



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

COMPORTAMIENTO SEMICONDUCTOR DEL  
OXIDO DE ZINC EN LA CONVERSION DE LA  
ENERGIA SOLAR EN ELECTRICA

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**I N G E N I E R O Q U I M I C O**

P R E S E N T A :

**J O S E E L I O F L O R E S G U E R R A**



MEXICO, D. F.

1992

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **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 está 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.

## I N D I C E.

	PAGINA
<u>INTRODUCCION.</u>	1
CAPITULO I. <u>FUENTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA.</u>	5
1. EL SOL.	8
2. EL HIDROGENO.	10
1.2.1. Hidrógeno como fuente alternativa de energía.	10
1.2.2. Almacenamiento del Hidrógeno.	15
1.2.3. Métodos de utilización del hidrógeno.	21

	<b>PAGINA</b>
<b>CAPITULO II. <u>CONCEPTOS FUNDAMENTALES.</u></b>	<b>29</b>
<b>1. MATERIALES SEMICONDUCTORES.</b>	<b>30</b>
2.1.1. Antecedentes históricos de los materiales semiconductores.	31
2.1.2. Naturaleza y clasificación de los materiales semiconductores.	32
2.1.3. Conductividad por impurezas químicas.	38
<b>2. CONVERSION FOTOVOLTAICA.</b>	<b>44</b>
2.2.1. Fundamentos.	45
2.2.2. Tipos de celdas y su evolución.	50
2.2.3. Conversión de Energía Solar en Energía Eléctrica.	55
2.2.4. Fotovoltaica en México.	63
2.2.5. Aplicaciones de los Sistemas Fotovoltaicos.	68

	<b>PAGINA</b>
3. VOLTAMETRIA CICLICA.	74
4. MATERIAL EMPLEADO: Oxido de zinc.	78
<b>CAPITULO III. PARTE EXPERIMENTAL.</b>	<b>81</b>
1. DESARROLLO EXPERIMENTAL.	82
2. RESULTADOS EXPERIMENTALES.	89
<b><u>CONCLUSIONES.</u></b>	<b>102</b>
<b><u>BIBLIOGRAFIA.</u></b>	<b>106</b>

## INDICE DE FIGURAS.

	PAGINA
1. Licuefacción del Hidrógeno	
a) Proceso Linde.	18
b) Proceso Claude con expansión.	18
2. Pilas de combustión	
a) Común.	24
b) Con electrodos soportados.	24
3. Representación esquemática de la longitud de la banda prohibida de los materiales aislantes, semiconductores y conductores.	35
4. Estructura Cristalina del Silicio.	36
5. Materiales semiconductores	
a) Adicionando un elemento donador. Semiconductor tipo N.	42
b) Adicionando un elemento aceptor. Semiconductor tipo P.	42
6. UNION P-N	
a) Representación.	45
b) Niveles energéticos.	45
7. Funcionamiento esquemático de una celda solar bajo la acción de la radiación solar.	58

	<b>PAGINA</b>
8. Principio del Generador Termoeléctrico.	58
9. Principio del Generador Termoiónico.	58
10. Principio de la Celda Fotovoltaica.	60
11. Celda Fotovoltaica	
a) Disposición de la celda.	61
b) Efecto Fotovoltaico.	61
12. Evolución desde la celda al campo de paneles. Base de Centrales Fotovoltaicas.	62
13. Diagrama de los Generadores Fotovoltaicos.	62
14. Representación de un Voltamograma Cíclico.	77
15. Estructura del Oxido de Zinc.	80
16. Configuración de las celdas de trabajo utilizadas	
a) En oscuro.	88
b) Bajo iluminación.	88
<b>VOLTAMOGRAMAS OBTENIDOS</b>	
17. Curva Patrón.	97
18. Electrodo de Cobre.	97

	<i>PAGINA</i>
19. Electrodo mal sellado.	98
20. Electrodo sin contacto.	98

**ELECTRODO EXPERIMENTAL.**

21. Bajo condiciones de luz natural.	99
22. En oscuro.	100
23. Bajo condiciones de iluminación.	100

## INDICE DE TABLAS

	PAGINA
1. Capacidad de almacenamiento del hidrógeno en distintos sistemas.	16
2. Diagrama de bloques de la estructura de un sistema económico basado en hidrógeno y oxígeno.	20
3. Propiedades físicas y químicas del Hidrógeno, Metano y Gasolina.	28
4. Intervalo de conductividades de materiales aislantes, semiconductores y conductores.	33
5. Energía de banda prohibida de algunos semiconductores.	43
6. Semiconductores utilizados en celdas solares y su rendimiento máximo.	48
7. Características de los electrodos semiconductores utilizados.	92
8. Errores experimentales obtenidos.	94
9. Condiciones experimentales de los electrodos.	95
10. Indice de las gráficas obtenidas.	96
11. Resultados experimentales.	101

