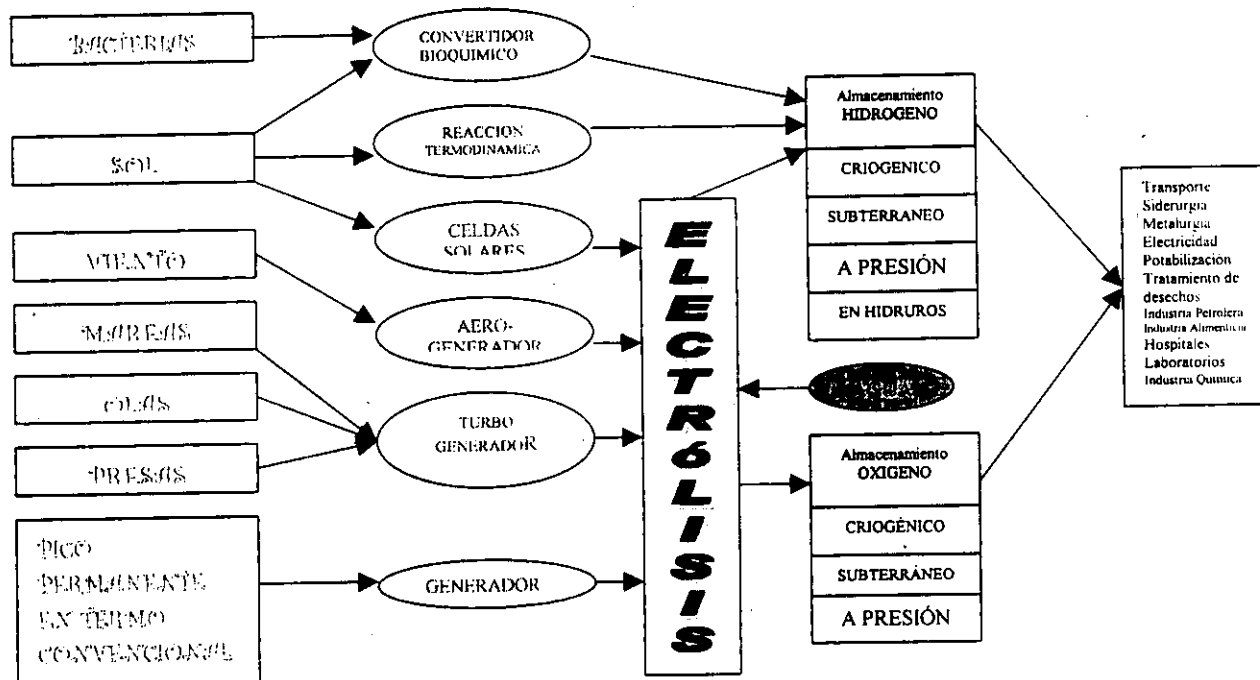
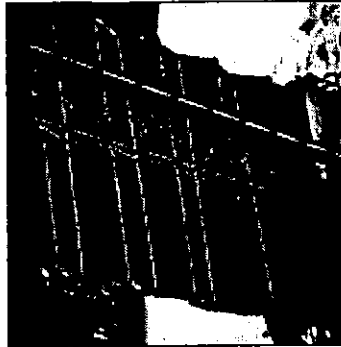


Diagrama 1. Cadena de transformación de las Fuentes Renovables

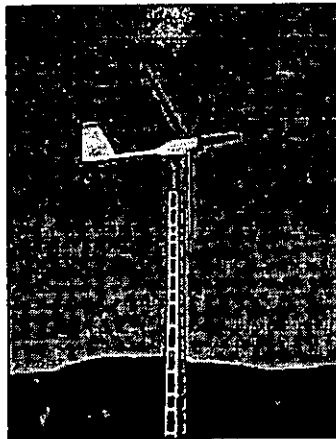
Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 177 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible



a)



b)



c)

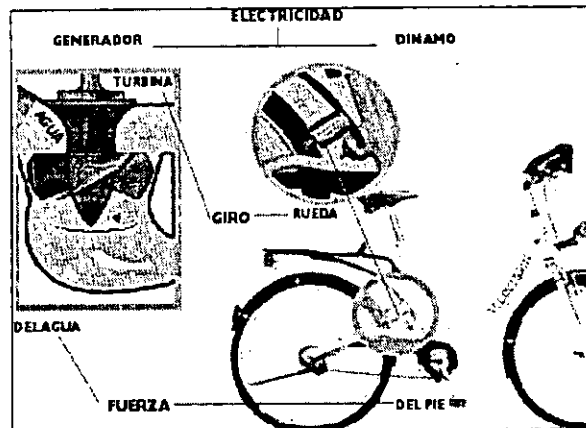


Fig. 1 Fuentes alternas que son convertidas a electricidad.
 a. Celda Solar
 b. Aerogenerador
 c. Dinamo-bicicleta



Existen en general dos inconvenientes de la electricidad generada directamente por las fuentes de energías renovables:

1. Su potencia es irregular, lo que significa que su energía en la unidad de tiempo y área no se ajusta a los requerimientos energéticos de los procesos industriales y tampoco a nuestras necesidades domésticas, por lo cual, se dice que son energías difusas.
2. Son intermitentes, lo que significa que no siempre se encuentran a nuestra disposición en el momento que se requieren.

Para superar estos inconvenientes se han desarrollado diferentes técnicas para almacenar la energía proveniente de las fuentes alternas. Una de ellas es la que nos interesa resaltar siendo conocida desde el siglo XIX: *La electrólisis del agua*.

Romper la molécula del agua requiere teóricamente 1.23 V. Este relativo bajo voltaje es el que permite que la difusa energía de las fuentes renovables pueda ser almacenada en forma de Hidrógeno.

La electrólisis del agua se simboliza en la Fig.2.

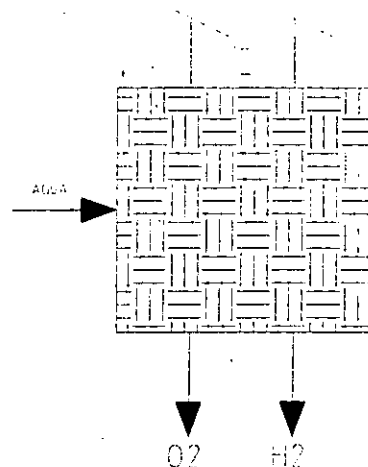


Fig. 2 Esquema de la electrólisis del agua



La técnica para almacenar y distribuir los gases Hidrógeno y Oxígeno está tan desarrollada que forma parte de la actividad cotidiana de empresas conocidas como PEMEX, AGA e INFRA. El almacenamiento tanto del Oxígeno como del Hidrógeno se simboliza en la Fig.3.

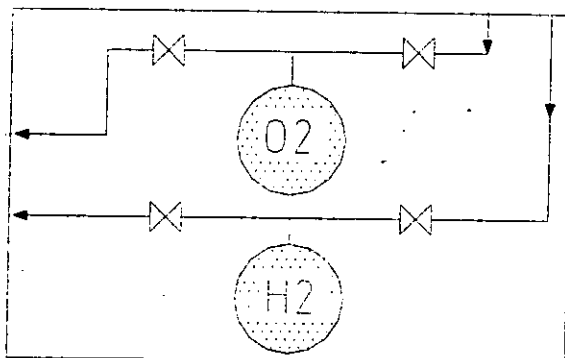


Fig. 3 Forma de almacenamiento del Hidrógeno y Oxígeno

En la actualidad conocemos cuatro formas de quemar el Hidrógeno:

1. Uniendo sus núcleos dentro de un reactor llamado Tokamak durante el proceso conocido como fusión nuclear a temperaturas muy elevadas.
2. Combinándolo químicamente con el Oxígeno del aire a través de quemadores convencionales con una amplia y asombrosa aplicación doméstica.
3. Combinándolo químicamente con el Oxígeno en medio acuoso dentro de una caldera no convencional para producir vapor motriz.
4. Combinándolo electroquímicamente con el Oxígeno sin generar flama para producir directamente electricidad dentro de un reactor llamado Celda de Combustible.

Es éste último proceso el que nos interesa resaltar toda vez que es el que mayores posibilidades tiene de producir un impacto industrial a corto plazo.



El símbolo que manejaremos para la combustión química del Hidrógeno en medio acuoso será el que se muestra en la Fig.4.

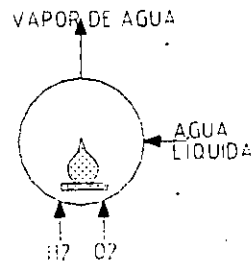


Fig. 4 Símbolo para la combustión química del Hidrógeno en medio acuoso.

Es necesario diseñar y construir, tanto a nivel laboratorio como a escala piloto, sistemas de potencia con base al Hidrógeno que operen continuamente y simulen lo que sucedería a escala industrial.



1.3 PROTOTIPO DE 7.7 kW PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD UTILIZANDO HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

Todo sistema energético alternativo que pretenda sustituir a los hidrocarburos y al uranio como combustibles, deberá conceptualmente clarificar todas las etapas de conversión energética involucradas.

De aquí surge la idea de diseñar una pequeña unidad autónoma que pueda ser instalada en una casa para satisfacer los requerimientos de electricidad de una familia para todo el año. Así cada familia, cada colonia o cada comunidad podría tener una unidad para abastecer sus propias necesidades de energía. Diagrama 2.

**DIAGRAMA 2
EL CICLO DE HIDRÓGENO SOLAR**

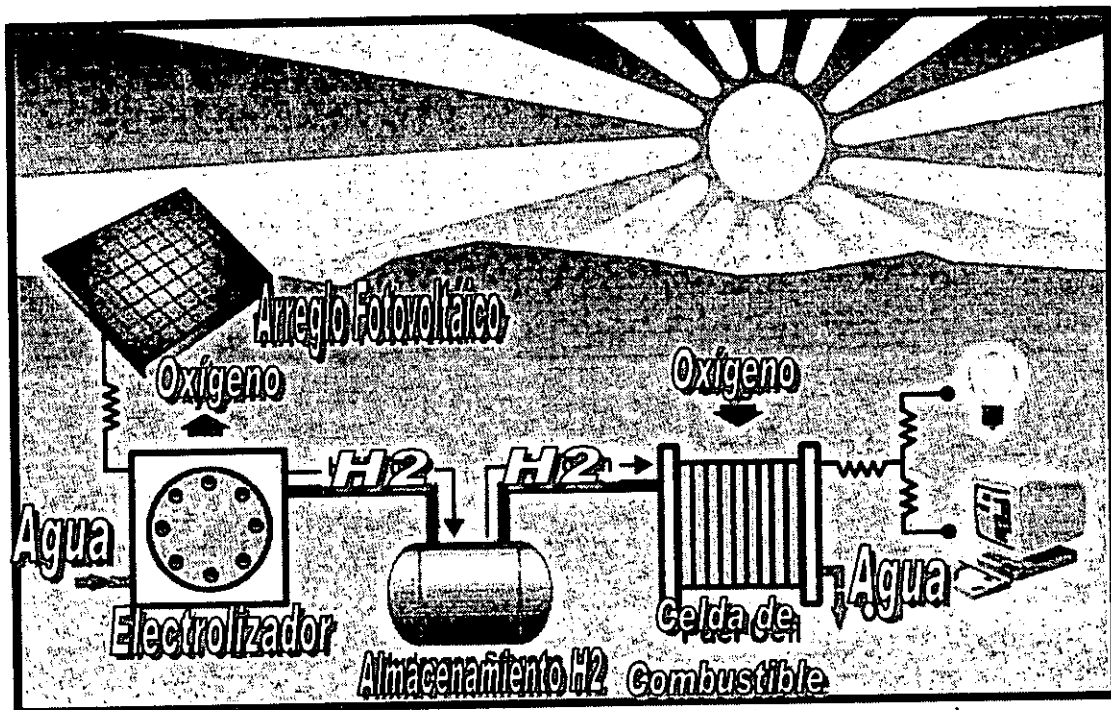


Diagrama 2 Diagrama de bloques del Ciclo de Hidrógeno que consta de:
a) Arreglo fotovoltaico, b) Electrolizador,
c) Almacenamiento de Hidrógeno, d) Celda de Combustible, e) Usos



La energía eléctrica que sale del arreglo fotovoltaico es usado para la electrólisis del agua. El Hidrógeno producido es almacenado en un pequeño tanque a presión en forma de gas y utilizado en una celda de combustible para transformarlo en electricidad de acuerdo a los requerimientos de energía de los usuarios.

El tamaño del arreglo solar fue calculado utilizando datos para la radiación total sobre una superficie horizontal en el área de México D.F. Los requerimientos anuales promedio de energía eléctrica de una familia se calcularon en 7 000 kWh. El área del arreglo solar para captar solamente dicha energía se calcula de la siguiente manera:

$$R * A * e = E \quad (1)$$

donde:

R = Radiación solar total.

A = Área de arreglo de la celda solar.

e = Eficiencia total del sistema.

E = Requerimiento anual de energía.

Utilizando los valores presentados en el diagrama 3, para los valores individuales, la eficiencia total e fue calculada con:

$$e = (0.15)(0.9625)(0.88)(0.95)(0.51)(0.91) = 0.05602 \quad (2)$$

$$R = 8\,760 \text{ kWhm}^{-2}\text{año}^{-1}.$$

$$E = 7\,000 \text{ kWhaño}^{-1}.$$

Por lo tanto:

$$A = \frac{E}{R * e} \quad (3)$$

$$A = \frac{7000 \text{ kWh/año}}{8760 \text{ kWh/año} * \text{m}^2 (0.05602)} = 14.27 \text{ m}^2 \quad (3a)$$



DIAGRAMA 3

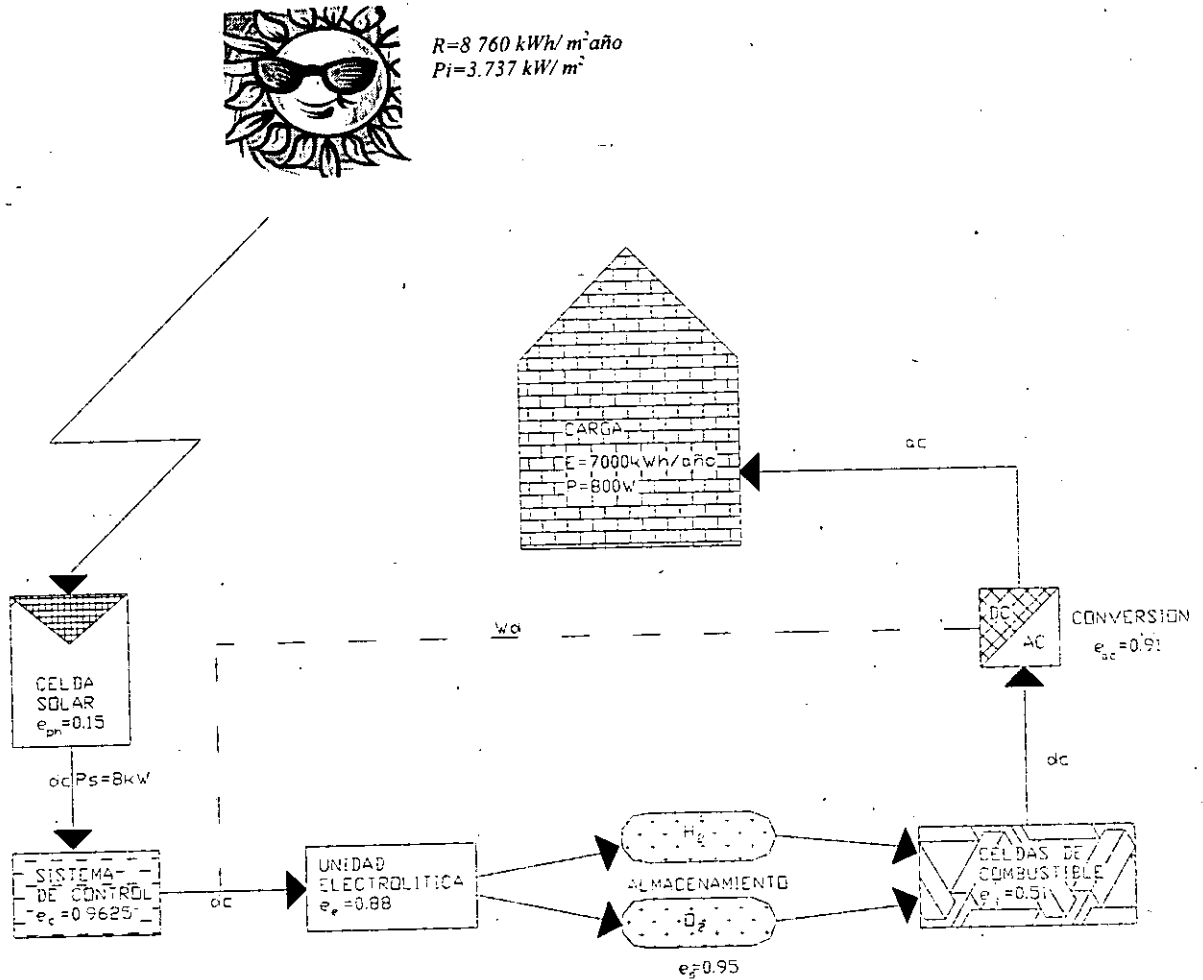


Diagrama 3 Cálculo del área requerida para la celda solar.
 R = Radiación solar total en México promedio
 P_i = Constante de Radiación solar máxima en México D.F.
 e = Eficiencia
 W_d = Energía utilizada directamente



La máxima potencia de salida de la celda fotovoltaica será calculada a partir del máximo valor de radiación solar, el cual en el área de México D.F. es $p_i = 3.737 \text{ kW/m}^2$.

$$P_s = p_i * A * e_{ph} \quad (4)$$

$$P_s = 3.737 \text{ kW/m}^2 (14.27 \text{ m}^2) (0.15) = 8.0 \text{ kW} \quad (4 \text{ a})$$

Por lo tanto la máxima energía en la entrada a la unidad electrolítica será:

$$P_e = P_s * e_c \quad (5)$$

$$P_e = 8 \text{ kW} * 0.9625 = 7.7 \text{ kW} \quad (5 \text{ a})$$

Todos los cálculos anteriores se hicieron utilizando la radiación total máxima en México D.F., pero al momento de calcularse la carga se utilizó la radiación solar total promedio.

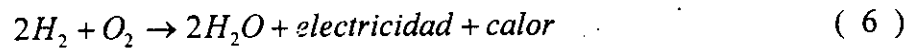
El prototipo propuesto utiliza una celda de combustible como lo muestra el Diagrama 2, ésta podría ser reemplazada por los ciclos de potencia. A continuación se da una breve reseña tanto de las celdas de combustible como de los ciclos de potencia, los cuales a elección se pueden utilizar en el prototipo propuesto a gran escala.



1.4 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible es una generadora de electricidad que utiliza procesos electroquímicos, en este caso para producir energía de Hidrógeno y Oxígeno; donde el Hidrógeno es el elemento combustible, y el Oxígeno puede obtenerse mediante almacenamiento ó simplemente del aire. La celda de combustible produce corriente directa como una batería, por lo cual su eficiencia puede ser muy elevada pero al contrario de una batería, nunca se descarga; la celda sigue produciendo energía mientras se disponga de combustible.

La celda de combustible que utiliza Hidrógeno opera de la forma inversa al proceso conocido como electrólisis del agua, en donde el agua es desdoblada en Hidrógeno y Oxígeno. Este proceso consiste en tomar el Hidrógeno y combinarlo con el Oxígeno para así obtener agua, calor y luz.



1.4.1 Funcionamiento

La celda de combustible consiste básicamente en la oxidación del Hidrógeno en agua, generando energía eléctrica y calor directamente, sin pasar por generadores u otros artefactos.

Toda celda de combustible esta compuesta de un ánodo, un cátodo y electrolitos para tal efecto Fig.5. Sin embargo, siendo la oxidación del Hidrógeno igual para todos los tipos de celdas de combustible, los materiales usados para estas es muy variado.

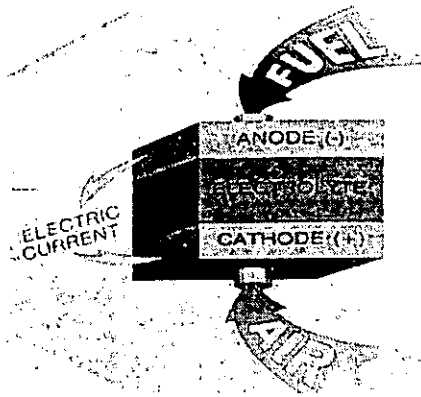


Fig. 5 Componentes de una celda de combustible

La reacción producida es similar a la mencionada en la sección anterior, con la diferencia que en lugar de producir luz se produce electricidad.

Esto se logra alimentando el Hidrógeno en el ánodo de la celda y el Oxígeno en el cátodo, los cuales están separados por un electrolito.

La reacción se produce en la celda misma, la producción de agua toma lugar en distintas partes de la celda, dependiendo del electrolito utilizado. El Hidrógeno fluye hacia el ánodo de la celda, una cubierta de platino ayuda a quitarle los electrones a los átomos de Hidrógeno, dejándolo ionizado (*protones*). La membrana electrolítica permite el paso sólo de los protones hacia el cátodo. Debido a que los electrones no pueden pasar a través de la membrana, se ven forzados a salir del ánodo por un circuito externo como forma de corriente eléctrica, y es esta corriente eléctrica la que es utilizada. Luego, a medida que pasa el Oxígeno por el cátodo, este permite que los protones y electrones del Oxígeno se combinen formando agua.

Las celdas de combustible puede ser conectadas entre sí, de manera similar a lo que se hace con las baterías comunes, con el fin de obtener condiciones de voltaje o corriente deseados.

1.4.2 Tipos de Celdas de Combustible

Los diferentes tipos de celdas de combustible se muestran en la tabla 1.



TABLA 1
TIPO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

| TIPO | TEMPERATURA DE OPERACIÓN | OBSERVACIONES |
|------------------------------------|--------------------------|---|
| Ácido fosfórico (PAFCs) | ~ 220 °C | Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. Las Celdas de Combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia – y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración – comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras. Existen en producción comercial unidades de alrededor de 200kW. |
| Polímero Sólido (PEM) | 50 - 100 °C | (ó Membrana de Intercambio Protónico). Tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, "son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas como el reemplazamiento de baterías recargables en video cámaras". |

Análisis Termodinámico de una celda electroquímica con capacidad de 77 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrogeno como combustible

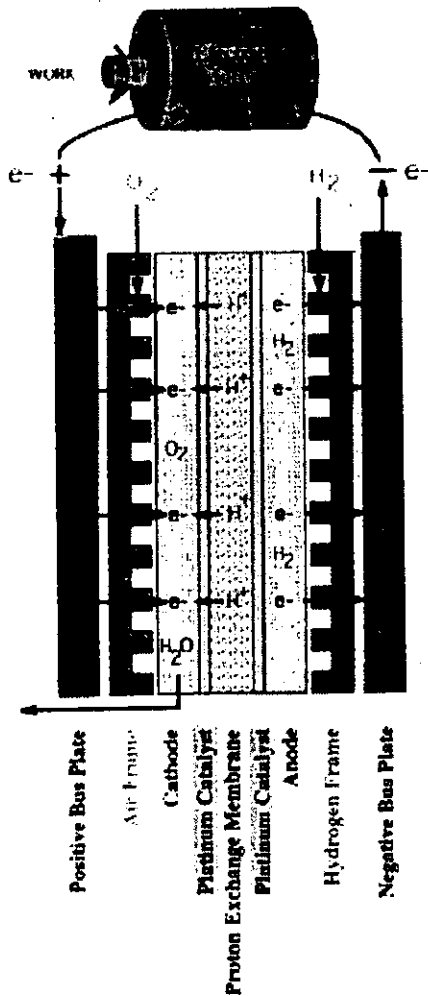


| | | |
|----------------------------------|---------------|--|
| Carbonato Fundido (MCFCs) | ~ 600 °C | Las Celdas de Combustible de Carbonato Fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California en 1996. En este tipo de celdas es aprovechada la electricidad y el calor generado. |
| Óxido Sólido (SOFCs) | 500 - 1000 °C | Otra Celda de Combustible altamente prometedora, la Celda de Combustible de Óxido Sólido, podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de estas en vehículos motores. Una prueba de 100kW está siendo terminada en Europa mientras que dos pequeñas unidades de 25kW se encuentran ya en línea en Japón. Un sistema de Óxido Sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación sea muy elevada. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%. Un tipo de Celda de Combustible de Óxido Sólido utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido semejando la parte superior de una lata de sopa. |

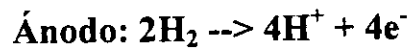


| | | |
|------------------|-------------|---|
| Alcalinas | 50 - 250 °C | Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación. |
| Otros | | Otros tipos de celdas de combustible están siendo desarrolladas para diversas aplicaciones, utilizando otros materiales y otros combustibles. |

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico son más apropiadas para la generación de energía a pequeña escala como se muestra en la Fig.6.



1. Al ánodo las moléculas de Hidrógeno pierden sus electrones y forman iones de Hidrógeno, un proceso que se hace posible por medio de *catalizadores* de platino.
2. Los electrones se traspan al *cátodo* a través de un circuito externo que produce electricidad al pasar por un motor (u otro mecanismo eléctrico).
3. Los iones de Hidrógeno pasan al *cátodo* por la membrana de intercambio protónico, donde se unen con las moléculas de Oxígeno y electrones para producir agua.
4. De esta manera, se utiliza el proceso natural de producción de agua por medio de la oxigenación de Hidrógeno, para producir electricidad y trabajo útil.
5. No se produce ninguna contaminación y los únicos desechos son agua y calor.
6. El proceso químico es:



Reacción Completa:

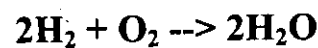


Fig 6 Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico



Una celda de combustible es silenciosa, eficiente y limpia. Las celdas de combustible normalmente funcionan con gas de Hidrógeno puro, el cual se puede producir sin contaminación utilizando la energía solar, tanto como otras fuentes renovables de energía.

Las celdas de combustible que utilizan Hidrógeno no producen ninguna forma de contaminación, y el único producto secundario es agua pura que puede ser reciclada. Las celdas de combustible son eficientes en un 50% aproximadamente, en comparación con los motores de combustión interna, que logran apenas 12% a 15% de eficiencia. Además, en vista de que las celdas de combustible no tienen componentes móviles, pueden ser muy confiables y casi completamente silenciosas.



1.5 CICLOS DE POTENCIA TERMODINÁMICOS

La energía mundial proviene en su mayor parte de gigantescas centrales conocidas como termoeléctricas y nucleoeeléctricas; esto es, plantas que transforman el calor de combustión de los hidrocarburos y la fisión del uranio en electricidad conforme lo establece la teoría termodinámica a través del llamado ciclo de potencia Rankine, el cual se ilustra en la Fig.7 a continuación.

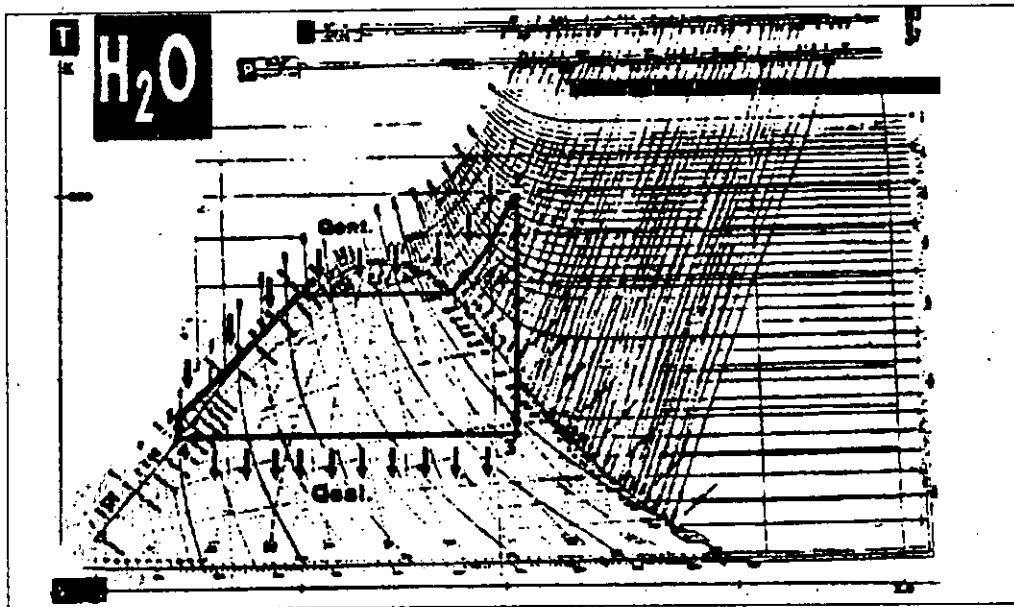


Fig. 7 Ciclo de Potencia Rankine en el Diagrama T-S.



1.5.1 Ciclo Rankine

El ciclo Rankine es el ciclo termodinámico que permite que el agua líquida en el estado (1) absorba el calor de combustión Q_{ent} de los hidrocarburos quemados dentro de una caldera vaporizándose hasta el estado (2). El agua en estado vapor se inyecta a una turbina acoplada a un generador donde al expandirse, moviendo sus alabes cuyos rehetes de acero, hace posible la producción de electricidad.

El vapor extenuado por el trabajo realizado alcanza el estado (3) donde lo recibe un condensador que lo licua extrayéndole el calor Q_{sal} hasta el estado (4). El agua otra vez en fase líquida se bombea de nueva cuenta a la caldera iniciándose así otro ciclo termodinámico más.

El esquema con los equipos principales del ciclo Rankine se muestra en la Fig.8.

CICLO DE POTENCIA RANKINE

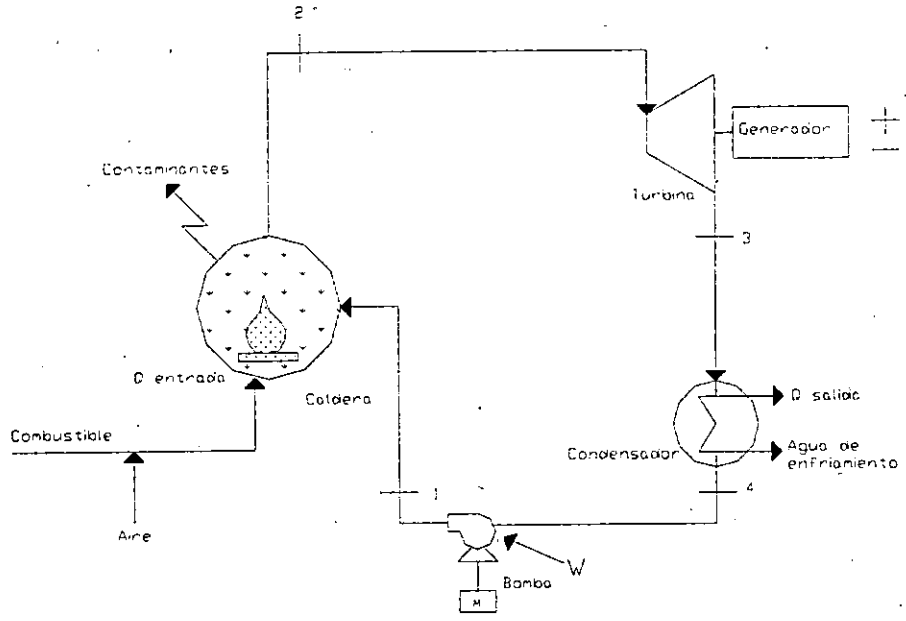


Fig. 8 Equipos principales del ciclo de Potencia Rankine.



El ciclo Rankine no es el único que la termodinámica nos proporciona para llevar a cabo la conversión de calor en trabajo aunque es el más importante en la producción de electricidad en el mundo.

La termodinámica, descrita en la simplicidad y elegancia de los ciclos de potencia, ha sido siempre causa de admiración que se transforma en estupor cuando uno se encuentra dentro de las gigantescas centrales de energía construidas con base en aquellas curvas geométricas donde las verdaderas termodinámicas son descritas.

Sin embargo, desde que se inició la construcción y operación de esas moles productoras de electricidad, las mismas han sido causantes de un importante número de males que nuestra civilización ha considerado desde entonces como “males necesarios”. Uno de ellos es sin duda la contaminación y el consecuente deterioro de la región donde las centrales son asentadas.

Los costos del impacto ambiental todavía hoy no son cabalmente asumidas por comunidades que aún reaccionan negativamente a los programas de racionamiento y ahorro energético.

A continuación se propone como se podría concebir y diseñar termodinámicamente un sistema de potencia que utilice Hidrógeno como combustible.

Esto sería posible innovando el ciclo Rankine, siendo fácil su extensión a los ciclos combinados cuyo desarrollo actual, basado en el gas natural como combustible, se extienda por todo el mundo, haciendo que el costo del kWh generado sea menor.

Al Ciclo de Potencia propuesto se le llamó “Chan K’iin” que significa “pequeño sol”.



1.5.2 Ciclos de Potencia Chan K'iin.

Estas cuatro áreas de desarrollo tecnológico de las fuentes renovables descritas anteriormente, por si solas, son de extraordinaria importancia. Las mismas son integradas y acopladas al Ciclo de Potencia Rankine en una propuesta que lo innova y a la que llamaremos Ciclos de Potencia Chan K'iin. Como se muestra en la Fig.9.

CICLO DE POTENCIA CHAN K'IIN

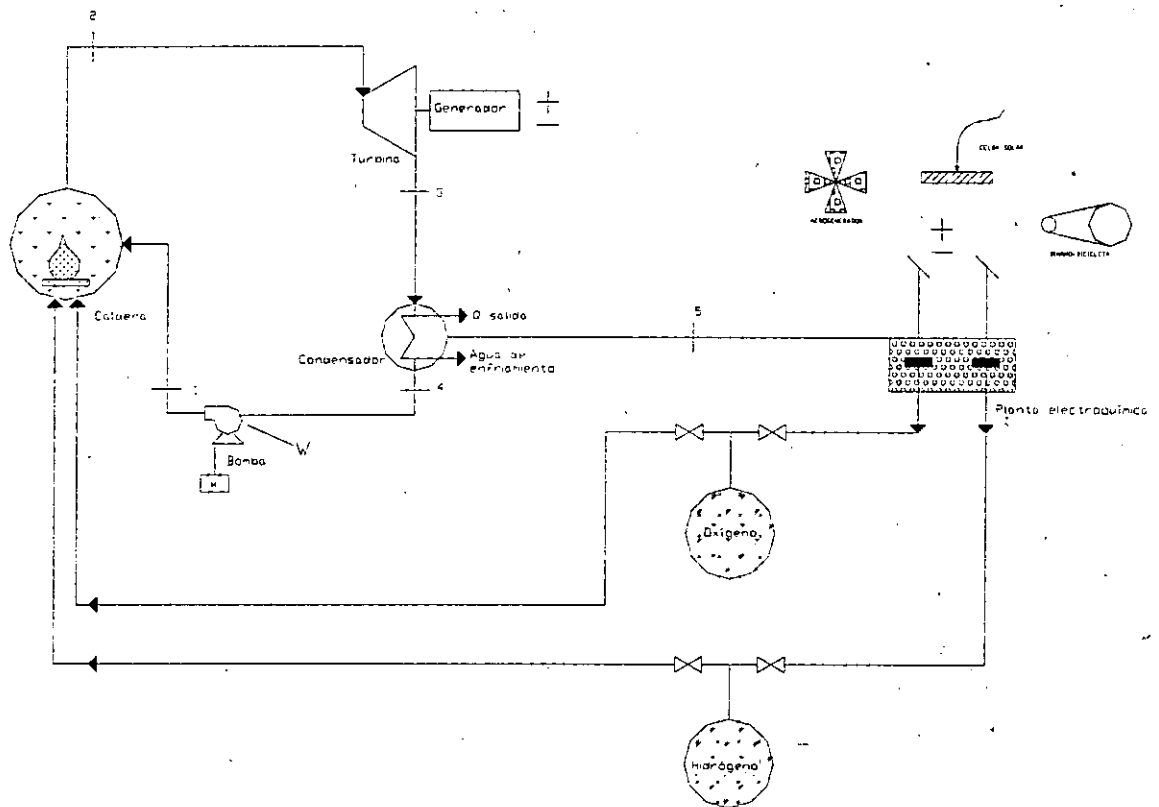


Fig. 9 Equipos principales del ciclo de potencia Chan K'iin



Sobre un diagrama T-S, la Fig.9 se esquematiza en la Fig.10.

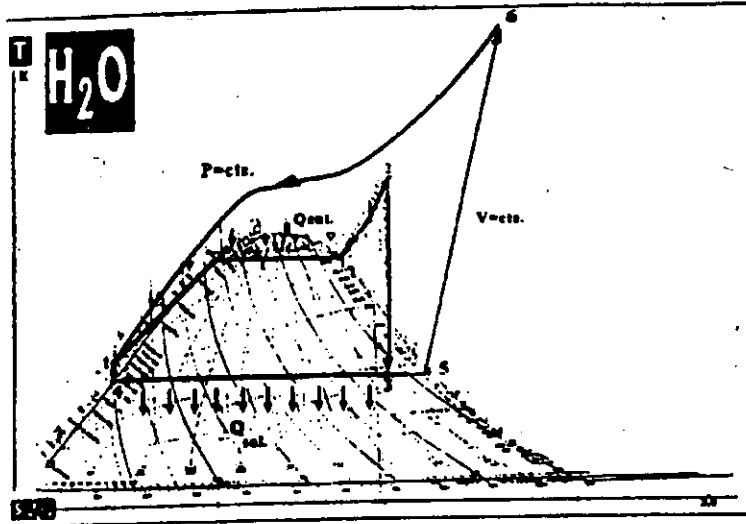


Fig. 10 Diagrama T-S del ciclo de potencia Chan K'in

Chan K'in consta de dos Ciclos acoplados y cerrados:

1. El Ciclo de Potencia Clásico 1-2-3-4-1.
2. El Ciclo de Combustible 1-2-3-5-6-1.

Las singulares propiedades de la combustión química del Hidrógeno permiten modelar los procesos de electrólisis y combustión a través de la trayectoria isocórica 5-6, describiendo también la aceptable constancia volumétrica de la flama de Hidrógeno que es, agua gaseosa a mas de 2000°C.

El proceso 6-1 describe el mezclado isobárico y la transferencia de calor del agua gaseosa al agua líquida para producir el vapor motriz durante el proceso 1-2.

El ciclo cerrado del combustible permite disminuir el calor requerido para generar 1 kWh de Potencia eléctrica aumentando por consiguiente la eficiencia del Ciclo, sin enviar humos y polvos al medio, reciclando continuamente el mismo combustible.



Lo anterior desde el punto de vista de la construcción de la base energética de cualquier modelo de auténtico desarrollo sustentable, es definitivo.

Nosotros no somos consumidores iniciales de la energía de una fuente lo que significa que no la podemos utilizar directamente, sino que debe sufrir una serie de procesos de transformación los cuales constan de etapas con eficiencias específicas para cada una que nos llevan a obtener energías de uso aprovechable, de las cuales las más comunes por ejemplo en el hogar son: la electricidad y el gas LP.

Pero debido a que cada bloque de transformación tiene una eficiencia específica y para poder obtener la energía de una forma aprovechable no podemos omitir ninguna de estas etapas, lo cual provoca que no se pueda aprovechar toda la energía existente, sino por lo contrario, la eficiencia de aprovechamiento sea demasiada baja.

Por ejemplo al prender un foco, debido a los sistemas de potencia o procesos de transformación, obtenemos una eficiencia total aproximada del 4%. en un automóvil de combustión interna la eficiencia es del 18% y así sucesivamente podríamos seguir enumerando las eficiencias de los sistemas de potencia existentes, pero este no es el propósito.

Lo que nos interesa es resaltar las diferentes fuentes de energía actualmente utilizadas, para poder así mostrar los beneficios y desventajas que existen al suplantar las fuentes de energía fósiles o no renovables por las fuentes de energías renovables.

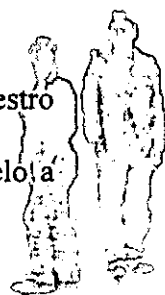


CONCLUSIONES

Es tiempo de empezar a conscientizarnos acerca del gran problema que nos envuelve, no sólo como entidad, como nación, ó como continente, sino como seres humanos que viven en un solo planeta.

Para así juntos buscar una solución a todo el daño que le estamos haciendo a nuestro hábitat. De aquí, la preocupación por buscar nuevas tecnologías, que puedan suplantar a las existentes provocando el menor daño posible.

Por lo cual el prototipo propuesto, es sólo una de tantas posibilidades de mejorar nuestro mundo, sin tener que sacrificar, el confort al que estamos acostumbrados, y ofrecérselo a quienes aún carecen del mismo.





II. DISEÑO TERMODINÁMICO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.

2.1 INTRODUCCIÓN

Una fase clave de los sistemas energéticos expuestos en el capítulo I lo es la celda electrolítica. Existen dos tipos de unidades electrolíticas: *La bipolar y la unipolar*, como se mencionará en el capítulo III, ambas se encuentran bien establecidas como sistemas comerciales que fácilmente pueden adaptarse a esta aplicación, en la que existen ventajas económicas o tecnológicas no apreciables entre ambas.

El Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) anexo, muestra parte de la representación esquemática de los controles y flujo de materia del sistema de energía propuesto donde la celda electrolítica opera. Los dos circuitos separados son usados para poner en circulación las soluciones *aniónicas y catiónicas*. Los gases son separados de la solución electrolítica KOH en los separadores FA-1001 y FA-1002, enfriados en los enfriadores EA-1001 y EA-1002, y después son pasados a través de los eliminadores de neblina FA-1003 y FA-1004 y de los secadores DA-1001-1004 son transportados a las unidades de almacenamiento FB-1002 y FB-1003.

La solución electrolítica es puesta en circulación por las bombas GA-1002 y GA-1003 de las cuales su eficiencia es controlada por el regulador de temperatura del electrolizador. El suministro de agua desionizada es regulada por un control de nivel en el separador FA-1003. La presión de la unidad (7.9 bar) es controlada por un regulador de contrapresión en la línea del Oxígeno mediante una válvula que se encuentra entre el separador de neblina FA-1004 y los secadores DA-1003 y DA-1004. La presión de la línea del Hidrógeno es controlada con el Transductor Diferencial de Presión PD y la válvula reguladora localizada entre el separador de neblina FA-1003 y los secadores DA-1001 y DA-1002.



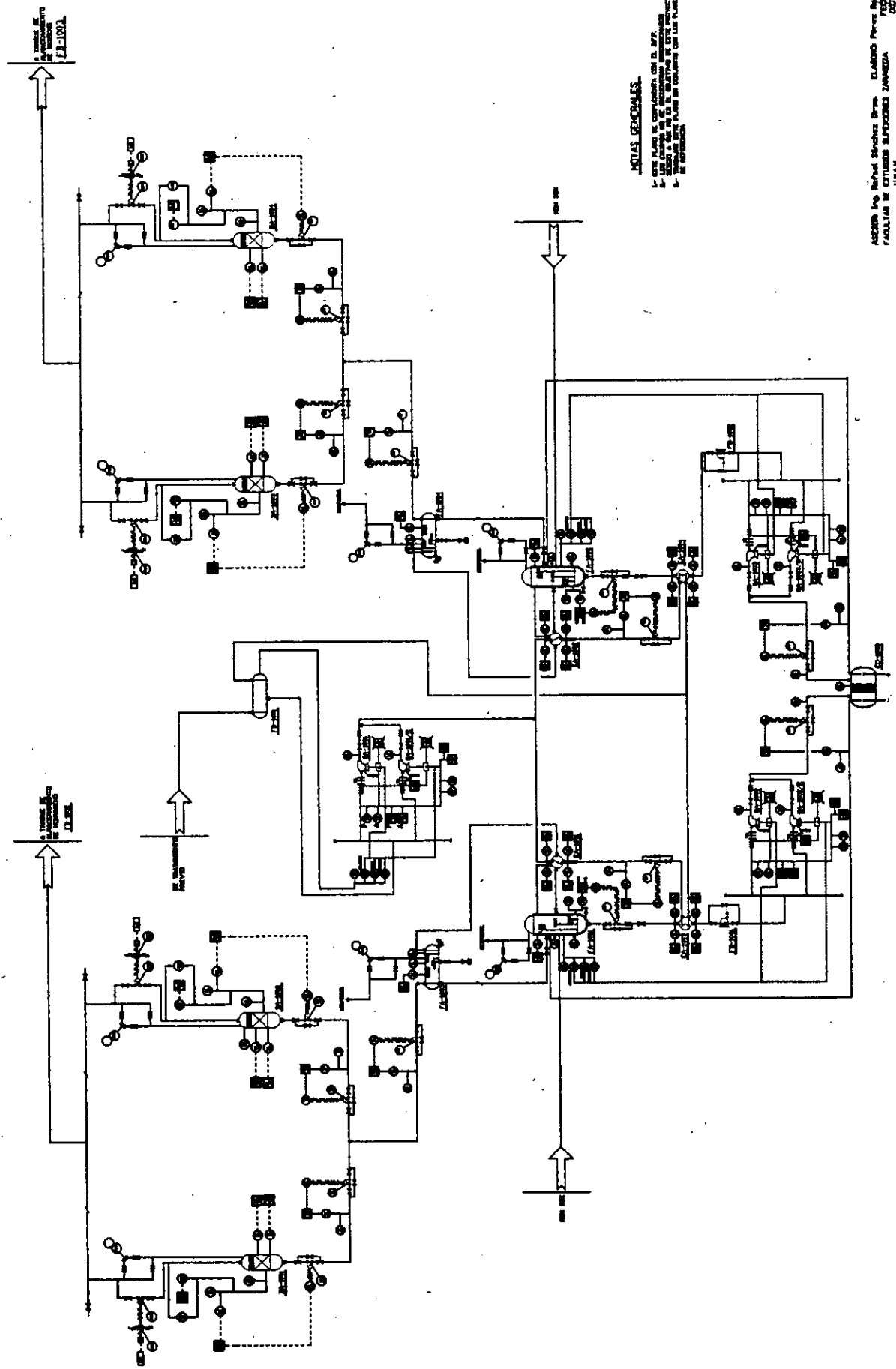
La temperatura es controlada independientemente en cada circuito. El calor es proporcionado por una bobina de calentamiento eléctrico en los separadores FA-1001 y FA-1002 debido a que su temperatura es menor a 95°C.

Cuando la temperatura excede los 105°C la solución electrolítica es enfriada pasando a través de los enfriadores EA-1003 y EA-1004, después se regresa al electrolizador.

La operación es arrancada o parada por la Unidad principal de regulación de acuerdo al rendimiento del panel solar como se discutirá después. Cuando la unidad es parada, las bombas GA-1002 y GA-1003 continúan operando por algún tiempo para asegurar el conveniente enfriamiento y separación del gas. La circulación para cuando las soluciones alcanzan una temperatura de 50°C mientras que la presión permanece baja.

Para desviaciones anormales de la operación de diseño en las condiciones de presión, temperatura, razón de flujo y nivel, la seguridad del sistema es disparada, los gases son venteados y el Hidrógeno es introducido dentro de la unidad.

1- Este plano de controlador con el B.P.F. 2- Este plano de controlador con el B.P.F. 3- Este plano de controlador con el B.P.F. 4- Este plano de controlador con el B.P.F. 5- Este plano de controlador con el B.P.F.



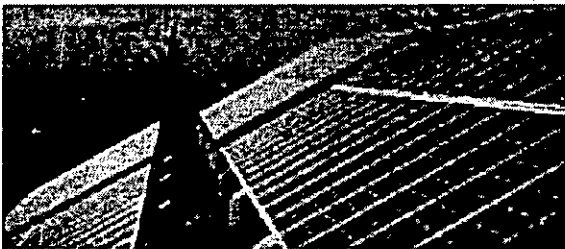
NOTAS GENERALES.

- 1- Este plano de controlador con el B.P.F.
- 2- Este plano de controlador con el B.P.F.
- 3- Este plano de controlador con el B.P.F.
- 4- Este plano de controlador con el B.P.F.
- 5- Este plano de controlador con el B.P.F.



2.2 Características de Diseño.

2.2.1 Panel Solar.

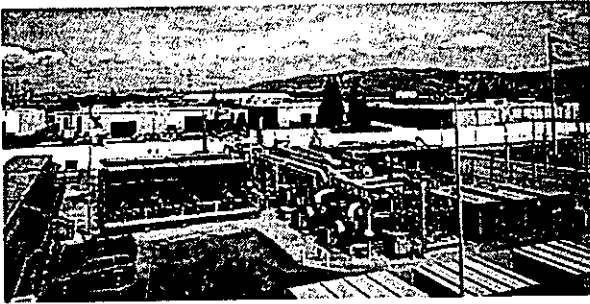


Las características de SOLAREX núm. 4200 son seleccionadas.

| | |
|---|--|
| Intensidad Máxima de | 0.83 kWm⁻² (máximo valor esperado) |
| Máximo rendimiento de potencia para una máxima intensidad de | 20 W |
| voltaje para el requerimiento máximo de | 14 -25.5V |
| Paneles necesarios para el requerimiento máximo de potencia de 8 kW | 400 paneles |



2.2.2 Sistema Electrolizador Bipolar.



La Unidad Bipolar de Sistemas de Energía fue seleccionada con las siguientes características de operación:

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura | 100 °C |
| Presión | 7.9 bar |
| Densidad de corriente | 400mAcm ⁻² |
| Potencia por celda | 239W |



2.3 Memoria de Cálculo para la Celda Electrolítica.

Sabiendo que el voltaje necesario para romper la molécula del agua a 7.9 bar se encuentra en un rango entre 1.9-2.4 Volts.