## **I N T R O D U C C I O N**

## INTRODUCCION.

Un hecho reconocido es que en la Tierra los depósitos y la disponibilidad de los derivados del petróleo son limitados. Durante muchas décadas se creyó que las reservas de estos energéticos eran tan grandes que no se podía esperar el agotamiento de los yacimientos conocidos, o por lo menos el de los aún no explotados hasta entonces. Como consecuencia del crecimiento exponencial de la población mundial y del aumento del nivel de vida, se puede calcular que para el año 2030 estarán agotados los yacimientos conocidos actualmente tanto de metales como de petróleo, a menos que se implanten medidas para la utilización más racional de la energía obtenida a partir de estos energéticos. Ya que el 90% de la energía que se consume en el mundo se deriva del carbón, petróleo crudo, gas natural, y uranio, los precios se han elevado y el medio ambiente se ha visto destruido en los esfuerzos para descubrir nuevos depósitos. Dentro de un cierto tiempo se presentarán problemas prácticamente insolubles en la extracción y comercialización de estos energéticos. ( 1,2 )

Pero el peligro es más evidente: la combustión de los derivados del petróleo libera componentes nocivos tales como óxidos de azufre y nitrógeno, plomo, bióxido de carbono y otros compuestos del carbono que representan un grave riesgo para la salud de la humanidad.

En muchas ciudades industriales la atmósfera es tan ácida que se han comenzado a corroer las fachadas de monumentos erigidos hace cientos de años. Cambiar a un sistema energético que sea independiente de los combustibles convencionales es, aunque difícil, obligado e inevitable. Incluso el intento de aplazar este cambio unas décadas más, determinará la aparición o desaparición de muchos problemas como los mencionados anteriormente.

Al tomar conciencia gobernantes, investigadores, industrias y público en general sobre los peligros de la contaminación, han renovado su interés en las fuentes alternativas de energía como la atómica, la eólica, la hidráulica y la solar.

A pesar de que la energía solar debería tener un gran peso en la demanda global de energía, tiene que competir con las ventajas económicas de los combustibles convencionales. Si el desarrollo en el campo de tecnologías ya conocidas es intensificado y se efectúa el cambio a fuentes de energía limpias, podrá evitarse la destrucción ecológica del planeta. ( 3.4 )

En la conversión de la energía solar en eléctrica, se utilizan materiales semiconductores, ya que con estos podemos obtener el efecto fotovoltaico para la conversión directa de la energía solar en electricidad.

En este trabajo se estudiará el comportamiento electroactivo de un material semiconductor: el Oxido de Zinc. Este estudio se realizará con electrodos de Ag/AgCl, Pt y como electrodo de trabajo ZnO puro en una celda fotoelectroquímica.

Esta primera parte tiene como objetivo hacer una reseña de la crisis energética y de materias primas a partir de la década de los setentas. En el primer capítulo se dará una visión del por que el sol y el hidrógeno son fuentes de energía limpias.

En el segundo capítulo se comentarán los materiales semiconductores, la conversión fotovoltaica así como las técnicas empleadas y el material semiconductor utilizado. Se hará énfasis en el estado actual de la Fotovoltaica en México y sus perspectivas.

Se presentan las bases teóricas en las que se apoya el trabajo experimental para resaltar y discutir los aspectos más importantes.

En el tercer capítulo se presentará el desarrollo y los resultados experimentales.

En la parte final se presentarán las conclusiones.

## **CAPITULO I**

### **FUENTES ALTERNATIVAS**

### **DE ENERGIA**

## FUENTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA.

En el futuro, al prescindir de manera forzada de los derivados del petróleo, sólo se podrá disponer de fuentes de energía permanentes tales como la energía atómica y/o de las energías regenerativas como la energía solar, la energía hidráulica y la energía eólica.

En consecuencia, se han realizado numerosos estudios con la finalidad de encontrar otro vector energético, el cual deberá poseer las condiciones siguientes:

- a) Tiene que obtenerse mediante corriente eléctrica con un alto rendimiento energético y ser, además, económicamente rentable.
- b) Su preparación y su consumo energético no deberá ser contaminante es decir; debe ser limpio.
- c) Debe trasportarse y almacenarse sin que sufra pérdidas con facilidad.
- d) Deberá utilizarse de varias maneras; tanto en el uso doméstico como en el uso industrial.

Todas éstas condiciones condujeron a tomar en consideración los reactivos químicos como el hidrógeno, el metano, el amoniaco - calentandolo se convierte fácilmente en nitrógeno e hidrógeno - y la hidrazina, entre otros. Entre todos estos el que ofrece propiedades más adecuadas es el Hidrógeno.