Voltaje.

$$V=1.9V.$$

Potencia por celda (medida estándar por fabricante).

$$P=239W.$$

Y sabiendo de la ley de Ohm que:

$$P = V I. \quad (7)$$

Despejando I:

$$I = \frac{239}{1.9} = 125.66 \text{ A.} \quad (7a)$$

Como necesitamos una Potencia total = 7 700 W

Y contamos con una potencia por celda.= 239 W

El número de celdas necesarias (n) es por lo tanto:

$$n = \frac{P_T}{P_{cell}} = \frac{7700}{239} = 32 \text{ celdas} \quad (8)$$



Sabiendo que necesitamos 32 celdas y que el arreglo de las celdas será en forma Bipolar.

$$I_T = 125.66 (32) = 4\,021.25 \text{ A.} \quad (9)$$

Con una densidad de corriente $\rho_c = 400 \text{ mA/cm}^2$.

Y como:

$$\rho_c = \frac{I}{A} \quad (10)$$

por lo tanto

$$I = A * \rho_c \quad (10 a)$$

Ya que el electrolizador es cilíndrico, el diámetro se calcula:

$$I = \frac{\pi}{4} D^2 \rho_c \quad (11 b)$$

Y despejando el diámetro (D).

$$D = \sqrt{\frac{4I}{\pi(\rho_c)}} \quad (12)$$

$$D = \sqrt{\frac{4(125664 \text{ mA})}{3.1416(400 \text{ mA/cm}^2)}} = 20 \text{ cm} \quad (12 a)$$



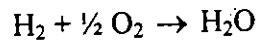
Calculando Flujos Másicos por celda.

Con un equivalente electroquímico $E = 0.0376 \text{ g/Ah}$.

De la 2ª Ley de Faraday:

$$W_{H_2} = \frac{I * E}{1000} = \frac{125.66A * 0.0376g / Ah}{1000} = 0.004725 \text{ kg/h.} \quad (13)$$

Estequiométricamente.



Con pesos moleculares.

$H_2 = 2 \text{ kg/mol}$.

$O_2 = 32 \text{ kg/mol}$.

$H_2O = 18 \text{ kg/mol}$.

Obtenemos los siguientes Flujos Másicos por celda.

TABLA 2

Flujos másicos por celda

| Compuesto. | Flujo Másico (kg/h) |
|---------------------|---------------------|
| Hidrógeno (H_2) | 0.004725 |
| Oxígeno (O_2) | 0.03780 |
| Agua (H_2O) | 0.04252 |

El Flujo másico del agua para 32 celdas = 1.36064 kg/h.



Ahora suponiendo que contamos con 5 h disponibles de sol.

El flujo másico del agua = 6.8032 kg/día.

O sea que necesitaremos cerca de 7 litros de agua diarios para obtener la electricidad necesaria para abastecer nuestras necesidades cotidianas.

El algoritmo de cálculo se puede ver en el Anexo 1.

El Balance de Masa y la lista de equipo se pueden ver en el Anexo 2.

Y la simbología de instrumentación en el Anexo 3.



CONCLUSIONES

Adentrándonos más, podemos darnos cuenta de la importancia que ejerce la celda electrolítica dentro de este prototipo. Siendo el tema central de este proyecto, en el cual se hizo el diseño termodinámico, mostrando balances de masa, que sirvieron como base para el diseño del proceso plasmado en el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) y posteriormente en el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI). Logrando con esto cumplir con 4 de los objetivos particulares planteados que son: a) Diseño termodinámico de una Unidad electrolítica para descomponer el agua, con una potencia de 7.7kW, b) Establecer los balances de masa del prototipo, c) Generar el Diagrama de Flujo del Proceso (DFP) donde se acoplará la Unidad electrolítica, y d) Hacer un esbozo del Diagrama de Tuberías e Instrumentación, para conocer la instrumentación necesaria de este proceso.

Capítulo

II

Este capítulo se centra en el estado de la tecnología del proceso de producción de hidrógeno a partir de los recursos renovables que se encuentran en la naturaleza, como la energía solar, eólica, hidráulica y geotérmica, y su aplicación en la producción de hidrógeno verde. Se describe la tecnología de hidrógeno verde y su importancia en la transición energética. Se aborda la producción de hidrógeno verde a partir de la energía renovable y su aplicación en la producción de hidrógeno verde. Se describe la tecnología de hidrógeno verde y su importancia en la transición energética. Se aborda la producción de hidrógeno verde a partir de la energía renovable y su aplicación en la producción de hidrógeno verde.



Las diferencias que existen entre estas unidades de producción de hidrógeno verde se reflejan en el precio del hidrógeno verde, que puede variar entre 1 y 5 dólares por kilogramo. Este precio depende de la tecnología utilizada y de la disponibilidad de recursos renovables. Se describe la tecnología de hidrógeno verde y su importancia en la transición energética. Se aborda la producción de hidrógeno verde a partir de la energía renovable y su aplicación en la producción de hidrógeno verde.

**Tecnología de Hidrógeno,
Para el Siglo XXI**



III. ESTADO DEL ARTE DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

3.1 ELECTRÓLISIS Y LEYES DE FARADAY.

Consiste en la descomposición de una sustancia por el paso de la corriente eléctrica. En un proceso electrolítico ocurre una transformación de energía eléctrica en energía química. Los iones positivos o cationes se dirigen al electrodo negativo (*cátodo*), al que proporcionan electrones (*reducción*), y los iones negativos se dirigen al polo positivo (*ánodo*), al que ceden electrones (*oxidación*).

3.1.1 Electrólisis.

Es un proceso que tiene lugar cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos y se realiza una reacción redox. La diferencia de potencial aplicada a los electrodos depende del electrolito y del material que constituyen los electrodos.

Las pilas que producen corriente eléctrica se denominan pilas voltaicas mientras que las pilas que consumen corriente eléctrica se denominan pilas electrolíticas.

En algunas electrólisis, si el valor de la diferencia de potencial aplicada es tan sólo ligeramente mayor que el calculado teóricamente, la reacción es lenta o no se produce, por lo que resulta necesario aumentar el potencial aplicado. Este fenómeno se da cuando en alguno de los electrodos se produce algún desprendimiento de gas.



El potencial añadido en exceso se denomina potencial de sobre tensión. La cantidad de producto que se forma durante una electrólisis depende de:

- a. *La cantidad de electricidad que circula a través de la pila electrolítica.*
- b. *De la masa equivalente de la sustancia que forma el electrolito.*
- c. *La superficie de contacto con el electrodo.*

La cantidad de electricidad que circula por una celda electrolítica puede determinarse hallando el producto de la intensidad de la corriente, expresada en amperios por el tiempo transcurrido, expresado en segundos. Es decir, $Q(\text{culombios}) = I \cdot t$.

Tras efectuar múltiples determinaciones, Faraday enunció las dos leyes que rigen la electrólisis y que son:

3.1.2 Leyes de Faraday.

Primera Ley de Faraday: La masa depositada por electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado.

$$m = eQ \text{ (masa = equivalente electroquímico * la cantidad de electricidad (coulombs)).} \quad (14)$$

Segunda Ley de Faraday: Si varias celdas electrolíticas conectadas en paralelo y provistas de electrodos inertes son atravesadas por la misma cantidad de corriente eléctrica, las cantidades de sustancia depositadas en cada electrodo son proporcionales a los equivalentes-gramo de las sustancias depositadas.



Se denomina *equivalente electroquímico* de una sustancia a la masa en gramos de dicha sustancia depositada por el paso de un culombio. De acuerdo con esta definición podemos escribir:

$$m = P_a I t / (96500 n_e) \quad (15)$$

Donde:

m = masa en gramos que se ha depositado o desprendido como gas

P_a = peso atómico del elemento

n_e = número de electrones intercambiados

I = intensidad de la corriente en amperios

t = tiempo en segundos

96500 = es el factor de equivalencia entre el Faraday y el Culombio. $1 F = 96500 C$

3.2 CELDAS ELECTROQUÍMICAS.

3.2.1 Fundamentos.

Recientes descubrimientos arqueológicos han llevado a los científicos a postular ciertos procedimientos electroquímicos que ya eran conocidos hace más de 2 mil años. Sin embargo, los inicios de la electroquímica como ciencia formal se sitúan en los últimos años del siglo XVIII. En 1786, Luigi Galvani descubrió una interesante relación entre las contracciones musculares de un anca de rana y ciertos impulsos que se obtenían al hacer contacto dos metales diferentes. Posteriormente, en 1796, Alessandro Volta estableció que, al formar uniones con diferentes metales con un electrolito entre ambos, se generaba un potencial eléctrico que originaba las contracciones observadas por Galvani. De los nombres de estos científicos han surgido dos de los términos más conocidos en electroquímica: "voltaje", para designar al potencial de un sistema eléctrico, y "celda galvánica" para nombrar los dispositivos que transforman energía química en energía eléctrica, como son, por ejemplo las pilas que se utilizan a diario en walkman, discman, grabadoras, linternas, etc.

Una celda galvánica común está constituida básicamente por dos piezas metálicas, llamadas *electrodos*, y una solución que contiene iones, denominada *electrolito*. Los electrolitos son generalmente líquidos, pero algunas celdas de gran importancia tecnológica utilizan electrolitos sólidos o en forma de pasta.

El aspecto fundamental de una celda galvánica, como el de cualquier sistema electroquímico, es la transferencia de carga eléctrica entre materiales con diferentes características: por un lado, los electrones que son los portadores de carga negativa en los metales (*conducción electrónica*) y, por otro lado, el electrolito, donde la conducción se establece en el movimiento de los iones negativos, *aniones*, y de iones positivos, *cationes*, (*conducción iónica*).



Las reacciones químicas que ocurren en las interfases electrodo/electrolito generan el flujo de corriente eléctrica que proporciona la celda. Por ejemplo, una celda galvánica constituida por dos compartimientos *semiceldas*, estas celdas producen un potencial eléctrico o voltaje de cierto valor y para aumentarlo se deben colocar varias celdas en serie.

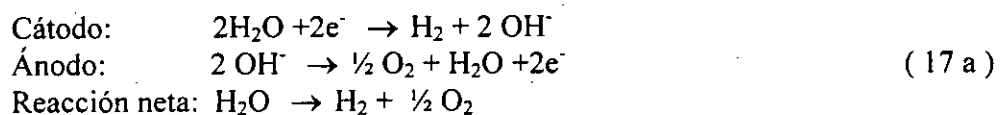
3.2.2 Principios Electroquímicos para el Rompimiento del Agua.

Si una corriente eléctrica de C-D es pasada a través de dos electrodos en agua, ocurre la siguiente reacción:



Hidrógeno y Oxígeno son originados por la descomposición del agua mediante la electrólisis. Como el agua es un conductor iónico muy pobre ésta es la razón por la que se debe agregar un conductor electrolítico para que la reacción pueda proceder a una celda de voltaje técnicamente aceptable. El voltaje eléctrico aplicado a estos dos electrodos deben tener una variación mínima. Este es determinado por la entalpía de Gibbs; la entalpía para el rompimiento del agua y es función de la presión y la temperatura. A una temperatura de 25°C y una presión de 1 bar el voltaje necesario es 1.23V.

Tanto en una solución electrolítica alcalina como en una ácida puede ser utilizado para la electrólisis del agua. En el medio alcalino las dos reacciones básicas son mostradas en la Fig.11.





Como se muestra en la Fig.11 los componentes principales en la celda para la electrólisis del agua son el cátodo, el ánodo y el separador. El *cátodo* debe ser resistente a la corrosión en el electrolizador potencialmente reductor, debe ser un buen conductor electrónico y tener una estructura integrada.

El *ánodo* debe ser resistente a la corrosión en un electrolizador potencialmente oxidante, debe ser buen conductor electrónico y tener una estructura integrada. Ambos electrodos se encuentran separados uno del otro por el diafragma o por una membrana impermeable para gases.

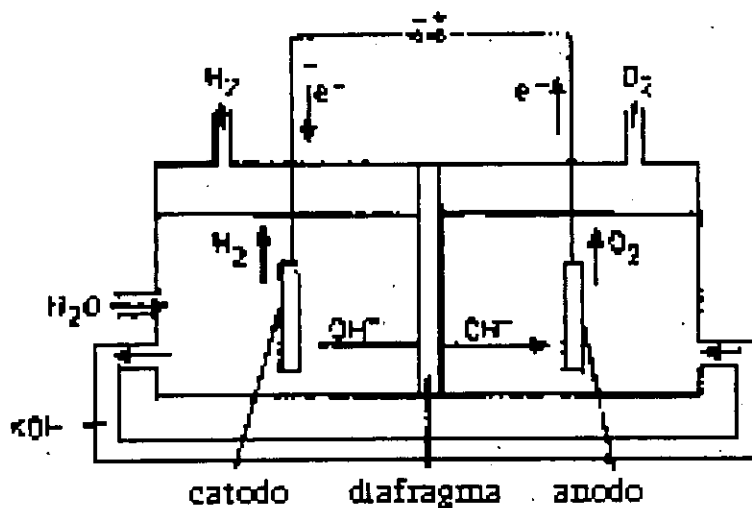
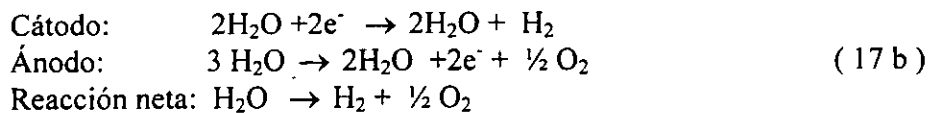


Fig. 11. Electrólisis del agua en un electrolito alcalino.

Una situación análoga resulta de la electrólisis ácida. En este caso se muestran las ecuaciones básicas que son:





La reacción es implementada hoy como una membrana electrolítica como se muestra en la Fig.12 originalmente desarrollada en la Compañía general de Electricidad de E.U.A.

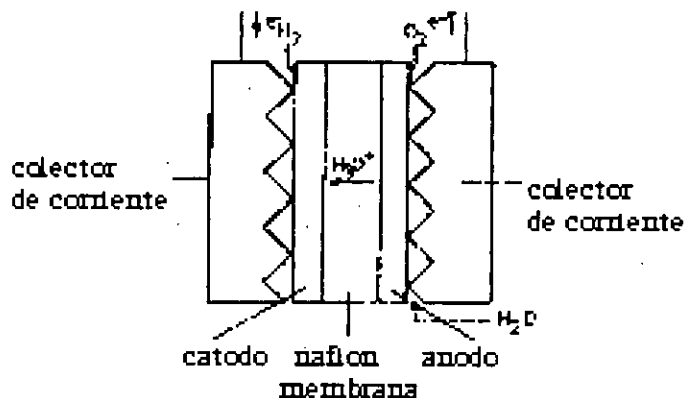


Fig.12 Electrólisis de agua con un electrolito ácido.

Esta electrólisis se basa en el uso de un protón-conductor, intercambiador de cationes (*Nafión*) como electrolizador. La membrana no hace el papel de un medio iónicamente conductivo, pero si de electrones y separa los dos gases producidos. Los catalizadores son mezclados en una superficie de la membrana para generar un intimo contacto electrodo-electrolizador.

3.2.3. Celdas Electrolíticas.

A los sistemas en que se aplica externamente un potencial eléctrico con el objeto de generar reacciones químicas de óxido-reducción, se les conoce como *celdas electrolíticas*



En general, los procesos electroquímicos pueden separarse en dos grupos:

a) *Procesos en que los electrodos no sufren ningún cambio.*

Los materiales que se introducen al electrolito sirven únicamente como intermediarios para que en su superficie se realice la transferencia de carga y se oxiden o se reduzcan las especies presentes en el electrolito. Por ejemplo, la descomposición del agua se puede lograr aplicando un potencial superior a 1.3 volts entre dos electrodos de platino.

En este proceso, denominado *electrólisis*, se observa la formación de Hidrógeno en el cátodo, mientras que en el ánodo se desprende Oxígeno. Sin embargo, las piezas de platino no sufren ninguna alteración.

b) *Procesos en que los electrodos participan activamente.*

Pertencen a este grupo los casos en que el ánodo se disuelve en forma intencional, como en el electro refinado del cobre, o se oxida deliberadamente, como en el caso del aluminio para la obtención de aluminio anodizado que tanta aplicación tiene en la construcción, y el de las pilas carbón-Zn.

Desafortunadamente, en muchos casos los electrodos reaccionan cuando no están supuestos a hacerlo, esto es, se oxidan, se contaminan o se disuelven, disminuyendo drásticamente la vida útil de los materiales y ocasionando grandes pérdidas económicas.

En general, los diferentes materiales que se utilizan como electrodos pueden ser utilizados sin problema dentro de ciertos intervalos de potencial eléctrico aplicado.



Por ejemplo, un electrodo de mercurio es muy utilizado para reacciones de reducción en medios acuosos, porque inhibe la electrólisis del agua y permite así el estudio de muchas sustancias; pero es prácticamente inútil como ánodo, esto es para procesos de oxidación, ya que, a potenciales positivos, es el propio mercurio el que se oxida. Por otra parte, los electrodos de platino son muy utilizados en el laboratorio, pues permiten trabajar en zonas más o menos amplias de potencial sin verse ellos afectados.



3.3 TERMODINÁMICA DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

Un análisis termodinámico del rompimiento electrolítico del agua es tomando para el cálculo sólo las propiedades termodinámicas del agua y los productos (H_2 y $\frac{1}{2} O_2$) bajo condiciones de trabajo efectivo de la electrólisis del agua. El voltaje reversible correspondiente puede ser expresado de la siguiente forma:

$$U_{\text{rev.T.P.}} = \frac{\Delta G_{f^0}(H_2O(l))_T}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{(p - p_w)^{3/2} p_w^0}{p_w} \quad (18)$$

Donde:

P_w = Presión de vapor parcial del agua.

P_w^0 = Presión de vapor del agua a condiciones standard.

La descomposición termodinámica reversible del voltaje correspondiente a la Energía molar Standard de Gibbs $\Delta G_{f,T}$ del rompimiento del agua se obtiene por la fórmula:

$$U_{\text{rev.T}}^0 = 1.5184 - 1.5421E - 3T + 9.523E - 5T * \ln T + 9.84E - 8T^2 \quad (19)$$

donde :

T (=) Kelvin.

La curva correspondiente se muestra en la curva de la Fig.13.

U_{rev}^0 vs T, es graficada, obteniendo para la electrólisis del agua, el voltaje termoneutral U_m basado en el cambio de entalpía para la celda de reacción.



Este voltaje se define por la ecuación:

$$U_m = -\frac{\Delta H^0_f(H_2O(l))_T}{2F} \quad (20)$$

y corresponde al voltaje entálpico $U_{\Delta H}$.

Los primeros valores para el voltaje termoneutral como una función de la temperatura indican ese incremento con incrementos de temperatura, con muy pequeñas variaciones. 1.48 V a 25°C, 1.49V a 100°C. Resultados recientes para estos valores muestran que decrecen con elevaciones de temperatura. El voltaje correspondiente depende de la temperatura como se muestra en la gráfica de la Fig. 13. Si la entalpía molar de la reacción para el rompimiento del

agua es tomado como el voltaje entálpico $U_{\Delta H} = \frac{-\Delta H}{2F}$,

donde el valor correspondiente a altos calores para el Hidrógeno U_{HHV} pueden definirse como:

$$U_{HHV,T,P} = U_{\Delta H,T,P} + \frac{(H_{T,P} - H_{298}^0)_{W(l)}}{2F} \quad (21)$$

En este caso, $H_{W(l)}$ es la entalpía molar del agua en fase líquida. La presión depende de $U_{\Delta H}$ que es la más negligible, y análogamente en U_{HHV} . Esta difiere a partir de cero solamente porque la desviación de los gases parte de la idealidad.

La temperatura depende de los voltajes U_{HHV} , $U_{\Delta H}$ que se pueden representar por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} U^0_{\Delta H,T} &= 1.5187 - 9.763E - 5T - 9.50E - 8T^2V \\ U^0_{HHV,T} &= 1.4146 + 2.205E - 4 + 1.0E - 8T^2V \end{aligned} \quad (22)$$

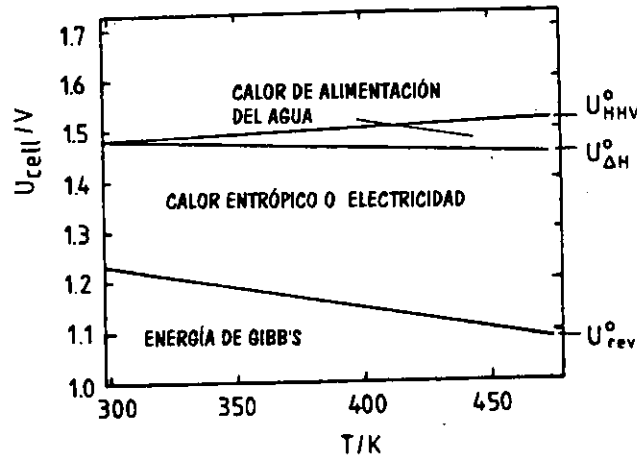


Fig. 13. Temperatura dependiente de las contribuciones de IR y sobrepotencia corregida del voltaje de la celda.

Los gráficos correspondientes son mostrados en la Fig.13. En donde a partir de esta figura se muestra que tanto U_{HHV} como, $U_{\Delta H}$ son idénticos a 25°C y son divergentes a 200°C por un 5%.

De acuerdo a la ecuación (21), los altos calores valuados para el voltaje U_{HHV} representan la entalpía contenida de los productos en estado gaseoso para la electrólisis a una temperatura relativa del agua de 25°C. La diferencia $U_{HHV} - U_{\Delta H}$ por lo tanto es el voltaje energético equivalente necesario para una alimentación de una mol de agua a 25°C .

$$U_{HHV,T} - U_{\Delta H,T} = \frac{1}{2F} \int_{298}^T C_{p(w)} dT \tag{23}$$

Donde:

$C_{p(w)}$: Es la capacidad calorífica molar del agua.

La eficiencia energética de la electrólisis del agua puede ser definida por:

$$\eta = \frac{U_{HHV}}{U_{obs}} \tag{24}$$



Esta definición puede ser utilizada tanto a condiciones atmosféricas, como para una electrólisis a presión.

Una fórmula particular exacta para el cálculo de la presión parcial del agua sobre extensas concentraciones y rangos de temperatura entre 0-18m (KOH) y 273-573 K se obtienen de la ecuación:

$$\log P_{w,T,m} = F_1(m) + F_2(m) * F_3(T) \text{ bar.} \quad (25)$$

con:

$$F_1 = -0.0151m - 1.679E - 3m^2 + 2.26E - 5m^3$$

$$F_2 = 1.0 - 1.206E - 3m + 5.60E - 4m^2 - 7.82E - 6m^3$$

$$F_3 = 35.446 - \frac{3343.9}{T} - 10.9 \log T + 4.16E - 3T.$$

donde:

T = (Kelvin)

m = (moles/kg)

Varios valores calculados de acuerdo a esta fórmula se obtienen en las Fig.14 y 15.



A partir de los datos de la Fig.14 y 15 es obvio que cerca de los 80°C la electrólisis a presión ayuda a prever pérdidas de agua la cuál puede escapar como vapor del electrolizador.

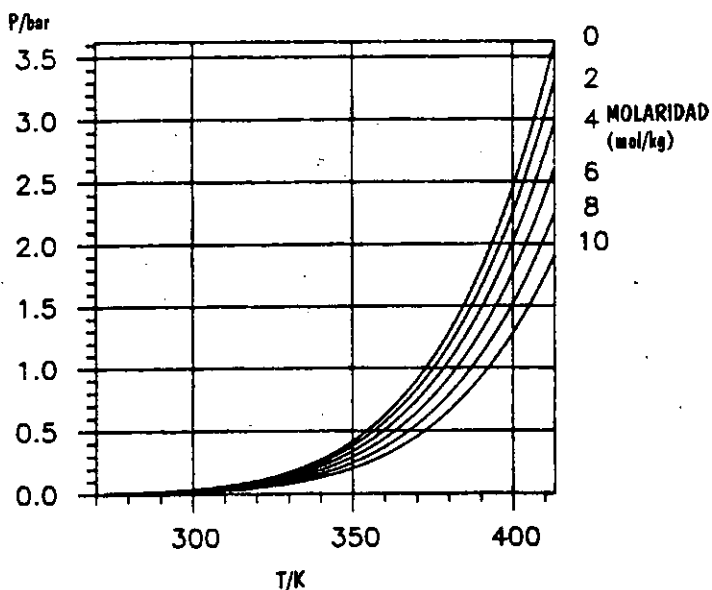


Fig. 14 Presión de Vapor Parcial de soluciones acuosas de Hidróxido de Potasio en bar.

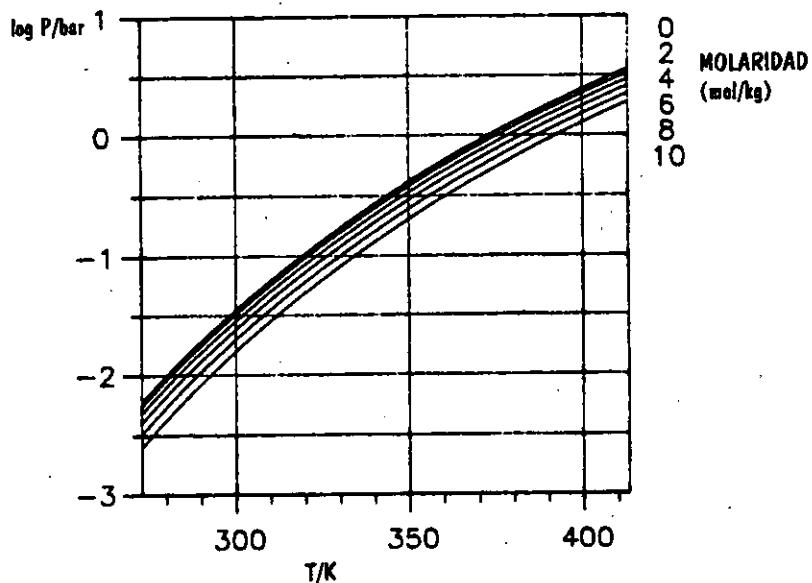


Fig. 15 Presión de Vapor Parcial Logarítmica de soluciones acuosas de KOH.



3.4 TÉCNICA DE EJECUCIÓN PARA LA ELECTROLISIS DEL AGUA.

3.4.1 Celda de Voltaje.

Ejecutando la electrólisis del agua bajo las condiciones técnicas demandadas para las celdas de voltaje las cuales son notablemente altas donde la descomposición del voltaje U_0 correspondiente al U_{rev} (eq.19).

La celda de voltaje técnica U_{cell} esta compuesta de la descomposición de voltaje U_0 , omitiendo las pérdidas de voltaje IR_i , causada por la resistencia interna R_i del electrolizador y los sobre potenciales anódicos y catódicos η_c y η_a . Esto se muestra esquemáticamente en la Fig.16.

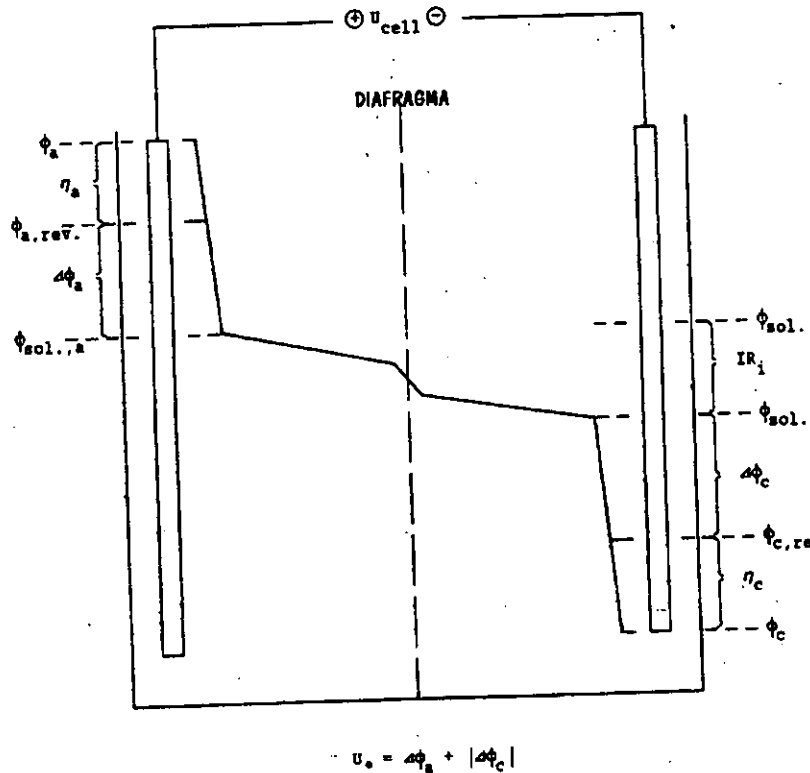


Fig. 16. Componentes de la Celda de Voltaje en una Celda Electrolytica.



U_{cell} puede entonces escribirse como:

$$U_{cell} = U_0 + IR_i + \eta_a + |\eta_c| \quad (26)$$

Los sobrevoltajes $\eta_{a,c}$ se incrementa logarítmicamente con la densidad de corriente j . Sin embargo pueden linealizarse con una buena aproximación para un rango limitado de densidades de corriente altas (generalmente de $0.3 - 1 \text{ A/cm}^2$) como:

$$\eta_a + |\eta_c| = \Delta U \eta + jR^*_\eta \quad (27)$$

La forma de linealización

$$U_{cell} = U_0 + \Delta U \eta + j(R^*_i + R^*_\eta) \quad (28)$$

$$U_{cell} = U \eta + jR^*_{sum} \quad (28a)$$

Este puede ser válido en el caso de densidades de corrientes altas. R^*_i es la resistencia específica de la superficie de la celda del electrolizador, y R^*_η es la inclinación de la linealización aproximada de la ecuación Butler-Volmer.

Se muestra en la Fig. 17 esquemáticamente la correlación de una técnica de electrólisis del agua en la que se grafican. Celda de voltaje-densidad de corriente. Si la función U_{cell} es extrapolada a los valores $j=0$, $U \eta$ es obtenida de acuerdo a la ecuación 28a.

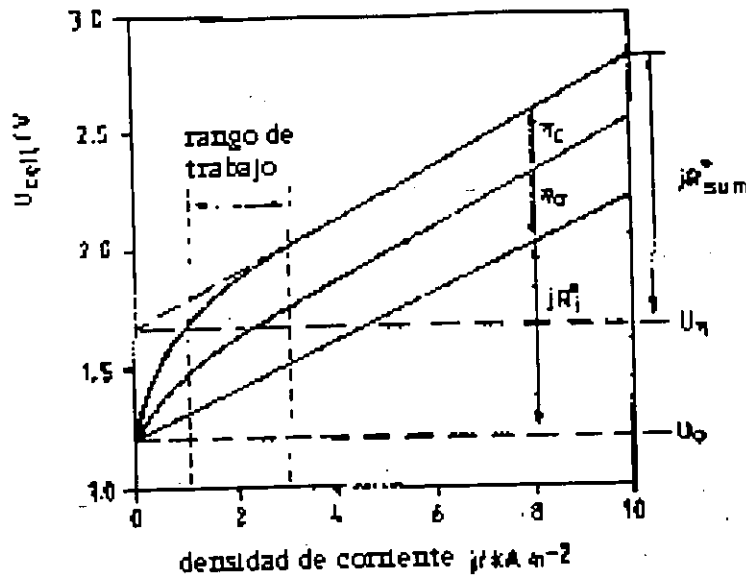


Fig. 17 Presentación esquemática del voltaje de la celda/densidad de corriente. Correlación de electrolizadores convencionales de agua alcalina (28 wt % KOH, 85°C).

3.4.2 Componentes de la Celda.

3.4.2.1 Configuración de la Celda.

Esta celda para electrolizar el agua consta de la armadura o coraza de la celda, cámara del ánodo y cámara del cátodo, normalmente vienen encajonadas por paredes para la celda bipolar, y un separador o diafragma, el cuál es para separar los gases de Hidrógeno y de Oxígeno el uno del otro sin peligro. El separador intenta ofrecer una resistencia tan pequeña como sea posible para el paso de corriente en la celda.



Un fenómeno particular de la electrólisis del agua es la necesidad de tomar en consideración los gases en el electrolizador. La resistencia eléctrica del conductor eléctrico puede ser incrementada notablemente por la fase de gas que lo envuelve. La conductividad eléctrica del gas es prácticamente cero, de aquí que los esfuerzos sean hechos para obtener la fracción de volumen relativo del gas tan bajo como sea posible. Una posibilidad es la electrólisis a presión.

Para que se reduzca la resistencia interna de la celda la tan llamada configuración vacío-cero que se muestra en la Fig.18 es adoptada hoy en día para el mejoramiento de la manufactura del electrolizador.

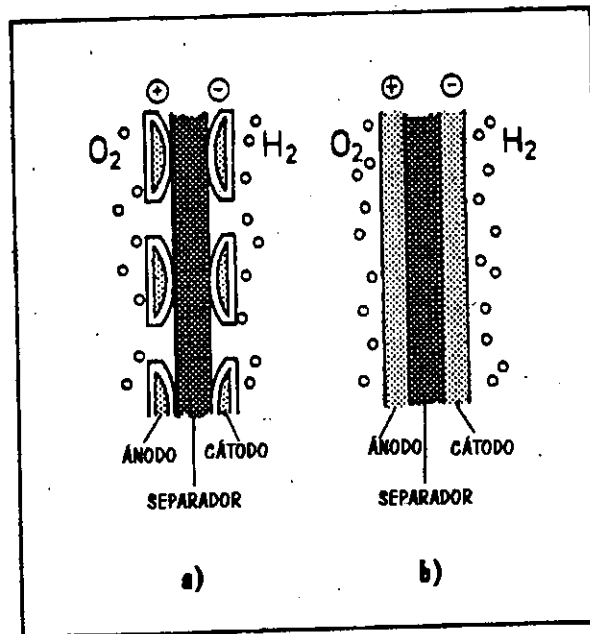


Fig. 18 Celdas geométricas, a) con electrodos perforados
b) Con la técnica tipo sándwich.

En esta configuración las partículas de los materiales del electrodo (metales porosos, metales extendidos, platos perforados entre otros) son presionados sobre cualquiera de los lados del diafragma, tanto que los gases de Hidrógeno y Oxígeno son forzados a abandonar los electrodos hacia atrás. Bajo condiciones semejantes los gases no interfieren grandemente con el paso de la corriente a través del electrolizador entre los electrodos.



3.4.2.2 Materiales de la Celda.

La mayoría de los electrolizadores hacen uso exclusivamente de componentes metálicos. El material de construcción más conveniente para las partes metálicas del electrolizador alcalino convencional operando a temperaturas cerca de los 80°C, es un acero normal. En los electrolizadores modernos, donde se trabaja a altas temperaturas (entre 90 – 120°C), el acero no es el material adecuado, debido a que su resistencia a la corrosión no es lo suficientemente grande.

El acero cada vez con mas frecuencia es reemplazado por níquel el cuál es mucho más estable debidõ a que su protección es más extensa la comparación de estos materiales, se presenta en la Fig.19 la cual muestra diagramas de corrosión de hierro y níquel.

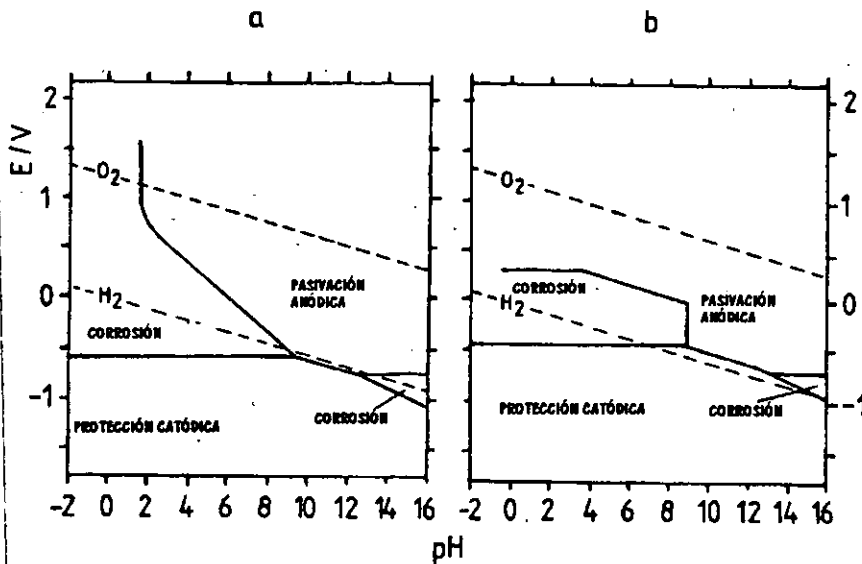


Fig. 19 Dominio de Corrosión, Protección Catódica y Pasividad Anódica del acero (a), níquel (b) a 25°C.



El níquel es un material de construcción el cual es flexible, físicamente débil y más caro que el acero, tanto que puede optarse por no utilizarlo como volumen de material para la armazón de celdas de electrolizadores a presión.

En cambio, niquelando líneas de protección electrolíticamente o químicamente puede aplicarse al acero.

Para la mejora de electrolizadores a pequeña escala se utilizan materiales poliméricos (polisulfones) que se han introducido para la fabricación de corazas de las celdas.

3.4.2.3 Separadores y Diafragmas.

En la electrólisis convencional del agua los diafragmas de asbestos son los utilizados normalmente. En estos los radios de las partículas son más pequeños que los radios de las burbujas del gas contenido en el electrolizador, el cuál para el Hidrógeno puede ser cerca de $10\mu\text{m}$

El líquido electrolítico esta sobresaturado con gases en la vecinidad del electrodo. Sin embargo en las celdas modernas, los electrodos tienen una abertura de diafragma cero, el electrolito sobresaturado con gases puede entrar dentro de los poros del diafragma. Esto da como resultado la precipitación del gas a partir del estado de sobresaturación que lo envuelve permanentemente, obstruyendo los poros y llevándolos a un incremento incontrolable en la resistencia del diafragma .



La regla para evitar esto, es tener un tamaño de poro menor de $10\mu\text{m}$. Es necesaria una permeabilidad hidrodinámica baja para alcanzar este orden de magnitud, el cual se requiere para prevenir el intercambio de electrones entre los dos compartimientos electrolíticos. Una alta porosidad de por lo menos 50%, es el deseado para obtener una resistencia electrolítica baja.

Para la membrana del electrolizador un protón conductor se intercambia por el catión polímero perfluorinado en forma de nafión, membrana que sirve simultáneamente como separador y como electrolito.

Los grupos ionofóricos en este polímero son grupos de ácidos sulfónicos ($-\text{SO}_3\text{H}$, Fig.20), los cuales en contacto con el agua líquida producen una hidratación y la disociación ($-\text{SO}_3^-\text{aq} + \text{H}^+\text{aq}$). Esta hidratación de los grupos de ácidos sulfónicos se conoce para formas de grupos polares, de lo contrario para los no polares el polímero patrón que además ofrece la posibilidad de una masa iónica y transferencia de carga en un entorno de conducción no electrolítica, es esencialmente el aislador de PTFE.

Diafragmas de asbestos con un espesor de varios milímetros se muestran bajo condiciones de trabajo industrial (90°C , 30 wt % KOH) la superficie eléctrica específica trabaja resistencias de $0.5 - 1.0 \Omega\text{cm}^2$, donde el nafión, membrana con una conductividad específica de $80 \text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ y un rango de espesor entre $0.1 - 0.3 \text{mm}$ generalmente exhibe una resistencia específica en la superficie entre $0.1 - 0.4 \Omega\text{cm}^2$. Debido a que la alta resistencia interna del equipo electrolizador con clero de asbestos, a provocado un gran número de nuevas propuestas durante la década. Sólo un pequeño número de soluciones tienen alguna oportunidad para introducirse en las prácticas industriales como se discutirá después.

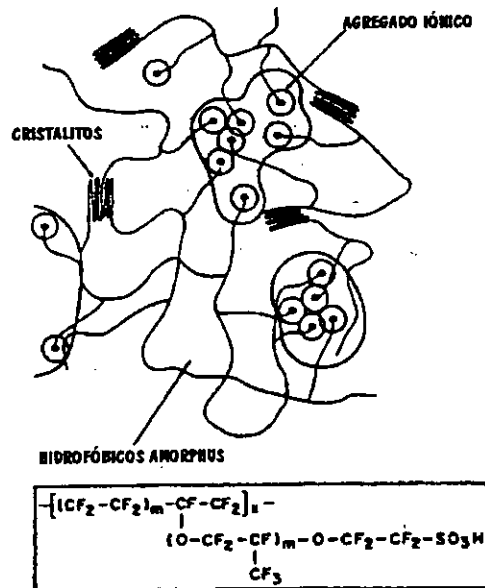


Fig. 20 Estructura del Nafion. El intercambio de iones forma grupos de áreas hidrofólicas en el polímero.

3.4.2.4 Modificación de Electrodo

Así como en ocasiones se evita la corrosión de los metales cubriéndolos con pinturas anticorrosivas, la fotocorrosión se puede disminuir depositando una capa polimérica sobre la superficie del electrodo.

Los polímeros son materiales constituidos por largas cadenas de moléculas. Algunos ejemplos muy conocidos son los plásticos, el poliuretano y el polietileno.

El silicio, de tanta utilidad en las celdas fotovoltaicas de estado sólido, no puede ser empleado en una celda fotoelectroquímica. Al contacto con el electrolito acuoso, el silicio reacciona formando un óxido aislante y esa capa de óxido impide la transferencia de electrones e inutiliza el sistema. El problema se presenta aun cuando en vez de agua se utiliza algún otro disolvente orgánico, ya que las pequeñas trazas de agua presentes como impurezas son suficientes para oxidar el semiconductor.



Si se recubre el electrodo de Silicio, con una película polimérica; ésta funciona como un impermeabilizante que evita el paso del agua hacia la superficie, y la corrosión disminuye notablemente.

Sin embargo, esta película protectora debe ser también conductora, pues de otra forma impedirá el flujo de electrones y el electrodo será inútil. Generalmente, los polímeros tienen baja conductividad, por lo que ha sido necesario buscar otros materiales con buenas características de conducción.

Uno de los más utilizados es el polipirrol. Esta sustancia resulta de la oxidación de muchas moléculas de pirrol:



las cuales se unen entre sí para formar cadenas de gran longitud. La oxidación se puede hacer electroquímicamente de tal forma que el silicio, actuando como ánodo, se recubre del polímero. La cantidad de polipirrol formada y, por lo tanto, el espesor de la película, se pueden controlar fácilmente mediante el tiempo de aplicación del potencial.



3.4.3 Celdas Bipolares y Monopolares.

3.4.3.1 Descripción General de Electrolizadores Monopolares y Bipolares.

Los Electrolizadores Industriales se componen de un gran número de celdas o pares de electrodos, donde el número depende del diseño general y la capacidad de producción. Unidades semejantes son tanto operadas como monopolares, en celdas tipo tanque Fig.21 o como bipolares, celdas purificadoras a presión Fig.22.

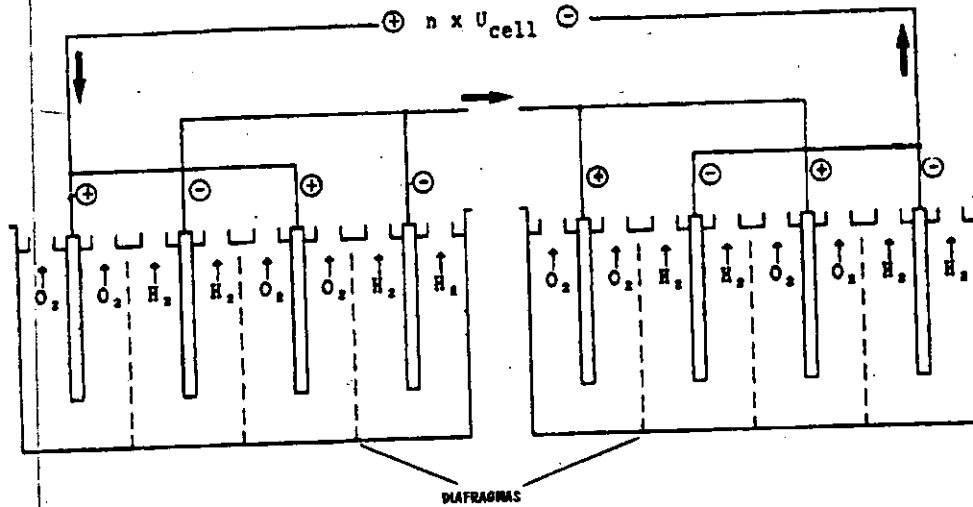


Fig. 21 Celda Unipolar tipo tanque ruta esquemática construcción-corriente.

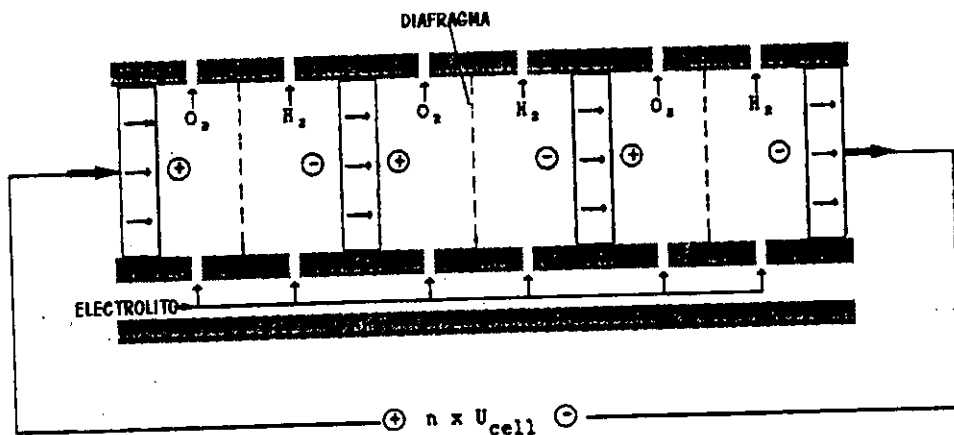


Fig. 22 Celda Bipolar filtro-presión.

En la construcción monopolar, cada electrodo es individual, y su línea de alimentación tiene sólo una polaridad ya sea el ánodo o el cátodo. Muchas de estas celdas de separación simples son conectadas en serie electrolíticamente.

En el electrolizador bipolar, las celdas son arregladas de acuerdo a la presión del purificador principal. Cada pared de partición metálica separando una celda a partir de varias al mismo tiempo como un elemento transportador de corriente abastecedor en un lado un cátodo y en el otro un ánodo con corriente. El cátodo y el ánodo son por consiguiente integrados en una sola parte metálica la cual separa simultáneamente el compartimiento del ánodo y el cátodo en dos celdas adyacentes.

Un lazo longitudinal sirve para arrojar a presiones juntas la pila completa, que consta de la coraza, electrodos, separadores y empaques. Cada uno de los dos diseños tiene sus ventajas y desventajas. Las celdas monopolares son de un simple y firme tanque construido con relativamente pocos empaques y puede ser manufacturado mas fácilmente y sin dificultad de operación. Ellos son baratos y se utilizan generalmente para electrólisis a presión ambiental.

Donde la línea de corriente es llevada a los cuerpos de los electrodos Fig.23 causando perdidas relativas por alto voltaje y distribución de densidad de corriente no uniforme produciendo por lo tanto una reducción en la producción de energía.

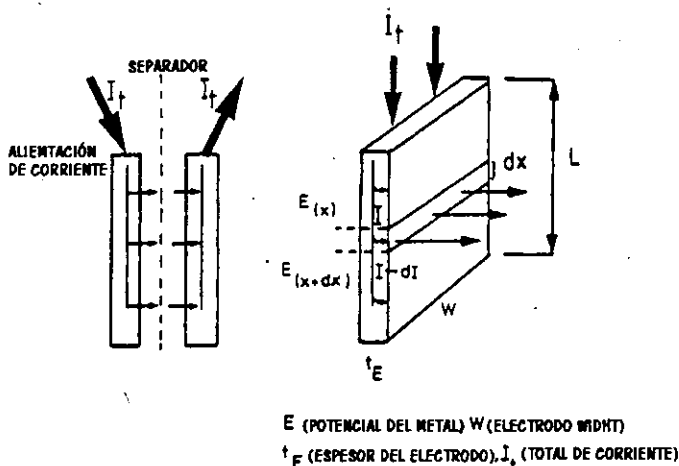


Fig. 23 Dirección del Flujo de Corriente en un electrodo con la función monopolar.

3.4.3.2 Distribución de Densidad de Corriente en Celdas Monopolares y Bipolares.

En los electrolizadores industriales de agua, un electrodo operando de modo bipolar se suplementa con distribución de densidades de corriente en comparación con uno monopolar. Esto se puede demostrar siguiendo la simplificación del análisis:

Aplicando la ley de Ohm para la fase metal de un electrodo de una celda monopolar Fig.23 la corriente $I(x)$ siguiendo a través del cruce de la sección (s) t_E del electrodo esta obteniendo la distancia (x) a partir de la corriente alimentada.

$$I(x) = - \frac{w * t_E * dE}{\rho * dx} \tag{30}$$

Definiendo la densidad de corriente de la celda $j(x)$ a una distancia x como:

$$j(x) = - \frac{dI(x)}{w * dx} \tag{31}$$

La segunda derivada del potencial se obtiene:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{j(x) \cdot \rho}{t_E} \quad (32)$$

De acuerdo a la ec.31 la densidad de corriente j es una función de la altura del electrodo (x). Asumiendo el primero como aproximación cero donde j es constante a lo largo de toda la sección de cruce de la celda.

$$j = \frac{I_t}{wL}$$

donde la siguiente ec.33 describe la pérdida de voltaje ΔE a lo largo de la longitud del electrodo L :

$$\Delta E = E(x=0) - E(x=L) = \frac{\rho \cdot L \cdot I_t}{2 \cdot t_E \cdot w} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot j}{2 \cdot t_E} \quad (33)$$

Esta ecuación se obtiene por la integración de la ec. 32.

El ΔE puede obtenerse tan pequeño como sea posible. La regla para obtener un ΔE bajo a lo largo del electrodo, es que el electrodo debe tener las siguientes propiedades de acuerdo a la ec.33.

Este no debe ser alto (L corto), debe tener una buena conductividad eléctrica (ρ pequeña) y debe ser tan grueso como sea posible (t_E alto). Sin embargo, son técnicas y represiones económicas las cuales imponen límites en un electrolizador técnico.

En el caso de una celda de construcción de espacio cero, la caracterización de la configuración de la alimentación usual de corriente en un electrolizador monopolar Fig.21 con respecto al resultado de la distribución de la densidad de corriente puede ser realizada de la siguiente manera.



Ohms bajos son aplicados tanto para el ánodo (subíndice a) como para el cátodo (subíndice c):

$$\frac{dE_a}{dx} = -\frac{I_a(x) * \rho_a}{w_a * t_a}; \frac{dE_c}{dx} = -\frac{I_c(x) * \rho_c}{w_c * t_c} \quad (34)$$

donde:

$$w_a = w_c = w$$

$$t_a = t_c = t_E$$

$$\rho_a = \rho_c = \rho$$

En paralelo con la derivación de la ec. 30-33 y tomando en cuenta que el incremento de corriente en el ánodo es equivalente al decremento de la corriente en el cátodo llegamos a:

$$j(x) = -\frac{dI_a(x)}{w * dx} = \frac{dI_c(x)}{w * dx} = \frac{E_a(x) - E_c(x)}{h * \rho_c} \quad (35)$$

donde:

ρ_c = Resistividad del separador

La solución puede obtenerse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} E_a &= A.Exp(Kx) + B.Exp(-Kx) + Cx + D \\ E_c &= -A.Exp(Kx) - B.Exp(-Kx) + Cx + D \end{aligned} \quad (36)$$



con :

$$K = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{h \cdot t_E \rho_e}} ; \text{ y A,B,C,D, son constantes arbitrarias de una naturaleza bastante complicada}$$

la cual fue estimada a partir de las condiciones límite.

$$X=0; E_c=0; E_a=E_{cell}; x=L, I_a=I_c=0. \quad (37 a)$$

Un ejemplo de Diferencial de Potenciales $E_a - E_c$ en el criterio de distribución de densidad de corriente ec. 35 para la configuración de celdas monoplares se obtiene en la Fig.25.

La dirección principal del flujo de corriente en un electrodo con la función bipolar es diferente a partir del caso monopolar y se obtiene esquemáticamente en la Fig.24 (configuración de celdas de espacio cero).

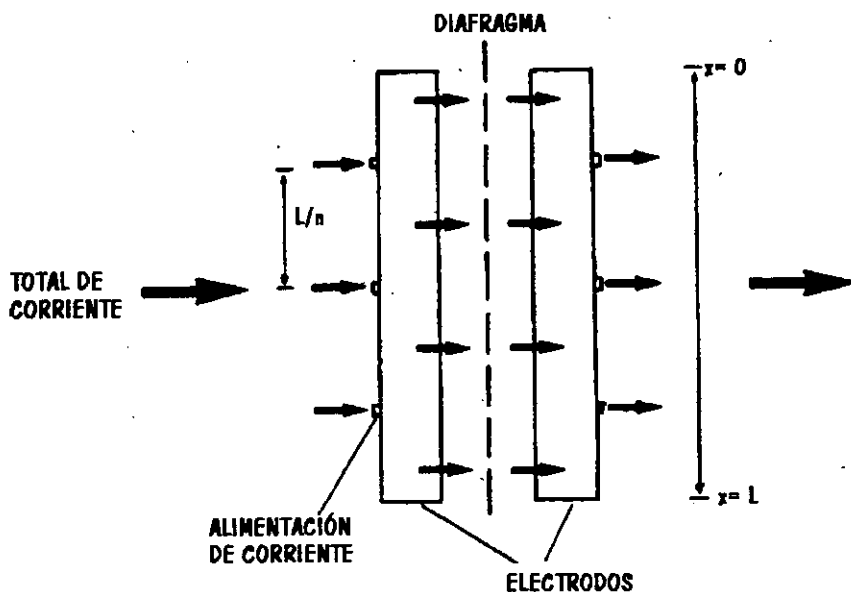


Fig. 24 Dirección del flujo de corriente en un Electrodo con la función Bipolar.



Esta figura muestra la simplificación unidimensional de la distribución del flujo de corriente entre dos electrodos bipolares. Siguiendo el mismo procedimiento matemático como en las ec. 29-31, las constantes A,B,C,D estimadas de acuerdo a la Fig.24 a partir de:

$$x = i \cdot \frac{L}{n} \tag{37 b}$$

donde $E_a = E_{cell}$, $E_c = 0$; $0 \leq i \leq n$

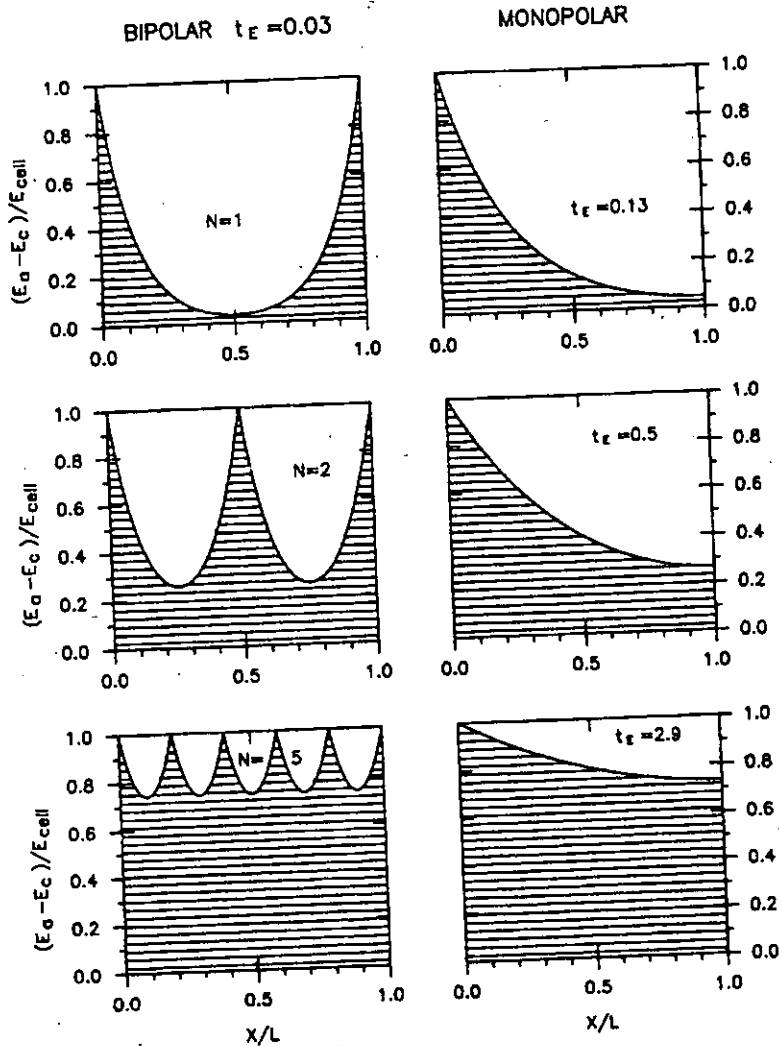


Fig. 25 Comparación de espesores de electrodos monopolares y bipolares, Cada uno con factor de utilización idéntico.

Longitud total del electrodo $L=100$ cm, $\rho=2 \cdot 10^3 \Omega$ cm, $\rho_e = 2 \Omega$ cm, $h=0.10$ cm, w arbitraria, t_E en cm.



Acordando que la diferencia de potenciales $E_a - E_c$ como los criterios de distribución de densidad de corriente se obtienen de la Fig.25. Esta figura compara los electrodos monopolar y bipolar, donde cada uno de ellos tiene el mismo factor de uso, que se expresa como el área sombreada de la integral.

Donde el número de puntos de contacto en el electrodo bipolar se volverá mayor, donde es la regla para lograr el mismo uso, el espesor del electrodo monopolar debe incrementarse. Esto se puede ver en la figura de las celdas bipolares con electrodos de espacio-cero no tienen una densidad de corriente completamente uniforme.

Por el contrario, a partir de la corriente eléctrica esta es transformada al punto exacto a partir del plato bipolar para el electrodo por clavos, alambres, láminas y otros dispositivos, disturbios en la distribución en la densidad de corriente son algunas experiencias, aunque sólo locales. Aunque existen pérdidas de voltaje, pero estas son generalmente bajas y por lo tanto permiten la utilización de estos electrodos.

3.4.3.3 Desviación Electrolítica de Corrientes en la Pila de las Celdas Bipolares.

Las ventajas de las celdas bipolares son obvias cuando nos referimos a la descripción. Ellos tienen un voltaje interno bajo, y las perdidas pueden ser por consiguiente una carga muy pesada. Es más, ellos pueden ser construidos en una forma mucho mas compacta y permitir operaciones presurizadas sin un mayor problema. Sin embargo, ello representa un sistema más complejo y requiere técnicas de diseño mucho mas sofisticadas, mucho más costoso y técnicas de fabricación mas precisas. Una alimentación relativamente estrecha y los canales de salida son integrados dentro del sistema bipolar y el electrolizador puede ser continuamente purificado para prevenir obstrucciones.



Los canales Fig.22 causan una desviación eléctrica de la corriente en la pila de las celdas Fig.26a. Esta corriente parásita reduce la corriente producida y eleva el fenómeno de corrosión en el sistema. Ellos son causados por el bypass electrolítico presentado esquemáticamente en la Fig.26b. Las celdas son caracterizadas con la adición de la resistencia Z , la cual tiene cierta semejanza a las características del diodo Zener.

Las resistencias R_p y R_m representan los puertos de distribución del fluido y las numerosas resistencias respectivamente. Los resultados de la fuga de corriente, similares se muestran diagramáticamente en la Fig.26c la cual tiene que ser calculada por una simulación de computo. Ellos son muy bajos al final de los dos en el bloque electrolizador y muestra un aplastado máximo alrededor del centro de la pila.

El método clásico de cálculo de esta fuga de corriente se basa en una aplicación de la ley de Kirchhoff para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas. La solución se obtiene generalmente con la adición de la ecuación bidimensional de Laplace.

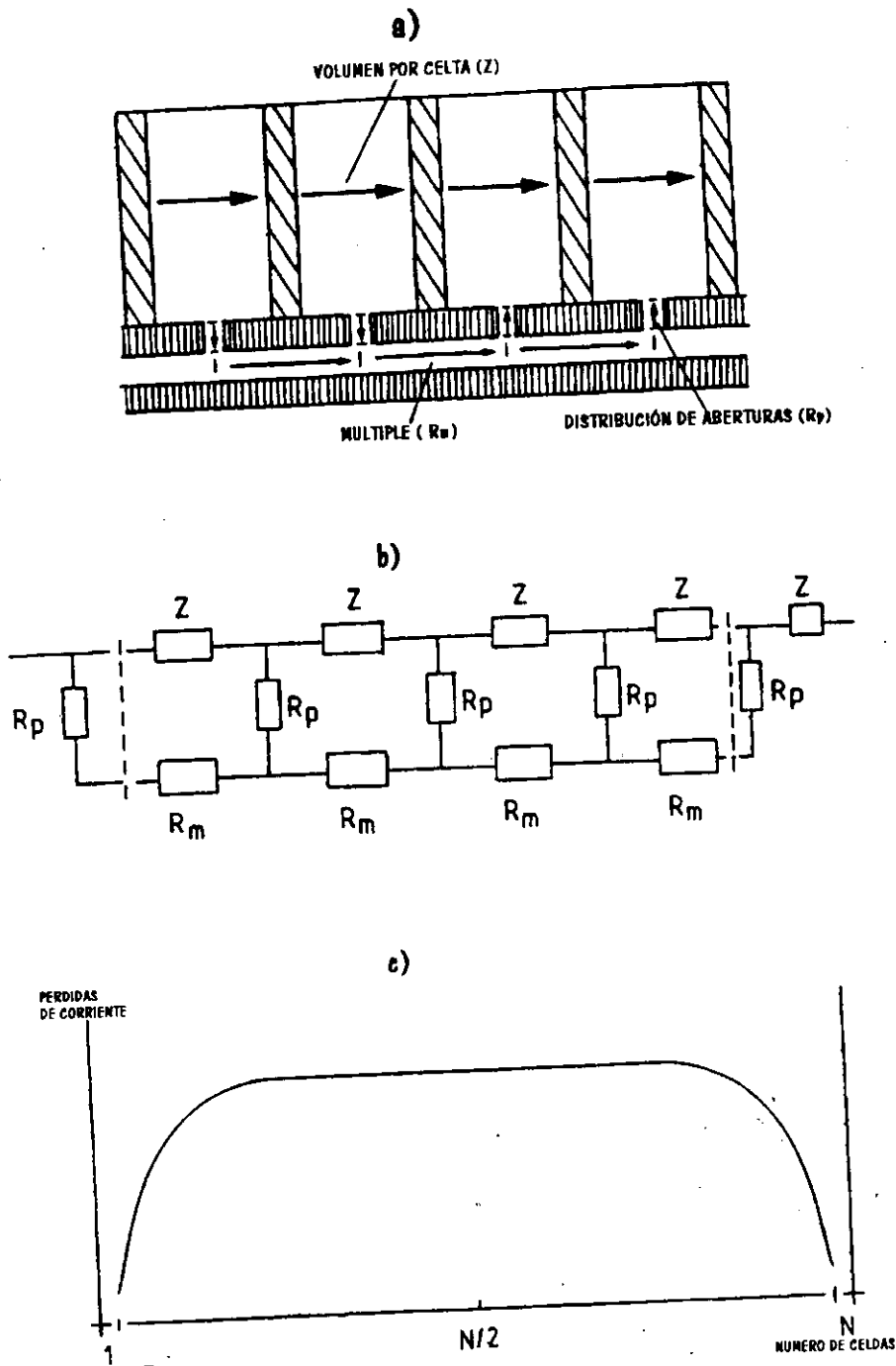


Fig. 26 Esquema de la pila de una electrólisis bipolar: a) desviaciones de corriente a través de la interconexión electrolítica; b) Análogo eléctrico de la pila de la celda; c) corriente desquebrajadamente derramada.



Deben ser propuestos varios métodos para la disminución de la fuga de corriente. Ellos son basados principalmente en tres principios:

1. Rompiendo la continuidad del conductor electrolítico en los canales del bypass.
2. Incrementando la resistencia eléctrica para reducir la sección de cruce de los canales.
3. Balanceando los gradientes de potencial entre las celdas y la sección correspondiente de la línea de bypass con la adición de una corriente protegida aplicada por la adición de electrodos auxiliares.

En el diseño de dispositivos de protección, se debe recordar que un electrolizador también es un sistema hidráulico, con distribución de la presión, la cuál se muestra diagramáticamente en la Fig.27.

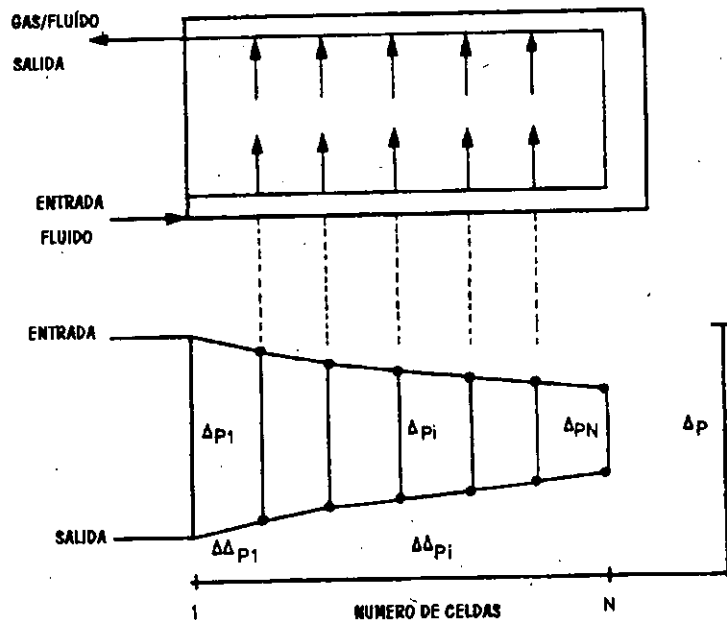


Fig. 27 Distribución de la presión hidrodinámica en un electrolizador bipolar.



La diferencia de presiones por celda ΔP_i puede ser posible si es igual a lo largo de toda la pila, sólo que toda la celda sea suministrada uniformemente con el electrolito. La estabilidad del ΔP_i hace que las pérdidas por fricción $\Delta\Delta P_i$ sean lo mas pequeñas posible. Por esta razón, no debe ser muy grande sino estrecho, a partir de que la resistencia hidráulica sea concentrada en la entrada de los canales Fig.27. En este caso, la resistencia eléctrica es causada por la pequeña sección de cruce de los puertos de distribución.

El objetivo de la optimización es para combinar la protección máxima efectiva de electricidad con la mínima resistencia hidráulica.

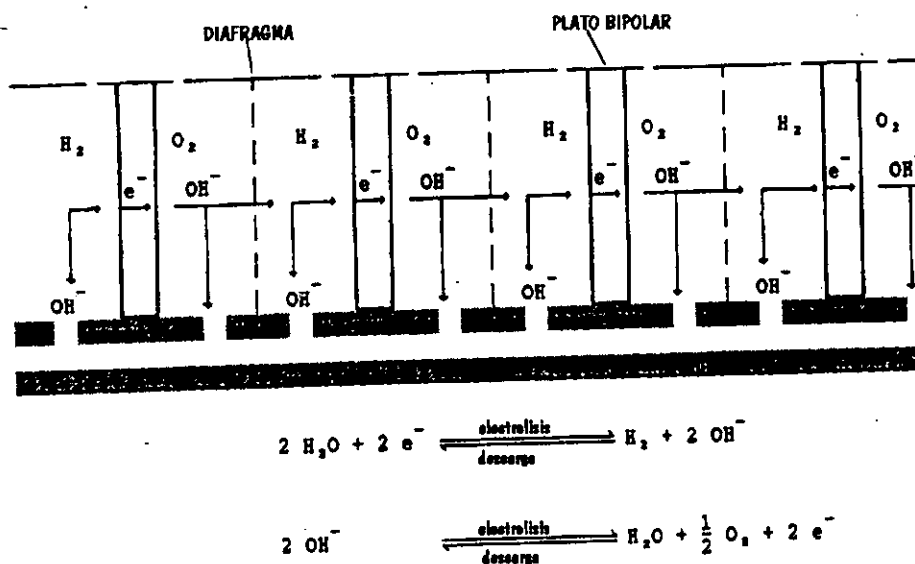


Fig. 28 Descarga para electrolítico/metálico cortos circuitos en electrolizadores bipolares.

3.4.3.4 Electrolizador Monopolar y Bipolar Bajo Condiciones de Operación Discontinuas.

Las propuestas hechas en los últimos años con frecuencia utilizan el off-peak de electricidad, a partir de estaciones de potencia nuclear o sistemas de operación solar para la electrólisis del agua.



Esto significa una utilización anual relativamente baja de la instalación menor a 3 000 h/año. Durante un bajo tiempo, lo cual puede dar mas de 5 000 h/año, las celdas pueden ponerse en marcha a una sola temperatura. Con un modo de operación semejante, los cátodos y ánodos en el caso de una celda bipolar descargan mutuamente la mitad de ellos vía platos bipolares Fig.28 tanto que su potencial puede alcanzar estas zonas, en la cuales, por ejemplo, níquel como el electrodo o material catalizador puede ser puesto en peligro por la corrosión. Con la celda monopolar, el circuito puede ser simplemente un interruptor durante tiempo fuera de servicio en que se espera aumente la resistencia a la corrosión. En un caso semejante las medidas de protección pueden por consiguiente ser tomadas para las celdas bipolares (protección de voltaje etc). Estas pueden no ser necesarias en las celdas monopolares.



3.5 PLANTAS INDUSTRIALES PARA LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

3.5.1 Observaciones Generales.

Algunas inspecciones son aprovechables en los electrolizadores de agua comerciales. La mayoría de ellos trata con electrolizadores alcalinos.

Una tabla de datos técnicos de un número de electrolizadores de agua reflejan el progreso de las técnicas que pueden existir.

La electrólisis del agua es todavía sólo una tecnología en progreso para obtener el Hidrógeno a partir de energías no fósiles o sea energías renovables. Por eso, la estimulación para recientes extensiones de la energía nuclear en Francia, Bélgica, Canadá y Japón, sin embargo el interés particular que se tiene en estas ciudades, es la producción electrolítica del Hidrógeno.

La electrólisis del agua puede servir para la nivelación de carga y simultáneamente para el almacenamiento de energía. Para las ciudades de tercer mundo, esta oferta ofrece la posibilidad de cubrir las demandas de Hidrógeno para fertilizantes artificiales evitando la importación de aceites y de exportación de energía solar en un futuro.

Hoy la mayor parte de la industria del Hidrógeno es producida a partir de gas natural y combustibles fósiles.

La electrólisis del agua generalmente no puede competir con estos métodos y está todavía en expansión, principalmente porque los costos de electricidad son prohibitivamente altos. Sin embargo las viejas técnicas y las celdas monopolares simples deben ser reemplazadas gradualmente en el mundo salvaje por las energéticamente más efectivas que son las celdas bipolares.



La tabla 3 muestra una comparación de varios electrolizadores selectos comúnmente aprovechables en el mercado.

TABLA 3
Parámetros típicos de operación para las celdas

| Manufacturera | Electrolyser Corp. Ltd. | Brown Boveri & Cie | Norsk Hydro A.S. | DeNora S.P.A. | Lurgi GmbH | Krebskosmo Berlin |
|---|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Tipo de celda | Tanque monopolar | Bipolar a presión | Bipolar a presión | Bipolar a presión | Bipolar a presión | Bipolar a presión |
| Presión de Operación | 0.1MPa | 0.1MPa | 0.1MPa | 0.1MPa | 3 MPa | 0.1MPa |
| Temp. de Operación | 70°C | 80°C | 80°C | 80°C | 90°C | 80°C |
| Electrolito | 28% KOH | 25% KOH | 25% KOH | 29% KOH | 25% KOH | 25% KOH |
| Densidad de Corriente kA/m ² | 1.34 | 2.0 | 1.75 | 1.85 | 1.86 | 1.85 |
| Voltaje por celda, V. | 1.9 | 2.04 | 1.75 | 1.85 | 1.86 | 1.85 |
| % eficiencia de corriente | 99.9 | 99.9 | 98.0 | 98.5 | 98.75 | 98.5 |
| % pureza de Oxígeno | 99.7 | 99.6 | 99.3-99.7 | 99.6 | 99.3-99.5 | 99.5 |
| % pureza de Hidrógeno | 99.9 | 99.8 | 99.8-99.9 | 99.9 | 99.8-99.9 | 99.9 |
| Potencia de consumo DC-kWh/Nm ³ H ₂ | 4.9 | 4.9 | 4.3 | 4.6 | 4.5 | 4.5 |

*NOTA: La corriente requerida para 1 Nm³ de Hidrógeno = 2 393 A h.

La tabla 4 lista la localización de algunas de las plantas principales de electrólisis del agua, en todo el mundo.

Disco Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 7.7 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible



TABLA 4

Plantas de Hidrógeno por diferentes Manufactureras.

| LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA | MANUFACTURERA | CAPACIDAD Nm ³ H ₂ /h. |
|---------------------------|--------------------------|---|
| Nangal, India | DeNora | 30 000 |
| Aswan, Egipto | Brown Boveri | 33 000 |
| Ryukan, Norway | Norsk hydro | 27 900 |
| Ghomfjord, Norway | Norsk Hydro | 27 100 |
| Trail, Canada | Trail | 15 200 |
| Cuzco, Perú | Lurgi | 4 500 |
| Huntsville, Alabama | Electrolyzer Corporation | 535 |

3.5.2 Tanques Tipo Celdas Monopolares.

La Fig.29 muestra un esquema de un electrolizador monopolar. Uno de los primeros electrolizadores de agua técnicos viene a partir de Knowles. Fauser produjo un diseño el cuál puede ser descrito como compacto. Conduciendo a la construcción del tanque tipo celda que hoy en día se utiliza, diseñado por Stuart. La celda Stuart Fig.29 consta de un tanque de acero niquelado rectangular, cubierto por una tapa, a través de la cuál los electrodos de acero son inmersos en el tanque.

Los compartimientos de Oxígeno, separadores de asbesto y electrodos son soportados por la celda cubierta de gas seguro. El diafragma que rodea cada ánodo y portador de Oxígeno evoluciona dentro del compartimiento del ánodo, situado bajo la tapa de la celda. El Hidrógeno es colectado en el otro lado del diafragma, en el compartimiento del cátodo.



Los electrodos son eléctricamente aislados desde la tapa de la celda.

La construcción de esta celda da una gran efectividad en la superficie del electrodo con requerimientos de espacio mínimos.

La celda opera a 70°C con 28% de KOH con una densidad de corriente aproximadamente de 1.5 kA/m².

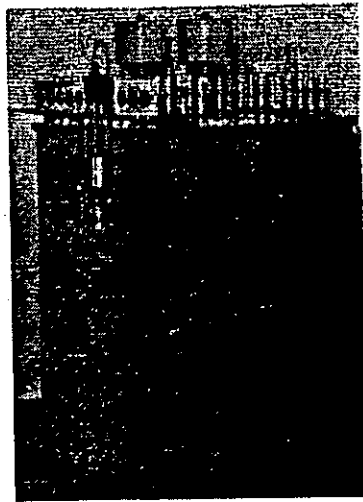


Fig. 29 18 000 amperes en la celda monopolar Stuart tipo tanque.

En el diseño monopolar clásico, los caminos de la corriente son básicamente guiados a lo largo del electrodo. Las desventajas asociadas con esta son mejoradas en la generación I y II de las celdas Stuart, para la simulación del flujo de corriente acordado en los principios de la celda bipolar, Fig.30 tanto que esta es una nueva posibilidad para incrementar la densidad de corriente a 2.5 kA/m². y simultáneamente baja el voltaje de la celda a 1.85 V.

La conexión entre los electrodos de una celda a la otra no son largas entre las secciones superiores de los electrodos sumergidos en el diseño de esta celda pero los electrodos son conectados unos de otros mediante barras de cobre integradas dentro de la pared de la celda, como se muestra esquemáticamente en la Fig.30.



Un progreso mas allá fue alcanzado en la generación II pero reduciendo la resistencia interna y decreciendo el sobrevoltaje del electrodo para mejorar principalmente la temperatura de operación.

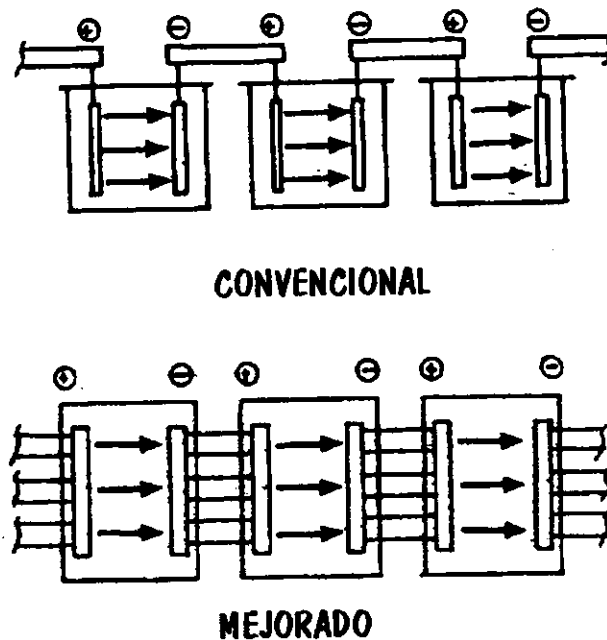


Fig. 30 Ruta de corriente esquemática para electrolizadores monopolares convencionales y avanzados.

3.5.3 Celda Bipolar con Filtro Comprimido.

Este diagrama básico del electrolizador bipolar es mostrado en la Fig.30. Las celdas bipolares son manufacturadas por varias firmas. Estas son generalmente operadas a presión ambiental, sólo LURGI GMBH produce dispositivos a presión.



3.5.3.1 Brown Boveri Y Celdas Cie.

El precursor de la presente celda BBC, es el electrolizador Oerlikon-Schmidt. Las plantas modernas son diseñadas semejantes debido a que ellos requieren un esfuerzo muy pequeño para su operación y servicio.

En el bloque de celdas bipolares del electrolizador BBC los productos (gases) son alimentados a partir de cada celda individual dentro de los separadores de gas por medio de tuberías simples. Fig.31.

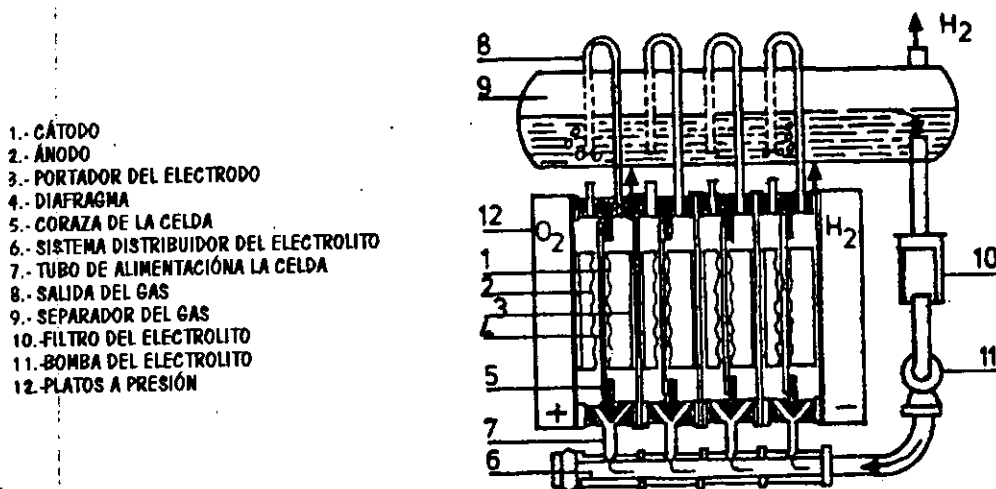


Fig. 31 Esquema de la sección transversal de un electrolizador BBC.

Las celdas se componen de celdas armadas con diafragmas, una separación bipolar, junto con el ánodo y el cátodo, como se muestra esquemáticamente en la Fig.32.

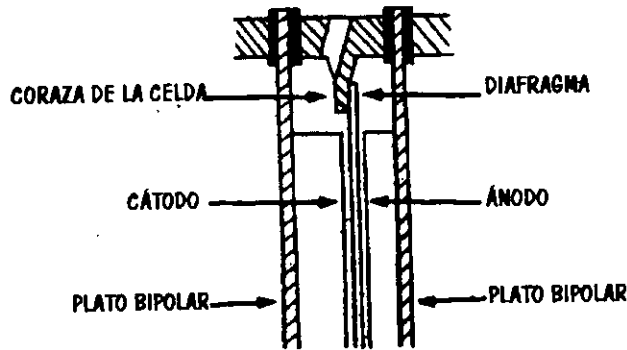


Fig. 32 Estructura de la celda básica de un electrolizador BBC.

El ánodo está hecho de acero niquelado y el cátodo consta de acero activado electrocatalíticamente.

Las separaciones bipolares metálicas con el diafragma son aisladas eléctricamente desde la armazón de la celda. Los gases separados por el diafragma elevado debido a su propia flotación y dejando la celda en forma de una mezcla gas-electrolito, la cual es alimentada a separadores de gas a través de tubos inundados Fig.31. Ellos son equipados con recubrimiento transparente en los tubos permitiendo el control visual del gas producido y la circulación del electrolito. Al final las tuberías inundadas tienden a descender estos creando una cerradura segura para cada celda individualmente.

Brown Boberi produce unidades electrolíticas con una capacidad de producción entre 5 y 300 Nm³ H₂/h.

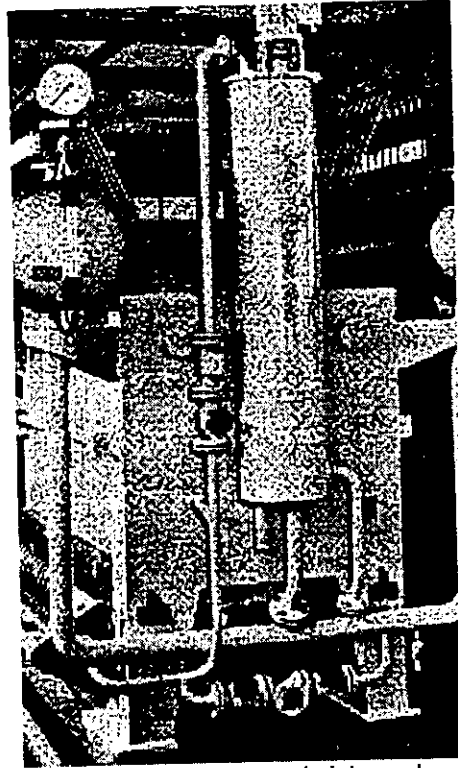


Fig. 33 Electrolizador BBC con una capacidad de producción de $10 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$.

La Fig.33 muestra una fotografía de un electrolizador de agua BBC típico. Las características técnicas se dan en la tabla 3. La planta de electrólisis del agua BBC en Asswan se muestra en la Fig.34.

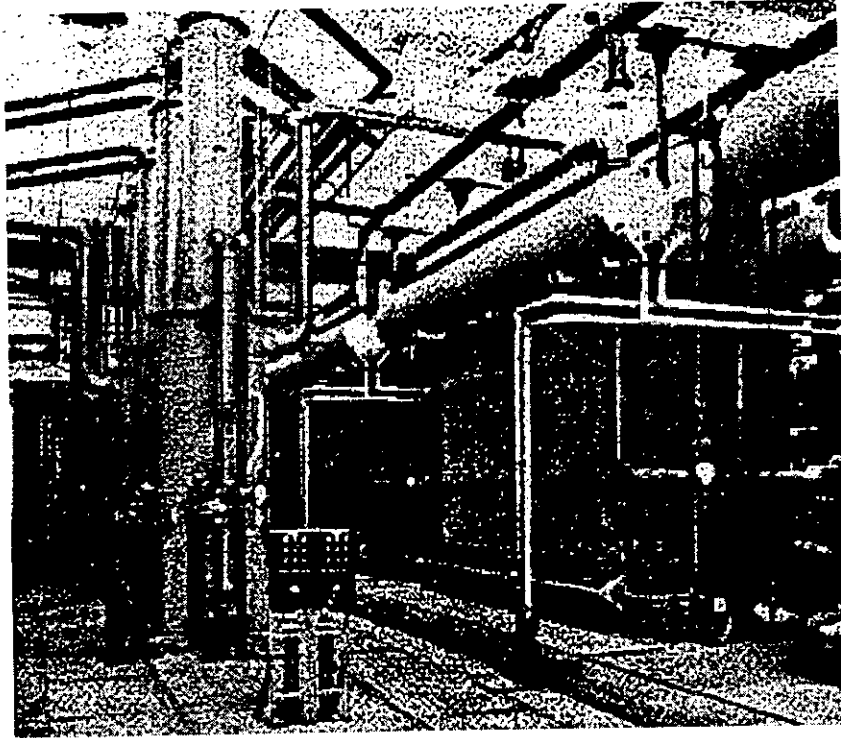


Fig. 34 Electrólisis de agua en la Planta BBC en Asswan.

3.5.3.2 Celdas Krebskosmo.

Krebskosmo en Berlín construyó una planta para la electrólisis del agua en 1972. El aparato Krebskosmo del tipo WE puede producir entre 20 y 200 Nm³ H₂/h. En la Fig.35 se muestra un diseño de un electrolizador típico de estas series.

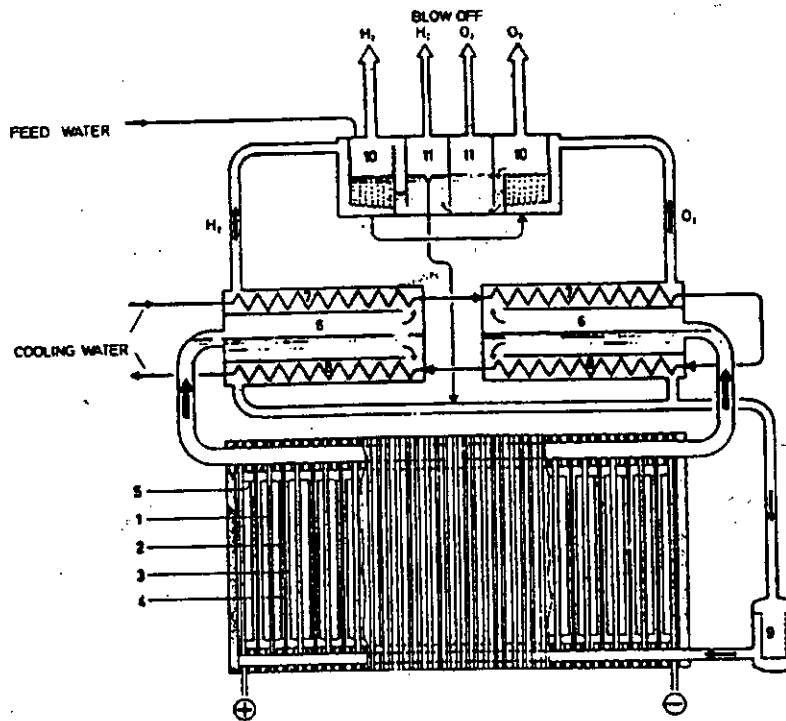


Fig. 35 Sección transversal esquemática de un Electrolizador de agua Krebskosmo de las series WE.

Los platos bipolares de acero niquelado lleva una perforación niquelada en el ánodo y una perforación de acero niquelado en el cátodo. Los cátodos son cubiertos por una capa de Ni-S activado catalíticamente. Los diafragmas de asbestos son sellados con un empaque de goma. El electrolito ha circulado por el gas elevado. La mezcla electrolito/gas pasa a través de los separadores los cuales fueron diseñados como enfriadores. Los gases producidos son alimentados dentro de un recipiente compensador de presión el cuál compensa algunas posibles fluctuaciones en la presión. Este recipiente tiene una cerradura de emersión segura para la descarga rápida del gas en el caso de un desequilibrio en la presión.

La planta de electrólisis del agua Krebskosmo del tipo WE Fig.36 son aprovechables en tres medidas standard de 60, 135 y 200 Nm³ H₂/h.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

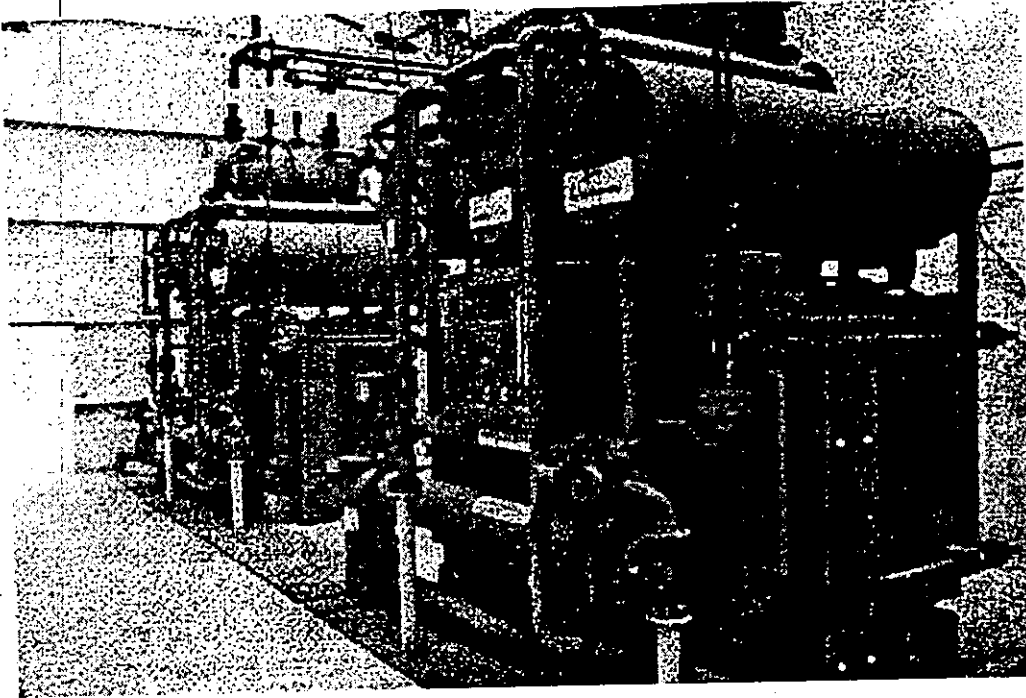


Fig. 36 Dos Electrolizadores Bipolares de agua Krebskosmo, con una capacidad de producción de $200 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ cada uno.

3.5.3.3 Celdas Norsk Hydro.

Estas plantas de electrólisis de agua son construidas comercialmente desde 1927, originalmente fueron hechas para la producción de amoníaco. La Fig.37 muestra un esquema de la estructura de la celda.

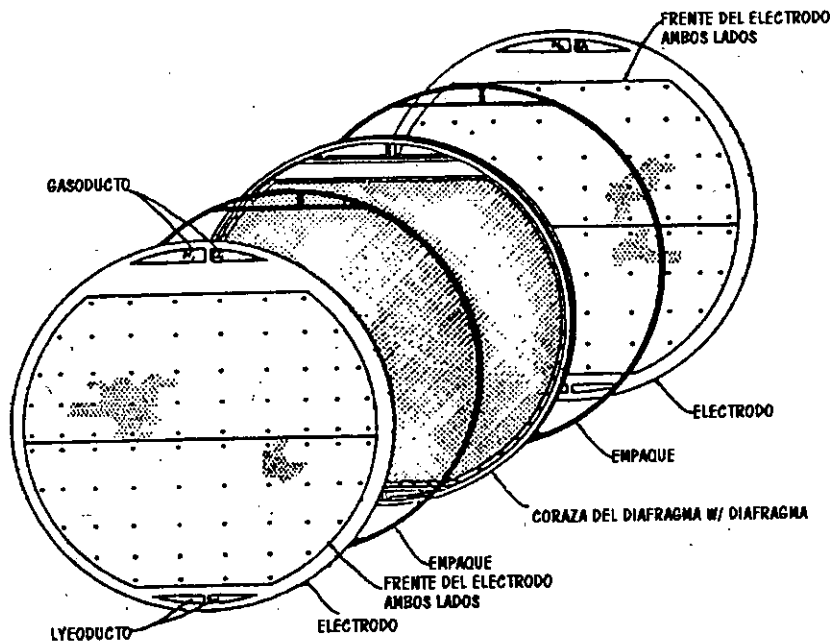


Fig. 37 *Electrolizador Norsk Hydro vista explotada de una celda electrolizadora.*

Los dos electrodos constan de láminas de metal perforadas y son arrojados al plato bipolar. Estos son encaquetados por una activación especial, generalmente NiS. Electrodos, empaques y diafragmas son comprimidos juntos por grandes cerrojos. El diafragma de asbestos es reforzado por hilos de níquel para incrementar su estabilidad mecánica. Los prototipos para producir gases y los electrolitos son integrados dentro de la alta o baja porción de la coraza del diafragma respectivamente Fig.37. La construcción en forma de sándwich permite hacer celdas muy delgadas.

Todos los componentes metálicos son hechos de acero blando reforzado en sus puntos críticos por una capa de níquel. La Fig.38 muestra la planta de generación de Hidrógeno típica Norsk Hydro. Y los datos acerca de esta se pueden encontrar en la tabla 3.

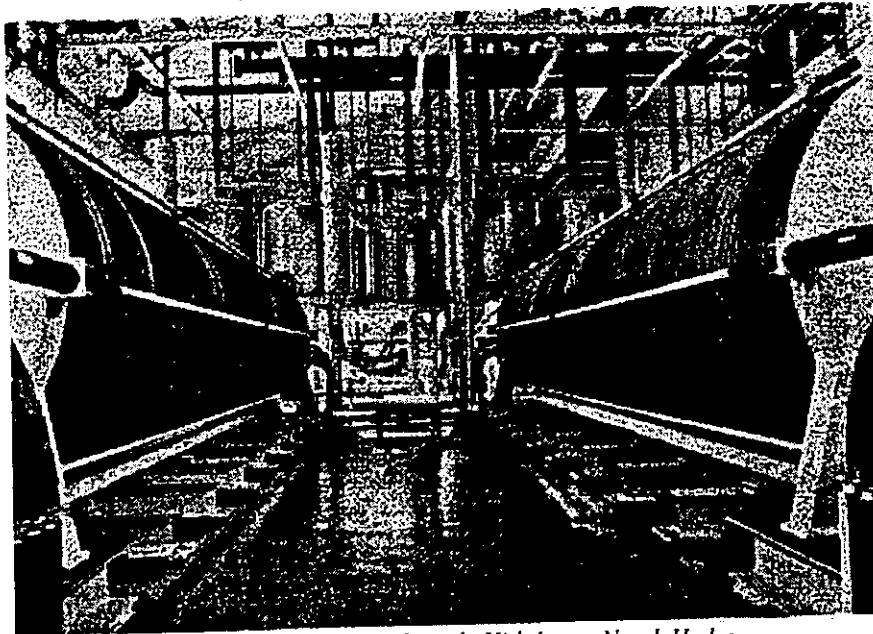


Fig. 38 Planta Generadora de Hidrógeno Norsk Hydro.

Este tipo de electrolizador normalmente tiene un electrodo simple que mide 2.1 m² permitiendo una densidad de corriente de 1 700 A/m² con una carga de corriente de 3 600 A. El electrolizador puede ser utilizado para la producción de Hidrógeno en gran escala.

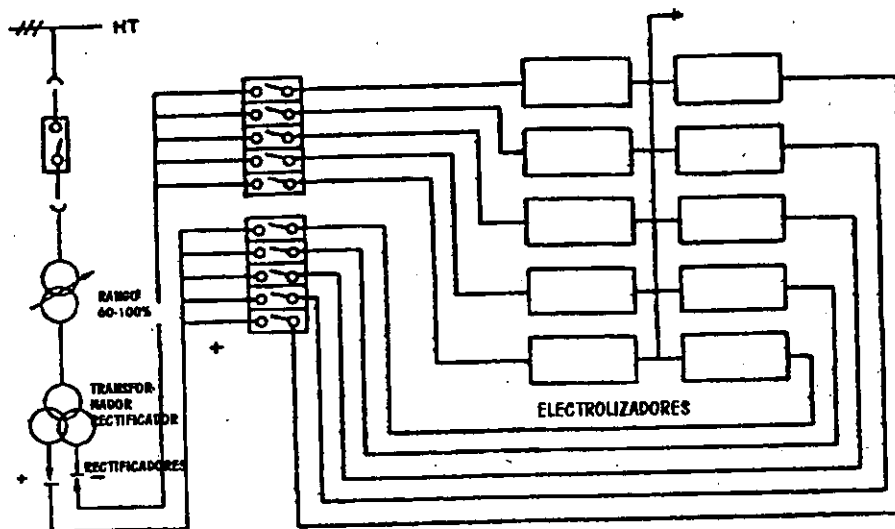


Fig. 39 Transformador y diagrama rectificador incluyendo una batería de electrolizadores.



La instalación del diafragma Fig.39 para una planta grande con la mitad de tierras deja las secciones de cruce de las obstrucciones de cable se reducen lo cual mantiene los puertos fuera para la producción de gases y el electrolito con un voltaje cero. Esto reduce la corrosión y los riesgos de operación.

3.5.3.4 Celdas DeNora S.P.A.

Los elementos bipolares de las celdas DeNora constan de una coraza de acero rodeando el plato bipolar la cual dilata el metal de los electrodos que son conectados en ambos lados. El metal dilatado de los electrodos, tanto el ánodo como el cátodo son de acero blando niquelado y azufre activado.