[ 8 ]

Las ventajas del Hidrógeno como portador secundario de energía son principalmente: su preparación, transporte, almacenamiento y utilización; ya que se puede acoplar adecuadamente con otras fuentes energéticas.

Además, de la producción de electricidad para obtener Hidrógeno, se deberán plantear en un futuro las condiciones de una tecnología nuclear en la obtención de Hidrógeno. El desarrollo de nuevos procedimientos electrolíticos, parece tener buenas perspectivas comerciales y técnicas; ya han sido probadas con electricidad procedente de reactores de agua ligera o de reactores reproductores rápidos. En cambio, no tienen posibilidades técnicas los procedimientos para la obtención de Hidrógeno basados en los ciclos termoquímicos que utilizan calor procedente de los reactores nucleares de alta temperatura.

En el marco de una Tecnología Solar del Hidrógeno, se procura utilizar la energía solar de modo industrial para aprovechar esta fuente energética. La función del hidrógeno como portador secundario de energía es concentrar la radiación solar que recibe la Tierra, y hacerla transportable y almacenable. En la obtención del Hidrógeno se pueden aprovechar las Centrales Térmicas Solares y las Centrales Fotovoltaicas Solares.

[ 3,6,7 ]

## 1. EL SOL COMO FUENTE ALTERNATIVA DE ENERGIA.

El sol es una esfera gaseosa de 1'291,000 Km. de diámetro -poco más de 100 veces al de la Tierra- cuya distancia media es de 149'500,000 Km. Se pueden distinguir 3 regiones:

- a) Núcleo. En éste se genera la energía por medio de reacciones termonucleares, resulta innaccesible a las investigaciones porque las radiaciones emitidas de esta región son absorbidas totalmente por las capas exteriores. La temperatura alcanza varios millones de grados y la presión es de millones de atmósferas.
- b) Fotósfera. Es una capa de unos 300 Km., donde se producen casi totalmente los rayos que llegan hasta nuestro planeta. La temperatura alcanza varios miles de grados que decrecen rápidamente en el espesor de la capa, hasta llegar a la temperatura de la superficie: 4500 K.
- c) Cromósfera y Corona Solar. Son regiones de poca densidad donde la materia se encuentra muy diluida, lo cual explica que a pesar de ser muy elevada su temperatura ( 1'000,000 K ), la radiación emitida es débil.

La edad del sol se calcula de  $5 \cdot 10^9$  años y se estima que durante toda su vida ha consumido solamente el 14% de sus reservas de energía, por lo que se trata de una fuente prácticamente inagotable.

La cantidad total de energía interceptada por la Tierra y su atmósfera es de 5.4 millones de quads/año\*. Una parte de esta energía es reflejada hacia el espacio y otra por la atmósfera. Debido a la temperatura de la superficie terrestre, la radiación neta que se refleja de ella es aproximadamente de 6.2 millones de quads/año, es decir; el 15% de la radiación que recibe. ( 5 )

Además el 10% abandona la Tierra por convección y el 19% por evaporación de los océanos. Tenemos entonces que el total de energía que abandona la superficie de la Tierra es mayor que la energía solar incidente. No obstante, gran parte de este calor es atrapado y devuelto desde la atmósfera y las nubes, de modo que el flujo neto de energía de la superficie de la Tierra es igual al 47% del influjo. Por lo tanto, la Tierra mantiene un balance de energía, y su temperatura promedio se conserva constante.

Como fuente energética, el sol es muy atractivo, ya que la energía solar es limpia e ilimitada, aunque tiene la desventaja de no ser económicamente rentable en la noche o en días nublados.

Esta limitación presenta una problemática especial para las industrias, porque un alto porcentaje de éstas están localizadas en zonas septentrionales, donde los inviernos son largos y la noche y el mal tiempo pueden oscurecer al Sol por días, semanas o aún más tiempo. Una solución es el uso de colectores-concentradores solares dentro de los 30 ó 40° que tenemos alrededor del Ecuador - parecido al alargamiento árido de África del Norte y Arabia Saudita -, donde el Sol es muy intenso y 2 ó 3 horas serían suficientes para abastecer de energía a los centros industriales del Hemisferio Norte.

( 3,6,7. )

---

\* UNIDAD TERMICA QUE EQUIVALE A 172 MILLONES DE BARRILES DE CRUDO.