Los electrolizadores utilizan un tejido doble en los diafragmas de asbesto de un diseño especial. Durante la operación normal, los diafragmas son presionados entre uno y otro, pero alguna penetración de burbujas de gas da como resultado la formación de grandes burbujas entre los diafragmas, las cuales no se pueden desahogar a la salida debido a la oposición del gas interno. Estos diseños prevén efectivamente la posibilidad de formación de una mezcla de gas explosiva y da particularmente gases puros, pero a expensas de un alto voltaje en las celdas.

Los electrolizadores DeNora tienen medidas Standard entre 2 500 y 12 000A.



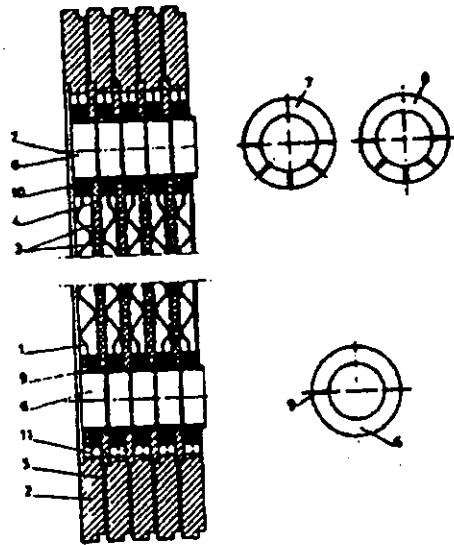
3.5.3.5 Celdas LURGI GmbH.

El electrolizador a presión LURGI explota la fracción de volumen reducido del gas en el electrolito produciendo una conductividad electrolítica mejorada. Los aparatos producen gas a una presión de 30 bar la cual es suficiente para muchos consumidores.

Debido a la alta presión de operación en el sistema y consecuentemente el pequeño volumen específico de los gases, las celdas y también el gas y los canales electrolíticos pueden ser obtenidos relativamente en estrechos volúmenes en comparación al caso de la electrolisis atmosférica. Por consiguiente el electrolizador a presión es más compacto que los otros. Sin embargo, la manufactura de estos diseños son más sofisticados que los que no operan a presión. En particular, la gran seguridad de protección en contraste al exceso de presión requerida.

Un realce empanelado con una lámina de acero niquelado sirve como un plato bipolar, para el cual se fabrican alambres de acero niquelado para su aplicación como electrodos.

Ambos son presionados de ambos lados como ese muestra en la Fig.40. Las corazas de las celdas son aisladas eléctricamente una de la otra con un empaque de teflón.



- 1.- PARED DE PARTICIÓN DE LA CELDA
- 2.- CORAZA DE LA CELDA
- 3.- ALAMBRE GAUZE DE LOS ELECTRODOS
- 4.- DIAFRAGMA DE ASBESTOS
- 5.- EMPAQUE CIRCUNDANTE
- 6.- DUCTO DEL ELECTROLITO
- 7.- DUCTO DE HIDRÓGENO
- 8.- DUCTO DEL OXÍGENO
- 9.- BARRENOS EN LOS DUCTOS DEL ELECTROLITO
- 10.- BARRENOS EN EL DUCTO DEL GAS
- 11.- ABERTURA EN LA PARED DE PARTICIÓN DE LA CELDA

Fig. 40 Vista seccional de la celda electrolizadora LURGI.

La Fig.41 presenta una vista seccional, y la Fig.42 una vista completa de este electrolizador el cual a una potencia de 1 MW produce aproximadamente $220 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$.

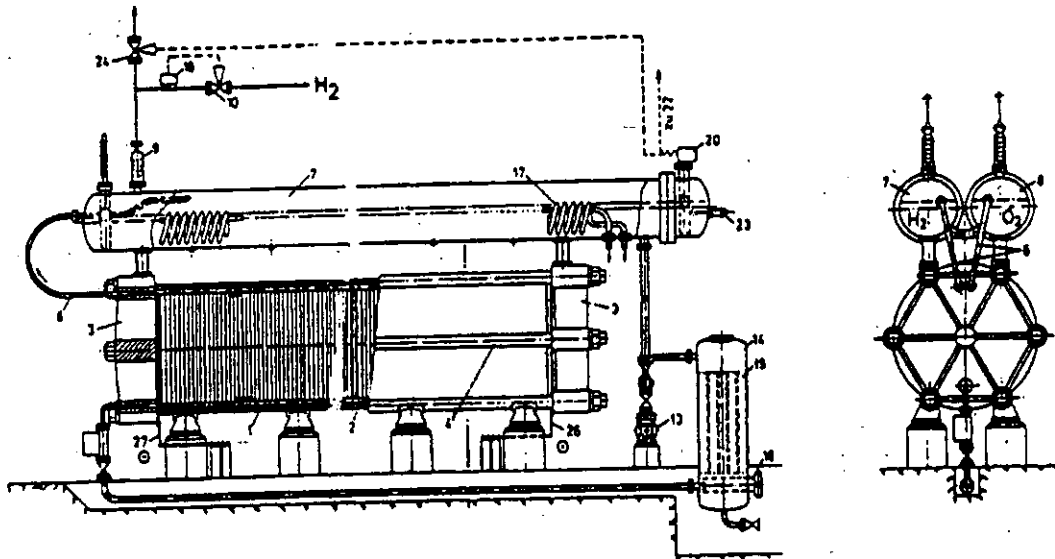


Fig. 41 Vista seccional y final del Electroizador LURGI.

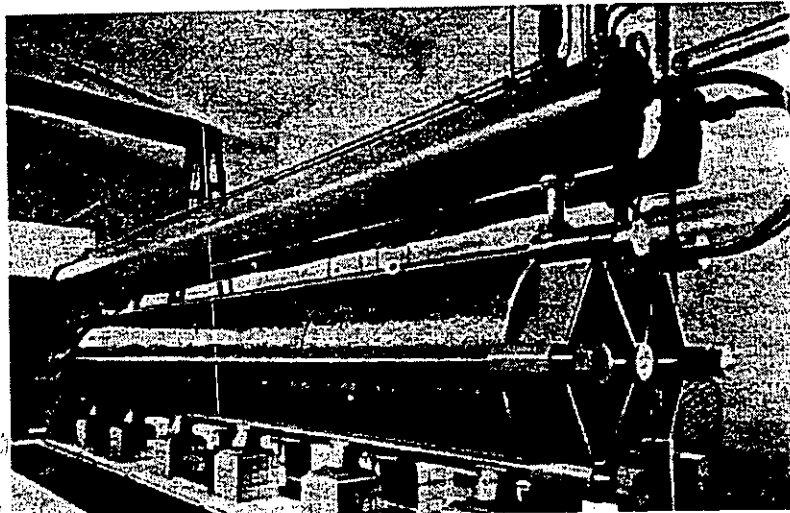


Fig. 42 Fotografía del Electroizador LURGI instalado en la compañía.

Los datos técnicos de pueden encontrar en la tabla 3.

3.6 CONDICIONES BÁSICAS DE SEGURIDAD

Es necesario considerar la seguridad en cada paso del diseño, fabricación, ensamble y operación del sistema de Hidrógeno. Para el presente sistema con una mayor seguridad se incluye:

1. Asegurar que la máxima corriente de operación del electrolizador nunca sea excedida.
2. Asegurar que no existan fugas de gases en el sistema.
3. Asegurar que la presión máxima de operación nunca se exceda.
4. Excluir la posible ignición de las fuentes a partir del área de las salidas del Hidrógeno y Oxígeno.
5. Separación de salidas de Oxígeno e Hidrógeno

La referencia 1 proporciona una descripción general del Hidrógeno y contenedores de Hidrógeno. Y de la referencia 2-4 intentan proporcionar una introducción a la seguridad del Hidrógeno. Esta es una responsabilidad del experimentador desarrollar el trabajo apropiado de los requerimientos de seguridad para el Hidrógeno.



CONCLUSIONES

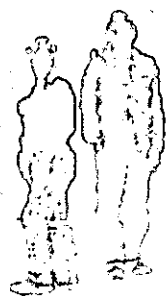
Se describió el estado del arte de la Electrólisis del agua con el objetivo de dar un panorama más amplio acerca de todo lo que envuelve a la celda electrolítica.

Haciendo notar, que ya existen un gran número de electrolizadores en el mercado, los cuáles podemos adaptar al prototipo propuesto, o sea, que no es necesario diseñarlo mecánicamente, sino que con sólo algunos cálculos, como los mostrados en los capítulos anteriores, podemos cotizar aquel equipo que cubra las necesidades de nuestro prototipo.

Lo cuál nos demuestra que el cambio no está lejos, que podemos empezar.



Conclusiones Generales





CONCLUSIONES

Como todos sabemos el ser humano necesita cada vez más fuentes de energía para poder continuar el desarrollo de este, pero a la vez estas fuentes deben ayudar a mantener el equilibrio del planeta, es por eso que:

1. Se propone al prototipo anterior como una importante alternativa para en un futuro cercano modificar nuestra forma de generar energía.
2. Se espera que la existente tecnología de electrólisis pueda ser adaptada a la presente aplicación con no mayores problemas técnicos.
3. La adición del apropiado sistema de control puede proporcionar una segura operación automática.
4. Es sabido que las actuales formas de aprovechar los combustibles no es óptima, un ejemplo de esto es el motor de combustión interna el cual presenta un pobre rendimiento (cerca del 18% de eficiencia), y altas emisiones de contaminantes. Es por esto que las Celdas de Combustible y los Ciclos de Potencia Combinados son una excelente forma de aprovechar la energía y proteger el medio ambiente. Como se mostró en este proyecto estos presentan un rendimiento muy bueno y una sola emisión que es el agua, el funcionamiento de las Celdas de Combustible es muy sencillo ya que solo consiste en una



reacción química y no requiere piezas adicionales y complicadas para poder funcionar (como el motor de OTTO). Es por eso que presenta una gran aplicación en todos los campos del desarrollo humano. Es importante destacar que la tecnología de la Celda de Combustible esta totalmente desarrollada y sólo falta poder bajar los costos de producción para poder masificar el uso de éstas.


5. Aunque los costos de inversión parecen ser muy altos, se debe considerar que la implementación de todo cambio, siempre induce un gasto, pero este es justificado, si consideramos, que este sistema nos hará no depender de las energías fósiles, además de que nosotros mismos podremos producir, la cantidad de electricidad que abastezca nuestras necesidades. Y así en un futuro, la electricidad mundial será relativamente independiente, para así dar uso de las fuentes de energía actualmente utilizadas de una forma realmente aprovechable, en lugar de ser quemadas.
6. El sistema propuesto tiene tan sólo una eficiencia total del 5.6%, que al ser comparadas con las eficiencias en la producción de electricidad que se obtienen a partir de las fuentes de energía actualmente utilizadas (aprox. 4%), esto sin mencionar el sin número de ventajas a nivel ambiental, muestran una mejora buena, pero aún no lo suficiente. La eficiencia del sistema de almacenamiento de energía, incluyendo al electrolizador, el almacenador de gas, la celda de combustión y el convertidor DC-AC es aproximadamente el 39%.



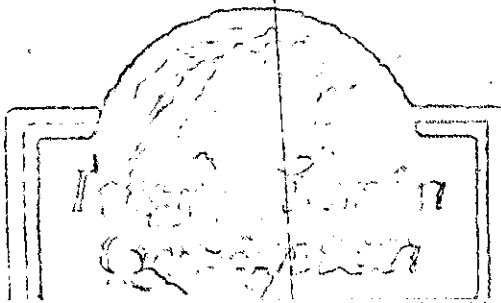
CONCLUSIONES

Un incremento de esta eficiencia resulta de una disminución proporcional del costo de producción de energía eléctrica.

7. Para la implementación de este sistema en un futuro, se puede conseguir un financiamiento comunal, en diferentes organizaciones como podría ser el EL BANCO MUNDIAL, PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), FINESSE (Financiamiento de Energía Renovable para consumidores de Energía en pequeña escala) entre otros.



Bibliografía
Glosario
Abreviaturas



**BIBLIOGRAFÍA****ARTÍCULOS**

1. Robert Swarfekamp, PE. Associate Editor. *Single-shaft combined cycle power in at low cost.*
2. Gustav P. Dinga, (1989). *Hydrogen: The Ultimate fuel and Energy Carrier*, Hydrogen Energy, Vol. 14 No. 11 pp. 777-784, 1989.
3. Daniel Morgan and Fred Sissine (1995). *Hydrogen: Technology and policy.*
4. J.P. Vanhanen, P.S. Kauranen, P.D. Lund & L.M. Manninen (1994) *Simulation of Solar Hydrogen Energy Systems*, Solar Energy, Vol. 53. No. 3 pp. 267-278, 1994.
5. Moritaka Kato, Shouji Mezawa, Kouichi Sato (1998). *Polymer-Electrolite Water Electrolysis*, Applied Energy, Vol. 59. No. 4 pp.261-271, 1998.
6. D.Dini (1982). *Hydrogen Production through Solar Energy Water Electrolysis*, Hydrogen Energy, Vol. 8 No. 11/12 pp. 897-903, 1983.
7. R.L. LeRoy (1982). *Industrial Water Electrlysis: Present and Future*, Hydrogen Energy, Vol. 8 No. 6 pp. 401-417, 1983.
8. G. De Beni (1982). *Thermochemical Proceses for Hydrogen Production by Water splitting.*
9. Rafael Sánchez Dirzo (1998). *Chan K'iin: Las Fuentes de las Energías Renovables.*
10. Mark. A. Daugherty (2000). *Electrolytic Production of Hydrogen Utilizing Photovoltaic Cells.*
11. C. Mender, H. Barthels, W.A. Brocke, B. Emonts & H. G. Groehn (2000). *Phoebus an Autonomous suplly system with renewable energy: Six years of opérational experience and advanced concepts.*
12. A. Goetzberg (1995) *Solar Energy the key to a sustainable World.*
13. Lisa W. Shepperd & Elizabeth H. Richards (2000). *Energía Solar Fotovoltaica para Proyectos de Desarrollo.*
14. Kristoferson, L.A. y V. Bokalders (1991). *Renawable Energy Technologies, Their Aplications in Developing Countries.*
15. Sandia Technology Vol. 3 No.1 (2000). *Developing the Energy Resources for the New Era.*



LIBROS

1. Gilbert. William. Castellan. *Physical Chemistry*. Ed. 2. Editorial. SITESA. 1924.
2. Maron & Proutton. *Fisicoquímica*. Editorial. LIMUSA. 1996.
3. Ernesto Ureta Barron. *El Equilibrio Químico*. Editorial. LIMUSA. 1975.
4. Mark *Termodinámica*. Editorial. Mc. Grow Hill.
5. William Craig Reynolds. *Enginner Thermodynamics*. Editorial. Mc. Grow Hill. 1933.
6. García Collin, Leopoldo Sherer *Introducción a la Termodinámica Clásica*. Editorial. TRILLAS. 1970.
7. Virgil Moring Faires. *Thermoyinamics*. Ed. 4. Editorial. Mc. Grow Hill. 1897.
8. Zemansky. *Termodinámica*. Editorial. Mc. Grow Hill.
9. S. Kunstreich and J. Sterlini. *Theoretical efficiency limit of Water electrolysis and practical means to approach it in "Hydrogen Energy System" Vol.5*. 1979.
10. A.T. Kuhn, ed. *Industrial Elektrolyse Process*, Elsevier, Amsterdam, 1971.
11. R.L. LeRoy, Ch.T. Bowen and D.J. LeRoy, J. *Electrochem*. 1980.
12. Evangelista, B. Phillips, and L. Gordon, *Electrolytic Hydrogen Production, an analysis an review, NASA*.
13. J. Balej, Int. J. *Hydrogen Energy*, 10 (1985)
14. M.S. Casper, ed. *Hydrogen Manufacture by Electrolysis, Thermal Descomposition and Unsual Techniques, Noyes Data Corporation, Parrk Ridge*, 1978.
15. Y. Abe, T. Fujimaki, M. Matsubara, Y. Tanaka. *Hydrogen Production by High Temperature, High Pressure water Electrolysis in: Hydrogen Energy Progress IV*.
16. J.W. Holmes and R.E. White, in: *Electrochemical Cell Design*, R.E. White, ed. Plenum Press. 1984.
17. Charles Kittel, *Física Térmica*. Editorial. Reverté. 1972.



DIRECCIONES ELECTRONICAS

1. <http://www.cubicsci.com/chem/hs/index%20search/electro.htm>
2. <http://engineer.tamu.edu/tees/ceshr/center.htm>
3. <http://www.stuartenergy.com>
4. <http://www.education.ram.gov/resources/h2/daugherty/education.html>
5. <http://www.hydrogenapphances.com/hydrogeneration.html>
6. <http://www.cnie.org/nle/eng-4.html>
7. <http://www.igc.apc.org/reanergy/fuelcl.html>
8. <http://www.crl.com/~rwicher/fuelcell.htm>
9. http://www.mpi-stuttgart.mpg.de/MAIER/research/projects/p_femsofc.html
10. <http://now2000.com/sjohnson/pagenews.html#CLEAN>
11. <http://www.fuelcell.kosone.com/>
12. <http://www.h2fc.com/defaultNS4.html>
13. <http://www.h2fc.com/infra.html>
14. <http://www.gmi.edu/~altfuel/fcmain.htm>
15. <http://www.harc.edu/fuelcell.html>
16. <http://www.fuelcellworld.org/>
17. <http://www.humboldt.edu/~serc/spanish/fuelcell.html>
18. <http://www.2hydro.com/eng/into/index.html>
19. <http://www.unep.org>
20. <http://www.imp.mx>
21. <http://www.upmf.grenoble.fr/iep/sites.html>
22. <http://www.hpower.com/edukit.htm>
23. <http://www.conae.com>
24. <http://www.nasa.gov>
25. <http://www.eren.doe.gov/Abalphabetical.htm/#h>
26. <http://www.annex14.ozweb.com>



GLOSARIO

Ánodo.- Electrodo conectado al polo positivo de un generador. En la electrólisis se depositan en él los aniones.

Cátodo.- Electrodo negativo del que parten los electrones. En la electrólisis se depositan en él los cationes.

Catalizador.- Sustancia con capacidad de acelerar o disminuir la velocidad de reacción química sin que ella misma sufra alteración.

Conducción electrónica.- Transferencia de electrones por emigración directa de los electrones a través del conductor bajo la influencia de un potencial aplicado. Aquí los átomos o iones que componen al conductor no intervienen en el proceso.

Conducción iónica.- La transferencia electrónica tiene lugar por migración iónica, positiva y negativa, hacia los electrodos. Esa migración involucra no sólo una transferencia de electricidad sino también el transporte de materia de una parte a otra del conductor, además siempre va acompañada de cambios químicos en los electrodos.

Corriente Alterna (AC).- Corriente eléctrica en la cual la dirección del flujo es invertida a intervalos frecuentes; 60 ciclos por segundo es usado en los Estados Unidos. Este es el flujo de corriente en una toma eléctrica de la casa o negocio.

Corriente Directa (DC).- Corriente eléctrica en la cual el flujo de los electrones circula solamente en una dirección. Este es el tipo de corriente producida por un sistema de energía solar. Para ser usado en aparatos electrodomésticos de 120 a 220 V. Debe ser convertida a corriente alterna.

Electrólisis.- Proceso químico en el cual, por medio de electricidad, el agua es separada en Hidrógeno y Oxígeno.

Electrolito.- Cualquier sustancia que en disolución se disocia en iones y, por lo tanto, es capaz de conducir la corriente eléctrica.

Energía.- Capacidad para ejecutar un trabajo.



Energía renovable.- Flujos de energía que son regenerables o virtualmente inagotables. Los que incluyen la energía solar (eléctrica y termal), biomasa, geotérmica, eólica, marejada y fuentes de energía hidroeléctrica.

Ión.- Átomo u otra partícula con carga eléctrica positiva (catión) o negativo (anión), como los existentes en una disolución.

kW.- Medida de Potencia eléctrica en una unidad de tiempo igual a la proporción de flujo (Amperios) multiplicado por el voltaje de ese flujo (Voltios).

kWh.- Medida de Electricidad igual a la potencia eléctrica multiplicada por la cantidad de tiempo (horas).

Laplaciano.- Operador matemático que puede actuar en dos o tres dimensiones.

Molaridad.- Es el número de moles de una sustancia llamada soluto.

Nafión ó Membrana Semipermeable.- La que permite el paso de las moléculas del disolvente, pero no las del soluto (en este caso el soluto son los electrones y el disolvente los protones de Hidrógeno).

Oxidación.- Reacción en la que la partícula de la sustancia oxidada (átomo o ión) pierde electrones.

Protón.- Partícula fundamental del átomo, con carga eléctrica positiva y masa 1836 veces mayor que la de el electrón; el número de protones (número atómico) determina la naturaleza de cada elemento.

Reducción.- Parte de una reacción, en la que una sustancia oxidante absorbe los electrones que la sustancia oxidada pierde.



ABREVIATURAS

| | |
|--------------------------------------|---|
| A | Área |
| ac | Corriente Alterna |
| C_{p(w)} | Capacidad Calorífica del Agua |
| D | Diámetro |
| dc | Corriente Directa |
| ρ | Conductividad eléctrica |
| ρ_c | Densidad de Corriente |
| ρ_e | Resistividad del espesor |
| ΔP_l | Diferencia de Presiones por Celda |
| ΔΔPP | Perdidas por fricción |
| E | Requerimiento Anual de Energía |
| E_a y E_c | Potenciales |
| e | Equivalente electroquímico |
| e | Eficiencia Total del Sistema |
| e_s | Eficiencia del Sistema de Almacenamiento |
| e_{ac} | Eficiencia de la Conversión de DC a AC |
| e_c | Eficiencia del Sistema de Control |
| e_e | Eficiencia de la Unidad Electrolítica |
| e_f | Eficiencia de la Celda de Combustible |
| e_{ph} | Eficiencia de la Celda Solar |
| H_{w(l)} | Entalpía Molar del Agua en fase líquida |
| I | Intensidad de Corriente |
| I_T | Intensidad de Corriente Total |
| I_(x) | Corriente |
| L | Longitud del electrodo |
| m | Masa |
| m | Molaridad |
| n | Número de Celdas |
| n_e | Número de Electrones intercambiados |
| η | Eficiencia energética de la electrólisis del Agua |
| η_a | Potencial Catódico (Sobre Voltaje en el cátodo) |
| η_c | Potencial Anódico (Sobre Voltaje en el ánodo) |



ABREVIATURAS



| | |
|--------------------------------------|---|
| P | Potencia |
| P_a | Peso Atómico |
| P_{cell} | Potencia por Celda |
| P_e | Potencia a la entrada de la Unidad Electrolítica |
| P_i | Constante de Radiación Solar máxima en México D.F. |
| P_s | Potencia de Salida de la Celda Fotovoltaica |
| P_T | Potencia Total |
| P_w | Presión de Vapor parcial del Agua |
| P_w⁰ | Presión de Vapor del Agua a condiciones Standard |
| PTFE | Poli-tetra-fluoro-etileno |
| Q_{ent} | Calor de Combustión a la entrada |
| Q_{sal} | Calor de Combustión a la salida |
| Q | Cantidad de Electricidad |
| R | Radiación Solar Total |
| R | Constante de los Gases Ideales |
| R_i | Resistencia Interna |
| R*₁ | Resistencia específica de la Superficie de la Celda del Electrolizador |
| R*_n | Inclinación de la Linealización aproximada |
| R_p y R_m | Resistencias que representan los puertos de distribución del fluido |
| t | Tiempo |
| t_E | Espesor del electrodo |
| U_{cell} | Celda de Voltaje Técnica |
| U_{ΔH} | Voltaje Entálpico |
| U_{rev,T,P} | Voltaje Reversible a Presión y Temperatura constante |
| U⁰_{rev,T} | Descomposición Termodinámica reversible de Voltaje correspondiente a la Energía Molar Standard de Gibbs |
| U_{tn} | Voltaje Termoneutral |
| U_{HHV,T,P} | Voltaje Entálpico para el Hidrógeno |
| V | Voltaje |
| W | Flujo másico |
| W_d | Energía utilizada directamente |
| W_{H2} | Flujo másico de Hidrógeno por celda |
| wt % | Por ciento en peso |
| Z | Resistencia semejante a la del diodo Zener |

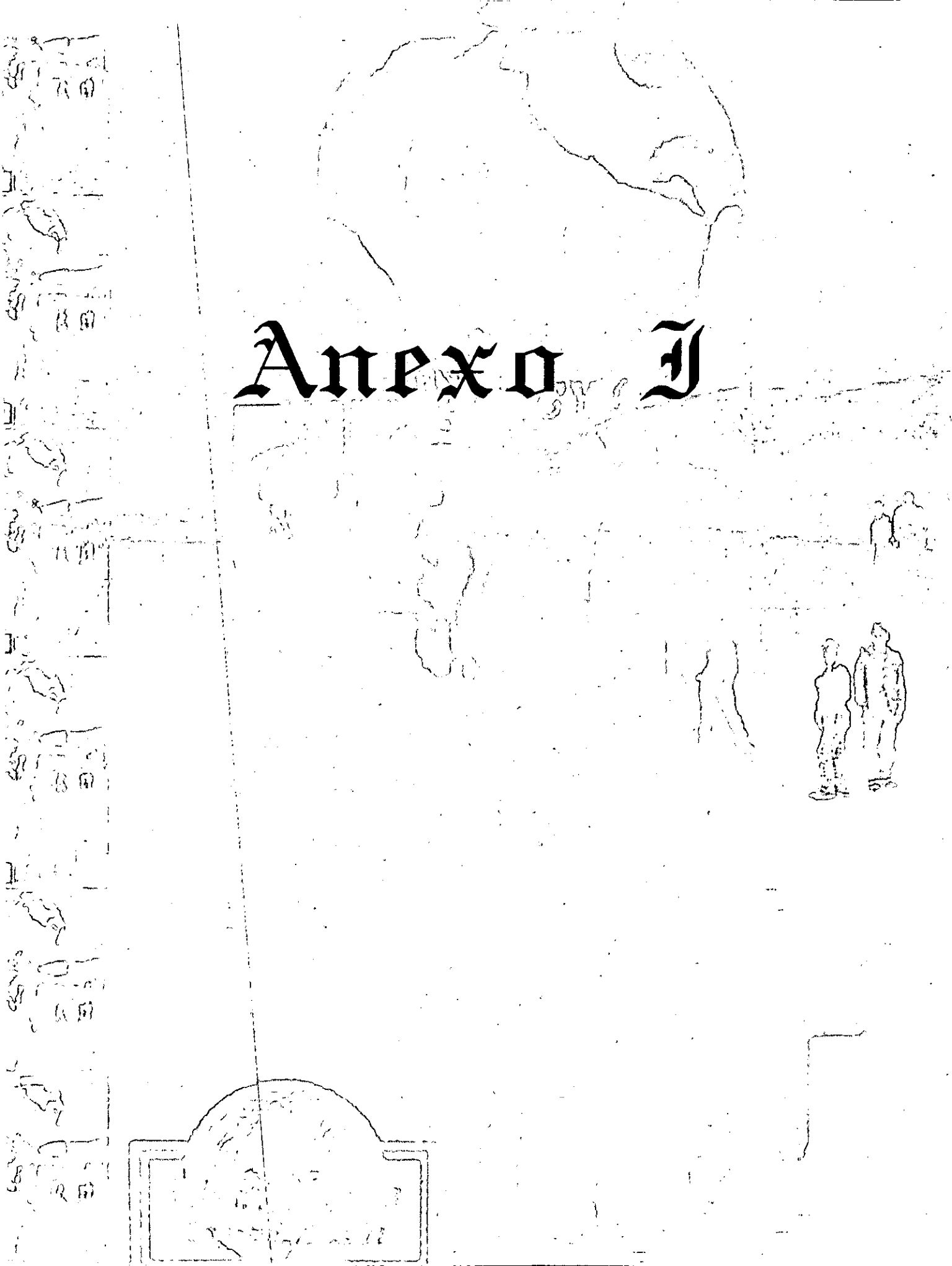
Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 7.7 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible



Alexos

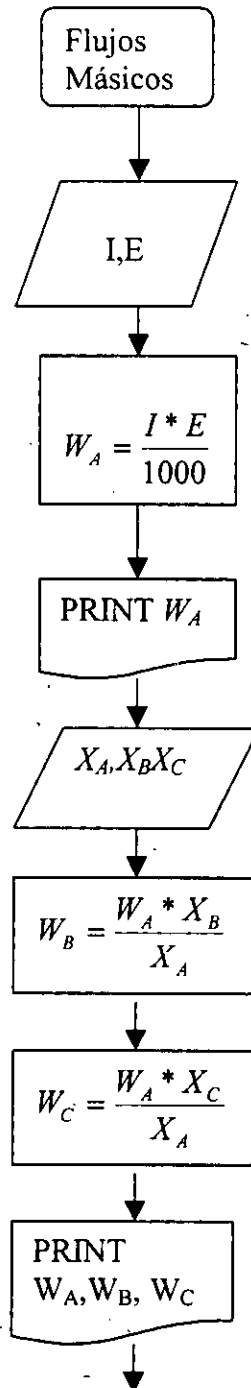
**Tecnología de Hidrógeno,
Para el Siglo XXI**

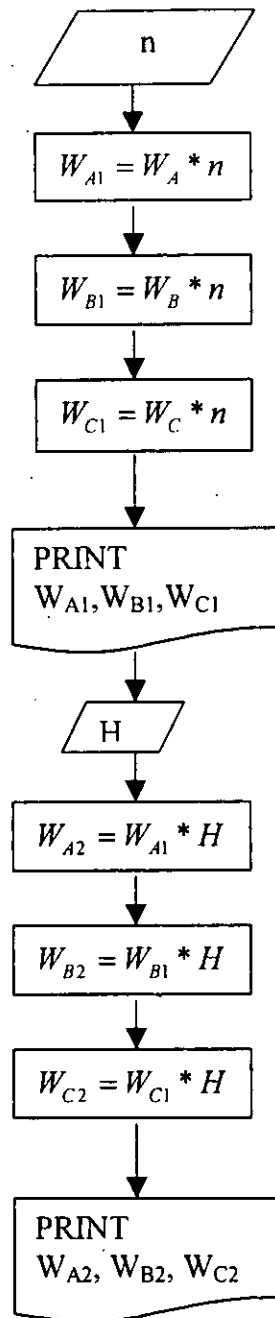
Анекс II



ANEXO 1

DIAGRAMA DE FLUJO PARA OBTENER LOS FLUJOS MÁSICOS







ALGORITMO PARA OBTENER LOS FLUJOS MÁSICOS.

1. Leer I (A), E_{H_2} (g/Ah)

2. Calcular $W_A = \frac{I * E_A}{1000}$

3. Leer X_A, X_B, X_C

4. Calcular $W_B = \frac{W_A * X_B}{X_A}$

5. Calcular $W_C = \frac{W_A * X_C}{X_A}$

6. Leer n

7. Calcular $W_{A1} = W_A * n$

8. Calcular $W_{B1} = W_B * n$

9. Calcular $W_{C1} = W_C * n$

10. Leer H

11. Calcular $W_{A2} = W_{A1} * H$

12. Calcular $W_{B2} = W_{B1} * H$

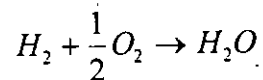
13. Calcular $W_{C2} = W_{C1} * H$

BALANCE DE MASA

Corriente 1

De la Ley de Faraday

$$W_{H_2} = \frac{IE}{1000} = \frac{125.66 A (0.0376 \frac{g}{Ah})}{1000 \frac{g}{kg}} = 0.004725 \frac{kg}{h} \quad (\text{Por celda})$$



Estequiométricamente para cada celda.

$$W_{H_2} = 0.004725 \frac{kg}{h}$$

$$W_{O_2} = \frac{0.004725(16)}{2} = 0.0377985 \frac{kg}{h} \quad (\text{Por celda})$$

$$W_{H_2O} = \frac{0.004725(18)}{2} = 0.0042525 \frac{kg}{h} \quad (\text{Por celda})$$

Para obtener el flujo másico total, multiplicamos por 32 celdas

$$W_{H_2} = 0.1512 \frac{kg}{h}$$

$$W_{O_2} = 1.209552 \frac{kg}{h}$$

$$W_{H_2O} = 1.3608 \frac{kg}{h}$$



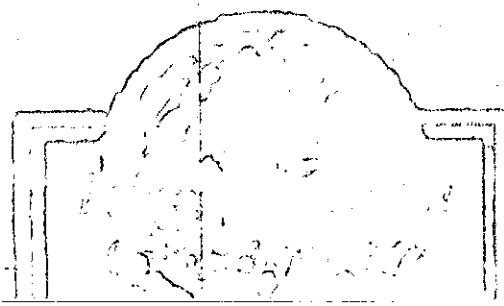
Multiplicando por las horas de sol durante el día = 5 h.

$$W_{H_2} = 0.1512(5) = 0.756 \frac{kg}{5h} = 0.756 \frac{kg}{día}$$

$$W_{O_2} = 1.209552(5) = 6.04776 \frac{kg}{5h} = 6.04776 \frac{kg}{día}$$

$$W_{H_2O} = 1.3608(5) \frac{kg}{5h} = 6.804 \frac{kg}{día}$$

Апexo III



Balance de Masa

| Corriente | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| H ₂ O(kg/día) | 6.804 | 6.804 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 |
| H ₂ (kg/día) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| O ₂ (kg/día) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P (bar) | 0.78 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| T (°C) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 95 | 95 | 95 | 95 |
| Fase | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida |

| Corriente | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|
| H ₂ O(kg/día) | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | * | * | * | * |
| H ₂ (kg/día) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.756 | 0 | 0.756 |
| O ₂ (kg/día) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.048 | 0 | 6.048 | 0 |
| P (bar) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| T (°C) | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 | 105 | 105 |
| Fase | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | gas | gas | gas | gas |

Apéndice 2

| Corriente | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H ₂ O(kg/día) | * | * | | * | * | * | * | * | * | * |
| H ₂ (kg/día) | 0 | 0.756 | * | * | | 0.756 | | 0.756 | | |
| O ₂ (kg/día) | 6.048 | 0 | * | | 6.048 | 0 | 6.048 | 0 | 3.024 | 3.024 |
| P (bar) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| T (°C) | 105 | 80 | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Fase | Liq/gas | Liq/gas | líquida | líquida | gas | gas | gas | gas | gas | gas |

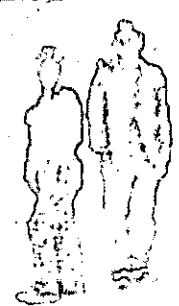
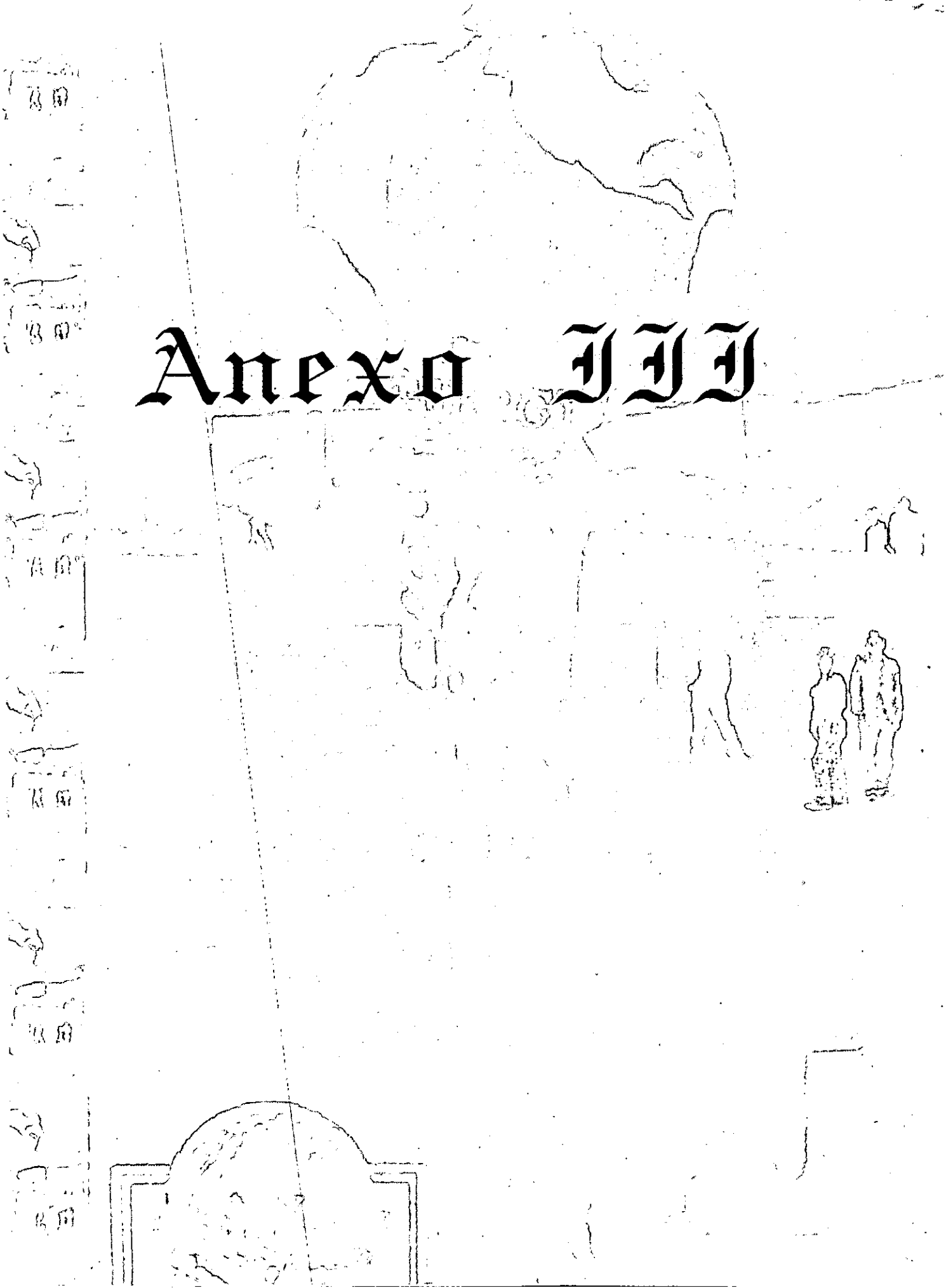
| Corriente | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H ₂ O(kg/día) | * | * | * | 0 | 0 | * | * | * | * | 0 | 0 | 0 |
| H ₂ (kg/día) | | | | 0 | 0 | 0.378 | 0.378 | 0.378 | 0.378 | 0.378 | 0.378 | 0.756 |
| O ₂ (kg/día) | 3.024 | 3.024 | 3.024 | 3.024 | 6.048 | | | | | 0 | 0 | 0 |
| P (bar) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| T (°C) | 80 | 80 | 70 | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 | 80 | 70 | 70 | |
| Fase | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas |

Diseño termo-dinámico de una celda electrolítica con capacidad de 7.7 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible.

Lista de Equipo

| CLAVE | SERVICIO |
|--------------|---------------------------------------|
| FB-1001 | Tanque de Almacenamiento de Agua |
| FB-1002 | Tanque de Almacenamiento de Hidrógeno |
| FB-1003 | Tanque de Almacenamiento de Oxígeno |
| FA-1001 | Separador Flash 1 |
| FA-1002 | Separador Flash 2 |
| FA-1003 | Separador de Neblina 1 |
| FA-1004 | Separador de Neblina 2 |
| EA-1001 | Enfriador de Solución de Hidrógeno |
| EA-1002 | Enfriador de Solución de Oxígeno |
| EA-1003 | Enfriador de Solución Electrolítica 1 |
| EA-1004 | Enfriador de Solución Electrolítica 2 |
| DA-1001 | Secador de Hidrógeno 1 |
| DA-1002 | Secador de Hidrógeno 2 |
| DA-1003 | Secador de Oxígeno 1 |
| DA-1004 | Secador de Oxígeno 2 |
| GA-1001/R | Bomba de Succión de Agua de entrada |
| GA-1002/R | Bomba para Solución Electrolítica 1 |
| GA-1003/R | Bomba para Solución Electrolítica 2 |
| FG-1001 | Filtro para Solución Electrolítica 1 |
| FG-1002 | Filtro para Solución Electrolítica 2 |

Апexo III



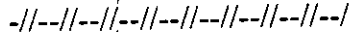






**SIMBOLOGÍA DE INSTRUMENTACIÓN**

| | |
|-------------------------------|-----|
| Alarma de alta | AH |
| Alarma de muy alta | AHH |
| Alarma de baja | AL |
| Alarma de muy baja | ALL |
| Elemento primario de división | E |
| Indicador | I |
| Indicador controlador | IC |
| Registrador | R |
| Registrador controlador | RC |
| Interruptor de alta | SH |
| Interruptor de muy alta | SHH |
| Interruptor de baja | SL |
| Interruptor de muy baja | SLL |
| Transmisor | T |
| Válvula de control | V |
| Convertidor de señal | Y |
| Botones locales | PB |



SÍMBOLOS DE LINEAS E INSTALACIONES DE INSTRUMENTOS

| | |
|---|---|
|  | Línea de Proceso |
|  | Línea de Servicios |
|  | Señal Neumática |
|  | Señal Eléctrica |
|  | Instrumento Instalado Localmente |
|  | Instrumento Instalado en el Tablero Local |
|  | Instrumento Instalado en el Tablero Principal |

168

26



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

DISEÑO TERMODINÁMICO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA CON CAPACIDAD DE 1 kW PARA USO EN UN PROTOTIPO PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD UTILIZANDO HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

T E S I S

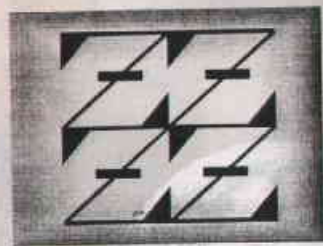
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

JENNIFER L. ^{Lorena} PÉREZ RAMOS

ASESOR: I.Q. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO



298810

MÉXICO D.F.

NOVIEMBRE 2001.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/517/01

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNA: PEREZ RAMOS JENNIFER LORENA

P r e s e n t e .

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| Presidente: | I.Q. Alejandro Rogel Ramírez |
| Vocal: | I.Q. Rafael Sánchez Dirzo |
| Secretario: | I.Q. Hugo H. Martínez Rojas |
| Suplente: | I.Q. Roberto Ramírez Torres |
| Suplente: | I.Q. Espiridión Muñoz Rivera |

Sin más por el momento. reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México. D. F., 9 de Julio del 2001.

EL JEFE DE LA CARRERA

I.Q. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ



INDICE

| | |
|-------------------------|------|
| RESUMEN | I |
| INDICE | IV |
| INDICE DE FIGURAS | VIII |
| INTRODUCCIÓN | XII |

CAPÍTULO I. SISTEMAS DE POTENCIA QUE UTILIZAN LAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES VÍA HIDRÓGENO

| | |
|--|-----------|
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Fuentes alternas de Energía | 2 |
| 1.3. Prototipo de 7.7 kW para producir Electricidad utilizando Hidrógeno como Combustible | 7 |
| 1.4. Celdas de Combustible | 11 |
| 1.4.1. Funcionamiento | 11 |
| 1.4.2. Tipos de Celdas de Combustible..... | 12 |
| 1.5. Ciclos de Potencia Termodinámicos | 18 |
| 1.5.1 Ciclo Rankine | 19 |
| 1.5.2 Ciclos de Potencia Chan K'iin..... | 21 |
| Conclusiones | 24 |



CAPITULO II. DISEÑO TERMODINÁMICO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA

| | | |
|------------|---|----|
| 2.1 | Introducción | 25 |
| 2.2 | Características de Diseño | 27 |
| 2.1 | Panel Solar | 27 |
| 2.2 | Sistema Electrolizador Bipolar | 28 |
| 2.3 | Memoria de Cálculo para la celda Electrolítica | 29 |
| | Conclusiones | 33 |

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA

| | | |
|------------|---|----|
| 3.1 | Electrólisis y Leyes de Faraday | 34 |
| 3.1.1 | Electrólisis | 34 |
| 3.1.2 | Leyes de Faraday | 35 |
| 3.2 | Celdas Electroquímicas | 37 |
| 3.2.1 | Fundamentos | 37 |
| 3.2.2 | Principios electroquímicos para el rompimiento del agua | 38 |
| 3.2.3 | Celdas electrolíticas | 40 |
| 3.3 | Termodinámica de la electrólisis del agua | 43 |
| 3.4 | Técnica de ejecución para la electrólisis del agua | 48 |
| 3.4.1 | Celda de voltaje | 48 |
| 3.4.2 | Componentes de la celda | 50 |

Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 77 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrogeno como combustible



| | |
|---|-----------|
| 3.4.2.1 Configuración de la celda | 50 |
| 3.4.2.2 Materiales de la celda | 52 |
| 3.4.2.3 Separadores y diafragmas..... | 53 |
| 3.4.2.4 Modificación de electrodos | 55 |
| | |
| 3.4.3 Celdas bipolares y monopoles | 57 |
| 3.4.3.1 Descripción general de electrolizadores monopoles y bipolares | 57 |
| 3.4.3.2 Distribución de densidad de corriente en celdas monopoles y bipolares | 59 |
| 3.4.3.3 Desviación electrolítica de corrientes en la pila de las celdas bipolares | 64 |
| 3.4.3.4 Electrolizador monopolar y bipolar bajo condiciones de operación discontinuas | 68 |
| | |
| 3.5 Plantas Industriales para la Electrólisis del Agua | 70 |
| 3.5.1 Observaciones generales | 70 |
| 3.5.2 Tanques tipo celdas monopoles | 72 |
| 3.5.3 Celda bipolar con filtro comprimido | 74 |
| 3.5.3.1 Brown Boberi y celdas CIE | 75 |
| 3.5.3.2 Celdas Krebskomo | 78 |
| 3.5.3.3 Celdas Norsk Hydro | 80 |
| 3.5.3.4 Celdas deNora S.P.A. | 83 |
| 3.5.3.5 Celdas LURGI GMBH | 84 |
| | |
| 3.6 Condiciones básicas de seguridad | 87 |
| | |
| Conclusiones | 88 |
| | |
| CONCLUSIONES | 89 |
| BIBLIOGRAFÍA | 92 |
| GLOSARIO | 95 |
| ABREVIATURAS | 97 |



ANEXO 1

- **Diagrama de Flujo para obtener los Flujos Másicos 99**
- **Algoritmo para obtener los Flujos Másicos 101**
- **Balance de Masa para la entrada al electrolizador 102**

ANEXO 2

- **Balance de Masa General del Prototipo 104**
- **Lista de Equipo 106**

ANEXO 3

- **Simbología de Instrumentación 107**
- **Símbolos de líneas e Instalaciones de Instrumentación..... 108**



ÍNDICE DE FIGURAS

DIAGRAMAS

| | |
|---|---|
| Diagrama 1. Cadenas de Transformación de las Fuentes Renovables | 2 |
| Diagrama 2. El Ciclo del Hidrógeno Solar | 7 |
| Diagrama 3. Cálculo del área requerida para la Celda Solar | 9 |

CAPÍTULO I

| | |
|---|----|
| 1. Fuentes alternas que son convertidas a electricidad | 3 |
| 2. Esquema de la electrólisis del agua | 4 |
| 3. Forma de almacenamiento del Hidrógeno y Oxígeno | 5 |
| 4. Símbolo para la combustión química del Hidrógeno en medio acuoso | 6 |
| 5. Componentes de una celda de Combustible | 12 |
| 6. Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico | 16 |
| 7. Ciclo de Potencia Rankine en el Diagrama T-S..... | 18 |
| 8. Equipos principales del Ciclo de Potencia Rankine | 19 |
| 9. Ciclo de Potencia Chan K'iin | 21 |
| 10. Diagrama T-S del ciclo de Chan K'iin | 22 |



CAPÍTULO III.

| | |
|---|----|
| 11. Electrólisis del agua en un electrolito alcalino. | 39 |
| 12. Electrólisis de agua con un electrolito ácido. | 40 |
| 13. Temperatura dependiente de las contribuciones de IR y sobrepotencia corregida del voltaje de la celda | 45 |
| 14. Presión de Vapor Parcial de soluciones acuosas de Hidróxido de Potasio en bar. | 47 |
| 15. Presión de Vapor Parcial Logarítmica de soluciones acuosas de KOH. | 47 |
| 16. Componentes de la Celda de Voltaje en una Celda Electrolítica | 48 |
| 17. Presentación esquemática del voltaje de la celda/densidad de corriente. | 50 |
| 18. Celdas geométricas | 51 |
| 19. Dominio de Corrosión, Protección Catódica y Pasividad Anódica del acero ... | 52 |
| 20. Estructura del Nafión. | 55 |
| 21. Celda Unipolar tipo tanque | 57 |
| 22. Celda Bipolar filtro-presión. | 57 |
| 23. Dirección del Flujo de Corriente en un electrodo con la función monopolar ... | 59 |
| 24. Dirección del flujo de corriente en un Electrodo con la función Bipolar. | 62 |
| 25. Comparación de espesores de electrodos monopolares y bipolares. | 63 |
| 26. Esquema de la pila de una electrólisis bipolar | 66 |
| a) desviaciones de corriente a través de la interconexión electrolítica; | |
| b) Análogo eléctrico de la pila de la celda; | |



c) corriente desquebrajadamente derramada.

| | |
|---|----|
| 27. Distribución de la presión hidrodinámica en un electrolizador bipolar. | 67 |
| 28. Descarga para electrolítico/metálico cortos circuitos en electrolizadores bipolares. | 68 |
| 29. 18 000 amperes en la celda monopolar Stuart tipo tanque. | 73 |
| 30. Ruta de corriente esquemática para electrolizadores monopolares convencionales y avanzados. | 74 |
| 31. Esquema de la sección transversal de un electrolizador BBC. | 75 |
| 32. Estructura de la celda básica de un electrolizador BBC. | 76 |
| 33. Electrolizador BBC con una capacidad de producción de $10 \text{ Nm}^3\text{H}_2/\text{h}$ | 77 |
| 34. Electrólisis de agua en la Planta BBC en Asswan. | 78 |
| 35. Sección transversal esquemática de un Electrolizador de agua Krebskosmo de las series WE. | 79 |
| 36. Dos Electrolizadores Bipolares de agua Krebskosmo | 80 |
| 37. Electrolizador Norsk Hydro vista exlotada de una celda electrolizadora. | 81 |
| 38. Planta Generadora de Hidrógeno Norsk Hydro. | 82 |
| 39. Transformador y diagrama rectificador incluyendo una batería de electrolizadores. | 82 |
| 40. Vista seccional de la celda electrolizadora LURGI. | 85 |
| 41. Vista seccional y final del Electrolizador LURGI. | 86 |
| 42. Fotografía del Electrolizador LURGI instalado en la compañía. | 86 |



TABLAS

| | |
|---|----|
| 1. Tipo de Celdas de Combustible | 13 |
| 2. Flujos Másicos por Celda | 31 |
| 3. Parámetros típicos de operación para las celdas | 71 |
| 4. Plantas de Hidrógeno por diferentes manufactureras | 72 |



INTRODUCCIÓN

Llegará el momento en el que las fuentes de energía utilizadas actualmente que son las energías no renovables o fósiles se agotarán, por lo que se debe buscar su paulatina sustitución.