### 1.2.1. HIDROGENO COMO FUENTE ALTERNATIVA DE ENERGIA.

El Hidrógeno al igual que el Metano, es un portador de energía gaseoso. El gas natural contiene por unidad de volumen tres veces más energía que el hidrógeno, pero sólo una tercera parte por unidad de peso. El metano se maneja y se puede almacenar con más facilidad, de todos los combustibles es el que por peso específico proporciona el mayor efecto calorífico: 29 Kcal/Kg. EL FUTURO PERTENECE AL HIDROGENO, puesto que se podrá disponer de metano sólo unas décadas más y el metano sintetizado a partir de carbón no representa ninguna solución. Está demostrado que la conversión del carbón en metano es muy difícil; ya que requiere mucho carbón además, de no ser económicamente rentable, se debe tener en cuenta que las reservas de Carbón son limitadas y que la combustión del metano produce dióxido de carbono. ( 7,9 )

#### ALGUNOS METODOS DE OBTENCION DEL HIDROGENO :

- I. *Electrólisis del agua (  $t < 100^{\circ} C$  ).*
- II. *Producto secundario en la electrólisis cloroalcalina.*
- III. *Electrólisis de vapor del agua mediante semiconductores y a altas temperaturas ( " TERMOLISIS " ).*
- IV. *Cracking térmico de hidrocarburos.*
- V. *Reformación con vapor de agua de hidrocarburos.*

VI. Ciclos termoquímicos de reacciones acopladas ( " PROCESO ISPRA " ).

VII. Obtención a partir de agua mediante la siguiente reacción:



con lignitos u otros materiales.

VIII. Fotólisis biotérmica mediante cloroplastos de tanque.

IX. Por Celdas Fotoelectroquímicas ( " EFECTO BECQUEREL " ).

X. Fotólisis inorgánica en conjunto de capas monomoleculares ( Este procedimiento por ahora sólo cuenta con una base teórica ).

#### VENTAJAS DEL HIDROGENO COMO ENERGETICO :

- I. Unica sustancia totalmente no contaminante puesto que su combustión es distinta a la de todos los hidrocarburos, ya que esta es completa, no como en el caso del carbón. El producto final de su combustión es el agua, que forma parte de un ciclo natural abierto, es decir; se puede reciclar a la atmósfera sin necesidad de instalaciones especiales.
- II. Se puede preparar a partir de agua electroquímica o biotérmicamente sin necesidad de consumir otras materias primas.

III. No es venenoso.

IV. Con electrocatalizadores baratos y a temperatura ambiente pasa a ion hidrógeno de modo altamente reversible, lo que posibilita transformarlo teniendo un rendimiento en corriente eléctrica. Esto equivale a una combustión fría.

V. Se puede almacenar como gas a presión ya sea licuado o absorbido.

VI. Al igual que el metano, se puede transportar de modo económico y seguro por gasoductos a presión. Esta compatibilidad favorece una transición paulatina de la tecnología del metano a la del hidrógeno.

El sistema económico del hidrógeno es descrito como la forma de utilizar el hidrógeno para transportar energía desde fuentes energéticas primarias, así como materia prima para la industria química, su utilización como combustible doméstico, y como el producto final de su combustión puede ser reutilizado para el suministro de servicios auxiliares - agua de proceso, agua de enfriamiento, combustible o energía eléctrica, agua potable o simplemente retornarlo a la biósfera -. ( 10 )

El Hidrógeno sustituirá a los combustibles tradicionales tanto en sus usos como en las otras formas energéticas como por ejemplo:

## **I. ENERGIA ELECTRICA.**

Esta energia puede obtenerse a partir de hidrógeno mediante turbinas de vapor la producción de calor por combustión y por producción directa.

## **II. CALOR PARA LA OBTENCION DE TEMPERATURAS NO ELEVADAS.**

En la calefacción doméstica: el hidrógeno se puede emplear de manera análoga al metano, con ayuda de catalizadores y sin chimenea es posible la combustión del hidrógeno.

## **III. TECNOLOGIA QUIMICA.**

Se puede emplear en muchos procesos químicos de reducción y permitirá disminuir tanto los costos de producción así como la contaminación ambiental.

## **IV. METALURGIA Y REFINADO.**

Utilizando hidrógeno en vez de otros reductores como el carbón, se puede simplificar toda una serie de procesos de reducción, así como el poder trabajar con menas no tan ricas.

#### V. OBTENCION DE AGUA.

En un sistema donde el hidrógeno fuese la fuente energética universal, el consumo de agua potable podría ser cubierta por el hidrógeno, puesto que el producto final de su combustión es el agua pura.

#### VI. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

El tratamiento de aguas industriales se podría efectuar con más facilidad si se dispusiera de electricidad y/o de oxígeno, el cual también se produce en el sistema económico del hidrógeno. Podría ser práctico su tratamiento mediante la oxidación electrolítica a bióxido de carbono.

#### VII. TRANSPORTE MARITIMO.

El hidrógeno licuado y ocasionalmente el oxígeno podrán ser utilizados como combustibles para cargueros utilizando depósitos refrigerados.

#### VIII. TRANSPORTE AEREO.

En el caso del transporte aéreo, el hidrógeno será utilizado para vuelos super e hipersónicos, gracias a que posee gran densidad energética. 1 2 1

### 1. 2. 2. ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO.

El hidrógeno se puede almacenar de las siguientes maneras,

i. Almacenamiento de gas hidrógeno.

- Campos petrolíferos, de gas natural, acuíferos y cavernas.

ii. Almacenamiento de hidrógeno líquido. (  $LH_2$  )

iii. Hidrógeno fijado en compuestos químicos.

i. Almacenamiento de hidrógeno gaseoso.

Con tanques a presión enterrados, existe la solución de emplear yacimientos agotados de petróleo y gas natural, así; como depósitos acuíferos y cavernas artificiales. La introducción del gas sirve tanto para almacenarlo como para desplazar el agua, ya que las capas porosas que los acuíferos poseen - impermeable a los gases -, ayudan a que las pérdidas de hidrógeno sean mínimas.

El almacenamiento en sistemas de tuberías es atractivo, ya que los centros de consumo del hidrógeno y los centros productores del mismo deberán estar conectados por gasoductos, puesto que cabe la posibilidad de estar separados largas distancias. Las presiones de trabajo de éstos sistemas pueden

variar dentro de ciertos límites y por lo tanto puede variar la cantidad de gas que contienen, lo cual significa que pueden actuar como acumuladores de energía. [ 10 ]

	CAPACIDAD ( MILLONES DE Nm <sup>3</sup> )
Depósitos acuíferos	1 - 170
Recipientes a baja presión	0.01 - 0.5
Recipientes a alta presión	0.33
Depósitos en cavernas	1 - 70

Tabla # 1. Capacidades de almacenamiento del hidrógeno en distintos sistemas. [ 9 ]

*ii. Almacenamiento de hidrógeno líquido.*

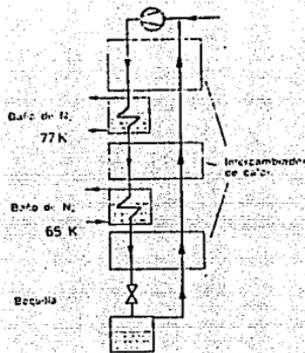
La utilización del hidrógeno como una alternativa práctica no se ha extendido debido a que este:

- \* No es condensable debido a su ligereza.
- \* Difícil de diseñar redes de distribución.
- \* Su costo es más elevado.

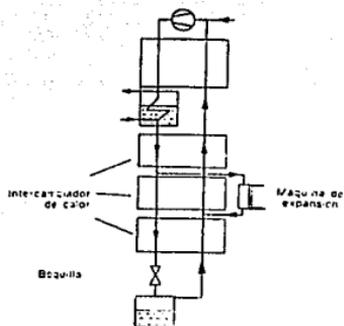
Se espera que dentro de 30 años estas desventajas sean irrelevantes. ( 6 )

La densidad del hidrógeno líquido es de  $0.071 \text{ g/cm}^3$  y su punto de ebullición es de  $20.4 \text{ K}$ , al evaporar un litro de hidrógeno se obtienen  $0.79 \text{ Nm}^3$  de gas hidrógeno y su calor de evaporación es de  $129 \text{ Wh/Kg}$ . Por lo tanto, a un envase metálico a presión de  $200 \text{ atm}$  de  $10 \text{ Nm}^3$  corresponde a  $12.7 \text{ l}$  de  $\text{LH}_2$ . La licuefacción del hidrógeno se efectúa según varios procedimientos y existen numerosas variantes de los mismos. Las instalaciones de licuefacción tienen que enfriar previamente el hidrógeno con nitrógeno líquido y como segunda etapa una expansora. La licuefacción se efectúa mediante una válvula de reducción aprovechando el efecto Joule - Thompson y el efecto isotérmico al reducir el flujo. ( 2,10 )

A causa de su baja temperatura, el hidrógeno líquido ha de almacenarse en tanques aislados del calor. La mayoría de los depósitos de  $\text{LH}_2$  que se utilizan actualmente son tanques de doble pared con capa de aislante al vacío de perlita, éste se puede transportar mediante depósitos o cisternas especiales como se hace con el oxígeno y el nitrógeno líquidos. El consumidor almacena el  $\text{LH}_2$  con gasificadores - tanques criostáticos pequeños con sistemas de regulación -, que mantienen constante la presión de trabajo. El calor necesario para evaporar el  $\text{LH}_2$  lo proporciona el medio ambiente.



a) Proceso Linde.



b) Proceso Claude con una máquina expansora.

Figura # 1. Licuefacción del Hidrógeno.

### iii. Hidrógeno fijado en compuestos químicos.

Los compuestos de nitrógeno e hidrógeno permiten almacenar grandes cantidades de hidrógeno. Estos compuestos tienen una gran ventaja: el nitrógeno es muy abundante - 79 % de la composición del aire -, y al descomponer la unión N-H puede obtenerse nitrógeno que se puede recircular al aire. El compuesto más barato de N-H es el amoníaco, un envase de  $\text{NH}_3$  de 40 l pesa en vacío 42 Kg. y el  $\text{NH}_3$  que puede contener pesa 21 Kg.; es decir contiene 41  $\text{Nm}^3$  de hidrógeno.