Tampoco el uranio es la alternativa toda vez que los residuos (plutonio) de su uso se encuentran entre los más tóxicos y peligrosos que existen.

En el mundo industrializado existe una febril actividad por hacer del sol, el viento, las mareas y las olas las fuentes primarias de energía que alimentarán a un mundo cada vez más ávido de energía, específicamente energía eléctrica.

Este proyecto propone a dichas fuentes alternas vía Hidrógeno para sustituir a las fuentes de energía fósiles en la generación de electricidad. El Hidrógeno como combustible presenta mejores características tanto en eficiencia, costo, seguridad en su uso, como en compatibilidad con el medio ambiente por sólo mencionar algunas de ellas, para la sustitución de dichas fuentes convencionales de energía en su tarea de producir potencia eléctrica.



ABSTRACT

Due to the limitless use of the energy sources used at the moment like they are the petroleum, the natural gas, the coal, the biomass and the uranium, being these non renewable energy sources, the moment will arrive in that will be drained, this without mentioning the great damage that burns it of these fuels causes in our planet.

The climatic change will be the main environmental problem of the XXI century that is impelled by the continuous increase of the emissions of gases of effect hothouse.

For him which the concern arises of looking for new alternatives for the substitution of this energy sources. We know of the absolute presence that the petroleum exercises are, but we know that it is the moment to think of its substitution, he/she stops this way to stop to burn it absurdly in form of fuel and to only be input of the industries of petrochemical transformation.

The Hydrogen has the potential to serve so much in means of energy storage and as an energy payee inside the system of renewable energy.

Proposing a generating prototype of electricity via Hydrogen, like a possible solution, with a focus to what will be the heart of this prototype that is, the electrolytic unit, standing out the state of the art of the electrolysis of the water, including a review of the components of the different electrolytic cells, as well as of the industrial plants that are in the market.

This thesis tries to give a wide panorama about the Production of Hydrogen starting from the electrolysis, for the possible inform of the readers waiting is developed every time with a bigger peak, to be able to have a better world.

RESUMEN

Debido al uso desmedido de las fuentes de energía utilizadas actualmente como son el petróleo, el gas natural, el carbón, la biomasa y el uranio, siendo estas fuentes de energía no renovables, llegará el momento en que se agotarán, esto sin mencionar el gran daño que la quema de estos combustibles provoca en nuestro planeta pero también el gran beneficio que se tiene en el funcionamiento de las ciudades y pueblos tecnificados que consumen electricidad, comunicaciones, autos T.V, teléfonos etc.

El cambio climático será el principal problema ambiental del siglo XXI, que está impulsado por el continuo aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, como CO₂, CH₄ y NO_x. Al CO₂ se debe más del 60% del efecto invernadero, este gas se encuentra normalmente en la atmósfera, pero la quema de carbón, petróleo y gas natural entre otros esta liberando el carbono almacenado en esos combustible fósiles a un ritmo sin precedentes en la historia del hombre.



Por lo cuál surge la preocupación de buscar nuevas alternativas para la sustitución de dichas fuentes de energía, de aquí que especialmente los países industrializados se estén enfocando al estudio y desarrollo de nuevas tecnologías basadas en la utilización de energías renovables.

Estamos concientes de la presencia absoluta que el petróleo ejerce, pero sabemos que es el momento de pensar en su reemplazo, para así dejar de quemarlo absurdamente en forma de combustible y pase a ser únicamente insumo de las industrias de transformación petroquímica.

El Hidrógeno tiene el potencial para servir tanto en medios de almacenamiento de energía y como un portador de energía dentro del sistema de energías renovables.

Cuando las fuentes de energías renovables tales como solar o eólicas son usadas para producir potencia eléctrica, la salida puede ser dependiente de las condiciones climáticas.

Pero utilizando las energías renovables para producir Hidrógeno, un combustible el cual puede ser almacenado y transportado, confiable y continuamente es un suministro de energía realmente aprovechable, con un promedio de salida predecible.

Proponiendo como objetivo general un prototipo generador de electricidad vía Hidrógeno al cual integra modularmente los adelantos en la captación de las fuentes de energía renovables y las tecnologías para el almacenamiento, distribución y uso del Hidrógeno, como una posible solución, apoyándose en los ciclos termodinámicos y en las celdas de combustible como demostración de la efectividad de esta propuesta.



Con un enfoque a lo que será el corazón de este prototipo que es, la unidad electrolítica, haciendo un diseño termodinámico de esta celda, incluyendo los balances necesarios, así como utilizando las herramientas necesarias para su elaboración tales como la generación del Diagrama de Flujo del Proceso (DFP) para la producción de Hidrógeno, donde se acoplará la Unidad electrolítica, y la generación de un esbozo del Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI), para conocer la instrumentación necesaria de este proceso.

Resaltando el estado del arte de la electrólisis del agua, resumiendo las leyes y conceptos básicos en los que se basa, así como la termodinámica que envuelve la reacción electroquímica. Incluyendo una reseña de los componentes de las diferentes celdas electrolíticas, así como de las plantas industriales que se encuentran en el mercado.

Esta tesis trata de dar un amplio panorama acerca de la Producción de Hidrógeno a partir de la electrólisis, para la posible concientización de los lectores esperando sea desarrollada cada vez con un mayor auge, para lograr tener un mundo mejor.

Capítulo

H

Este capítulo nos muestra las diferentes opciones que existen en para la posible sustitución de los combustibles fósiles, también llamados no renovables.

Haciendo un hincapié en la utilización del Hidrógeno como posible sustituto, se están para la producción de electricidad y demostrando mediante los diferentes tipos de celdas de combustible, así como de los ciclos de potencia, tanto con el ciclo Rankine como con la

utilización de los ciclos combinados, la efectividad de utilizar al Hidrógeno como combustible a partir de la electrólisis del agua.

Mostrando la propuesta de un prototipo para producir electricidad a partir del Hidrógeno como combustible y para suministrar la energía eléctrica necesaria para una familia durante todo el año.

**Tecnología de Hidrógeno,
Para el Siglo XXI**



I.- SISTEMAS DE POTENCIA QUE UTILIZAN LAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES VÍA HIDRÓGENO

1.1 INTRODUCCIÓN

Debido al uso desmedido de las fuentes de energía utilizadas actualmente como son el petróleo, el gas natural, el carbón, la biomasa y el uranio, siendo estas fuentes de energía no renovables, llegará el momento en que se agotarán, esto sin mencionar el gran daño que provoca la quema de estos combustibles en nuestro planeta, y por lo tanto en todo su ecosistema al generar compuestos tales como CO, CO₂, NO_x, SO_x, plutonio entre otros contaminantes que rápidamente han ido acabando con nuestra biosfera.

Teniendo en cuenta que hasta el momento no contamos con otro mundo en donde vivir, surge la preocupación de buscar nuevas alternativas para la sustitución de dichas fuentes de energía, por otras que además de satisfacer las necesidades que nuestra sociedad demanda no dañen nuestro ecosistema.

De aquí que especialmente los países industrializados como Estados Unidos, Japón y Alemania, se estén enfocando al estudio y desarrollo de nuevas tecnologías basadas en la utilización de las energías renovables como lo son: el sol, el viento, las mareas y las olas, para una paulatina sustitución de las fuentes de energía primarias que son actualmente las energías no renovables.

Estamos concientes de la presencia absoluta que sobre nuestra economía y nuestro ánimo ejerce el petróleo, pero sabemos que es el momento de pensar en su reemplazo, para así dejar de quemarlo absurdamente en forma de combustible y que sea únicamente insumo de las industrias de transformación petroquímica.



1.2 FUENTES ALTERNAS DE ENERGÍA.

Las fuentes alternas tienen gran diversidad en su aplicación, pero una es la que nos interesa resaltar que es, su conversión a electricidad por medio de semiconductores para la energía solar, de aerogeneradores para la energía eólica, de turbogeneradores para la energía hidráulica y de dinamos-bicicleta para la energía humana.

Esto se muestra en la Cadena de transformaciones de las fuentes renovables Diagrama 1 y Fig.1 que describe tales procesos de captación y conversión a electricidad por parte de las fuentes alternas.

DIAGRAMA 1

CADENAS DE TRANSFORMACIÓN PROPUESTO PARA LAS FUENTES RENOVABLES

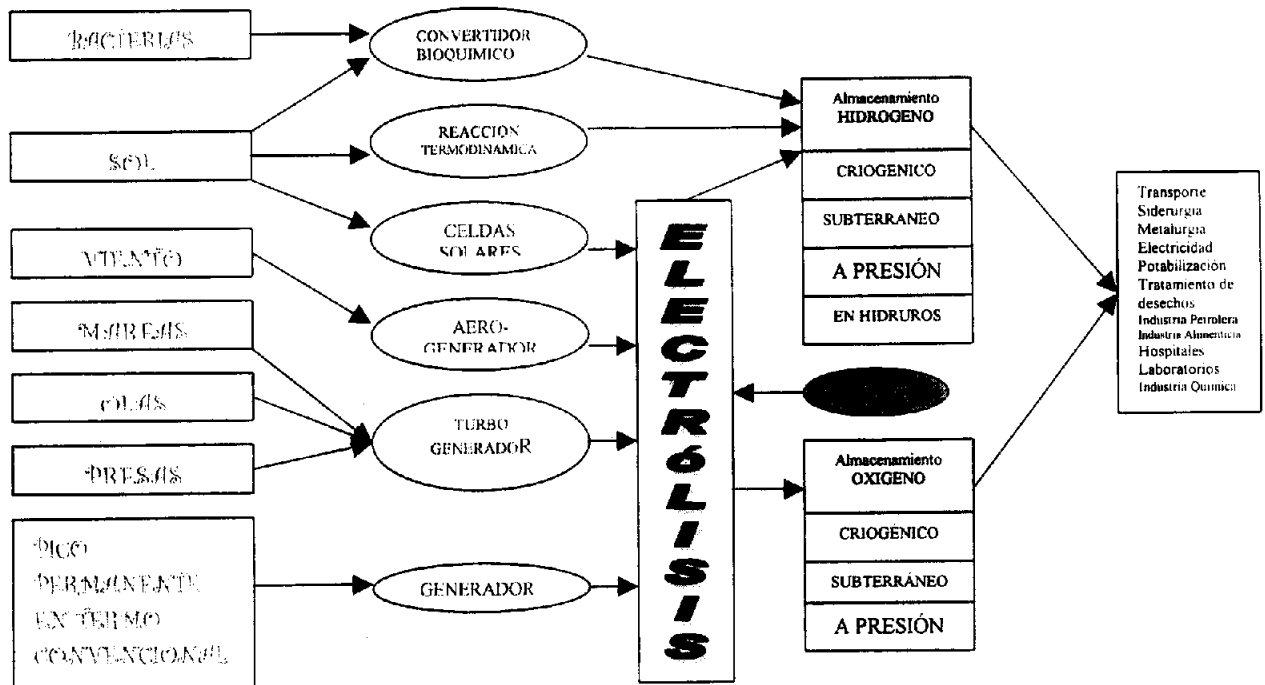


Diagrama 1. Cadena de transformación de las Fuentes Renovables

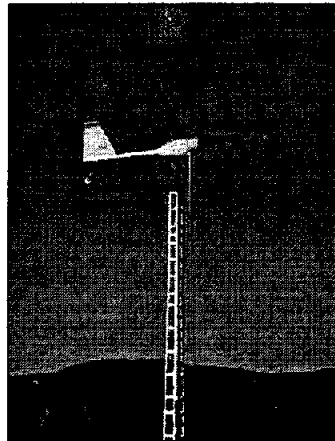
Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 17.7 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrógeno como combustible



a)



b)



c)

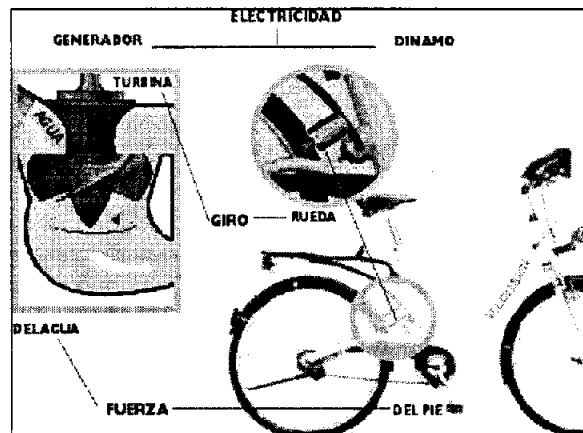


Fig. 1 Fuentes alternas que son convertidas a electricidad.
 a. Celda Solar
 b. Aerogenerador
 c. Dinamo-bicicleta



Existen en general dos inconvenientes de la electricidad generada directamente por las fuentes de energías renovables:

1. Su potencia es irregular, lo que significa que su energía en la unidad de tiempo y área no se ajusta a los requerimientos energéticos de los procesos industriales y tampoco a nuestras necesidades domésticas, por lo cual, se dice que son energías difusas.
2. Son intermitentes, lo que significa que no siempre se encuentran a nuestra disposición en el momento que se requieren.

Para superar estos inconvenientes se han desarrollado diferentes técnicas para almacenar la energía proveniente de las fuentes alternas. Una de ellas es la que nos interesa resaltar siendo conocida desde el siglo XIX: *La electrólisis del agua*.

Romper la molécula del agua requiere teóricamente 1.23 V. Este relativo bajo voltaje es el que permite que la difusa energía de las fuentes renovables pueda ser almacenada en forma de Hidrógeno.

La electrólisis del agua se simboliza en la Fig.2.

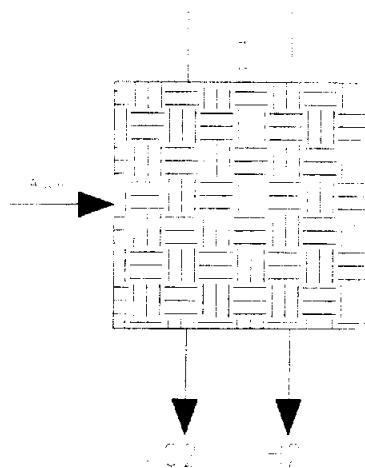


Fig. 2 Esquema de la electrólisis del agua



La técnica para almacenar y distribuir los gases Hidrógeno y Oxígeno está tan desarrollada que forma parte de la actividad cotidiana de empresas conocidas como PEMEX, AGA e INFRA. El almacenamiento tanto del Oxígeno como del Hidrógeno se simboliza en la Fig.3.

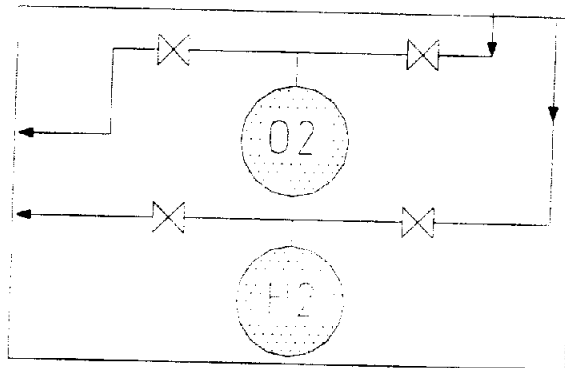


Fig. 3 Forma de almacenamiento del Hidrógeno y Oxígeno

En la actualidad conocemos cuatro formas de quemar el Hidrógeno:

1. Uniendo sus núcleos dentro de un reactor llamado Tokamak durante el proceso conocido como fusión nuclear a temperaturas muy elevadas.
2. Combinándolo químicamente con el Oxígeno del aire a través de quemadores convencionales con una amplia y asombrosa aplicación doméstica.
3. Combinándolo químicamente con el Oxígeno en medio acuoso dentro de una caldera no convencional para producir vapor motriz.
4. Combinándolo electroquímicamente con el Oxígeno sin generar flama para producir directamente electricidad dentro de un reactor llamado Celda de Combustible.

Es éste último proceso el que nos interesa resaltar toda vez que es el que mayores posibilidades tiene de producir un impacto industrial a corto plazo.



El símbolo que manejaremos para la combustión química del Hidrógeno en medio acuoso será el que se muestra en la Fig.4.

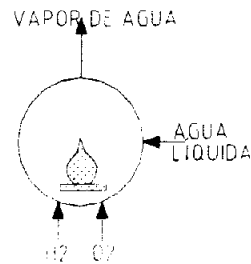


Fig. 4 Símbolo para la combustión química del Hidrógeno en medio acuoso.

Es necesario diseñar y construir, tanto a nivel laboratorio como a escala piloto, sistemas de potencia con base al Hidrógeno que operen continuamente y simulen lo que sucedería a escala industrial.



1.3 PROTOTIPO DE 7.7 kW PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD UTILIZANDO HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

Todo sistema energético alternativo que pretenda sustituir a los hidrocarburos y al uranio como combustibles, deberá conceptualmente clarificar todas las etapas de conversión energética involucradas.

De aquí surge la idea de diseñar una pequeña unidad autónoma que pueda ser instalada en una casa para satisfacer los requerimientos de electricidad de una familia para todo el año. Así cada familia, cada colonia o cada comunidad podría tener una unidad para abastecer sus propias necesidades de energía. Diagrama 2.

**DIAGRAMA 2
EL CICLO DE HIDRÓGENO SOLAR**

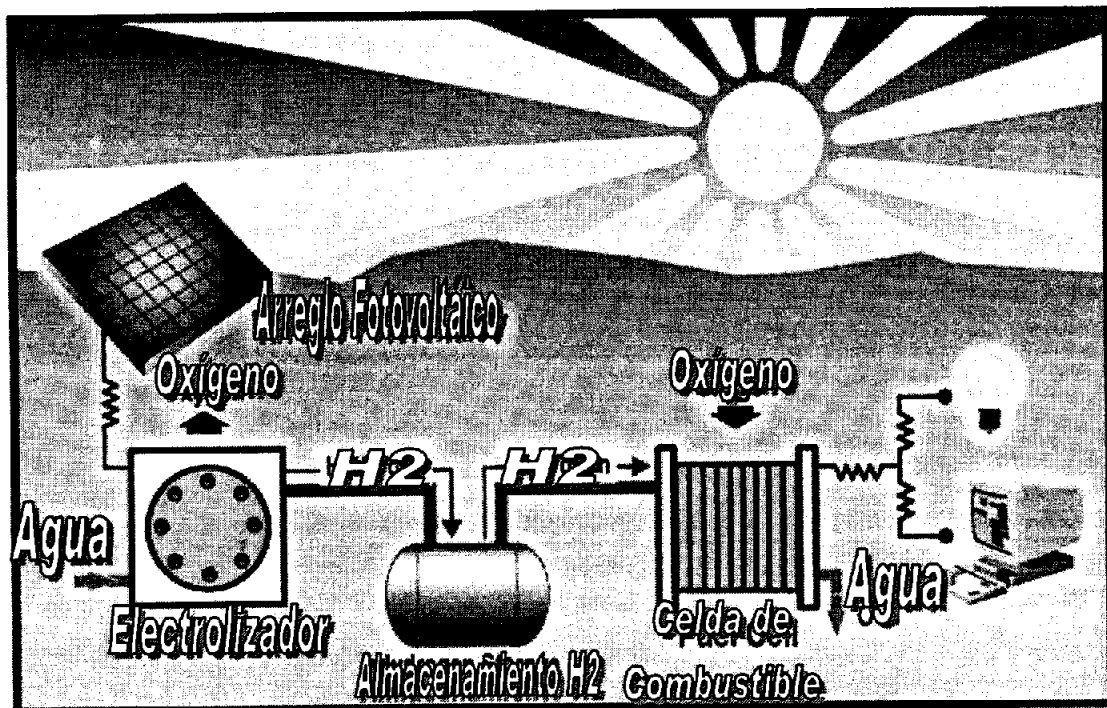


Diagrama 2 Diagrama de bloques del Ciclo de Hidrógeno que consta de:
a) Arreglo fotovoltaico, b) Electrolizador,
c) Almacenamiento de Hidrógeno, d) Celda de Combustible, e) Usos



La energía eléctrica que sale del arreglo fotovoltaico es usado para la electrólisis del agua. El Hidrógeno producido es almacenado en un pequeño tanque a presión en forma de gas y utilizado en una celda de combustible para transformarlo en electricidad de acuerdo a los requerimientos de energía de los usuarios.

El tamaño del arreglo solar fue calculado utilizando datos para la radiación total sobre una superficie horizontal en el área de México D.F. Los requerimientos anuales promedio de energía eléctrica de una familia se calcularon en 7 000 kWh. El área del arreglo solar para captar solamente dicha energía se calcula de la siguiente manera:

$$R * A * e = E \quad (1)$$

donde:

R = Radiación solar total.

A = Área de arreglo de la celda solar.

e = Eficiencia total del sistema.

E = Requerimiento anual de energía.

Utilizando los valores presentados en el diagrama 3, para los valores individuales, la eficiencia total e fue calculada con:

$$e = (0.15)(0.9625)(0.88)(0.95)(0.51)(0.91) = 0.05602 \quad (2)$$

$$R = 8\,760 \text{ kWhm}^{-2}\text{año}^{-1}.$$

$$E = 7\,000 \text{ kWhaño}^{-1}.$$

Por lo tanto:

$$A = \frac{E}{R * e} \quad (3)$$

$$A = \frac{7000 \text{ kWh/año}}{8760 \text{ kWh/año} * \text{m}^2 (0.05602)} = 14.27 \text{ m}^2 \quad (3 a)$$



DIAGRAMA 3

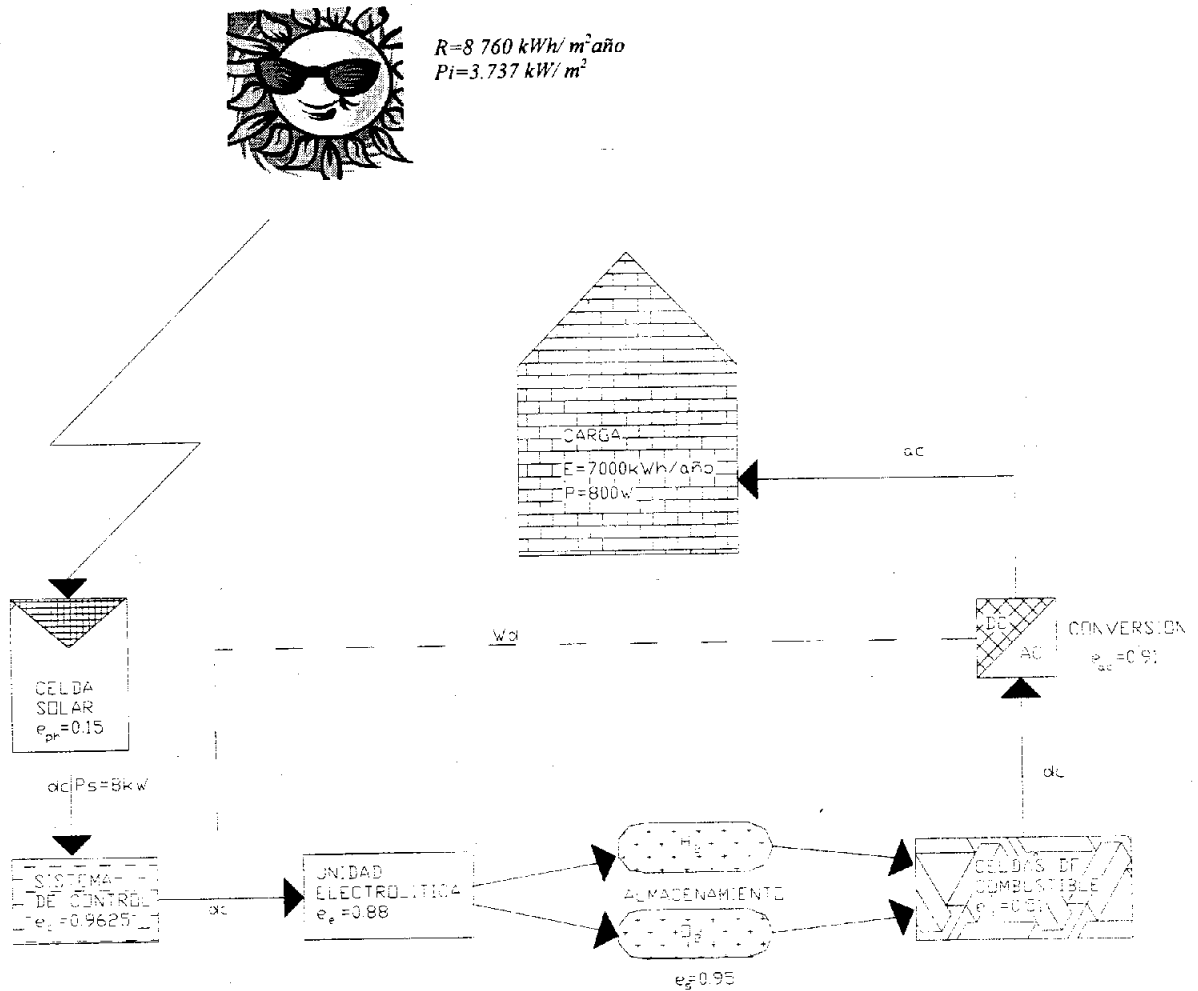


Diagrama 3 Cálculo del área requerida para la celda solar.
 R = Radiación solar total en México promedio
 P_i = Constante de Radiación solar máxima en México D.F.
 e = Eficiencia
 W_d = Energía utilizada directamente



La máxima potencia de salida de la celda fotovoltaica será calculada a partir del máximo valor de radiación solar, el cual en el área de México D.F. es $p_i = 3.737 \text{ kW/m}^2$.

$$P_s = p_i * A * e_{ph} \quad (4)$$

$$P_s = 3.737 \text{ kW/m}^2 (14.27 \text{ m}^2) (0.15) = 8.0 \text{ kW} \quad (4 a)$$

Por lo tanto la máxima energía en la entrada a la unidad electrolítica será:

$$P_e = P_s * e_c \quad (5)$$

$$P_e = 8 \text{ kW} * 0.9625 = 7.7 \text{ kW} \quad (5 a)$$

Todos los cálculos anteriores se hicieron utilizando la radiación total máxima en México D.F., pero al momento de calcularse la carga se utilizó la radiación solar total promedio.

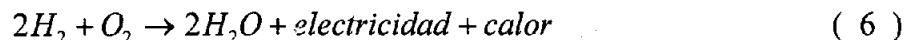
El prototipo propuesto utiliza una celda de combustible como lo muestra el Diagrama 2, ésta podría ser reemplazada por los ciclos de potencia. A continuación se da una breve reseña tanto de las celdas de combustible como de los ciclos de potencia, los cuales a elección se pueden utilizar en el prototipo propuesto a gran escala.



1.4 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible es una generadora de electricidad que utiliza procesos electroquímicos, en este caso para producir energía de Hidrógeno y Oxígeno; donde el Hidrógeno es el elemento combustible, y el Oxígeno puede obtenerse mediante almacenamiento ó simplemente del aire. La celda de combustible produce corriente directa como una batería, por lo cual su eficiencia puede ser muy elevada pero al contrario de una batería, nunca se descarga; la celda sigue produciendo energía mientras se disponga de combustible.

La celda de combustible que utiliza Hidrógeno opera de la forma inversa al proceso conocido como electrólisis del agua, en donde el agua es desdoblada en Hidrógeno y Oxígeno. Este proceso consiste en tomar el Hidrógeno y combinarlo con el Oxígeno para así obtener agua, calor y luz.



1.4.1 Funcionamiento

La celda de combustible consiste básicamente en la oxidación del Hidrógeno en agua, generando energía eléctrica y calor directamente, sin pasar por generadores u otros artefactos.

Toda celda de combustible esta compuesta de un ánodo, un cátodo y electrolitos para tal efecto Fig.5. Sin embargo, siendo la oxidación del Hidrógeno igual para todos los tipos de celdas de combustible, los materiales usados para estas es muy variado.

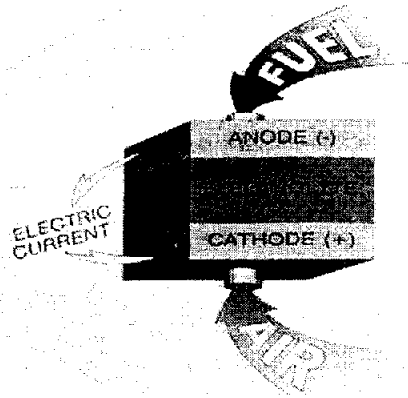


Fig. 5 Componentes de una celda de combustible

La reacción producida es similar a la mencionada en la sección anterior, con la diferencia que en lugar de producir luz se produce electricidad.

Esto se logra alimentando el Hidrógeno en el ánodo de la celda y el Oxígeno en el cátodo, los cuales están separados por un electrolito.

La reacción se produce en la celda misma, la producción de agua toma lugar en distintas partes de la celda, dependiendo del electrolito utilizado. El Hidrógeno fluye hacia el ánodo de la celda, una cubierta de platino ayuda a quitarle los electrones a los átomos de Hidrógeno, dejándolo ionizado (*protones*). La membrana electrolítica permite el paso sólo de los protones hacia el cátodo. Debido a que los electrones no pueden pasar a través de la membrana, se ven forzados a salir del ánodo por un circuito externo como forma de corriente eléctrica, y es esta corriente eléctrica la que es utilizada. Luego, a medida que pasa el Oxígeno por el cátodo, este permite que los protones y electrones del Oxígeno se combinen formando agua.

Las celdas de combustible puede ser conectadas entre sí, de manera similar a lo que se hace con las baterías comunes, con el fin de obtener condiciones de voltaje o corriente deseados.

1.4.2 Tipos de Celdas de Combustible

Los diferentes tipos de celdas de combustible se muestran en la tabla 1.



TABLA 1
TIPO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

| TIPO | TEMPERATURA DE OPERACIÓN | OBSERVACIONES |
|---------------------------------------|--------------------------|--|
| <p>Ácido fosfórico (PAFCs)</p> | <p>~ 220 °C</p> | <p>Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. Las Celdas de Combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia – y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración – comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras. Existen en producción comercial unidades de alrededor de 200kW.</p> |
| <p>Polímero Sólido (PEM)</p> | <p>50 - 100 °C</p> | <p>(ó Membrana de Intercambio Protónico). Tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, "son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas como el reemplazamiento de baterías recargables en video cámaras".</p> |

Diseño termodinámico de una celda electroquímica con capacidad de 7.5 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrogeno como combustible

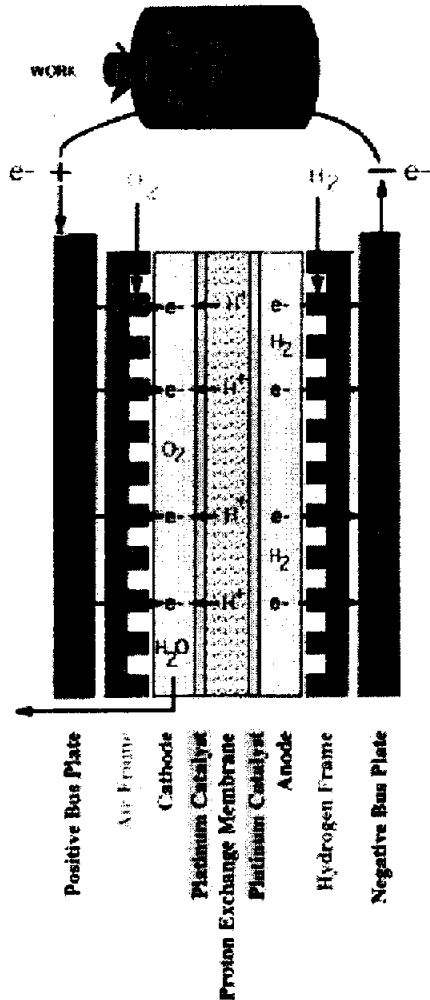


| | | |
|---|----------------------|---|
| <p>Carbonato Fundido (MCFCs)</p> | <p>~ 600 °C</p> | <p>Las Celdas de Combustible de Carbonato Fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California en 1996. En este tipo de celdas es aprovechada la electricidad y el calor generado.</p> |
| <p>Óxido Sólido (SOFCs)</p> | <p>500 - 1000 °C</p> | <p>Otra Celda de Combustible altamente prometedora, la Celda de Combustible de Óxido Sólido, podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de estas en vehículos motores. Una prueba de 100kW está siendo terminada en Europa mientras que dos pequeñas unidades de 25kW se encuentran ya en línea en Japón. Un sistema de Óxido Sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación sea muy elevada. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%. Un tipo de Celda de Combustible de Óxido Sólido utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido semejando la parte superior de una lata de sopa.</p> |

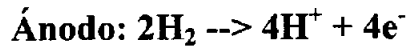


| | | |
|------------------|-------------|---|
| Alcalinas | 50 - 250 °C | Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación. |
| Otros | | Otros tipos de celdas de combustible están siendo desarrolladas para diversas aplicaciones, utilizando otros materiales y otros combustibles. |

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico son más apropiadas para la generación de energía a pequeña escala como se muestra en la Fig.6.



1. Al ánodo las moléculas de Hidrógeno pierden sus electrones y forman iones de Hidrógeno, un proceso que se hace posible por medio de *catalizadores* de platino.
2. Los electrones se traspasan al *cátodo* a través de un circuito externo que produce electricidad al pasar por un motor (u otro mecanismo eléctrico).
3. Los iones de Hidrógeno pasan al *cátodo* por la membrana de intercambio protónico, donde se unen con las moléculas de Oxígeno y electrones para producir agua.
4. De esta manera, se utiliza el proceso natural de producción de agua por medio de la oxigenación de Hidrógeno, para producir electricidad y trabajo útil.
5. No se produce ninguna contaminación y los únicos desechos son agua y calor.
6. El proceso químico es:



Reacción Completa:

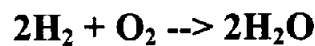


Fig 6 Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico



Una celda de combustible es silenciosa, eficiente y limpia. Las celdas de combustible normalmente funcionan con gas de Hidrógeno puro, el cual se puede producir sin contaminación utilizando la energía solar, tanto como otras fuentes renovables de energía.

Las celdas de combustible que utilizan Hidrógeno no producen ninguna forma de contaminación, y el único producto secundario es agua pura que puede ser reciclada. Las celdas de combustible son eficientes en un 50% aproximadamente, en comparación con los motores de combustión interna, que logran apenas 12% a 15% de eficiencia. Además, en vista de que las celdas de combustible no tienen componentes móviles, pueden ser muy confiables y casi completamente silenciosas.



1.5 CICLOS DE POTENCIA TERMODINÁMICOS

La energía mundial proviene en su mayor parte de gigantescas centrales conocidas como termoeléctricas y nucleoeeléctricas; esto es, plantas que transforman el calor de combustión de los hidrocarburos y la fisión del uranio en electricidad conforme lo establece la teoría termodinámica a través del llamado ciclo de potencia Rankine, el cual se ilustra en la Fig.7 a continuación.

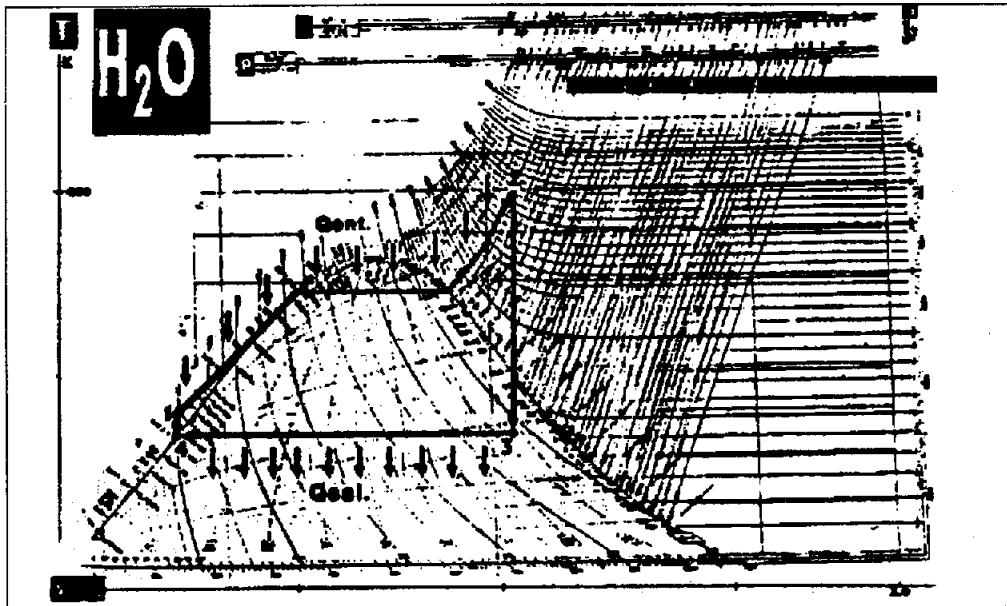


Fig. 7 Ciclo de Potencia Rankine en el Diagrama T-S.



1.5.1 Ciclo Rankine

El ciclo Rankine es el ciclo termodinámico que permite que el agua líquida en el estado (1) absorba el calor de combustión Q_{ent} de los hidrocarburos quemados dentro de una caldera vaporizándose hasta el estado (2). El agua en estado vapor se inyecta a una turbina acoplada a un generador donde al expandirse, moviendo sus alabes cuyos rehilletes de acero, hace posible la producción de electricidad.

El vapor extenuado por el trabajo realizado alcanza el estado (3) donde lo recibe un condensador que lo licua extrayéndole el calor Q_{sal} hasta el estado (4). El agua otra vez en fase líquida se bombea de nueva cuenta a la caldera iniciándose así otro ciclo termodinámico más.

El esquema con los equipos principales del ciclo Rankine se muestra en la Fig.8.

CICLO DE POTENCIA RANKINE

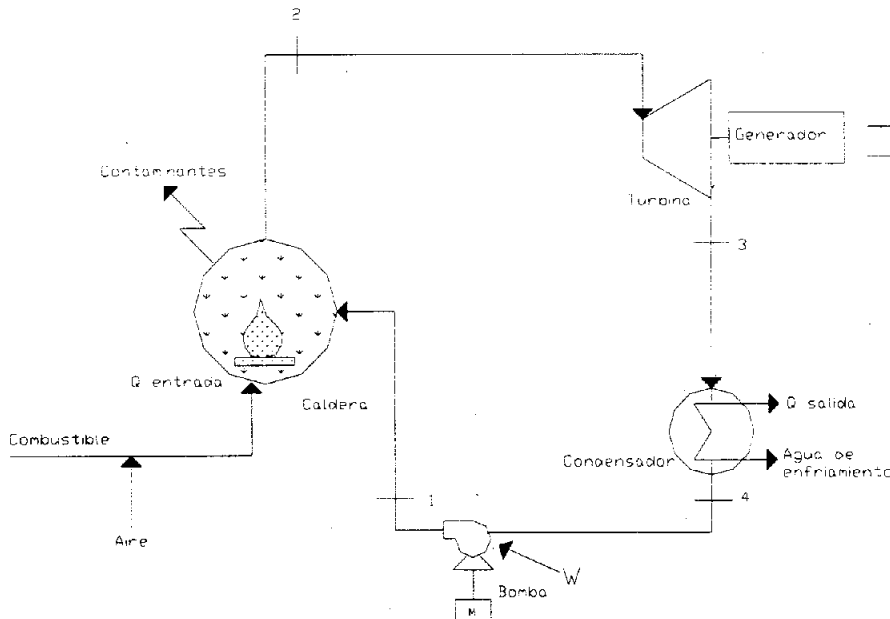


Fig. 8 Equipos principales del ciclo de Potencia Rankine.



El ciclo Rankine no es el único que la termodinámica nos proporciona para llevar a cabo la conversión de calor en trabajo, aunque es el más importante en la producción de electricidad en el mundo.

La termodinámica, descrita en la simplicidad y elegancia de los ciclos de potencia, ha sido siempre causa de admiración que se transforma en estupor cuando uno se encuentra dentro de las gigantescas centrales de energía construidas con base en aquellas curvas geométricas donde las verdaderas termodinámicas son descritas.

Sin embargo, desde que se inició la construcción y operación de esas moles productoras de electricidad, las mismas han sido causantes de un importante número de males que nuestra civilización ha considerado desde entonces como "males necesarios". Uno de ellos es sin duda la contaminación y el consecuente deterioro de la región donde las centrales son asentadas.

Los costos del impacto ambiental todavía hoy no son cabalmente asumidas por comunidades que aún reaccionan negativamente a los programas de racionamiento y ahorro energético.

A continuación se propone como se podría concebir y diseñar termodinámicamente un sistema de potencia que utilice Hidrógeno como combustible.

Esto sería posible innovando el ciclo Rankine, siendo fácil su extensión a los ciclos combinados cuyo desarrollo actual, basado en el gas natural como combustible, se extienda por todo el mundo, haciendo que el costo del kWh generado sea menor.

Al Ciclo de Potencia propuesto se le llamó "Chan K'iiin" que significa "pequeño sol".



1.5.2 Ciclos de Potencia Chan K'iin.

Estas cuatro áreas de desarrollo tecnológico de las fuentes renovables descritas anteriormente, por si solas, son de extraordinaria importancia. Las mismas son integradas y acopladas al Ciclo de Potencia Rankine en una propuesta que lo innova y a la que llamaremos Ciclos de Potencia Chan K'iin. Como se muestra en la Fig.9.

CICLO DE POTENCIA CHAN K'IIN

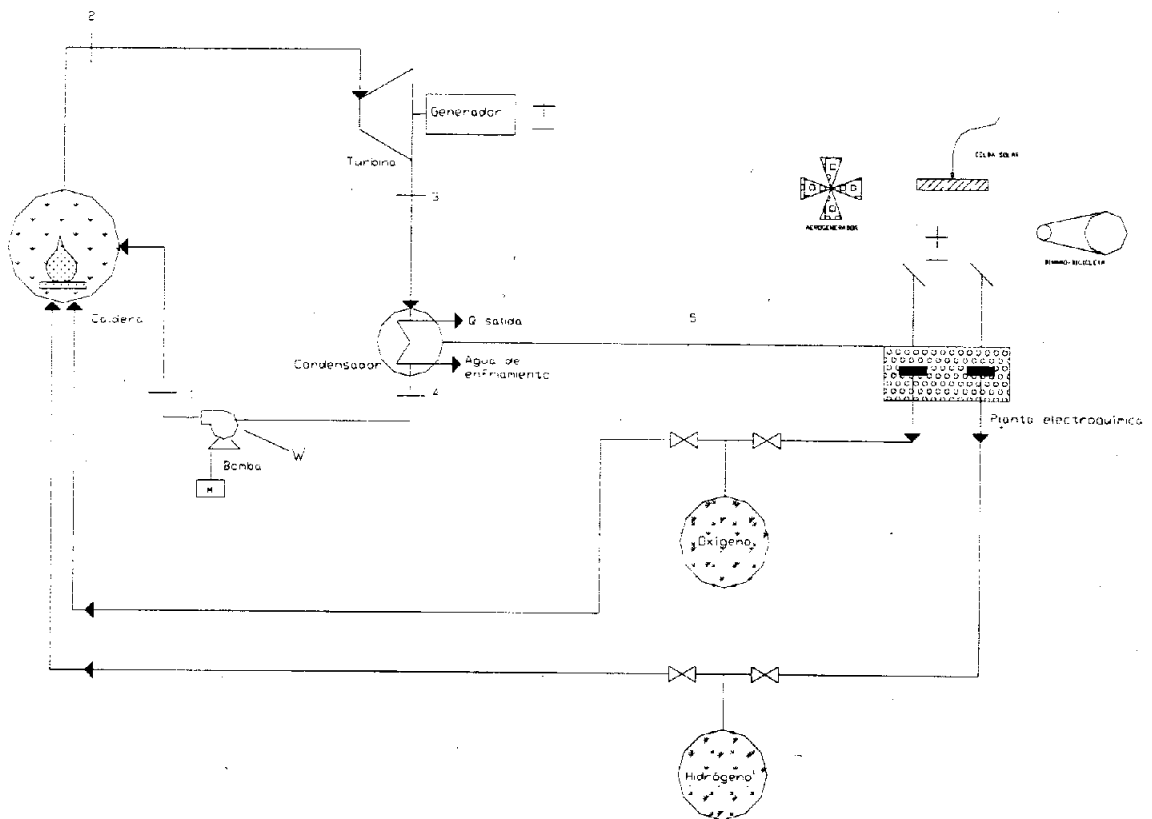


Fig. 9 Equipos principales del ciclo de potencia Chan K'iin



Sobre un diagrama T-S, la Fig.9 se esquematiza en la Fig.10.

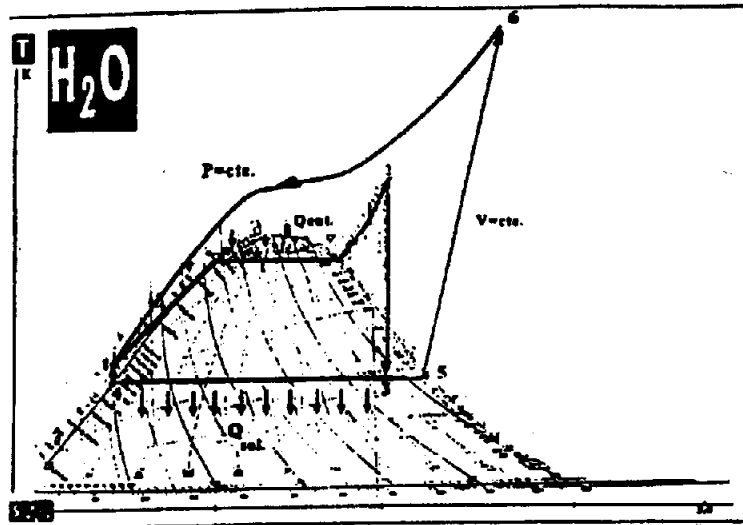


Fig. 10 Diagrama T-S del ciclo de potencia Chan K'iin

Chan K'iin consta de dos Ciclos acoplados y cerrados:

1. El Ciclo de Potencia Clásico 1-2-3-4-1.
2. El Ciclo de Combustible 1-2-3-5-6-1.

Las singulares propiedades de la combustión química del Hidrógeno permiten modelar los procesos de electrólisis y combustión a través de la trayectoria isocórica 5-6, describiendo también la aceptable constancia volumétrica de la flama de Hidrógeno que es, agua gaseosa a mas de 2000°C.

El proceso 6-1 describe el mezclado isobárico y la transferencia de calor del agua gaseosa al agua líquida para producir el vapor motriz durante el proceso 1-2.

El ciclo cerrado del combustible permite disminuir el calor requerido para generar 1 kWh de Potencia eléctrica aumentando por consiguiente la eficiencia del Ciclo, sin enviar humos y polvos al medio, reciclando continuamente el mismo combustible.



Lo anterior desde el punto de vista de la construcción de la base energética de cualquier modelo de auténtico desarrollo sustentable, es definitivo.

Nosotros no somos consumidores iniciales de la energía de una fuente lo que significa que no la podemos utilizar directamente, sino que debe sufrir una serie de procesos de transformación los cuales constan de etapas con eficiencias específicas para cada una que nos llevan a obtener energías de uso aprovechable, de las cuales las más comunes por ejemplo en el hogar son: la electricidad y el gas LP.

Pero debido a que cada bloque de transformación tiene una eficiencia específica y para poder obtener la energía de una forma aprovechable no podemos omitir ninguna de estas etapas, lo cual provoca que no se pueda aprovechar toda la energía existente, sino por lo contrario, la eficiencia de aprovechamiento sea demasiada baja.

Por ejemplo al prender un foco, debido a los sistemas de potencia o procesos de transformación, obtenemos una eficiencia total aproximada del 4%, en un automóvil de combustión interna la eficiencia es del 18% y así sucesivamente podríamos seguir enumerando las eficiencias de los sistemas de potencia existentes, pero este no es el propósito.

Lo que nos interesa es resaltar las diferentes fuentes de energía actualmente utilizadas, para poder así mostrar los beneficios y desventajas que existen al suplantar las fuentes de energía fósiles o no renovables por las fuentes de energías renovables.



CONCLUSIONES

Es tiempo de empezar a conscientizarnos acerca del gran problema que nos envuelve, no sólo como entidad, como nación, ó como continente, sino como seres humanos que viven en un solo planeta.

Para así juntos buscar una solución a todo el daño que le estamos haciendo a nuestro hábitat. De aquí, la preocupación por buscar nuevas tecnologías, que puedan suplantar a las existentes provocando el menor daño posible.

Por lo cual el prototipo propuesto, es sólo una de tantas posibilidades de mejorar nuestro mundo, sin tener que sacrificar, el confort al que estamos acostumbrados y ofrecérselo a quienes aún carecen del mismo.



II. DISEÑO TERMODINÁMICO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.

2.1 INTRODUCCIÓN

Una fase clave de los sistemas energéticos expuestos en el capítulo I lo es la celda electrolítica. Existen dos tipos de unidades electrolíticas: *La bipolar y la unipolar*, como se mencionará en el capítulo III, ambas se encuentran bien establecidas como sistemas comerciales que fácilmente pueden adaptarse a esta aplicación, en la que existen ventajas económicas o tecnológicas no apreciables entre ambas.

El Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) anexo, muestra parte de la representación esquemática de los controles y flujo de materia del sistema de energía propuesto donde la celda electrolítica opera. Los dos circuitos separados son usados para poner en circulación las soluciones *aniónicas y catiónicas*. Los gases son separados de la solución electrolítica KOH en los separadores FA-1001 y FA-1002, enfriados en los enfriadores EA-1001 y EA-1002, y después son pasados a través de los eliminadores de neblina FA-1003 y FA-1004 y de los secadores DA-1001-1004 son transportados a las unidades de almacenamiento FB-1002 y FB-1003.

La solución electrolítica es puesta en circulación por las bombas GA-1002 y GA-1003 de las cuales su eficiencia es controlada por el regulador de temperatura del electrolizador. El suministro de agua desionizada es regulada por un control de nivel en el separador FA-1003. La presión de la unidad (7.9 bar) es controlada por un regulador de contrapresión en la línea del Oxígeno mediante una válvula que se encuentra entre el separador de neblina FA-1004 y los secadores DA-1003 y DA-1004. La presión de la línea del Hidrógeno es controlada con el Transductor Diferencial de Presión PD y la válvula reguladora localizada entre el separador de neblina FA-1003 y los secadores DA-1001 y DA-1002.



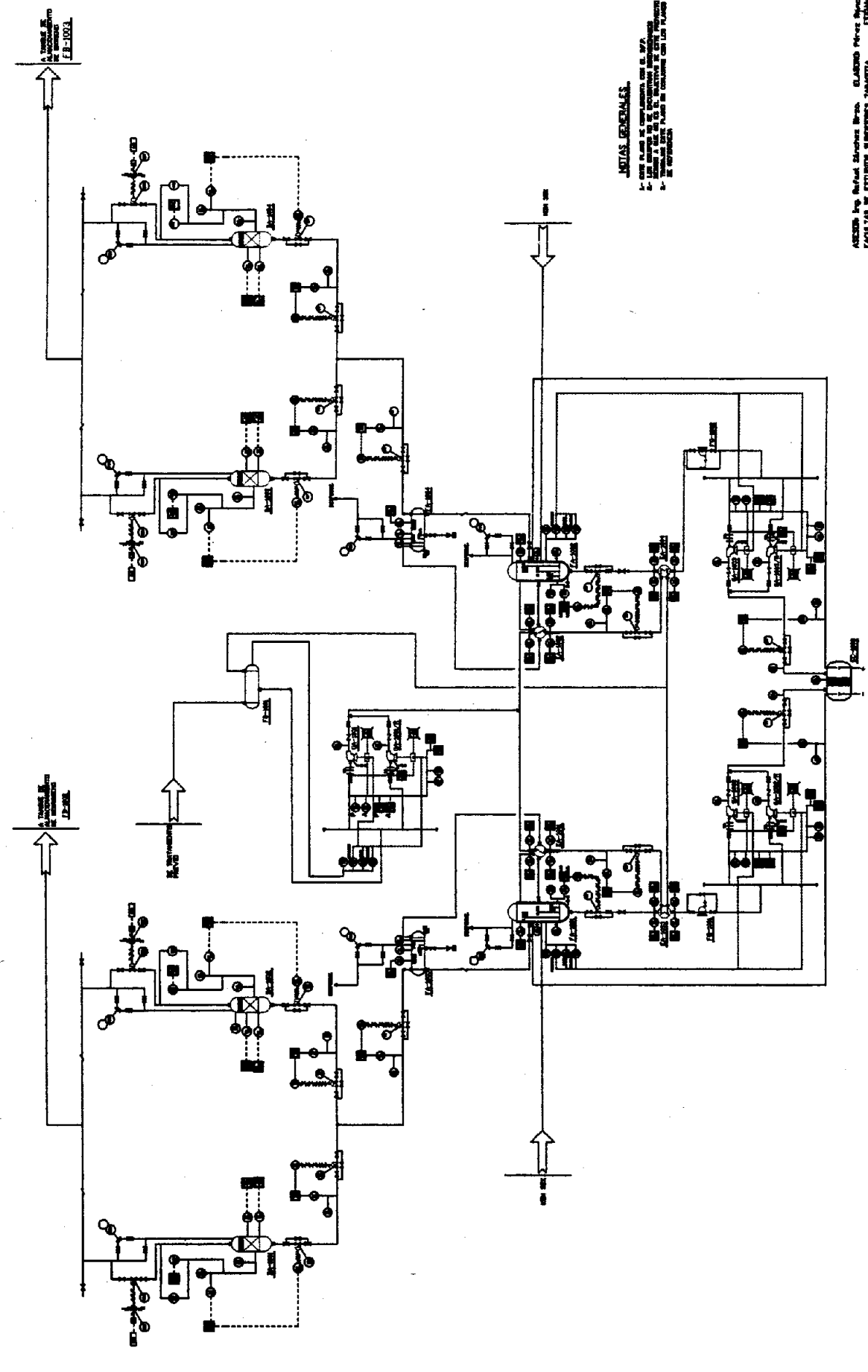
La temperatura es controlada independientemente en cada circuito. El calor es proporcionado por una bobina de calentamiento eléctrico en los separadores FA-1001 y FA-1002 debido a que su temperatura es menor a 95°C .

Cuando la temperatura excede los 105°C la solución electrolítica es enfriada pasando a través de los enfriadores EA-1003 y EA-1004, después se regresa al electrolizador.

La operación es arrancada o parada por la Unidad principal de regulación de acuerdo al rendimiento del panel solar como se discutirá después. Cuando la unidad es parada, las bombas GA-1002 y GA-1003 continúan operando por algún tiempo para asegurar el conveniente enfriamiento y separación del gas. La circulación para cuando las soluciones alcanzan una temperatura de 50°C mientras que la presión permanece baja.

Para desviaciones anormales de la operación de diseño en las condiciones de presión, temperatura, razón de flujo y nivel, la seguridad del sistema es disparada, los gases son venteados y el Hidrógeno es introducido dentro de la unidad.

1. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 2. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 3. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 4. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 5. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 6. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 7. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 8. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 9. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 10. PLAN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.



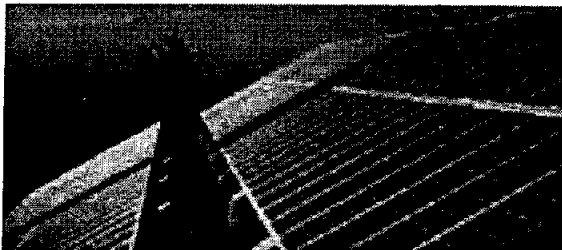
NOTAS GENERALES.
 1.- ESTE PLANO DE CONSTRUCCION DEBE SER LEIDO EN CONJUNTO CON EL PLAN DE DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 2.- ESTE PLANO DE CONSTRUCCION DEBE SER LEIDO EN CONJUNTO CON EL PLAN DE DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.
 3.- ESTE PLANO DE CONSTRUCCION DEBE SER LEIDO EN CONJUNTO CON EL PLAN DE DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.

ARQUITECTO Ing. Rafael Sánchez Rivera. ELABORADO POR Ing. Rafael Sánchez Rivera.
 FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA. DURANGO, COAHUILA DE ZARAGOZA.
 MEXICO.
 DISEÑADA POR TURESPA E INGENIERIA.
 DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE TURESPA, ESTADO DE DURANGO, MEXICO.



2.2 Características de Diseño.

2.2.1 Panel Solar.

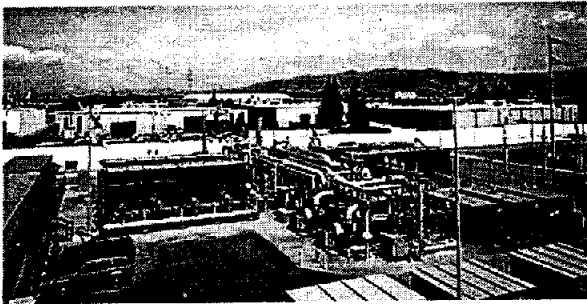


Las características de SOLAREX núm. 4200 son seleccionadas.

| | |
|---|--|
| Intensidad Máxima de | 0.83 kWm⁻² (máximo valor esperado) |
| Máximo rendimiento de potencia para una máxima intensidad de | 20 W |
| voltaje para el requerimiento máximo de | 14 -25.5V |
| Paneles necesarios para el requerimiento máximo de potencia de 8 kW | 400 paneles |



2.2.2 Sistema Electrolizador Bipolar.



La Unidad Bipolar de Sistemas de Energía fue seleccionada con las siguientes características de operación:

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura | 100 °C |
| Presión | 7.9 bar |
| Densidad de corriente | 400mAcm ⁻² |
| Potencia por celda | 239W |



2.3 Memoria de Cálculo para la Celda Electrolítica.

Sabiendo que el voltaje necesario para romper la molécula del agua a 7.9 bar se encuentra en un rango entre 1.9-2.4 Volts.

Voltaje.

$$V=1.9V.$$

Potencia por celda (medida estándar por fabricante).

$$P=239W.$$

Y sabiendo de la ley de Ohm que:

$$P = V I. \quad (7)$$

Despejando I:

$$I = \frac{239}{1.9} = 125.66 \text{ A.} \quad (7a)$$

Como necesitamos una Potencia total = 7 700 W

Y contamos con una potencia por celda = 239 W

El número de celdas necesarias (n) es por lo tanto:

$$n = \frac{P_T}{P_{cell}} = \frac{7700}{239} = 32 \text{ celdas} \quad (8)$$



Sabiendo que necesitamos 32 celdas y que el arreglo de las celdas será en forma Bipolar.

$$I_T = 125.66 (32) = 4\,021.25 \text{ A.} \quad (9)$$

Con una densidad de corriente $\rho_c = 400 \text{ mA/cm}^2$.

Y como:

$$\rho_c = \frac{I}{A} \quad (10)$$

por lo tanto

$$I = A \cdot \rho_c \quad (10 a)$$

Ya que el electrolizador es cilíndrico, el diámetro se calcula:

$$I = \frac{\pi}{4} D^2 \rho_c \quad (11 b)$$

Y despejando el diámetro (D).

$$D = \sqrt{\frac{4I}{\pi(\rho_c)}} \quad (12)$$

$$D = \sqrt{\frac{4(125664 \text{ mA})}{3.1416(400 \text{ mA/cm}^2)}} = 20 \text{ cm} \quad (12 a)$$



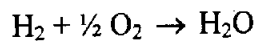
Calculando Flujos Másicos por celda.

Con un equivalente electroquímico $E = 0.0376 \text{ g/Ah}$.

De la 2ª Ley de Faraday:

$$W_{H_2} = \frac{I * E}{1000} = \frac{125.66 A * 0.0376 \text{ g/Ah}}{1000} = 0.004725 \text{ kg/h.} \quad (13)$$

Estequiométricamente.



Con pesos moleculares.

$H_2 = 2 \text{ kg/mol}$.

$O_2 = 32 \text{ kg/mol}$.

$H_2O = 18 \text{ kg/mol}$.

Obtenemos los siguientes Flujos Másicos por celda.

TABLA 2

Flujos másicos por celda

| Compuesto. | Flujo Másico (kg/h) |
|---------------------|---------------------|
| Hidrógeno (H_2) | 0.004725 |
| Oxígeno (O_2) | 0.03780 |
| Agua (H_2O) | 0.04252 |

El Flujo másico del agua para 32 celdas = 1.36064 kg/h.



Ahora suponiendo que contamos con 5 h disponibles de sol.

El flujo másico del agua = 6.8032 kg/día.

O sea que necesitaremos cerca de 7 litros de agua diarios para obtener la electricidad necesaria para abastecer nuestras necesidades cotidianas.

El algoritmo de cálculo se puede ver en el Anexo 1.

El Balance de Masa y la lista de equipo se pueden ver en el Anexo 2.

Y la simbología de instrumentación en el Anexo 3.



CONCLUSIONES

Adentrándonos más, podemos darnos cuenta de la importancia que ejerce la celda electrolítica dentro de este prototipo. Siendo el tema central de este proyecto, en el cual se hizo el diseño termodinámico, mostrando balances de masa, que sirvieron como base para el diseño del proceso plasmado en el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) y posteriormente en el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI). Logrando con esto cumplir con 4 de los objetivos particulares planteados que son: a) Diseño termodinámico de una Unidad electrolítica para descomponer el agua, con una potencia de 7.7kW, b) Establecer los balances de masa del prototipo, c) Generar el Diagrama de Flujo del Proceso (DFP) donde se acoplará la Unidad electrolítica, y d) Hacer un esbozo del Diagrama de Tuberías e Instrumentación, para conocer la instrumentación necesaria de este proceso.

Capítulo I

Este capítulo se centra en resaltar el estado del arte del proceso de electrólisis del agua dando lugar a conceptos básicos en los que se basa el mismo, así como la termodinámica que envuelve la reacción electroquímica para lograr el rompimiento de la molécula del agua en Hidrógeno y Oxígeno.

Se hace además una reseña de los componentes de los diferentes celdas electroquímicas así como de los diferentes tipos de electrolitos existentes, para dar un panorama más amplio del funcionamiento y diferencias que existen entre estas unidades y se encuentran en el mercado.

Tecnología de Hidrógeno,
Para el Siglo XXI



III. ESTADO DEL ARTE DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

3.1 ELECTRÓLISIS Y LEYES DE FARADAY.

Consiste en la descomposición de una sustancia por el paso de la corriente eléctrica. En un proceso electrolítico ocurre una transformación de energía eléctrica en energía química. Los iones positivos o cationes se dirigen al electrodo negativo (*cátodo*), al que proporcionan electrones (*reducción*), y los iones negativos se dirigen al polo positivo (*ánodo*), al que ceden electrones (*oxidación*).

3.1.1 Electrólisis.

Es un proceso que tiene lugar cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos y se realiza una reacción redox. La diferencia de potencial aplicada a los electrodos depende del electrolito y del material que constituyen los electrodos.

Las pilas que producen corriente eléctrica se denominan pilas voltaicas mientras que las pilas que consumen corriente eléctrica se denominan pilas electrolíticas.

En algunas electrólisis, si el valor de la diferencia de potencial aplicada es tan sólo ligeramente mayor que el calculado teóricamente, la reacción es lenta o no se produce, por lo que resulta necesario aumentar el potencial aplicado. Este fenómeno se da cuando en alguno de los electrodos se produce algún desprendimiento de gas.



El potencial añadido en exceso se denomina potencial de sobre tensión. La cantidad de producto que se forma durante una electrólisis depende de:

- a. *La cantidad de electricidad que circula a través de la pila electrolítica.*
- b. *De la masa equivalente de la sustancia que forma el electrolito.*
- c. *La superficie de contacto con el electrodo.*

La cantidad de electricidad que circula por una celda electrolítica puede determinarse hallando el producto de la intensidad de la corriente, expresada en amperios por el tiempo transcurrido, expresado en segundos. Es decir, $Q(\text{culombios}) = I \cdot t$.

Tras efectuar múltiples determinaciones, Faraday enunció las dos leyes que rigen la electrólisis y que son:

3.1.2 Leyes de Faraday.

Primera Ley de Faraday: La masa depositada por electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado.

$$m = eQ \text{ (masa = equivalente electroquímico * la cantidad de electricidad (coulombs).)} \quad (14)$$

Segunda Ley de Faraday: Si varias celdas electrolíticas conectadas en paralelo y provistas de electrodos inertes son atravesadas por la misma cantidad de corriente eléctrica, las cantidades de sustancia depositadas en cada electrodo son proporcionales a los equivalentes-gramo de las sustancias depositadas.



Se denomina *equivalente electroquímico* de una sustancia a la masa en gramos de dicha sustancia depositada por el paso de un culombio. De acuerdo con esta definición podemos escribir:

$$m = P_a I t / (96500 n_e) \quad (15)$$

Donde:

m = masa en gramos que se ha depositado o desprendido como gas

P_a = peso atómico del elemento

n_e = número de electrones intercambiados

I = intensidad de la corriente en amperios

t = tiempo en segundos

96500 = es el factor de equivalencia entre el Faraday y el Culombio. $1 F = 96500 C$

3.2 CELDAS ELECTROQUÍMICAS.

3.2.1 Fundamentos.

Recientes descubrimientos arqueológicos han llevado a los científicos a postular ciertos procedimientos electroquímicos que ya eran conocidos hace más de 2 mil años. Sin embargo, los inicios de la electroquímica como ciencia formal se sitúan en los últimos años del siglo XVIII. En 1786, Luigi Galvani descubrió una interesante relación entre las contracciones musculares de un anca de rana y ciertos impulsos que se obtenían al hacer contacto dos metales diferentes. Posteriormente, en 1796, Alessandro Volta estableció que, al formar uniones con diferentes metales con un electrolito entre ambos, se generaba un potencial eléctrico que originaba las contracciones observadas por Galvani. De los nombres de estos científicos han surgido dos de los términos más conocidos en electroquímica: "voltaje", para designar al potencial de un sistema eléctrico, y "celda galvánica" para nombrar los dispositivos que transforman energía química en energía eléctrica, como son, por ejemplo las pilas que se utilizan a diario en walkman, discman, grabadoras, linternas, etc.

Una celda galvánica común está constituida básicamente por dos piezas metálicas, llamadas *electrodos*, y una solución que contiene iones, denominada *electrolito*. Los electrolitos son generalmente líquidos, pero algunas celdas de gran importancia tecnológica utilizan electrolitos sólidos o en forma de pasta.

El aspecto fundamental de una celda galvánica, como el de cualquier sistema electroquímico, es la transferencia de carga eléctrica entre materiales con diferentes características: por un lado, los electrones que son los portadores de carga negativa en los metales (*conducción electrónica*) y, por otro lado, el electrolito, donde la conducción se establece en el movimiento de los iones negativos, *aniones*, y de iones positivos, *cationes*, (*conducción iónica*).



Las reacciones químicas que ocurren en las interfases electrodo/electrolito generan el flujo de corriente eléctrica que proporciona la celda. Por ejemplo, una celda galvánica constituida por dos compartimientos *semiceldas*, estas celdas producen un potencial eléctrico o voltaje de cierto valor y para aumentarlo se deben colocar varias celdas en serie.

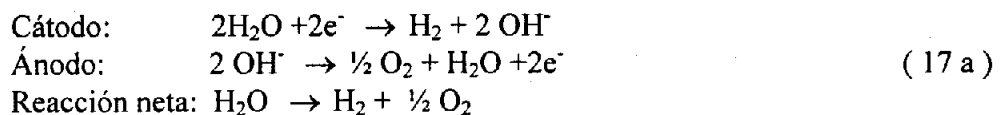
3.2.2 Principios Electroquímicos para el Rompimiento del Agua.

Si una corriente eléctrica de C-D es pasada a través de dos electrodos en agua, ocurre la siguiente reacción:



Hidrógeno y Oxígeno son originados por la descomposición del agua mediante la electrólisis. Como el agua es un conductor iónico muy pobre ésta es la razón por la que se debe agregar un conductor electrolítico para que la reacción pueda proceder a una celda de voltaje técnicamente aceptable. El voltaje eléctrico aplicado a estos dos electrodos deben tener una variación mínima. Este es determinado por la entalpía de Gibbs; la entalpía para el rompimiento del agua y es función de la presión y la temperatura. A una temperatura de 25°C y una presión de 1 bar el voltaje necesario es 1.23V.

Tanto en una solución electrolítica alcalina como en una ácida puede ser utilizado para la electrólisis del agua. En el medio alcalino las dos reacciones básicas son mostradas en la Fig.11.





Como se muestra en la Fig.11 los componentes principales en la celda para la electrólisis del agua son el cátodo, el ánodo y el separador. El *cátodo* debe ser resistente a la corrosión en el electrolizador potencialmente reductivo, debe ser un buen conductor electrónico y tener una estructura integrada.

El *ánodo* debe ser resistente a la corrosión en un electrolizador potencialmente oxidante, debe ser buen conductor electrónico y tener una estructura integrada. Ambos electrodos se encuentran separados uno del otro por el diafragma o por una membrana impermeable para gases.

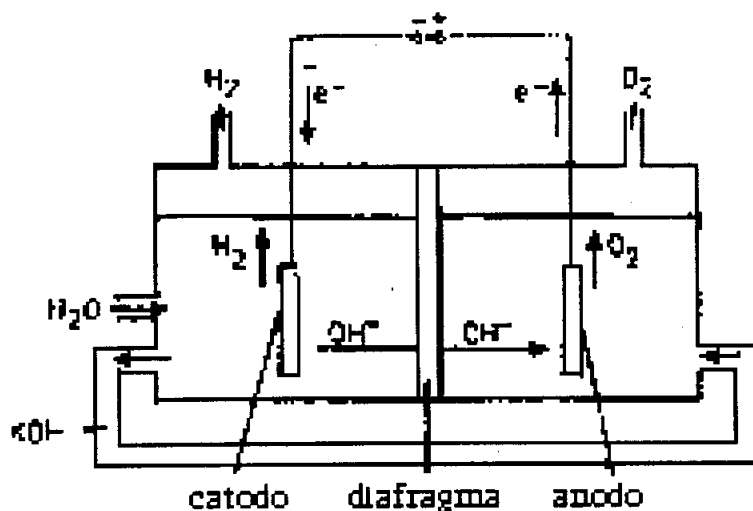
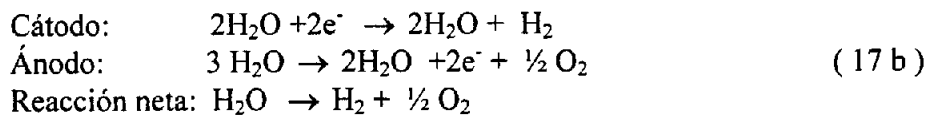


Fig. 11. Electrólisis del agua en un electrolito alcalino.

Una situación análoga resulta de la electrólisis ácida. En este caso se muestran las ecuaciones básicas que son:



La reacción es implementada hoy como una membrana electrolítica como se muestra en la Fig.12 originalmente desarrollada en la Compañía general de Electricidad de E.U.A.

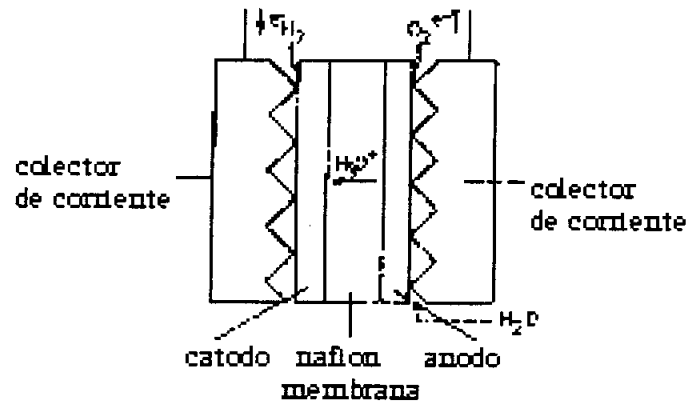


Fig.12 Electrólisis de agua con un electrolito ácido.

Esta electrólisis se basa en el uso de un protón-conductor, intercambiador de cationes (*Nafion*) como electrolizador. La membrana no hace el papel de un medio iónicamente conductor, pero sí de electrones y separa los dos gases producidos. Los catalizadores son mezclados en una superficie de la membrana para generar un íntimo contacto electrodo-electrolizador.

3.2.3. Celdas Electrolíticas.

A los sistemas en que se aplica externamente un potencial eléctrico con el objeto de generar reacciones químicas de óxido-reducción, se les conoce como *celdas electrolíticas*



En general, los procesos electroquímicos pueden separarse en dos grupos:

a) Procesos en que los electrodos no sufren ningún cambio.

Los materiales que se introducen al electrolito sirven únicamente como intermediarios para que en su superficie se realice la transferencia de carga y se oxiden o se reduzcan las especies presentes en el electrolito. Por ejemplo, la descomposición del agua se puede lograr aplicando un potencial superior a 1.3 volts entre dos electrodos de platino.

En este proceso, denominado *electrólisis*, se observa la formación de Hidrógeno en el cátodo, mientras que en el ánodo se desprende Oxígeno. Sin embargo, las piezas de platino no sufren ninguna alteración.

b) Procesos en que los electrodos participan activamente.

Pertencen a este grupo los casos en que el ánodo se disuelve en forma intencional, como en el electro refinado del cobre, o se oxida deliberadamente, como en el caso del aluminio para la obtención de aluminio anodizado que tanta aplicación tiene en la construcción, y el de las pilas carbón-Zn.

Desafortunadamente, en muchos casos los electrodos reaccionan cuando no están supuestos a hacerlo, esto es, se oxidan, se contaminan o se disuelven, disminuyendo drásticamente la vida útil de los materiales y ocasionando grandes pérdidas económicas.

En general, los diferentes materiales que se utilizan como electrodos pueden ser utilizados sin problema dentro de ciertos intervalos de potencial eléctrico aplicado.



Por ejemplo, un electrodo de mercurio es muy utilizado para reacciones de reducción en medios acuosos, porque inhibe la electrólisis del agua y permite así el estudio de muchas sustancias; pero es prácticamente inútil como ánodo, esto es para procesos de oxidación, ya que, a potenciales positivos, es el propio mercurio el que se oxida. Por otra parte, los electrodos de platino son muy utilizados en el laboratorio, pues permiten trabajar en zonas más o menos amplias de potencial sin verse ellos afectados.



3.3 TERMODINÁMICA DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

Un análisis termodinámico del rompimiento electrolítico del agua es tomando para el cálculo sólo las propiedades termodinámicas del agua y los productos (H_2 y $\frac{1}{2} O_2$) bajo condiciones de trabajo efectivo de la electrólisis del agua. El voltaje reversible correspondiente puede ser expresado de la siguiente forma:

$$U_{rev,T,P} = \frac{\Delta G_{f^0}(H_2O(l))_T}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{(p - p_w)^{3/2} p_w^0}{p_w} \quad (18)$$

Donde:

p_w = Presión de vapor parcial del agua.

p_w^0 = Presión de vapor del agua a condiciones standard.

La descomposición termodinámica reversible del voltaje correspondiente a la Energía molar Standard de Gibbs $\Delta G_{f,T}$ del rompimiento del agua se obtiene por la fórmula:

$$U_{rev,T}^0 = 1.5184 - 1.5421E - 3T + 9.523E - 5T * \ln T + 9.84E - 8T^2 \quad (19)$$

donde :

T (=) Kelvin.

La curva correspondiente se muestra en la curva de la Fig.13.

U_{rev}^0 vs T, es graficada, obteniendo para la electrólisis del agua, el voltaje termoneutral U_{tn} basado en el cambio de entalpía para la celda de reacción.



Este voltaje se define por la ecuación:

$$U_m = -\frac{\Delta H^0_f(H_2O(l))_T}{2F} \quad (20)$$

y corresponde al voltaje entálpico $U_{\Delta H}$.

Los primeros valores para el voltaje termoneutral como una función de la temperatura indican ese incremento con incrementos de temperatura, con muy pequeñas variaciones. 1.48 V a 25°C, 1.49V a 100°C. Resultados recientes para estos valores muestran que decrecen con elevaciones de temperatura. El voltaje correspondiente depende de la temperatura como se muestra en la gráfica de la Fig. 13. Si la entalpía molar de la reacción para el rompimiento del

agua es tomado como el voltaje entálpico $U_{\Delta H} = \frac{-\Delta H}{2F}$,

donde el valor correspondiente a altos calores para el Hidrógeno U_{HHV} pueden definirse como:

$$U_{HHV,T,P} = U_{\Delta H,T,P} + \frac{(H_{T,P} - H_{298}^O)_{W(l)}}{2F} \quad (21)$$

En este caso, $H_{W(l)}$ es la entalpía molar del agua en fase líquida. La presión depende de $U_{\Delta H}$ que es la más negligible, y análogamente en U_{HHV} . Esta difiere a partir de cero solamente porque la desviación de los gases parte de la idealidad.

La temperatura depende de los voltajes U_{HHV} , $U_{\Delta H}$ que se pueden representar por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} U_{\Delta H,T}^0 &= 1.5187 - 9.763E - 5T - 9.50E - 8T^2V \\ U_{HHV,T}^0 &= 1.4146 + 2.205E - 4 + 1.0E - 8T^2V \end{aligned} \quad (22)$$

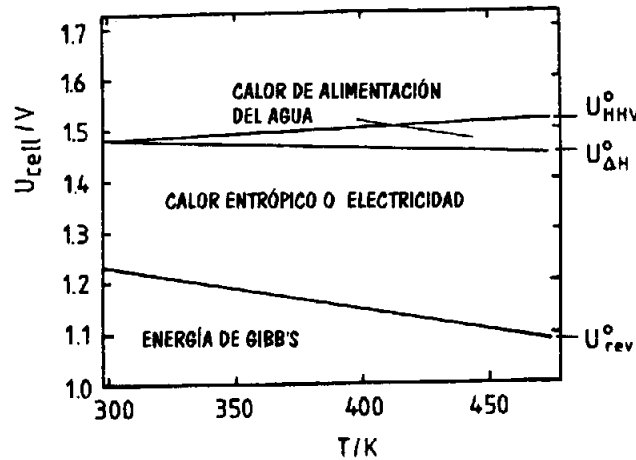


Fig. 13. Temperatura dependiente de las contribuciones de IR y sobrepotencia corregida del voltaje de la celda.

Los gráficos correspondientes son mostrados en la Fig.13. En donde a partir de esta figura se muestra que tanto U_{HHV} como, $U_{\Delta H}$ son idénticos a 25°C y son divergentes a 200°C por un 5%.

De acuerdo a la ecuación (21), los altos calores valuados para el voltaje U_{HHV} representan la entalpía contenida de los productos en estado gaseoso para la electrólisis a una temperatura relativa del agua de 25°C. La diferencia $U_{HHV} - U_{\Delta H}$ por lo tanto es el voltaje energético equivalente necesario para una alimentación de una mol de agua a 25°C .

$$U_{HHV,T} - U_{\Delta H,T} = \frac{1}{2F} \int_{298}^T C_{p(w)} dT \quad (23)$$

Donde:

$C_{p(w)}$: Es la capacidad calorífica molar del agua.

La eficiencia energética de la electrólisis del agua puede ser definida por:

$$\eta = \frac{U_{HHV}}{U_{obs}} \quad (24)$$

Diseño Termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 77 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrogeno como combustible



Esta definición puede ser utilizada tanto a condiciones atmosféricas, como para una electrólisis a presión.

Una fórmula particular exacta para el cálculo de la presión parcial del agua sobre extensas concentraciones y rangos de temperatura entre 0-18m (KOH) y 273-573 K se obtienen de la ecuación:

$$\log P_{W,T,m} = F_1(m) + F_2(m) * F_3(T) \text{ bar.} \quad (25)$$

con:

$$F_1 = -0.0151m - 1.679E - 3m^2 + 2.26E - 5m^3$$

$$F_2 = 1.0 - 1.206E - 3m + 5.60E - 4m^2 - 7.82E - 6m^3$$

$$F_3 = 35.446 - \frac{3343.9}{T} - 10.9 \log T + 4.16E - 3T.$$

donde:

T = (Kelvin)

m = (moles/kg)

Varios valores calculados de acuerdo a esta fórmula se obtienen en las Fig.14 y 15.



A partir de los datos de la Fig.14 y 15 es obvio que cerca de los 80°C la electrólisis a presión ayuda a prever pérdidas de agua la cuál puede escapar como vapor del electrolizador.

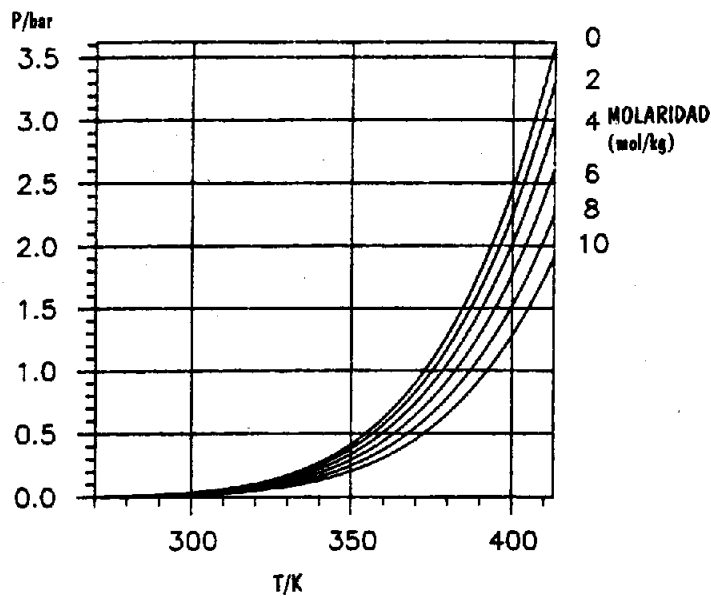


Fig. 14 Presión de Vapor Parcial de soluciones acuosas de Hidróxido de Potasio en bar.

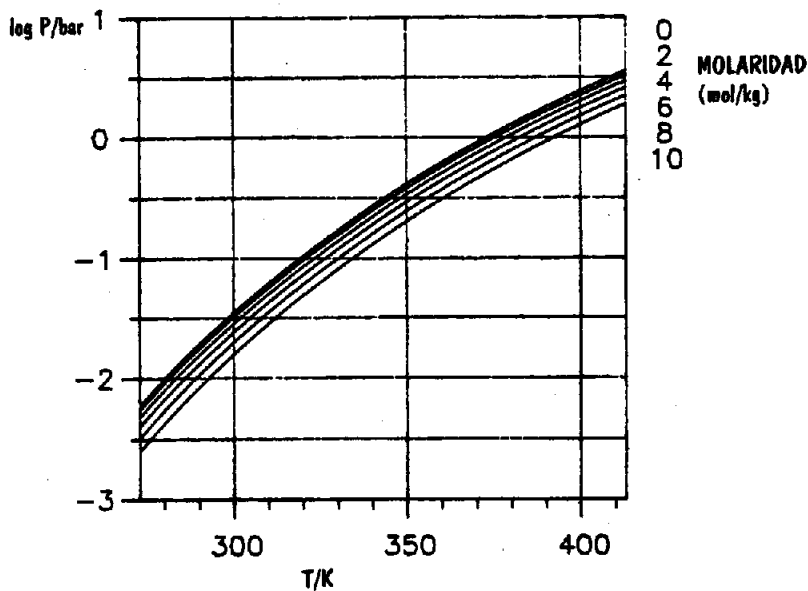


Fig. 15 Presión de Vapor Parcial Logarítmica de soluciones acuosas de KOH.



3.4 TÉCNICA DE EJECUCIÓN PARA LA ELECTROLISIS DEL AGUA.

3.4.1 Celda de Voltaje.

Ejecutando la electrólisis del agua bajo las condiciones técnicas demandadas para las celdas de voltaje las cuales son notablemente altas donde la descomposición del voltaje U_o correspondiente al U_{rev} (eq.19).

La celda de voltaje técnica U_{cell} esta compuesta de la descomposición de voltaje U_o , omitiendo las pérdidas de voltaje IR_i , causada por la resistencia interna R_i del electrolizador y los sobre potenciales anódicos y catódicos η_c y η_a . Esto se muestra esquemáticamente en la Fig.16.

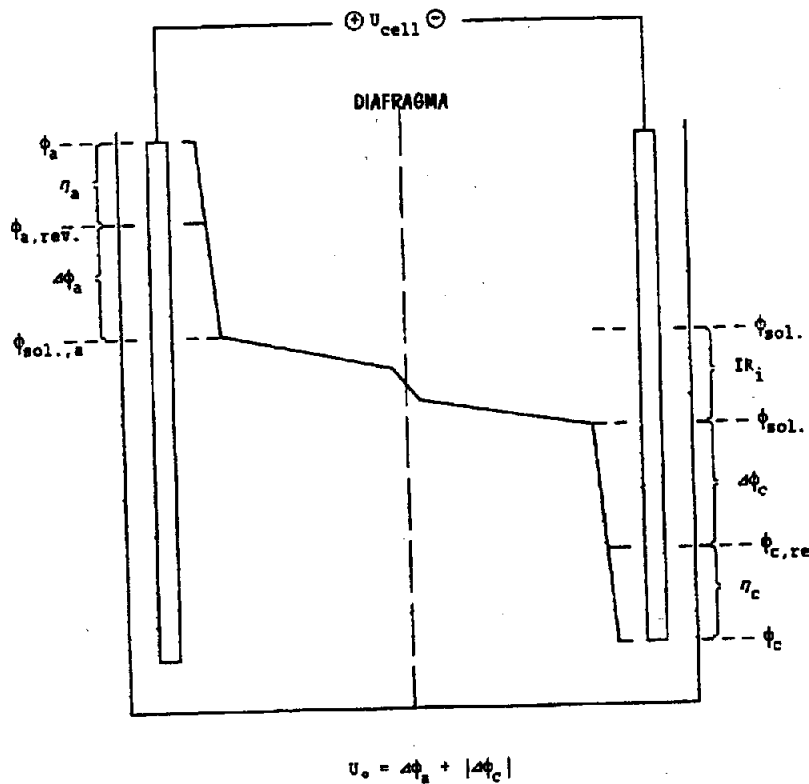


Fig. 16. Componentes de la Celda de Voltaje en una Celda Electrolytica.



U_{cell} puede entonces escribirse como:

$$U_{cell} = U_o + IR_i + \eta_a + \eta_c \quad (26)$$

Los sobrevoltajes $\eta_{a,c}$ se incrementa logarítmicamente con la densidad de corriente j . Sin embargo pueden linealizarse con una buena aproximación para un rango limitado de densidades de corriente altas (generalmente de $0.3 - 1 \text{ A/cm}^2$) como:

$$\eta_a + \eta_c = \Delta U \eta + jR^*_\eta \quad (27)$$

La forma de linealización

$$U_{cell} = U_o + \Delta U \eta + j(R^*_i + R^*_\eta) \quad (28)$$

$$U_{cell} = U \eta + jR^*_{sum} \quad (28 a)$$

Este puede ser válido en el caso de densidades de corrientes altas. R^*_i es la resistencia específica de la superficie de la celda del electrolizador, y R^*_η es la inclinación de la linealización aproximada de la ecuación Butler-Volmer.

Se muestra en la Fig. 17 esquemáticamente la correlación de una técnica de electrólisis del agua en la que se grafican. Celda de voltaje-densidad de corriente. Si la función U_{cell} es extrapolada a los valores $j=0$, $U \eta$ es obtenida de acuerdo a la ecuación 28a.

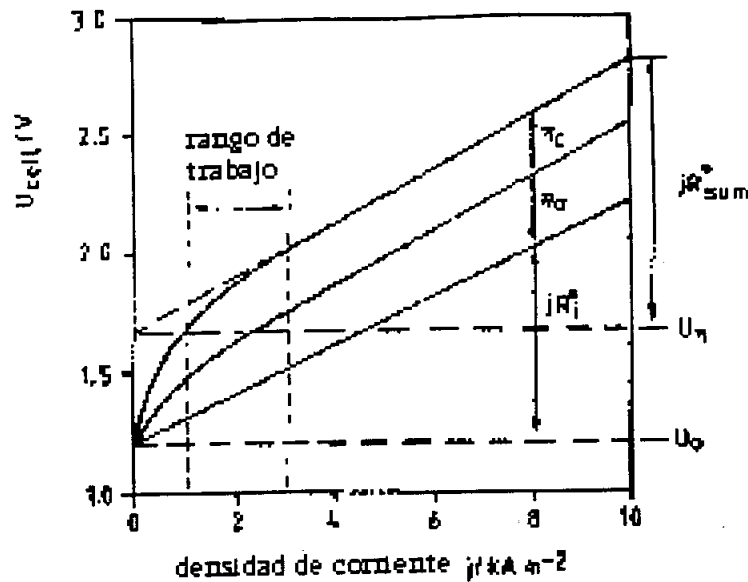


Fig. 17 Presentación esquemática del voltaje de la celda/densidad de corriente. Correlación de electrolizadores convencionales de agua alcalina (28 wt % KOH, 85°C).

3.4.2 Componentes de la Celda.

3.4.2.1 Configuración de la Celda.

Esta celda para electrolizar el agua consta de la armadura o coraza de la celda, cámara del ánodo y cámara del cátodo, normalmente vienen encajonadas por paredes para la celda bipolar, y un separador o diafragma, el cuál es para separar los gases de Hidrógeno y de Oxígeno el uno del otro sin peligro. El separador intenta ofrecer una resistencia tan pequeña como sea posible para el paso de corriente en la celda.



Un fenómeno particular de la electrólisis del agua es la necesidad de tomar en consideración los gases en el electrolizador. La resistencia eléctrica del conductor eléctrico puede ser incrementada notablemente por la fase de gas que lo envuelve. La conductividad eléctrica del gas es prácticamente cero, de aquí que los esfuerzos sean hechos para obtener la fracción de volumen relativo del gas tan bajo como sea posible. Una posibilidad es la electrólisis a presión.

Para que se reduzca la resistencia interna de la celda la tan llamada configuración vacío-cero que se muestra en la Fig.18 es adoptada hoy en día para el mejoramiento de la manufactura del electrolizador.

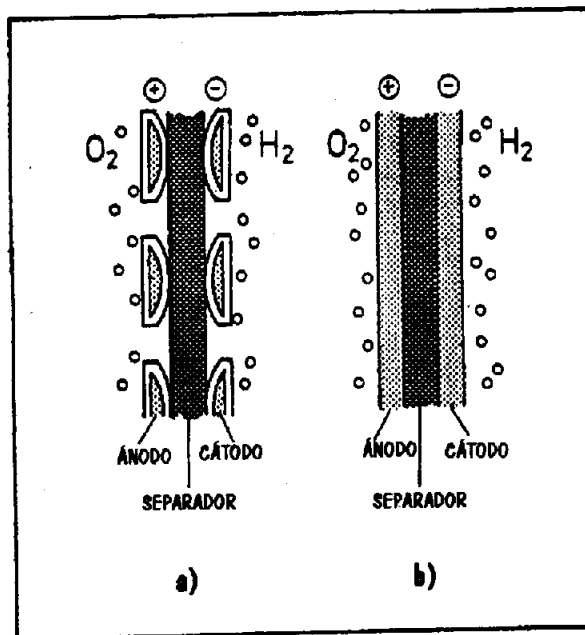


Fig. 18 Celdas geométricas, a) con electrodos perforados
b) Con la técnica tipo sándwich.

En esta configuración las partículas de los materiales del electrodo (metales porosos, metales extendidos, platos perforados entre otros) son presionados sobre cualquiera de los lados del diafragma, tanto que los gases de Hidrógeno y Oxígeno son forzados a abandonar los electrodos hacia atrás. Bajo condiciones semejantes los gases no interfieren grandemente con el paso de la corriente a través del electrolizador entre los electrodos.



3.4.2.2 Materiales de la Celda.

La mayoría de los electrolizadores hacen uso exclusivamente de componentes metálicos. El material de construcción más conveniente para las partes metálicas del electrolizador alcalino convencional operando a temperaturas cerca de los 80°C , es un acero normal. En los electrolizadores modernos, donde se trabaja a altas temperaturas (entre $90 - 120^{\circ}\text{C}$), el acero no es el material adecuado, debido a que su resistencia a la corrosión no es lo suficientemente grande.

El acero cada vez con mas frecuencia es reemplazado por níquel el cuál es mucho más estable debido a que su protección es más extensa la comparación de estos materiales, se presenta en la Fig.19 la cual muestra diagramas de corrosión de hierro y níquel.

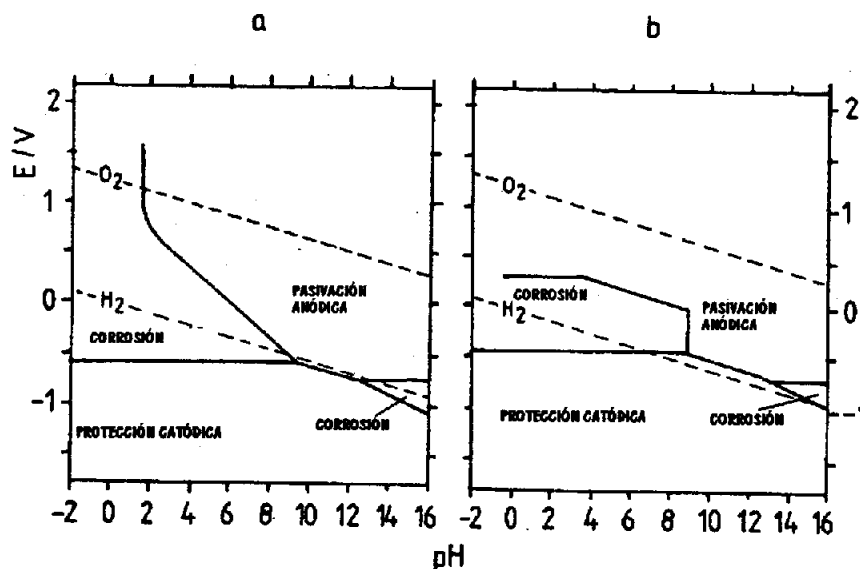


Fig. 19 Dominio de Corrosión, Protección Catódica y Pasividad Anódica del acero (a), níquel (b) a 25°C .



El níquel es un material de construcción el cual es flexible, físicamente débil y más caro que el acero, tanto que puede optarse por no utilizarlo como volumen de material para la armazón de celdas de electrolizadores a presión.

En cambio, niquelando líneas de protección electrolíticamente o químicamente puede aplicarse al acero.

Para la mejora de electrolizadores a pequeña escala se utilizan materiales poliméricos (polisulfones) que se han introducido para la fabricación de corazas de las celdas.

3.4.2.3 Separadores y Diafragmas.

En la electrólisis convencional del agua los diafragmas de asbestos son los utilizados normalmente. En estos los radios de las partículas son más pequeños que los radios de las burbujas del gas contenido en el electrolizador, el cuál para el Hidrógeno puede ser cerca de $10\mu\text{m}$

El líquido electrolítico esta sobresaturado con gases en la vecinidad del electrodo. Sin embargo en las celdas modernas, los electrodos tienen una abertura de diafragma cero, el electrolito sobresaturado con gases puede entrar dentro de los poros del diafragma. Esto da como resultado la precipitación del gas a partir del estado de sobresaturación que lo envuelve permanentemente, obstruyendo los poros y llevándolos a un incremento incontrolable en la resistencia del diafragma .



La regla para evitar esto, es tener un tamaño de poro menor de $10\mu\text{m}$. Es necesaria una permeabilidad hidrodinámica baja para alcanzar este orden de magnitud, el cual se requiere para prevenir el intercambio de electrones entre los dos compartimientos electrolíticos. Una alta porosidad de por lo menos 50%, es el deseado para obtener una resistencia electrolítica baja.

Para la membrana del electrolizador un protón conductor se intercambia por el catión polímero perfluorinado en forma de nafi3n, membrana que sirve simultáneamente como separador y como electrolito.

Los grupos ionofóricos en este polímero son grupos de ácidos sulfónicos ($-\text{SO}_3\text{H}$, Fig.20), los cuales en contacto con el agua líquida producen una hidratación y la disociación ($-\text{SO}_3^-_{\text{aq}} + \text{H}^+_{\text{aq}}$). Esta hidratación de los grupos de ácidos sulfónicos se conoce para formas de grupos polares, de lo contrario para los no polares el polímero patrón que además ofrece la posibilidad de una masa iónica y transferencia de carga en un entorno de conducción no electrolítica, es esencialmente el aislador de PTFE.

Diafragmas de asbestos con un espesor de varios milímetros se muestran bajo condiciones de trabajo industrial (90°C , 30 wt % KOH) la superficie eléctrica específica trabaja resistencias de $0.5 - 1.0 \Omega\text{cm}^2$, donde el nafi3n, membrana con una conductividad específica de $80 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ y un rango de espesor entre $0.1 - 0.3 \text{ mm}$ generalmente exhibe una resistencia específica en la superficie entre $0.1 - 0.4 \Omega\text{cm}^2$. Debido a que la alta resistencia interna del equipo electrolizador con clero de asbestos, a provocado un gran número de nuevas propuestas durante la década. Sólo un pequeño número de soluciones tienen alguna oportunidad para introducirse en las prácticas industriales como se discutirá después.