El almacenamiento en Paladio metálico resulta atractivo, pero muy costoso. El volumen de Paladio puede contener 800 volúmenes de Hidrógeno a presión atmosférica y temperatura ambiente. La cantidad absorbida aumenta con la presión. El Uranio metálico absorbe también considerables cantidades de Hidrógeno a la temperatura ambiente, y lo libera al ser calentado alrededor de 300°C.

Los compuestos intermetálicos Lantano-Níquel 5 ó Fierro-Titanio si ofrecen una alternativa económicamente viable para el almacenamiento de hidrógeno.

La tabla 2 muestra los diagramas de la estructura de un sistema basado en hidrógeno y oxígeno. ( 2,7,10 )

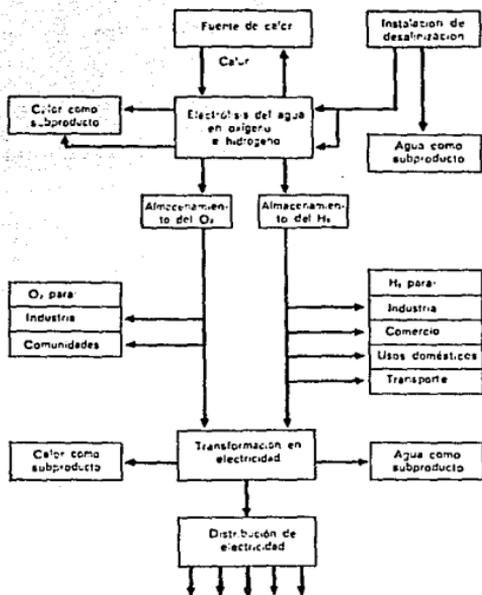


Tabla # 2. Diagrama de bloques de la estructura del sistema económico del Hidrógeno y Oxígeno.

### 1.2.3. METODOS DE UTILIZACION DEL HIDROGENO.

El hidrógeno que es suministrado a una planta de proceso debe ser transformado a Energía Mecánica o Eléctrica. Se puede hacer ésta transformación mediante:

- Turbinas con sistema de vapor de dos sustancias (  $H_2O / NH_3$  ).
- Transformación reversible de hidrógeno en corriente eléctrica.
- Pila de combustión alcalina con catalizadores Raney a baja temperatura.
- Pilas de combustión. [ 7 ]

Las mejores máquinas térmicas, que existen tanto desde el punto de vista de construcción como de optimización, son las turbinas que están propulsadas con vapor de agua y de funcionamiento continuo en las centrales termoeléctricas. Las turbinas propulsadas de gas, constan de un productor de gas a partir de metano o de hidrocarburos y una turbina conectada al mismo. Tienen la ventaja de ser económicamente rentables.

Las turbinas de vapor de carga continua, que requieren inversiones elevadas, requieren que la temperatura de vapor de entrada de  $T_1 = 900^\circ C$  y la temperatura de salida de  $T_2 = 300^\circ C$ , por lo tanto, su eficiencia del 51%, contra el 73% si se dispone

### 1. 2. 3. METODOS DE UTILIZACION DEL HIDROGENO.

El hidrógeno que es suministrado a una planta de proceso debe ser transformado a Energía Mecánica o Eléctrica. Se puede hacer ésta transformación mediante:

- Turbinas con sistema de vapor de dos sustancias (  $H_2O$  /  $NH_3$  ).
- Transformación reversible de hidrógeno en corriente eléctrica.
- Pila de combustión alcalina con catalizadores Raney a baja temperatura.
- Pilas de combustión. [ 7 ]

Las mejores máquinas térmicas, que existen tanto desde el punto de vista de construcción como de optimización, son las turbinas que están propulsadas con vapor de agua y de funcionamiento continuo en las centrales termoeléctricas. Las turbinas propulsadas de gas, constan de un productor de gas a partir de metano o de hidrocarburos y una turbina conectada al mismo. Tienen la ventaja de ser económicamente rentables.

Las turbinas de vapor de carga continua, que requieren inversiones elevadas, requieren que la temperatura de vapor de entrada de  $T_1 = 900^\circ C$  y la temperatura de salida de  $T_2 = 300^\circ C$ , por lo tanto, su eficiencia del 51%, contra el 73% si se dispone

de refrigeración obteniéndose una  $T_c$ -  $27^{\circ}\text{C}$ , pero el vapor de 200 a  $400^{\circ}\text{C}$  se puede utilizar para propulsar una segunda turbina, evitando el empleo directo de su baja presión de vapor - 1.2 a 4 atm - . [ 10 ]

En las pilas de combustión se transforma la energía química del gas hidrógeno en corriente eléctrica sin la transición del paso intermedio de energía mecánica; esta es la causa de que ésta transformación de energía no sea afectada por el factor de Carnot. Esta pila efectúa la reacción que corresponde a la de las mezclas detonantes de hidrógeno, separando en el ánodo la oxidación del hidrógeno y en el cátodo la reducción del oxígeno. Los dos gases, hidrógeno y oxígeno, permanecen separados y en consecuencia se produce la transferencia directa de electrones que transcurre a través de una secuencia de reacciones explosivas y con gran desprendimiento de calor.

La afinidad electroquímica de los gases respecto a sus electrodos es distinta así como su interacción en los electrolitos; por lo tanto sus reacciones, que ellos mismos catalizan, se producen a potenciales distintos. Esta diferencia de potencial es la que hace fluir la corriente eléctrica. Los dos reaccionantes, hidrógeno y oxígeno se suministran continuamente a los electrodos y el producto de reacción, agua, se separa del electrolito por evaporación. [ 10 ]

La figura 2 muestra el esquema de una pila de combustión con electrodos soportados, en el cual el soporte metálico forma la cámara del electrolito. El soporte metálico está recubierto por asbesto, que forma una capa límite de poros finos sobre el cual está prensado el catalizador en forma de polvo y la red que transforma la corriente. Las pilas industriales se compactan según el sistema de filtros prensa. Los electrodos, además del sistema de poros, deben ser catalizadores muy activos para alcanzar densidades de corriente muy elevadas.

Para el ánodo de hidrógeno se emplea, níquel-Raney - obtenido por disolución del aluminio de la aleación Raney de Ni-Al - éste catalizador de níquel tiene una estructura muy fina y posee una superficie interna entre 30 y 150 m<sup>2</sup>/g.

Para el cátodo de oxígeno se utiliza plata-Raney o plata finamente dividida, que se obtiene por precipitación alcalina. Una pila de combustión de este tipo debería proporcionar una diferencia de potencial de 1.23 V al suministrar los gases a los electrodos con una sobrepresión de 1 atm. No obstante, es de 1.1 V debido a la irreversibilidad del cátodo de oxígeno. Además al pasar corriente, se producen más pérdidas de potencial a causa de la presencia de gases inertes o impurezas en los gases o caídas óhmicas, lo cual determina que al aumentar la densidad de corriente de la pila de combustión disminuye la tensión entre los bornes. Casi todas éstas pérdidas disminuyen al aumentar la temperatura de trabajo de la pila.

| 9 |

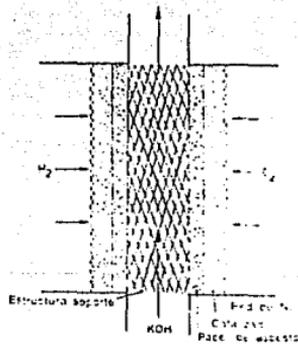
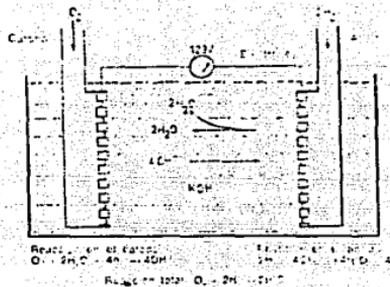
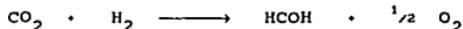


Figura # 2. Pilas de Combustión.

- a) Común
- b) Con electrodos sopitados.

El hidrógeno se utiliza frecuentemente en la tecnología química, por ejemplo, en la preparación de aceites y grasas ( 48% ), abonos artificiales ( 38% ) y síntesis de metanol ( 14% ). La demanda del hidrógeno se incrementa, para ser utilizado principalmente como sustituto del metano, el cual aumenta su precio debido a su gradual agotamiento. La tecnología química orgánica prevee un futuro en el que no existirán sus dos materias primas: el petróleo y el gas natural, pero en el que todavía será posible obtener productos químicos orgánicos a partir de carbón. La fabricación de productos químicos implicará el uso de rocas que contengan carbonatos de acuerdo a la siguiente reacción,



( esta reducción se podría obtener electroquímicamente ).

El hidrógeno se utiliza para fabricar algunos productos alimenticios ya que la reacción de éste con el bióxido de carbono produce formaldehído y metanol, los cuales en presencia de enzimas y nitrógeno pueden transformarse en proteínas con un rendimiento del 50%.