Si se recubre el electrodo de Silicio, con una película polimérica; ésta funciona como un impermeabilizante que evita el paso del agua hacia la superficie, y la corrosión disminuye notablemente.

Sin embargo, esta película protectora debe ser también conductora, pues de otra forma impedirá el flujo de electrones y el electrodo será inútil. Generalmente, los polímeros tienen baja conductividad, por lo que ha sido necesario buscar otros materiales con buenas características de conducción.

Uno de los más utilizados es el polipirrol. Esta sustancia resulta de la oxidación de muchas moléculas de pirrol:



las cuales se unen entre sí para formar cadenas de gran longitud. La oxidación se puede hacer electroquímicamente de tal forma que el silicio, actuando como ánodo, se recubre del polímero. La cantidad de polipirrol formada y, por lo tanto, el espesor de la película, se pueden controlar fácilmente mediante el tiempo de aplicación del potencial.



3.4.3 Celdas Bipolares y Monopolares.

3.4.3.1 Descripción General de Electrolizadores Monopolares y Bipolares.

Los Electrolizadores Industriales se componen de un gran número de celdas o pares de electrodos, donde el número depende del diseño general y la capacidad de producción. Unidades semejantes son tanto operadas como monopolares, en celdas tipo tanque Fig.21 o como bipolares, celdas purificadoras a presión Fig.22.

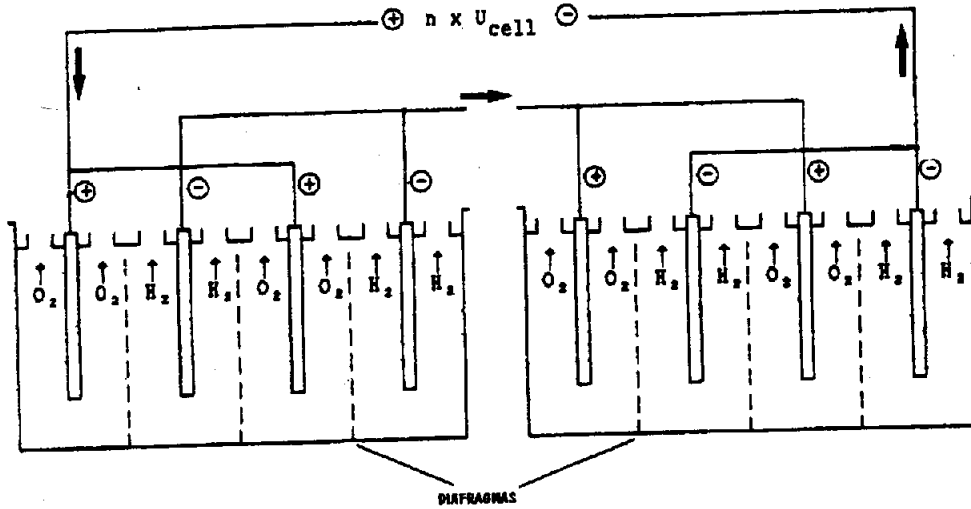


Fig. 21 Celda Unipolar tipo tanque ruta esquemática construcción-corriente.

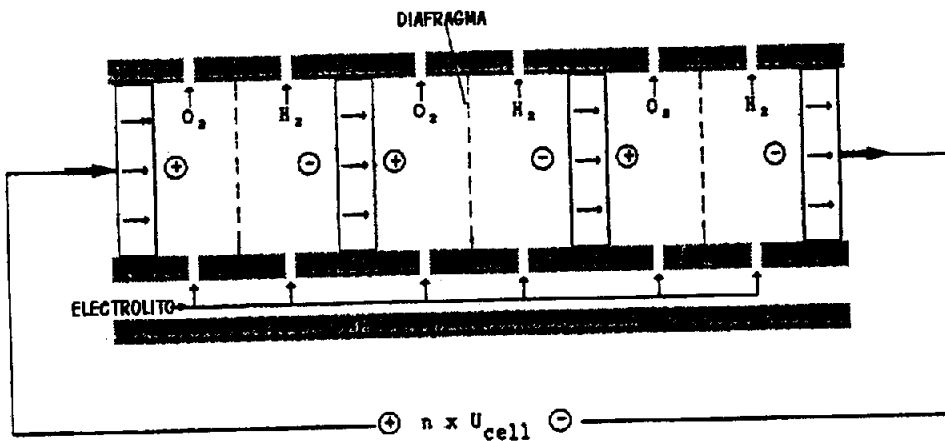


Fig. 22 Celda Bipolar filtro-presión.

En la construcción monopolar, cada electrodo es individual, y su línea de alimentación tiene sólo una polaridad ya sea el ánodo o el cátodo. Muchas de estas celdas de separación simples son conectadas en serie electrolíticamente.

En el electrolizador bipolar, las celdas son arregladas de acuerdo a la presión del purificador principal. Cada pared de partición metálica separando una celda a partir de varias al mismo tiempo como un elemento transportador de corriente abastecedor en un lado un cátodo y en el otro un ánodo con corriente. El cátodo y el ánodo son por consiguiente integrados en una sola parte metálica la cual separa simultáneamente el compartimiento del ánodo y el cátodo en dos celdas adyacentes.

Un lazo longitudinal sirve para arrojar a presiones juntas la pila completa, que consta de la coraza, electrodos, separadores y empaques. Cada uno de los dos diseños tiene sus ventajas y desventajas. Las celdas monopolares son de un simple y firme tanque construido con relativamente pocos empaques y puede ser manufacturado mas fácilmente y sin dificultad de operación. Ellos son baratos y se utilizan generalmente para electrólisis a presión ambiental.

Donde la línea de corriente es llevada a los cuerpos de los electrodos Fig.23 causando perdidas relativas por alto voltaje y distribución de densidad de corriente no uniforme produciendo por lo tanto una reducción en la producción de energía.

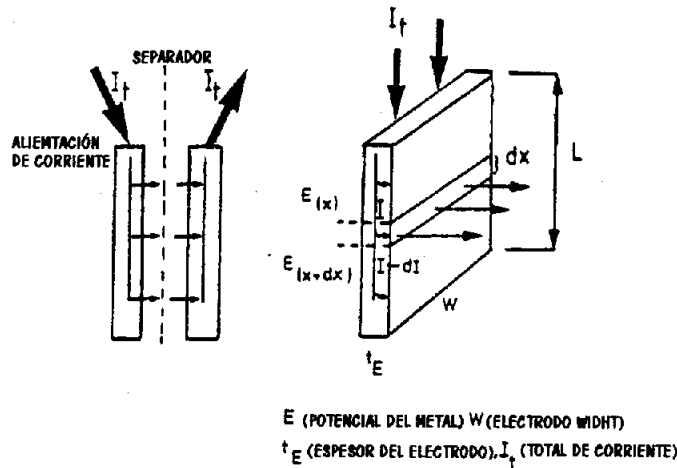


Fig. 23 Dirección del Flujo de Corriente en un electrodo con la función monopolar.

3.4.3.2 Distribución de Densidad de Corriente en Celdas Monopolares y Bipolares.

En los electrolizadores industriales de agua, un electrodo operando de modo bipolar se suplementa con distribución de densidades de corriente en comparación con uno monopolar. Esto se puede demostrar siguiendo la simplificación del análisis:

Aplicando la ley de Ohm para la fase metal de un electrodo de una celda monopolar Fig.23 la corriente $I(x)$ siguiendo a través del cruce de la sección (s) t_E del electrodo esta obteniendo la distancia (x) a partir de la corriente alimentada.

$$I(x) = - \frac{w * t_E * dE}{\rho * dx} \tag{30}$$

Definiendo la densidad de corriente de la celda $j(x)$ a una distancia x como:

$$j(x) = - \frac{dI(x)}{w * dx} \tag{31}$$

La segunda derivada del potencial se obtiene:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{j(x) \cdot \rho}{t_E} \quad (32)$$

De acuerdo a la ec.31 la densidad de corriente j es una función de la altura del electrodo (x). Asumiendo el primero como aproximación cero donde j es constante a lo largo de toda la sección de cruce de la celda.

$$j = \frac{I_t}{wL}$$

donde la siguiente ec.33 describe la pérdida de voltaje ΔE a lo largo de la longitud del electrodo L :

$$\Delta E = E(x=0) - E(x=L) = \frac{\rho \cdot L \cdot I_t}{2 \cdot t_E \cdot w} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot j}{2 \cdot t_E} \quad (33)$$

Esta ecuación se obtiene por la integración de la ec. 32.

El ΔE puede obtenerse tan pequeño como sea posible. La regla para obtener un ΔE bajo a lo largo del electrodo, es que el electrodo debe tener las siguientes propiedades de acuerdo a la ec.33.

Este no debe ser alto (L corto), debe tener una buena conductividad eléctrica (ρ pequeña) y debe ser tan grueso como sea posible (t_E alto). Sin embargo, son técnicas y represiones económicas las cuales imponen límites en un electrolizador técnico.

En el caso de una celda de construcción de espacio cero, la caracterización de la configuración de la alimentación usual de corriente en un electrolizador monopolar Fig.21 con respecto al resultado de la distribución de la densidad de corriente puede ser realizada de la siguiente manera.



Ohms bajos son aplicados tanto para el ánodo (subíndice a) como para el cátodo (subíndice c):

$$\frac{dE_a}{dx} = -\frac{I_a(x) * \rho_a}{w_a * t_a}; \frac{dE_c}{dx} = -\frac{I_c(x) * \rho_c}{w_c * t_c} \quad (34)$$

donde:

$$w_a = w_c = w$$

$$t_a = t_c = t_E$$

$$\rho_a = \rho_c = \rho$$

En paralelo con la derivación de la ec. 30-33 y tomando en cuenta que el incremento de corriente en el ánodo es equivalente al decremento de la corriente en el cátodo llegamos a:

$$j(x) = -\frac{dI_a(x)}{w * dx} = \frac{dI_c(x)}{w * dx} = \frac{E_a(x) - E_c(x)}{h * \rho_c} \quad (35)$$

donde:

ρ_c = Resistividad del separador

La solución puede obtenerse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} E_a &= A.Exp(Kx) + B.Exp(-Kx) + Cx + D \\ E_c &= -A.Exp(Kx) - B.Exp(-Kx) + Cx + D \end{aligned} \quad (36)$$



con :

$$K = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{h \cdot t_E \cdot \rho_e}} ; \text{ y A,B,C,D, son constantes arbitrarias de una naturaleza bastante complicada}$$

la cual fue estimada a partir de las condiciones límite.

$$X=0; E_c=0; E_a=E_{\text{cell}}; x=L, I_a=I_c=0. \quad (37 a)$$

Un ejemplo de Diferencial de Potenciales $E_a - E_c$ en el criterio de distribución de densidad de corriente ec. 35 para la configuración de celdas monopares se obtiene en la Fig.25.

La dirección principal del flujo de corriente en un electrodo con la función bipolar es diferente a partir del caso monopolar y se obtiene esquemáticamente en la Fig.24 (configuración de celdas de espacio cero).

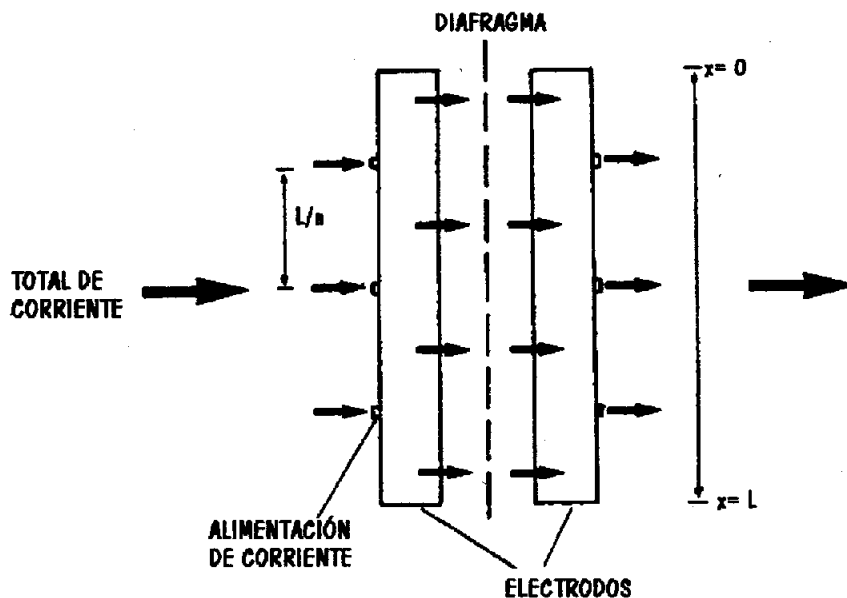


Fig. 24 Dirección del flujo de corriente en un Electrodo con la función Bipolar.



Esta figura muestra la simplificación unidimensional de la distribución del flujo de corriente entre dos electrodos bipolares. Siguiendo el mismo procedimiento matemático como en las ec. 29-31, las constantes A,B,C,D estimadas de acuerdo a la Fig.24 a partir de:

$$x = i \cdot \frac{L}{n} \tag{37 b}$$

donde $E_a = E_{cell}$, $E_c = 0$; $0 \leq i \leq n$

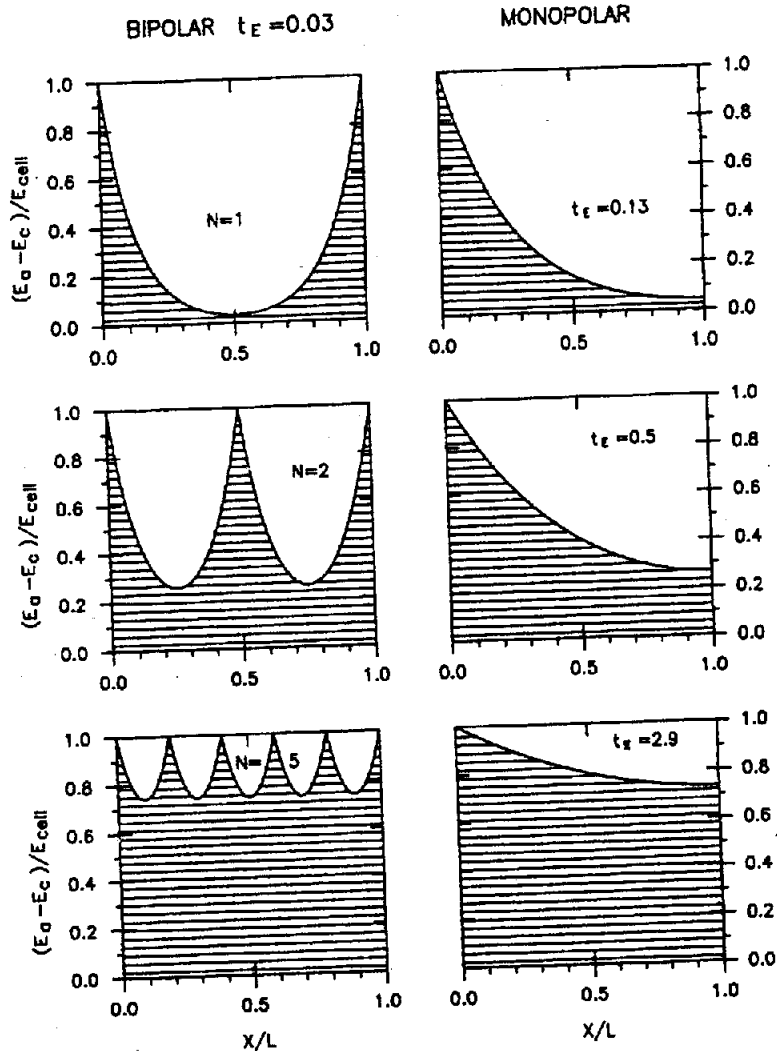


Fig. 25 Comparación de espesores de electrodos monopolares y bipolares, Cada uno con factor de utilización idéntico.

Longitud total del electrodo $L=100$ cm, $\rho=2 \cdot 10^5 \Omega$ cm, $\rho_e = 2 \Omega$ cm, $h=0.10$ cm, w arbitraria, t_E en cm.



Acordando que la diferencia de potenciales $E_a - E_c$ como los criterios de distribución de densidad de corriente se obtienen de la Fig.25. Esta figura compara los electrodos monopolar y bipolar, donde cada uno de ellos tiene el mismo factor de uso, que se expresa como el área sombreada de la integral.

Donde el número de puntos de contacto en el electrodo bipolar se volverá mayor, donde es la regla para lograr el mismo uso, el espesor del electrodo monopolar debe incrementarse. Esto se puede ver en la figura de las celdas bipolares con electrodos de espacio-cero no tienen una densidad de corriente completamente uniforme.

Por el contrario, a partir de la corriente eléctrica esta es transformada al punto exacto a partir del plato bipolar para el electrodo por clavos, alambres, láminas y otros dispositivos, disturbios en la distribución en la densidad de corriente son algunas experiencias, aunque sólo locales. Aunque existen pérdidas de voltaje, pero estas son generalmente bajas y por lo tanto permiten la utilización de estos electrodos.

3.4.3.3 Desviación Electrolítica de Corrientes en la Pila de las Celdas Bipolares.

Las ventajas de las celdas bipolares son obvias cuando nos referimos a la descripción. Ellos tienen un voltaje interno bajo, y las perdidas pueden ser por consiguiente una carga muy pesada. Es más, ellos pueden ser construidos en una forma mucho mas compacta y permitir operaciones presurizadas sin un mayor problema. Sin embargo, ello representa un sistema más complejo y requiere técnicas de diseño mucho mas sofisticadas, mucho más costoso y técnicas de fabricación mas precisas. Una alimentación relativamente estrecha y los canales de salida son integrados dentro del sistema bipolar y el electrolizador puede ser continuamente purificado para prevenir obstrucciones.



Los canales Fig.22 causan una desviación eléctrica de la corriente en la pila de las celdas Fig.26a. Esta corriente parásita reduce la corriente producida y eleva el fenómeno de corrosión en el sistema. Ellos son causados por el bypass electrolítico presentado esquemáticamente en la Fig.26b. Las celdas son caracterizadas con la adición de la resistencia Z , la cual tiene cierta semejanza a las características del diodo Zener.

Las resistencias R_p y R_m representan los puertos de distribución del fluido y las numerosas resistencias respectivamente. Los resultados de la fuga de corriente, similares se muestran diagramáticamente en la Fig.26c la cual tiene que ser calculada por una simulación de computo. Ellos son muy bajos al final de los dos en el bloque electrolizador y muestra un aplastado máximo alrededor del centro de la pila.

El método clásico de cálculo de esta fuga de corriente se basa en una aplicación de la ley de Kirchhoff para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas. La solución se obtiene generalmente con la adición de la ecuación bidimensional de Laplace.

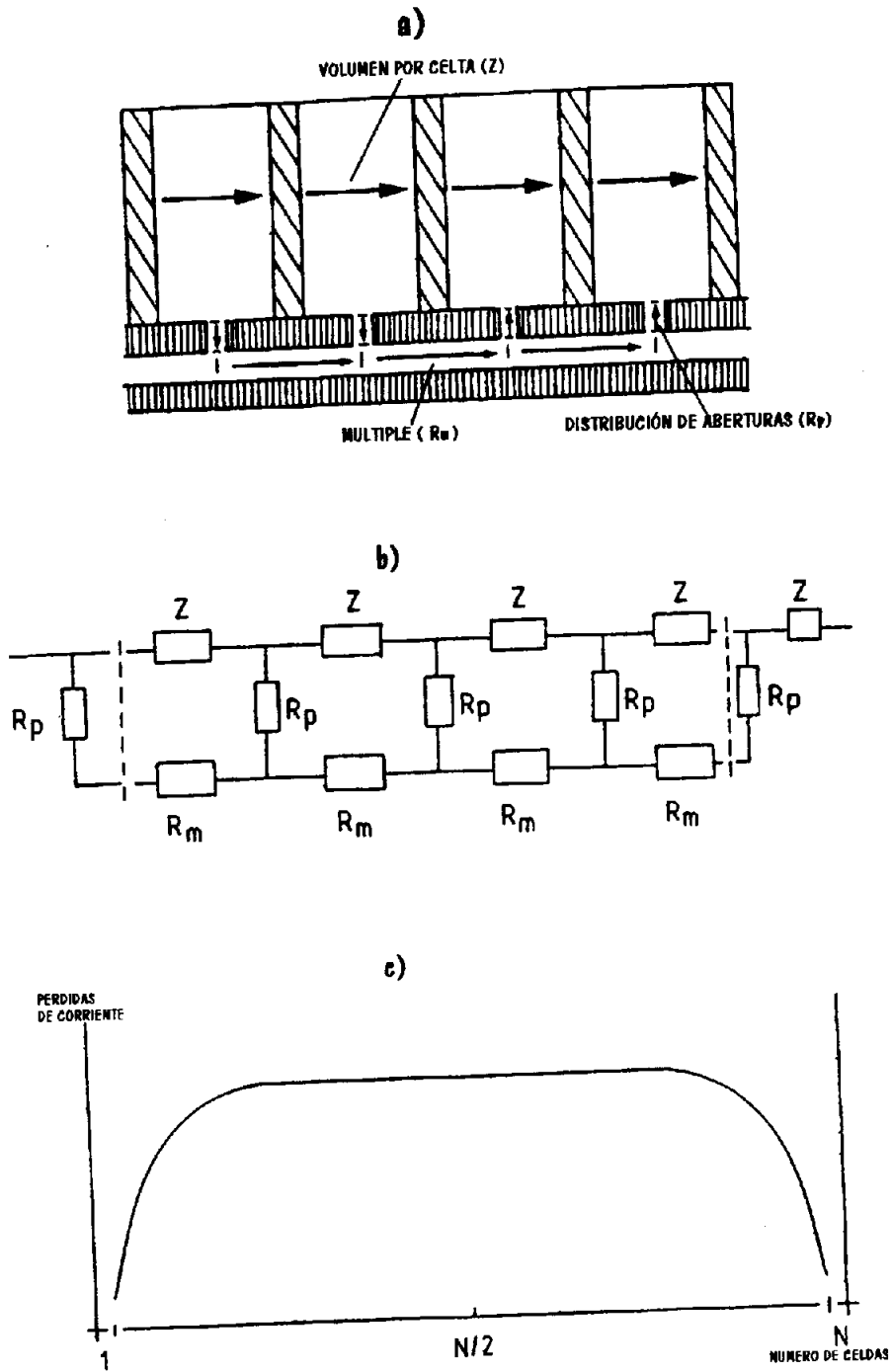


Fig. 26 Esquema de la pila de una electrólisis bipolar: a) desviaciones de corriente a través de la interconexión electrolítica; b) Análogo eléctrico de la pila de la celda; c) corriente desquebrajadamente derramada.



Deben ser propuestos varios métodos para la disminución de la fuga de corriente. Ellos son basados principalmente en tres principios:

1. Rompiendo la continuidad del conductor electrolítico en los canales del bypass.
2. Incrementando la resistencia eléctrica para reducir la sección de cruce de los canales.
3. Balanceando los gradientes de potencial entre las celdas y la sección correspondiente de la línea de bypass con la adición de una corriente protegida aplicada por la adición de electrodos auxiliares.

En el diseño de dispositivos de protección, se debe recordar que un electrolizador también es un sistema hidráulico, con distribución de la presión, la cuál se muestra diagramáticamente en la Fig.27.

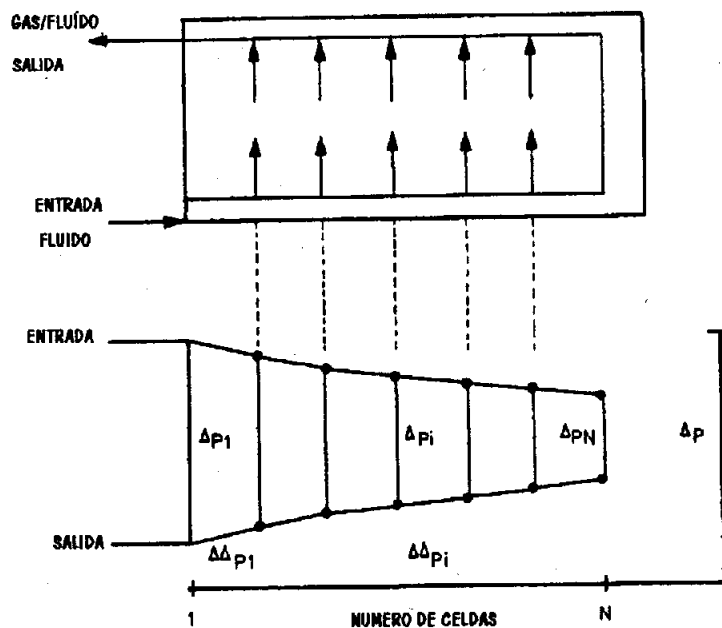


Fig. 27 Distribución de la presión hidrodinámica en un electrolizador bipolar.



La diferencia de presiones por celda ΔP_i puede ser posible si es igual a lo largo de toda la pila, sólo que toda la celda sea suministrada uniformemente con el electrolito. La estabilidad del ΔP_i hace que las pérdidas por fricción $\Delta \Delta P_i$ sean lo mas pequeñas posible. Por esta razón, no debe ser muy grande sino estrecho, a partir de que la resistencia hidráulica sea concentrada en la entrada de los canales Fig.27. En este caso, la resistencia eléctrica es causada por la pequeña sección de cruce de los puertos de distribución.

El objetivo de la optimización es para combinar la protección máxima efectiva de electricidad con la mínima resistencia hidráulica.

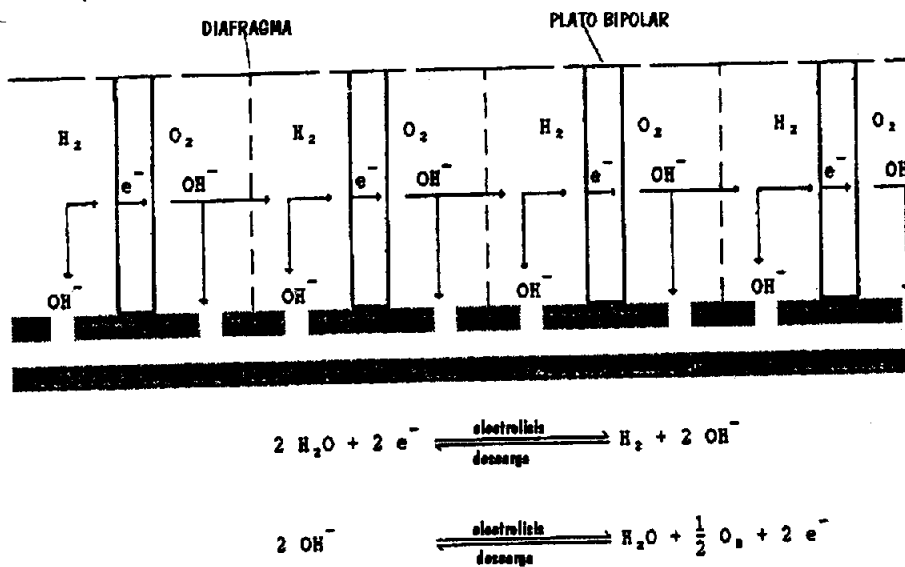


Fig. 28 Descarga para electrolítico/metálico cortos circuitos en electrolizadores bipolares.

3.4.3.4 Electrolizador Monopolar y Bipolar Bajo Condiciones de Operación Discontinuas.

Las propuestas hechas en los últimos años con frecuencia utilizan el off-peak de electricidad, a partir de estaciones de potencia nuclear o sistemas de operación solar para la electrólisis del agua.



Esto significa una utilización anual relativamente baja de la instalación menor a 3 000 h/año. Durante un bajo tiempo, lo cual puede dar mas de 5 000 h/año, las celdas pueden ponerse en marcha a una sola temperatura. Con un modo de operación semejante, los cátodos y ánodos en el caso de una celda bipolar descargan mutuamente la mitad de ellos vía platos bipolares Fig.28 tanto que su potencial puede alcanzar estas zonas, en la cuales, por ejemplo, níquel como el electrodo o material catalizador puede ser puesto en peligro por la corrosión. Con la celda monopolar, el circuito puede ser simplemente un interruptor durante tiempo fuera de servicio en que se espera aumente la resistencia a la corrosión. En un caso semejante las medidas de protección pueden por consiguiente ser tomadas para las celdas bipolares (protección de voltaje etc). Estas pueden no ser necesarias en las celdas monopolares.



3.5 PLANTAS INDUSTRIALES PARA LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

3.5.1 Observaciones Generales.

Algunas inspecciones son aprovechables en los electrolizadores de agua comerciales. La mayoría de ellos trata con electrolizadores alcalinos.

Una tabla de datos técnicos de un número de electrolizadores de agua reflejan el progreso de las técnicas que pueden existir.

La electrólisis del agua es todavía sólo una tecnología en progreso para obtener el Hidrógeno a partir de energías no fósiles o sea energías renovables. Por eso, la estimulación para recientes extensiones de la energía nuclear en Francia, Bélgica, Canadá y Japón, sin embargo el interés particular que se tiene en estas ciudades, es la producción electrolítica del Hidrógeno.

La electrólisis del agua puede servir para la nivelación de carga y simultáneamente para el almacenamiento de energía. Para las ciudades de tercer mundo, esta oferta ofrece la posibilidad de cubrir las demandas de Hidrógeno para fertilizantes artificiales evitando la importación de aceites y de exportación de energía solar en un futuro.

Hoy la mayor parte de la industria del Hidrógeno es producida a partir de gas natural y combustibles fósiles.

La electrólisis del agua generalmente no puede competir con estos métodos y está todavía en expansión, principalmente porque los costos de electricidad son prohibitivamente altos. Sin embargo las viejas técnicas y las celdas monopolares simples deben ser reemplazadas gradualmente en el mundo salvaje por las energéticamente más efectivas que son las celdas bipolares.



La tabla 3 muestra una comparación de varios electrolizadores selectos comúnmente aprovechables en el mercado.

TABLA 3
Parámetros típicos de operación para las celdas

| Manufacturera | Electrolyser Corp. Ltd. | Brown Boveri & Cie | Norsk Hydro A.S. | DeNora S.P.A. | Lurgi GmbH | Krebskosmo Berlin |
|---|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Tipo de celda | Tanque monopolar | Bipolar a presion | Bipolar a presion | Bipolar a presion | Bipolar a presion | Bipolar a presion |
| Presion de Operación | 0.1MPa | 0.1MPa | 0.1MPa | 0.1MPa | 3 MPa | 0.1MPa |
| Temp. de Operación | 70°C | 80°C | 80°C | 80°C | 90°C | 80°C |
| Electrolito | 28% KOH | 25% KOH | 25% KOH | 29% KOH | 25% KOH | 25% KOH |
| Densidad de Corriente kA/m ² | 1.34 | 2.0 | 1.75 | 1.85 | 1.86 | 1.85 |
| Voltaje por celda. V. | 1.9 | 2.04 | 1.75 | 1.85 | 1.86 | 1.85 |
| % eficiencia de corriente | 99.9 | 99.9 | 98.0 | 98.5 | 98.75 | 98.5 |
| % pureza de Oxígeno | 99.7 | 99.6 | 99.3-99.7 | 99.6 | 99.3-99.5 | 99.5 |
| % pureza de Hidrógeno | 99.9 | 99.8 | 99.8-99.9 | 99.9 | 99.8-99.9 | 99.9 |
| Potencia de consumo DC-kWh/Nm ³ H ₂ | 4.9 | 4.9 | 4.3 | 4.6 | 4.5 | 4.5 |

*NOTA: La corriente requerida para 1 Nm³ de Hidrógeno = 2 393 A h.

La tabla 4 lista la localización de algunas de las plantas principales de electrólisis del agua, en todo el mundo.



TABLA 4

Plantas de Hidrógeno por diferentes Manufactureras.

| LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA | MANUFACTURERA | CAPACIDAD Nm ³ H ₂ /h. |
|---------------------------|--------------------------|---|
| Nangal, India | DeNora | 30 000 |
| Aswan, Egipto | Brown Boveri | 33 000 |
| Ryukan, Norway | Norsk hydro | 27 900 |
| Ghomfjord, Norway | Norsk Hydro | 27 100 |
| Trail, Canada | Trail | 15 200 |
| Cuzco, Perú | Lurgi | 4 500 |
| Huntsville, Alabama | Electrolyzer Corporation | 535 |

3.5.2 Tanques Tipo Celdas Monopolares.

La Fig.29 muestra un esquema de un electrolizador monopolar. Uno de los primeros electrolizadores de agua técnicos viene a partir de Knowles. Fauser produjo un diseño el cuál puede ser descrito como compacto. Conduciendo a la construcción del tanque tipo celda que hoy en día se utiliza, diseñado por Stuart. La celda Stuart Fig.29 consta de un tanque de acero niquelado rectangular, cubierto por una tapa, a través de la cuál los electrodos de acero son inmersos en el tanque.

Los compartimientos de Oxígeno, separadores de asbesto y electrodos son soportados por la celda cubierta de gas seguro. El diafragma que rodea cada ánodo y portador de Oxígeno evoluciona dentro del compartimiento del ánodo, situado bajo la tapa de la celda. El Hidrógeno es colectado en el otro lado del diafragma, en el compartimiento del cátodo.



Los electrodos son eléctricamente aislados desde la tapa de la celda.

La construcción de esta celda da una gran efectividad en la superficie del electrodo con requerimientos de espacio mínimos.

La celda opera a 70°C con 28% de KOH con una densidad de corriente aproximadamente de 1.5 kA/m².

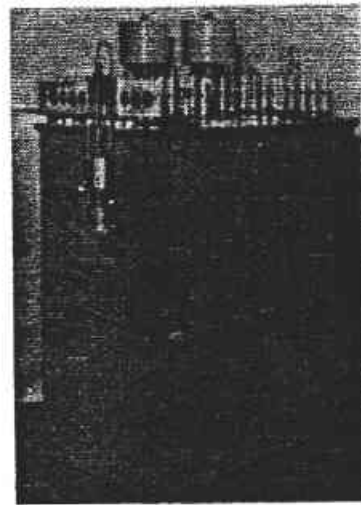


Fig. 29 18 000 amperes en la celda monopolar Stuart tipo tanque.

En el diseño monopolar clásico, los caminos de la corriente son básicamente guiados a lo largo del electrodo. Las desventajas asociadas con esta son mejoradas en la generación I y II de las celdas Stuart, para la simulación del flujo de corriente acordado en los principios de la celda bipolar, Fig.30 tanto que esta es una nueva posibilidad para incrementar la densidad de corriente a 2.5 kA/m². y simultáneamente baja el voltaje de la celda a 1.85 V.

La conexión entre los electrodos de una celda a la otra no son largas entre las secciones superiores de los electrodos sumergidos en el diseño de esta celda pero los electrodos son conectados unos de otros mediante barras de cobre integradas dentro de la pared de la celda, como se muestra esquemáticamente en la Fig.30.



Un progreso mas allá fue alcanzado en la generación II pero reduciendo la resistencia interna y decreciendo el sobrevoltaje del electrodo para mejorar principalmente la temperatura de operación.

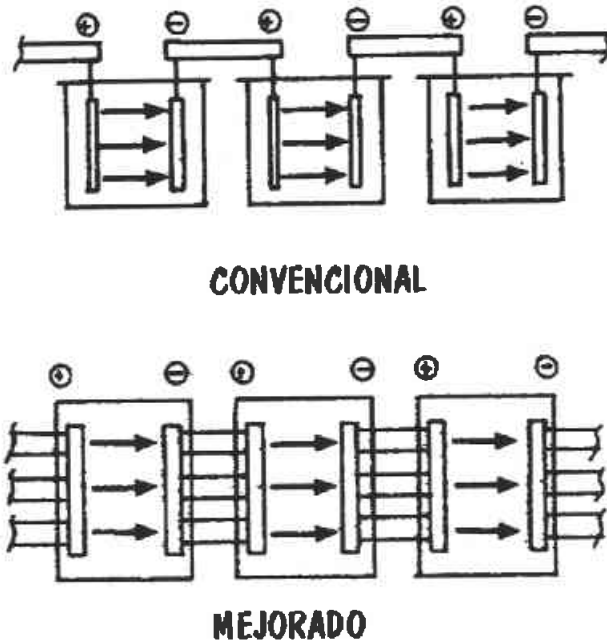


Fig. 30 Ruta de corriente esquemática para electrolizadores monopolares convencionales y avanzados.

3.5.3 Celda Bipolar con Filtro Comprimido.

Este diagrama básico del electrolizador bipolar es mostrado en la Fig.30. Las celdas bipolares son manufacturadas por varias firmas. Estas son generalmente operadas a presión ambiental, sólo LURGI GMBH produce dispositivos a presión.



3.5.3.1 Brown Boveri Y Celdas Cie.

El precursor de la presente celda BBC, es el electrolizador Oerlikon-Schmidt. Las plantas modernas son diseñadas semejantes debido a que ellos requieren un esfuerzo muy pequeño para su operación y servicio.

En el bloque de celdas bipolares del electrolizador BBC los productos (gases) son alimentados a partir de cada celda individual dentro de los separadores de gas por medio de tuberías simples. Fig.31.

- 1.- CÁTODO
- 2.- ÁNODO
- 3.- PORTADOR DEL ELECTRODO
- 4.- DIAFRAGMA
- 5.- CORAZA DE LA CELDA
- 6.- SISTEMA DISTRIBUIDOR DEL ELECTROLITO
- 7.- TUBO DE ALIMENTACIÓN LA CELDA
- 8.- SALIDA DEL GAS
- 9.- SEPARADOR DEL GAS
- 10.- FILTRO DEL ELECTROLITO
- 11.- BOMBA DEL ELECTROLITO
- 12.- PLATOS A PRESIÓN

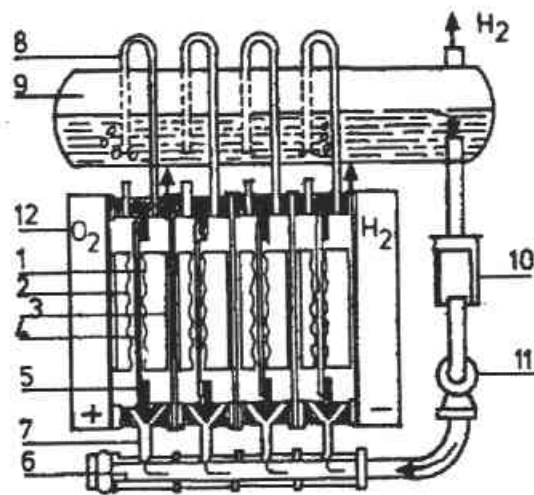


Fig. 31 Esquema de la sección transversal de un electrolizador BBC.

Las celdas se componen de celdas armadas con diafragmas, una separación bipolar, junto con el ánodo y el cátodo, como se muestra esquemáticamente en la Fig.32.

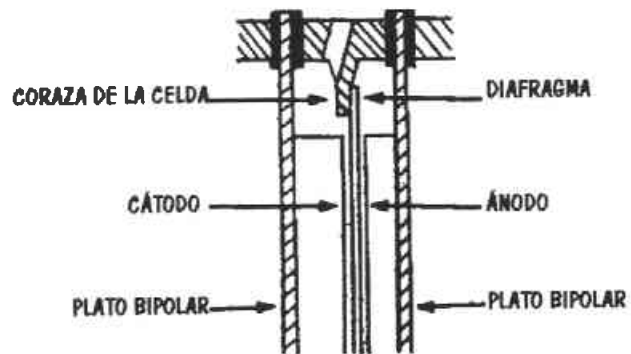


Fig. 32 Estructura de la celda básica de un electrolizador BBC.

El ánodo esta hecho de acero niquelado y el cátodo consta de acero activado electrocatalíticamente.

Las separaciones bipolares metálicas con el diafragma son aisladas eléctricamente desde la armazón de la celda. Los gases separados por el diafragma elevado debido a su propia flotación y dejando la celda en forma de una mezcla gas-electrolito, la cual es alimentada a separadores de gas a través de tubos inundados Fig.31. Ellos son equipados con recubrimiento transparente en los tubos permitiendo el control visual del gas producido y la circulación del electrolito. Al final las tuberías inundadas tienden a descender estos creando una cerradura segura para cada celda individualmente.

Brown Boberi produce unidades electrolíticas con una capacidad de producción entre 5 y 300 Nm³ H₂/h.

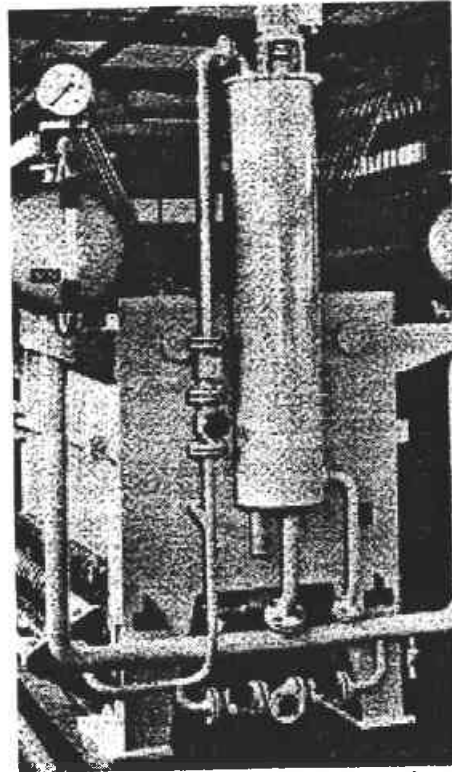


Fig. 33 Electrolizador BBC con una capacidad de producción de $10 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$.

La Fig.33 muestra una fotografía de un electrolizador de agua BBC típico. Las características técnicas se dan en la tabla 3. La planta de electrólisis del agua BBC en Asswan se muestra en la Fig.34.

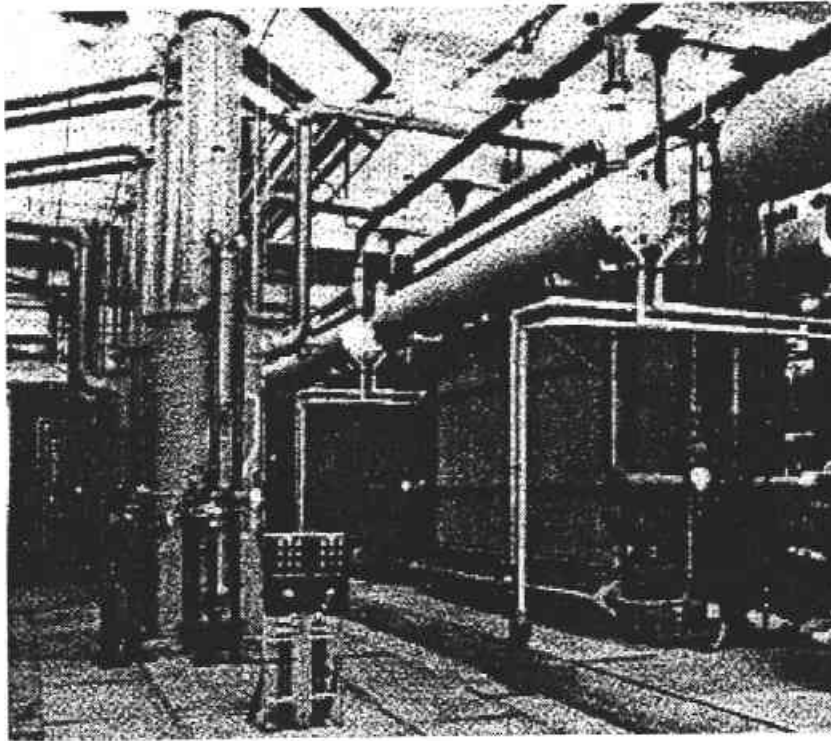


Fig. 34 Electrólisis de agua en la Planta BBC en Asswan.

3.5.3.2 Celdas Krebskosmo.

Krebskosmo en Berlín construyó una planta para la electrólisis del agua en 1972. El aparato Krebskosmo del tipo WE puede producir entre 20 y 200 Nm³ H₂/h. En la Fig.35 se muestra un diseño de un electrolizador típico de estas series.

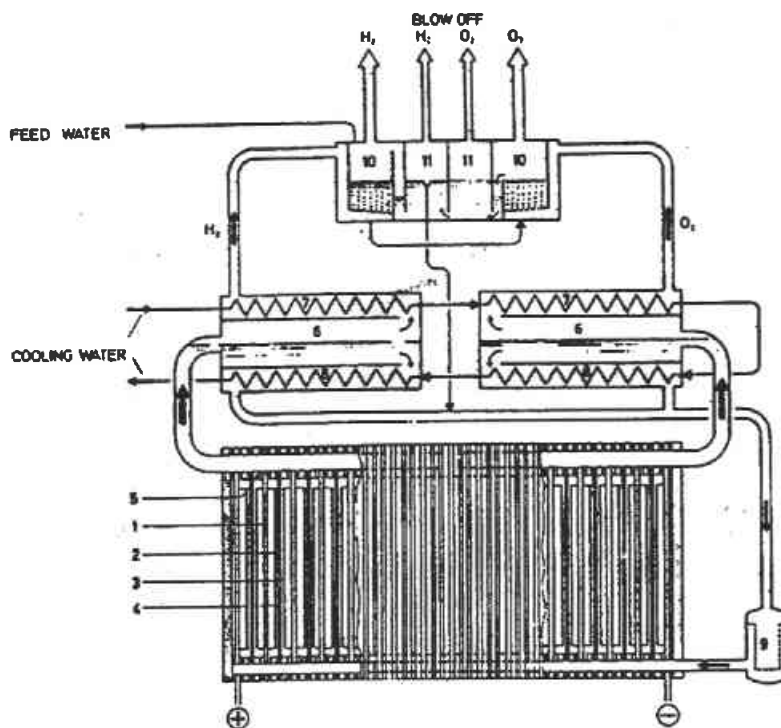


Fig. 35 Sección transversal esquemática de un Electrolizador de agua Krebskosmo de las series WE

Los platos bipolares de acero niquelado lleva una perforación niquelada en el ánodo y una perforación de acero niquelado en el cátodo. Los cátodos son cubiertos por una capa de Ni-S activado catalíticamente. Los diafragmas de asbestos son sellados con un empaque de goma. El electrolito ha circulado por el gas elevado. La mezcla electrolito/gas pasa a través de los separadores los cuales fueron diseñados como enfriadores. Los gases producidos son alimentados dentro de un recipiente compensador de presión el cuál compensa algunas posibles fluctuaciones en la presión. Este recipiente tiene una cerradura de emersión segura para la descarga rápida del gas en el caso de un desequilibrio en la presión.

La planta de electrólisis del agua Krebskosmo del tipo WE Fig.36 son aprovechables en tres medidas standard de 60, 135 y 200 Nm³ H₂/h.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

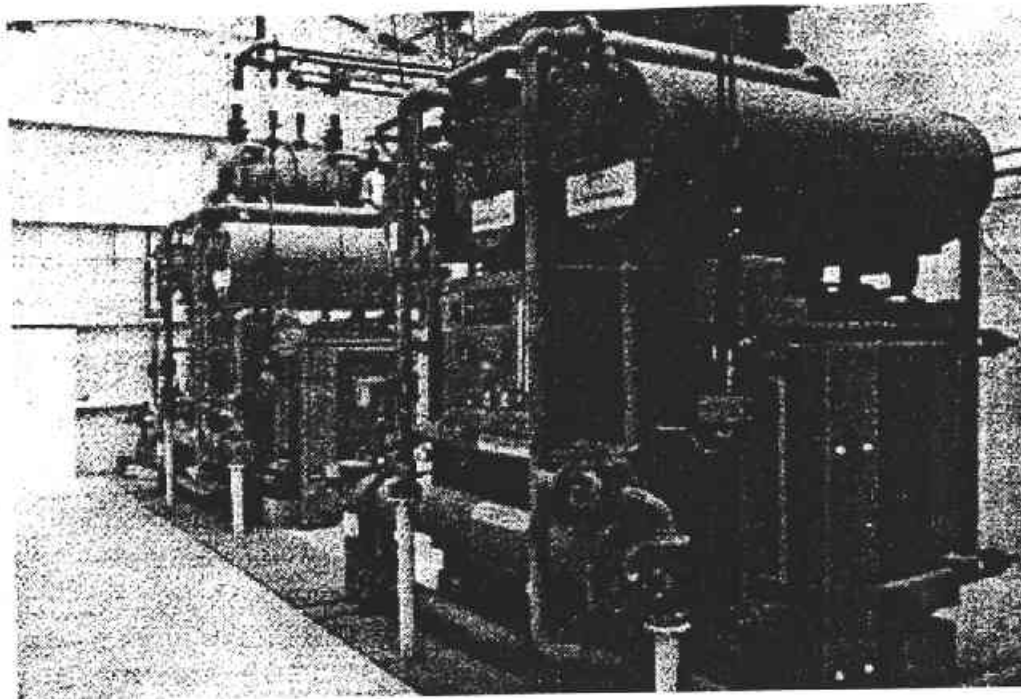


Fig. 36 Dos Electrolizadores Bipolares de agua Krebskosmo, con una capacidad de producción de $200 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ cada uno.

3.5.3.3 Celdas Norsk Hydro.

Estas plantas de electrólisis de agua son construidas comercialmente desde 1927, originalmente fueron hechas para la producción de amoníaco. La Fig.37 muestra un esquema de la estructura de la celda.

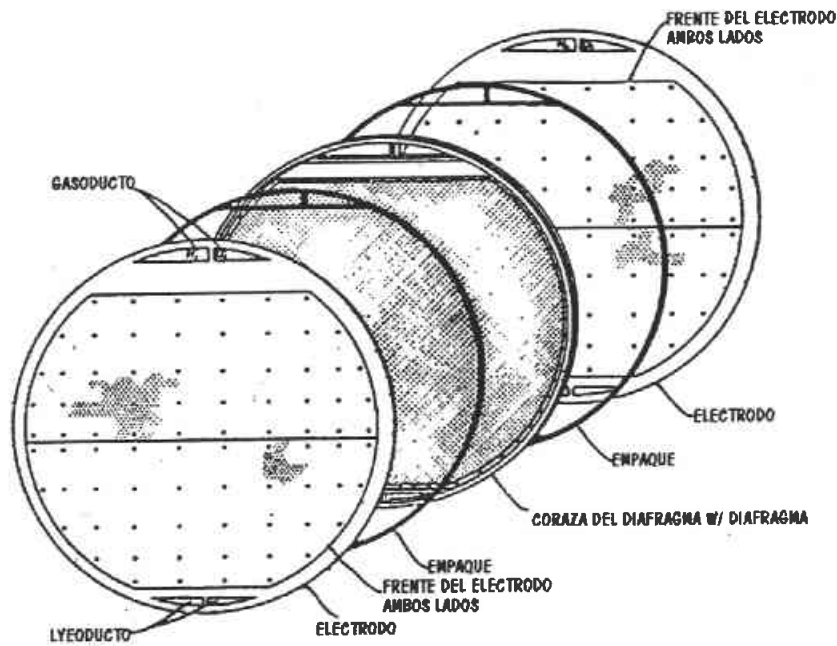


Fig. 37 Electrolizador Norsk Hydro vista exlotada de una celda electrolizadora.

Los dos electrodos constan de láminas de metal perforadas y son arrojados al plato bipolar. Estos son encaquetados por una activación especial, generalmente NiS. Electrodo, empaques y diafragmas son comprimidos juntos por grandes cerrojos. El diafragma de asbestos es reforzado por hilos de níquel para incrementar su estabilidad mecánica. Los prototipos para producir gases y los electrolitos son integrados dentro de la alta o baja porción de la coraza del diafragma respectivamente Fig.37. La construcción en forma de sándwich permite hacer celdas muy delgadas.

Todos los componentes metálicos son hechos de acero blando reforzado en sus puntos críticos por una capa de níquel. La Fig.38 muestra la planta de generación de Hidrógeno típica Norsk Hydro. Y los datos acerca de esta se pueden encontrar en la tabla 3.

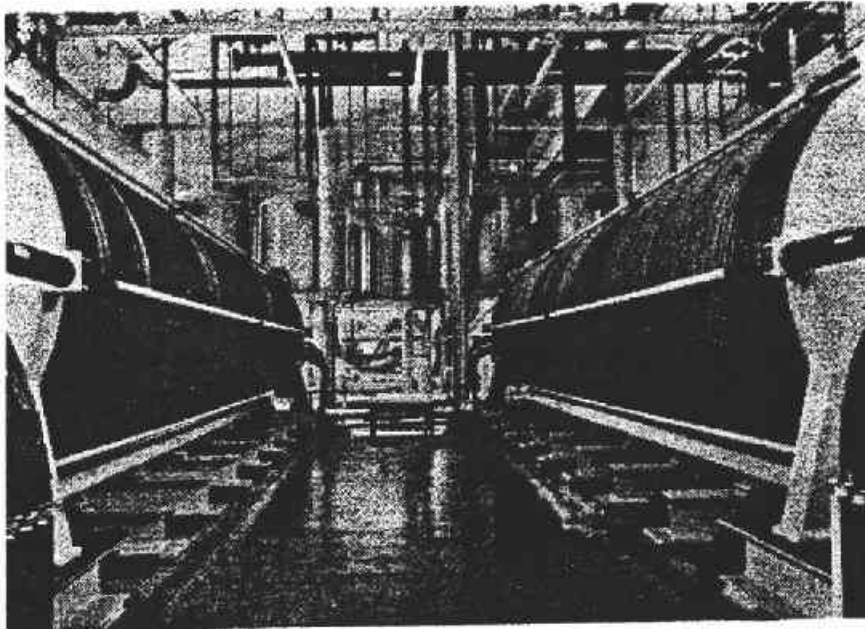


Fig. 38 Planta Generadora de Hidrógeno Norsk Hydro.

Este tipo de electrolizador normalmente tiene un electrodo simple que mide 2.1 m^2 permitiendo una densidad de corriente de $1\ 700 \text{ A/m}^2$ con una carga de corriente de $3\ 600 \text{ A}$. El electrolizador puede ser utilizado para la producción de Hidrógeno en gran escala.

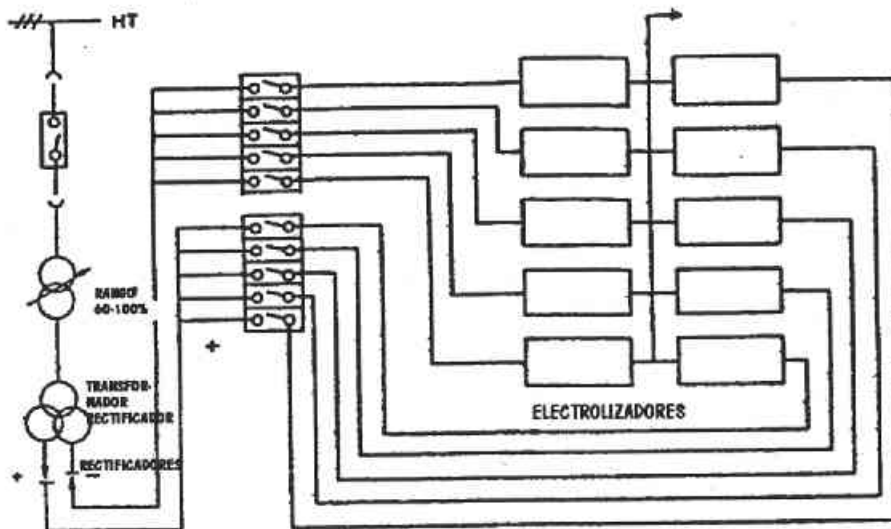
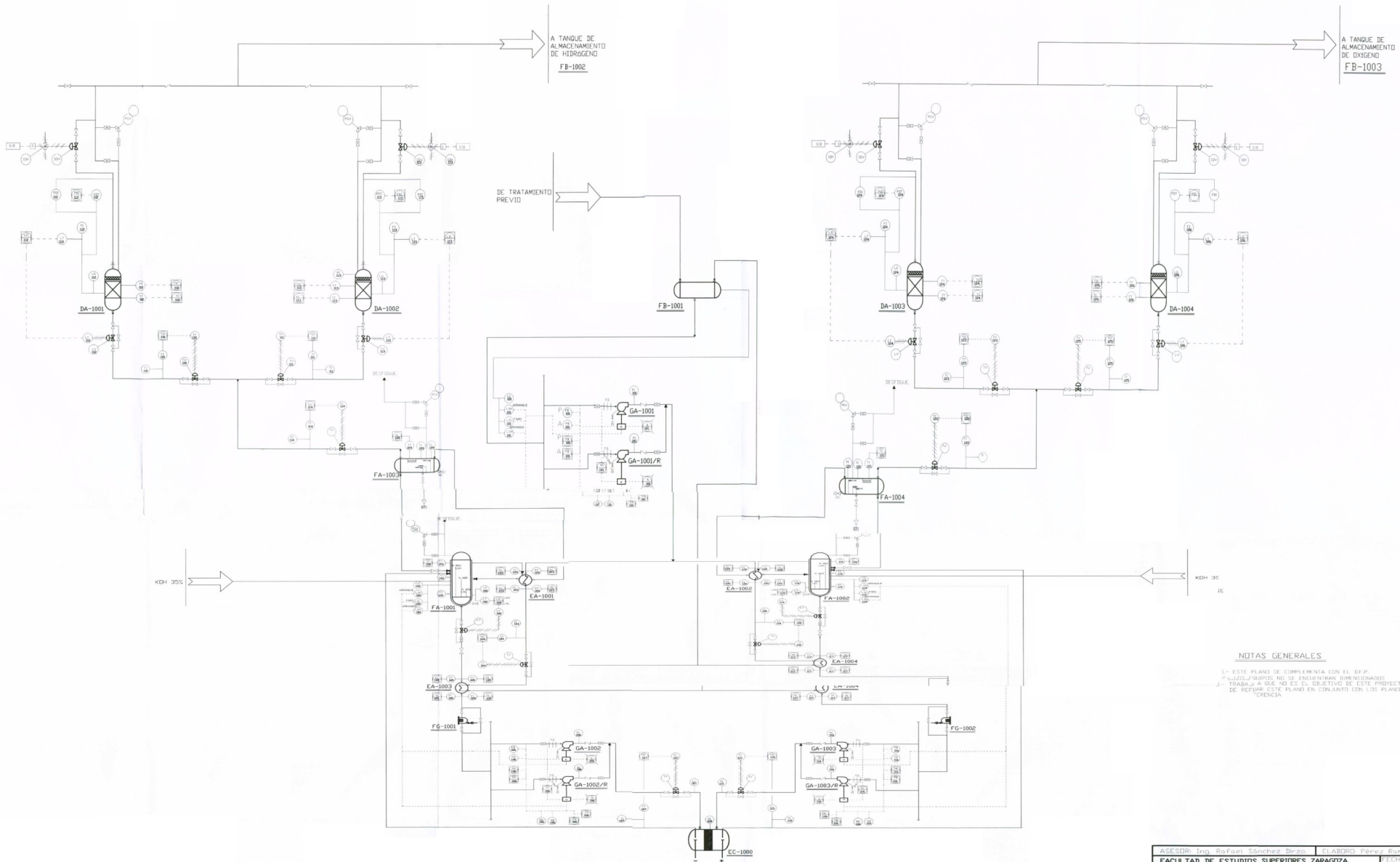


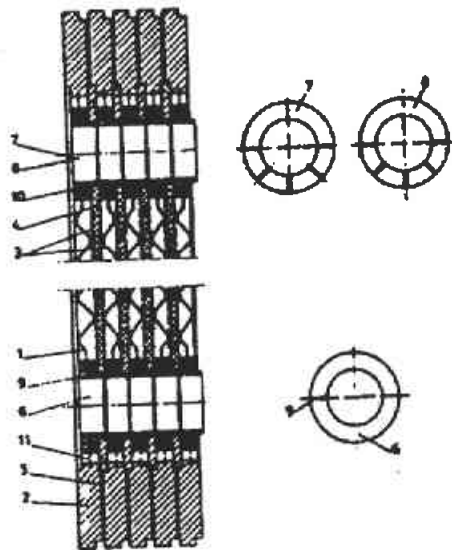
Fig. 39 Transformador y diagrama rectificador incluyendo una batería de electrolizadores.

DA-1001 SEPARADOR DE HIDROGENO 1 FG-1001 FILTRO PARA SOLUCION ELECTROLITICA 1 DA-1002 SEPARADOR DE HIDROGENO 2 FB-1002 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO FA-1004 SEPARADOR DE NEBLINA 2 CA-1002/2 CALENTADOR DE AGUA 2 FB-1001 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA - UNIDAD ELECTROLITICA EC-1000 SEPARADOR FLASH 1 FA-1001 SEPARADOR FLASH 1 FA-1003 SEPARADOR DE NEBLINA 1 CA-1001 CALENTADOR DE AGUA 1 GA-1003/R BOMBA PARA SOLUCION ELECTROLITICA 2 SEPARADOR FLASH 2 FB-1003 FILTRO PARA SOLUCION ELECTROLITICA 2 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ENXAMI GA-1002/R BOMBA PARA SOLUCION ELECTROLITICA 1 FA-1002 SEPARADOR FLASH 2 EA-1003 ENFRIADOR DE SOLUCION ELECTROLITICA 1 GA-1001/R BOMBA D. SUCCION DEL AGUA DE ENTRADA EA-1004 ENFRIADOR DE SOLUCION ELECTROLITICA 2 DA-1003 SEPARADOR DE ENXAMI 1 DA-1004 SEPARADOR DE ENXAMI 2



NOTAS GENERALES
 1- ESTE PLANO SE COMPLEMENTA CON EL D.P.P.
 2- SEGUIR SIEMPRE NO. DE INSTRUMENTOS, SIN RECORRER.
 3- TRABAJA A QUE NO ES EL OBJETIVO DE ESTE PROYECTO DE REFERIR ESTE PLANO EN CONJUNTO CON LOS PLANOS DE OTRAS UNIDADES.

| | | |
|---|--|-------------------|
| ASESOR: Ing. Rafael Sánchez Brzo. ELABORÓ: Pérez, Ramon Jennifer. | | ESCALA: 1:1 |
| FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA. | | FECHA: 10/08/2011 |
| UNAM | | ESCALA: 1:1 |
| DIAGRAMA DE TUBERIA E INSTRUMENTACION DE UNA PLANTA DE PRODUCCION DE HIDROGENO. | | EDICION: 1 |
| REVISION: | | REVISION: |



- 1.- PARED DE PARTICIÓN DE LA CELDA
- 2.- CORAZA DE LA CELDA
- 3.- ALAMBRE GAUZE DE LOS ELECTRODOS
- 4.- DIAFRAGMA DE ASBESTOS
- 5.- EMPAQUE CIRCUNDANTE
- 6.- DUCTO DEL ELECTROLITO
- 7.- DUCTO DE HIDRÓGENO
- 8.- DUCTO DEL OXÍGENO
- 9.- BARRENOS EN LOS DUCTOS DEL ELECTROLITO
- 10.- BARRENOS EN EL DUCTO DEL GAS
- 11.- ABERTURA EN LA PARED DE PARTICIÓN DE LA CELDA

Fig 40 Vista seccional de la celda electrolizadora LURGI.

La Fig.41 presenta una vista seccional, y la Fig.42 una vista completa de este electrolizador el cual a una potencia de 1 MW produce aproximadamente $220 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$.

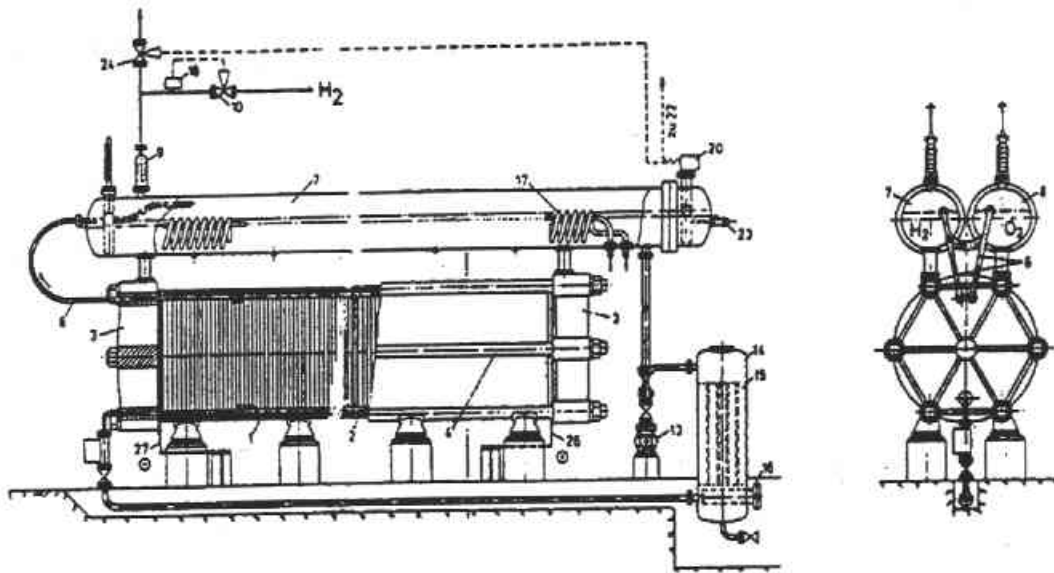


Fig. 41 Vista seccional y final del Electroizador LURGI.

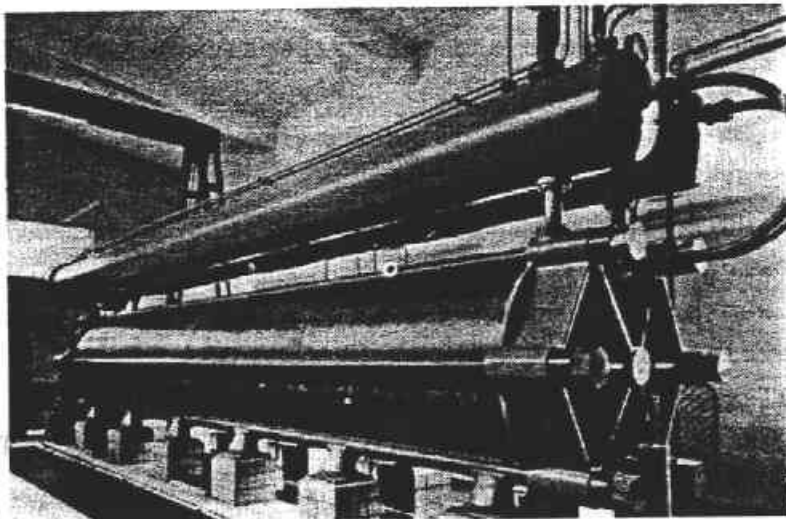


Fig. 42 Fotografía del Electroizador LURGI instalado en la compañía.

Los datos técnicos de pueden encontrar en la tabla 3.



3.6 CONDICIONES BÁSICAS DE SEGURIDAD

Es necesario considerar la seguridad en cada paso del diseño, fabricación, ensamble y operación del sistema de Hidrógeno. Para el presente sistema con una mayor seguridad se incluye:

1. Asegurar que la máxima corriente de operación del electrolizador nunca sea excedida.
2. Asegurar que no existan fugas de gases en el sistema.
3. Asegurar que la presión máxima de operación nunca se exceda.
4. Excluir la posible ignición de las fuentes a partir del área de las salidas del Hidrógeno y Oxígeno.
5. Separación de salidas de Oxígeno e Hidrógeno

La referencia 1 proporciona una descripción general del Hidrógeno y contenedores de Hidrógeno. Y de la referencia 2-4 intentan proporcionar una introducción a la seguridad del Hidrógeno. Esta es una responsabilidad del experimentador desarrollar el trabajo apropiado de los requerimientos de seguridad para el Hidrógeno.



CONCLUSIONES

Se describió el estado del arte de la Electrólisis del agua con el objetivo de dar un panorama más amplio acerca de todo lo que envuelve a la celda electrolítica.

Haciendo notar, que ya existen un gran número de electrolizadores en el mercado, los cuáles podemos adaptar al prototipo propuesto, o sea, que no es necesario diseñarlo mecánicamente, sino que con sólo algunos cálculos, como los mostrados en los capítulos anteriores, podemos cotizar aquel equipo que cubra las necesidades de nuestro prototipo.

Lo cuál nos demuestra que el cambio no está lejos, que podemos empezar.



Conclusiones Generales



*Investigación
Cualitativa*



CONCLUSIONES

Como todos sabemos el ser humano necesita cada vez más fuentes de energía para poder continuar el desarrollo de este, pero a la vez estas fuentes deben ayudar a mantener el equilibrio del planeta, es por eso que:

1. Se propone al prototipo anterior como una importante alternativa para en un futuro cercano modificar nuestra forma de generar energía.
2. Se espera que la existente tecnología de electrólisis pueda ser adaptada a la presente aplicación con no mayores problemas técnicos.
3. La adición del apropiado sistema de control puede proporcionar una segura operación automática.
4. Es sabido que las actuales formas de aprovechar los combustibles no es optima, un ejemplo de esto es el motor de combustión interna el cual presenta un pobre rendimiento (cerca del 18% de eficiencia), y altas emisiones de contaminantes. Es por esto que las Celdas de Combustible y los Ciclos de Potencia Combinados son una excelente forma de aprovechar la energía y proteger el medio ambiente. Como se mostró en este proyecto estos presentan un rendimiento muy bueno y una sola emisión que es el agua, el funcionamiento de las Celdas de Combustible es muy sencillo ya que solo consiste en una



reacción química y no requiere piezas adicionales y complicadas para poder funcionar (como el motor de OTTO). Es por eso que presenta una gran aplicación en todos los campos del desarrollo humano. Es importante destacar que la tecnología de la Celda de Combustible esta totalmente desarrollada y sólo falta poder bajar los costos de producción para poder masificar el uso de éstas.

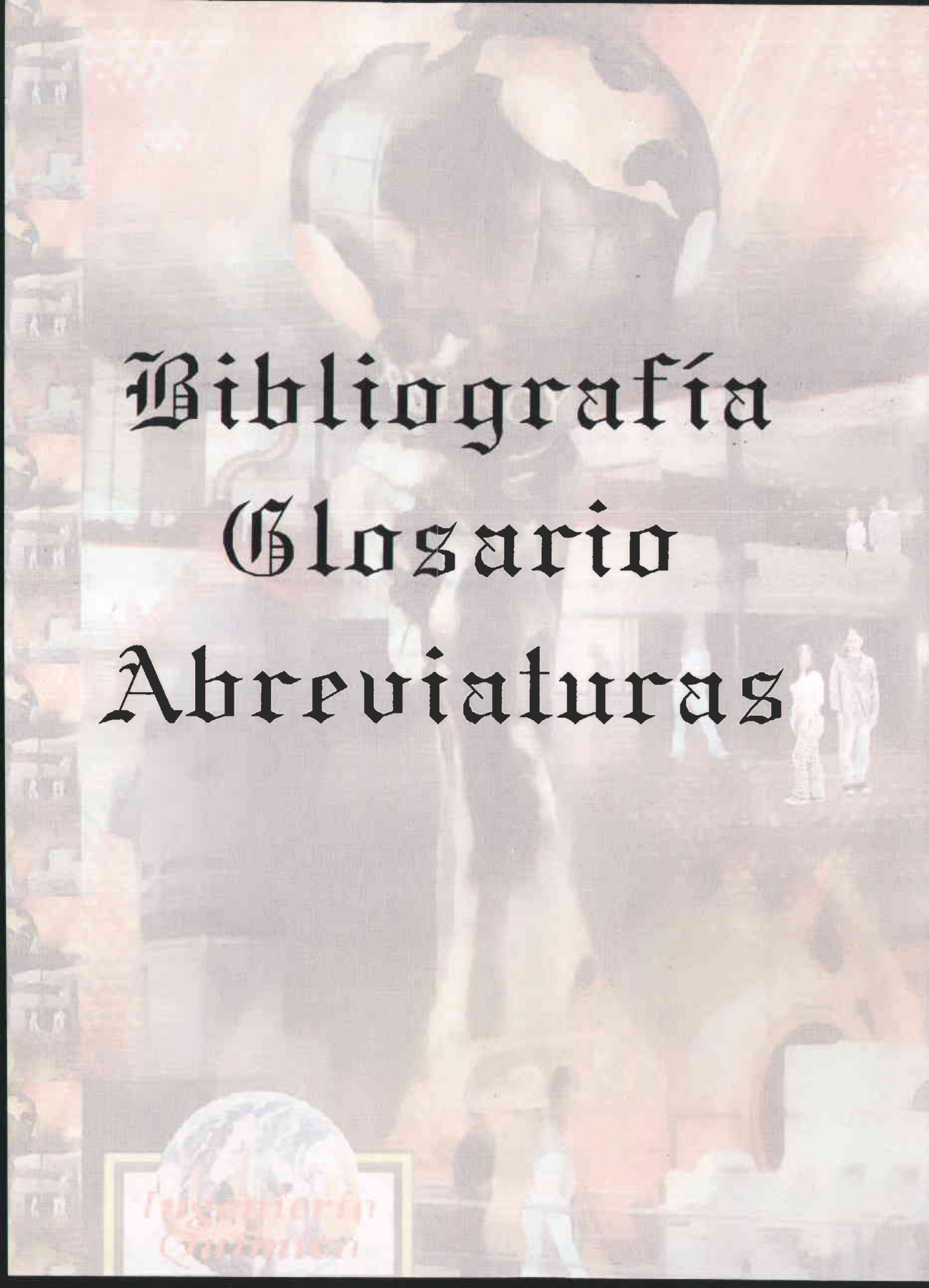
5. Aunque los costos de inversión parecen ser muy altos, se debe considerar que la implementación de todo cambio, siempre induce un gasto, pero este es justificado, si consideramos, que este sistema nos hará no depender de las energías fósiles, además de que nosotros mismos podremos producir, la cantidad de electricidad que abastezca nuestras necesidades. Y así en un futuro, la electricidad mundial será relativamente independiente, para así dar uso de las fuentes de energía actualmente utilizadas de una forma realmente aprovechable, en lugar de ser quemadas.
6. El sistema propuesto tiene tan sólo una eficiencia total del 5.6%, que al ser comparadas con las eficiencias en la producción de electricidad que se obtienen a partir de las fuentes de energía actualmente utilizadas (aprox. 4%), esto sin mencionar el sin número de ventajas a nivel ambiental, muestran una mejora buena, pero aún no lo suficiente. La eficiencia del sistema de almacenamiento de energía, incluyendo al electrolizador, el almacenador de gas, la celda de combustión y el convertidor DC-AC es aproximadamente el 39%.



CONCLUSIONES

Un incremento de esta eficiencia resulta de una disminución proporcional del costo de producción de energía eléctrica.

7. Para la implementación de este sistema en un futuro, se puede conseguir un financiamiento comunal, en diferentes organizaciones como podría ser el EL BANCO MUNDIAL, PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), FINESSE (Financiamiento de Energía Renovable para consumidores de Energía en pequeña escala) entre otros.



Bibliografía
Glosario
Abreviaturas



Universidad de Salamanca

**BIBLIOGRAFÍA****ARTÍCULOS**

1. Robert Swarfekamp, PE. Associate Editor. *Single-shaft combined cycle power in at low cost.*
2. Gustav P. Dinga, (1989). *Hydrogen: The Ultimate fuel and Energy Carrier*, Hydrogen Energy, Vol. 14 No. 11 pp. 777-784, 1989.
3. Daniel Morgan and Fred Sissine (1995). *Hydrogen: Technology and policy.*
4. J.P. Vanhanen, P.S. Kauranen, P.D. Lund & L.M. Manninen (1994) *Simulation of Solar Hydrogen Energy Systems*, Solar Energy, Vol. 53. No. 3 pp. 267-278, 1994.
5. Moritaka Kato, Shouji Mezawa, Kouichi Sato (1998). *Polymer-Electrolite Water Electrolysis*, Applied Energy, Vol. 59. No. 4 pp.261-271, 1998.
6. D.Dini (1982). *Hydrogen Production through Solar Energy Water Electrolysis*, Hydrogen Energy, Vol. 8 No. 11/12 pp. 897-903, 1983.
7. R.L. LeRoy (1982). *Industrial Water Electrllysis: Present and Future*, Hydrogen Energy, Vol. 8 No. 6 pp. 401-417, 1983.
8. G. De Beni (1982). *Thermochemical Proceses for Hydrogen Production by Water splitting.*
9. Rafael Sánchez Dirzo (1998). *Chan K'iin: Las Fuentes de las Energías Renovables.*
10. Mark. A. Daugherty (2000). *Electrolytic Production of Hydrogen Utilizing Photovoltaic Cells.*
11. C. Mender, H. Barthels, W.A. Brocke, B. Emonts & H. G. Groehn (2000). *Phoebus an Autonomous supply system with renewable energy: Six years of operational experiance and advanced concepts.*
12. A. Goetzberg (1995) *Solar Energy the key to a sustainable World.*
13. Lisa W. Shepperd & Elizabeth H. Richards (2000). *Energía Solar Fotovoltaica para Proyectos de Desarrollo.*
14. Kristoferson, L.A. y V. Bokalders (1991). *Renawable Energy Technologies, Their Aplications in Developing Countries.*
15. Sandia Technology Vol. 3 No.1 (2000). *Developing the Energy Resources for the New Era.*



LIBROS

1. Gilbert. William. Castellan. *Physical Chemistry*. Ed. 2. Editorial. SITESA. 1924.
2. Maron & Proutton. *Fisicoquímica*. Editorial. LIMUSA. 1996.
3. Ernesto Ureta Barron. *El Equilibrio Químico*. Editorial. LIMUSA. 1975.
4. Mark *Termodinámica*. Editorial. Mc. Grow Hill.
5. William Craig Reynolds. *Enginner Thermodynamics*. Editorial. Mc. Grow Hill. 1933.
6. García Collin, Leopoldo Sherer *Introducción a la Termodinámica Clásica*. Editorial. TRILLAS. 1970.
7. Virgil Moring Faires. *Thermoyinamics*. Ed. 4. Editorial. Mc. Grow Hill. 1897.
8. Zemansky. *Termodinámica*. Editorial. Mc. Grow Hill.
9. S. Kunstreich and J. Sterlini. *Theoretical efficiency limit of Water electrolysis and practical means to approach it in "Hydrogen Energy System" Vol.5*. 1979.
10. A.T. Kuhn, ed. *Industrial Elektrolyse Process*, Elsevier, Amsterdam, 1971.
11. R.L. LeRoy, Ch.T. Bowen and D.J. LeRoy, J. *Electrochem*. 1980.
12. Evangelista, B. Phillips, and L. Gordon, *Electrolytic Hydrogen Production, an analysis an review, NASA*.
13. J. Balej, Int. J. *Hydrogen Energy*, 10 (1985)
14. M.S. Casper, ed. *Hydrogen Manufacture by Electrolysis, Thermal Descomposition and Unsual Techniques, Noyes Data Corporation*, Parrk Ridge, 1978.
15. Y. Abe, T Fujimaki, M Matsubara, Y. Tanaka. *Hydrogen Production by High Temperature, High Pressure water Electrolysis in: Hydrogen Energy Progress IV*.
16. J.W. Holmes and R.E. White, in: *Electrochemical Cell Design*, R.E. White, ed. Plenum Press. 1984.
17. Charles Kittel, *Física Térmica*. Editorial. Reverté. 1972.



DIRECCIONES ELECTRONICAS

1. <http://www.cubicsci.com/chem/hs/index%20search/electro.htm>
2. <http://engineer.tamu.edu/tees/ceshr/center.htm>
3. <http://www.stuartenergy.com>
4. <http://www.education.ram.gov/resources/h2/daugherty/education.html>
5. <http://www.hydrogenapphances.com/hydrogeneration.html>
6. <http://www.cnie.org/nle/eng-4.html>
7. <http://www.igc.apc.org/reanergy/fuelcl.html>
8. <http://www.crl.com/~rwicher/fuelcell.htm>
9. http://www.mpi-stuttgart.mpg.de/MAIER/research/projects/p_femsofc.html
10. <http://now2000.com/sjohnson/pagenews.html#CLEAN>
11. <http://www.fuelcell.kosone.com/>
12. <http://www.h2fc.com/defaultNS4.html>
13. <http://www.h2fc.com/infra.html>
14. <http://www.gmi.edu/~altfuel/fcmain.htm>
15. <http://www.harc.edu/fuelcell.html>
16. <http://www.fuelcellworld.org/>
17. <http://www.humboldt.edu/~serc/spanish/fuelcell.html>
18. <http://www.2.hydro.com/eng/into/index.html>
19. <http://www.unep.org>
20. <http://www.imp.mx>
21. <http://www.upmf.grenoble.fr/iep/sites.html>
22. <http://www.hpower.com/edukit.htm>
23. <http://www.conae.com>
24. <http://www.nasa.gov>
25. <http://www.eren.doe.gov/Abalphabetical.htm/#h>
26. <http://www.annex14.ozweb.com>



GLOSARIO

Ánodo.- Electrodo conectado al polo positivo de un generador. En la electrólisis se depositan en él los aniones.

Cátodo.- Electrodo negativo del que parten los electrones. En la electrólisis se depositan en él los cationes.

Catalizador.- Sustancia con capacidad de acelerar o disminuir la velocidad de reacción química sin que ella misma sufra alteración.

Conducción electrónica.- Transferencia de electrones por emigración directa de los electrones a través del conductor bajo la influencia de un potencial aplicado. Aquí los átomos o iones que componen al conductor no intervienen en el proceso.

Conducción iónica.- La transferencia electrónica tiene lugar por migración iónica, positiva y negativa, hacia los electrodos. Esa migración involucra no sólo una transferencia de electricidad sino también el transporte de materia de una parte a otra del conductor, además siempre va acompañada de cambios químicos en los electrodos.

Corriente Alterna (AC).- Corriente eléctrica en la cual la dirección del flujo es invertida a intervalos frecuentes; 60 ciclos por segundo es usado en los Estados Unidos. Este es el flujo de corriente en una toma eléctrica de la casa o negocio.

Corriente Directa (DC).- Corriente eléctrica en la cual el flujo de los electrones circula solamente en una dirección. Este es el tipo de corriente producida por un sistema de energía solar. Para ser usado en aparatos electrodomésticos de 120 a 220 V. Debe ser convertida a corriente alterna.

Electrólisis.- Proceso químico en el cual, por medio de electricidad, el agua es separada en Hidrógeno y Oxígeno.

Electrolito.- Cualquier sustancia que en disolución se disocia en iones y, por lo tanto, es capaz de conducir la corriente eléctrica.

Energía.- Capacidad para ejecutar un trabajo.



Energía renovable.- Flujos de energía que son regenerables o virtualmente inagotables. Los que incluyen la energía solar (eléctrica y termal), biomasa, geotérmica, eólica, marejada y fuentes de energía hidroeléctrica.

Ión.- Átomo u otra partícula con carga eléctrica positiva (catión) o negativo (anión), como los existentes en una disolución.

kW.- Medida de Potencia eléctrica en una unidad de tiempo igual a la proporción de flujo (Amperios) multiplicado por el voltaje de ese flujo (Voltios).

kWh.- Medida de Electricidad igual a la potencia eléctrica multiplicada por la cantidad de tiempo (horas).

Laplaciano.- Operador matemático que puede actuar en dos o tres dimensiones.

Molaridad.- Es el número de moles de una sustancia llamada soluto.

Nafión ó Membrana Semipermeable.- La que permite el paso de las moléculas del disolvente, pero no las del soluto (en este caso el soluto son los electrones y el disolvente los protones de Hidrógeno).

Oxidación.- Reacción en la que la partícula de la sustancia oxidada (átomo o ión) pierde electrones.

Protón.- Partícula fundamental del átomo, con carga eléctrica positiva y masa 1836 veces mayor que la de el electrón; el número de protones (número atómico) determina la naturaleza de cada elemento.

Reducción.- Parte de una reacción, en la que una sustancia oxidante absorbe los electrones que la sustancia oxidada pierde.



ABREVIATURAS

| | |
|--------------------------------------|---|
| A | Área |
| ac | Corriente Alterna |
| C_{p(w)} | Capacidad Calorífica del Agua |
| D | Diámetro |
| dc | Corriente Directa |
| ρ | Conductividad eléctrica |
| ρ_c | Densidad de Corriente |
| ρ_e | Resistividad del espesor |
| ΔP₁ | Diferencia de Presiones por Celda |
| ΔΔPP | Perdidas por fricción |
| E | Requerimiento Anual de Energía |
| E_a y E_c | Potenciales |
| e | Equivalente electroquímico |
| e | Eficiencia Total del Sistema |
| e_s | Eficiencia del Sistema de Almacenamiento |
| e_{ac} | Eficiencia de la Conversión de DC a AC |
| e_c | Eficiencia del Sistema de Control |
| e_e | Eficiencia de la Unidad Electrolítica |
| e_f | Eficiencia de la Celda de Combustible |
| e_{ph} | Eficiencia de la Celda Solar |
| H_{w(l)} | Entalpía Molar del Agua en fase líquida |
| I | Intensidad de Corriente |
| I_T | Intensidad de Corriente Total |
| I_(x) | Corriente |
| L | Longitud del electrodo |
| m | Masa |
| m | Molaridad |
| n | Número de Celdas |
| n_e | Número de Electrones intercambiados |
| η | Eficiencia energética de la electrólisis del Agua |
| η_a | Potencial Catódico (Sobre Voltaje en el cátodo) |
| η_c | Potencial Anódico (Sobre Voltaje en el ánodo) |



| | |
|--------------------------------------|---|
| P | Potencia |
| P_a | Peso Atómico |
| P_{cell} | Potencia por Celda |
| P_e | Potencia a la entrada de la Unidad Electrolytica |
| P_i | Constante de Radiación Solar máxima en México D.F. |
| P_s | Potencia de Salida de la Celda Fotovoltaica |
| P_T | Potencia Total |
| P_w | Presión de Vapor parcial del Agua |
| P_w⁰ | Presión de Vapor del Agua a condiciones Standard |
| PTFE | Poli-tetra-fluoro-etileno |
| Q_{ent} | Calor de Combustión a la entrada |
| Q_{sal} | Calor de Combustión a la salida |
| Q | Cantidad de Electricidad |
| R | Radiación Solar Total |
| R | Constante de los Gases Ideales |
| R_i | Resistencia Interna |
| R*_l | Resistencia específica de la Superficie de la Celda del Electrolyzador |
| R*_η | Inclinación de la Linealización aproximada |
| R_p y R_m | Resistencias que representan los puertos de distribución del fluido |
| t | Tiempo |
| t_E | Espesor del electrodo |
| U_{cell} | Celda de Voltaje Técnica |
| U_{ΔH} | Voltaje Entálpico |
| U_{rev,T,P} | Voltaje Reversible a Presión y Temperatura constante |
| U⁰_{rev,T} | Descomposición Termodinámica reversible de Voltaje correspondiente a la Energía Molar Standard de Gibbs |
| U_{in} | Voltaje Termoneutral |
| U_{HHV,T,P} | Voltaje Entálpico para el Hidrógeno |
| V | Voltaje |
| W | Flujo másico |
| W_d | Energía utilizada directamente |
| W_{H2} | Flujo másico de Hidrógeno por celda |
| wt % | Por ciento en peso |
| Z | Resistencia semejante a la del diodo Zener |



Anexo I

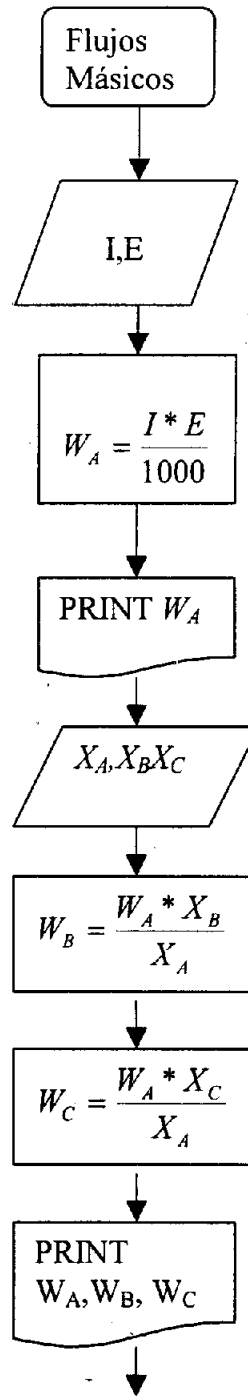


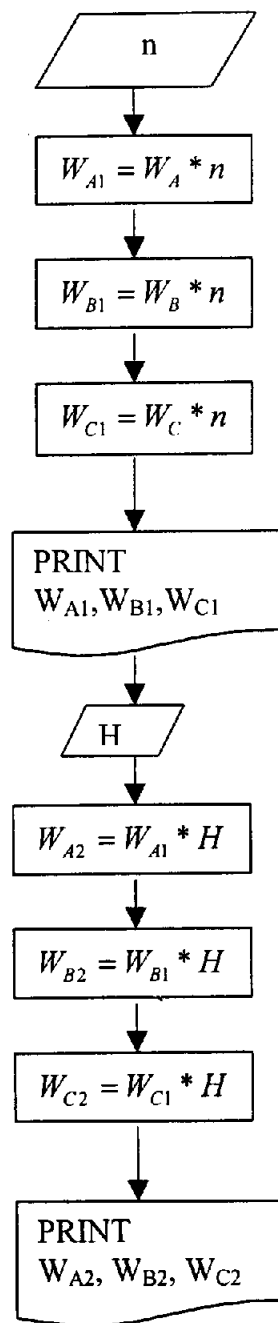
Tugimlerin
Comitateti



ANEXO 1

DIAGRAMA DE FLUJO PARA OBTENER LOS FLUJOS MÁSICOS







ALGORITMO PARA OBTENER LOS FLUJOS MÁSICOS.

1. Leer I (A), E_{H_2} (g/Ah)

2. Calcular $W_A = \frac{I * E_A}{1000}$

3. Leer X_A, X_B, X_C

4. Calcular $W_B = \frac{W_A * X_B}{X_A}$

5. Calcular $W_C = \frac{W_A * X_C}{X_A}$

6. Leer n

7. Calcular $W_{A1} = W_A * n$

8. Calcular $W_{B1} = W_B * n$

9. Calcular $W_{C1} = W_C * n$

10. Leer H

11. Calcular $W_{A2} = W_{A1} * H$

12. Calcular $W_{B2} = W_{B1} * H$

13. Calcular $W_{C2} = W_{C1} * H$

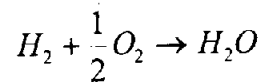


BALANCE DE MASA

Corriente 1

De la Ley de Faraday

$$W_{H_2} = \frac{IE}{1000} = \frac{125.66A(0.0376 \frac{g}{Ah})}{1000 \frac{g}{kg}} = 0.004725 \frac{kg}{h} \quad (\text{Por celda})$$



Estequiométricamente para cada celda

$$W_{H_2} = 0.004725 \frac{kg}{h}$$

$$W_{O_2} = \frac{0.004725(16)}{2} = 0.0377985 \frac{kg}{h} \quad (\text{Por celda})$$

$$W_{H_2O} = \frac{0.004725(18)}{2} = 0.0042525 \frac{kg}{h} \quad (\text{Por celda})$$

Para obtener el flujo másico total, multiplicamos por 32 celdas

$$W_{H_2} = 0.1512 \frac{kg}{h}$$

$$W_{O_2} = 1.209552 \frac{kg}{h}$$

$$W_{H_2O} = 1.3608 \frac{kg}{h}$$



Multiplicando por las horas de sol durante el día = 5 h.

$$W_{H_2} = 0.1512(5) = 0.756 \frac{kg}{5h} = 0.756 \frac{kg}{día}$$

$$W_{O_2} = 1.209552(5) = 6.04776 \frac{kg}{5h} = 6.04776 \frac{kg}{día}$$

$$W_{H_2O} = 1.3608(5) \frac{kg}{5h} = 6.804 \frac{kg}{día}$$



Анексo ᠒᠓



Balance de Masa

| Corriente | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| H ₂ O(kg/día) | 6.804 | 6.804 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 |
| H ₂ (kg/día) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| O ₂ (kg/día) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P (bar) | 0.78 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| T (°C) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 95 | 95 | 95 | 95 |
| Fase | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida |

| Corriente | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|
| H ₂ O(kg/día) | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | 3.402 | * | * | * | * |
| H ₂ (kg/día) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.756 | 0 | 0.756 |
| O ₂ (kg/día) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.048 | 0 | 6.048 | 0 |
| P (bar) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| T (°C) | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 | 105 | 105 |
| Fase | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | líquida | gas | gas | gas | gas |

Apéndice 2

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Corriente | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| H ₂ O(kg/día) | * | * | | * | * | * | * | * | * | * |
| H ₂ (kg/día) | 0 | 0.756 | * | * | | 0.756 | | 0.756 | | |
| O ₂ (kg/día) | 6.048 | 0 | * | | 6.048 | 0 | 6.048 | 0 | 3.024 | 3.024 |
| P (bar) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| T (°C) | 105 | 80 | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Fase | Liq/gas | Liq/gas | liquida | liquida | gas | gas | gas | gas | gas | gas |

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Corriente | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| H ₂ O(kg/día) | * | * | * | 0 | 0 | * | * | * | * | 0 | 0 | 0 |
| H ₂ (kg/día) | | | | 0 | 0 | 0.378 | 0.378 | 0.378 | 0.378 | 0.378 | 0.378 | 0.756 |
| O ₂ (kg/día) | 3.024 | 3.024 | 3.024 | 3.024 | 6.048 | | | | | 0 | 0 | 0 |
| P (bar) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| T (°C) | 80 | 80 | 70 | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 | 80 | 70 | 70 | |
| Fase | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas | gas |

Diseño termodinámico de una celda electrolítica con capacidad de 7.7 kW, para uso dentro de un prototipo para producir electricidad utilizando Hidrogeno como combustible

Lista de Equipo

| CLAVE | SERVICIO |
|--------------|---------------------------------------|
| FB-1001 | Tanque de Almacenamiento de Agua |
| FB-1002 | Tanque de Almacenamiento de Hidrógeno |
| FB-1003 | Tanque de Almacenamiento de Oxígeno |
| FA-1001 | Separador Flash 1 |
| FA-1002 | Separador Flash 2 |
| FA-1003 | Separador de Neblina 1 |
| FA-1004 | Separador de Neblina 2 |
| EA-1001 | Enfriador de Solución de Hidrógeno |
| EA-1002 | Enfriador de Solución de Oxígeno |
| EA-1003 | Enfriador de Solución Electrolítica 1 |
| EA-1004 | Enfriador de Solución Electrolítica 2 |
| DA-1001 | Secador de Hidrógeno 1 |
| DA-1002 | Secador de Hidrógeno 2 |
| DA-1003 | Secador de Oxígeno 1 |
| DA-1004 | Secador de Oxígeno 2 |
| GA-1001/R | Bomba de Succión de Agua de entrada |
| GA-1002/R | Bomba para Solución Electrolítica 1 |
| GA-1003/R | Bomba para Solución Electrolítica 2 |
| FG-1001 | Filtro para Solución Electrolítica 1 |
| FG-1002 | Filtro para Solución Electrolítica 2 |



Anexo III





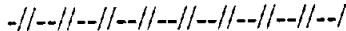




Integración
Cultural

**SIMBOLOGÍA DE INSTRUMENTACIÓN**

| | |
|-------------------------------|-----|
| Alarma de alta | AH |
| Alarma de muy alta | AHH |
| Alarma de baja | AL |
| Alarma de muy baja | ALL |
| Elemento primario de división | E |
| Indicador | I |
| Indicador controlador | IC |
| Registrador | R |
| Registrador controlador | RC |
| Interruptor de alta | SH |
| Interruptor de muy alta | SHH |
| Interruptor de baja | SL |
| Interruptor de muy baja | SLL |
| Transmisor | T |
| Válvula de control | V |
| Convertidor de señal | Y |
| Botones locales | PB |



SÍMBOLOS DE LINEAS E INSTALACIONES DE INSTRUMENTOS

| | |
|---|---|
|  | Línea de Proceso |
|  | Línea de Servicios |
|  | Señal Neumática |
|  | Señal Eléctrica |
|  | Instrumento Instalado Localmente |
|  | Instrumento Instalado en el Tablero Local |
|  | Instrumento Instalado en el Tablero Principal |



La instalación del diafragma Fig.39 para una planta grande con la mitad de tierras deja las secciones de cruce de las obstrucciones de cable se reducen lo cual mantiene los puertos fuera para la producción de gases y el electrolito con un voltaje cero. Esto reduce la corrosión y los riesgos de operación.

3.5.3.4 Celdas DeNora S.P.A.

Los elementos bipolares de las celdas DeNora constan de una coraza de acero rodeando el plato bipolar la cual dilata el metal de los electrodos que son conectados en ambos lados. El metal dilatado de los electrodos, tanto el ánodo como el cátodo son de acero blando niquelado y azufre activado.

Los electrolizadores utilizan un tejido doble en los diafragmas de asbesto de un diseño especial. Durante la operación normal, los diafragmas son presionados entre uno y otro, pero alguna penetración de burbujas de gas da como resultado la formación de grandes burbujas entre los diafragmas, las cuales no se pueden desahogar a la salida debido a la oposición del gas interno. Estos diseños prevén efectivamente la posibilidad de formación de una mezcla de gas explosiva y da particularmente gases puros, pero a expensas de un alto voltaje en las celdas.

Los electrolizadores DeNora tienen medidas Standard entre 2 500 y 12 000A.



3.5.3.5 Celdas LURGI GmbH.

El electrolizador a presión LURGI explota la fracción de volumen reducido del gas en el electrolito produciendo una conductividad electrolítica mejorada. Los aparatos producen gas a una presión de 30 bar la cual es suficiente para muchos consumidores.

Debido a la alta presión de operación en el sistema y consecuentemente el pequeño volumen específico de los gases, las celdas y también el gas y los canales electrolíticos pueden ser obtenidos relativamente en estrechos volúmenes en comparación al caso de la electrolisis atmosférica. Por consiguiente el electrolizador a presión es más compacto que los otros. Sin embargo, la manufactura de estos diseños son más sofisticados que los que no operan a presión. En particular, la gran seguridad de protección en contraste al exceso de presión requerida.

Un realce empanelado con una lámina de acero niquelado sirve como un plato bipolar, para el cual se fabrican alambres de acero niquelado para su aplicación como electrodos.

Ambos son presionados de ambos lados como ese muestra en la Fig.40. Las corazas de las celdas son aisladas eléctricamente una de la otra con un empaque de teflón.