Aunque no se implantara una estructura energética basada totalmente en el hidrógeno, éste, tanto desde punto de vista técnico como económico, se irá imponiendo lentamente como el combustible del tráfico aéreo. En este sentido, lo que es decisivo en favor del hidrógeno, es su gran efecto calorífico por unidad de peso: 28.9 Kcal/g = 0.0325 KwH/g para el hidrógeno, frente a 10.98 Kcal/g = 0.0128 KwH/g para la

gasolina. En consecuencia, como la tendencia es la de un aumento progresivo de los precios del petróleo, la transición de la gasolina de aviación a  $LH_2$  se producirá por sí sola, una vez que las normas de manejo y uso del  $LH_2$  estén completas, el uso del  $LH_2$  aún está siendo investigado. [ 7,10 ]

Para el uso doméstico, el hidrógeno es muy atractivo sobre todo se podría utilizar en los servicios de luz ya que el fósforo depositado en el interior de los tubos de cristal reaccionaría con el hidrógeno produciendo una luz clara a baja temperatura. Para la calefacción, el hidrógeno se difunde por un tubo de porcelana porosa impregnado de un catalizador, que facilita la reacción sin llama con el oxígeno del aire generando por lo tanto calor a temperatura media. La energía eléctrica se puede obtener en pilas de combustión de hidrógeno, la conexión de estas pilas con transformadores de corriente continua en corriente alterna permiten obtener la corriente alterna necesaria para hacer funcionar aparatos, domésticos por ejemplo televisores.

El hidrógeno sería un medio muy apropiado para almacenar energía con la finalidad de poder suministrarla en un momento dado. En el caso de una posible limitación en el suministro de petróleo, el hidrógeno puede ser una alternativa económicamente rentable de almacenamiento de energía - minimizaría los costos de operación -. El hidrógeno se obtendría electrolíticamente y se transformaría en electricidad mediante pilas de combustión.

El hidrógeno también es utilizado en la metalurgia del hierro, en la industria básica de metales - obtención y refinado - y en medios comunes de transporte. [ 10 ]

Como combustible para automóviles tiene las siguientes ventajas:

\* Es perfectamente compatible con las máquinas de combustión interna, las de Otto y Diesel y las turbinas de gas.

\* Alta relación masa-energía - 110,000 BTU / Kg -.

\* Mayor temperatura de auto-ignición - 585°C -, lo cual permite un grado de compresión más alto.

\* Promueve una mayor eficiencia de la máquina.

\* Menor energía de ignición.

\* Se aproxima más a la combustión instantánea a volumen constante ideal del ciclo de Otto.

\* Amplio intervalo de los límites de inflamabilidad - 4 a 75% -, lo cual le da una mayor flexibilidad en la selección de las reacciones combustible-aire.

\* No es contaminante. Elimina el óxido nítrico - único posible contaminante -, por reducción.

\* Ausencia de posibles condensaciones de vapor en climas fríos. [ 6 ]

PROPIEDAD	HIDROGENO	METANO	GASOLINA
Peso Molecular	2.016	16.043	-107.0
Densidad *	0.0837	0.65	- 4.40
Calores de combustión [ kJ / g ]			
- Mínimo	119.93	50.02	44.5
- Máximo	141.86	55.53	48.0
Límites de inflamación [ En vol. % H <sub>2</sub> ]			
- En el aire	4 - 75	5.3-15	1-7.6
- Detonación	18.3-59	6.3-13.5	1.1.3
Temp. de inflamac. **	~ 585	~ 540	228-471
Temp. de llama **	2045	1875	2197
Difusión en el aire *	0.61	0.16	0.05
Velocidad de difusión *	< 2	< 0.51	< 0.17
Relación estequiom.			
con el aire **	29.53	9.48	1.76
Energ de explosión <sup>■</sup>	2.02	7.03	44.22

Tabla # 3. Propiedades físicas y químicas del hidrógeno, metano y gasolina. ( 10 )

Nomenclatura utilizada :

- A presión normal y 20.C.
- \*\* En vol. % H<sub>2</sub>
- En Kg de TNT / ( m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> a presión normal y 20.C )

## CAPITULO II

### CONCEPTOS FUNDAMENTALES

**I . M A T E R I A L E S**

**S E M I C O N D U C T O R E S**

### 2.1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DE LOS MATERIALES SEMICONDUCTORES.

La historia de los semiconductores se remonta por lo menos a un siglo atrás. Pero es sólo hasta 1948, fecha de aparición del transistor, cuando se inicia una investigación a fondo de las propiedades físicas de los sólidos. Sólo tuvieron aplicación en la electrónica, después se ampliaron las posibilidades de aplicación y así surge una tendencia a utilizarse en dispositivos para aprovechar la Energía Solar.

En 1833 Michael Faraday realizó observaciones acerca de lo que más tarde se conocería como *semiconductores*, descubrió que la resistividad eléctrica del sulfato de plata disminuye con el aumento de la temperatura, lo que se llama *coeficiente de temperatura negativo*, cosa anómala con respecto a los *metales comunes* en los que la resistividad aumenta con la temperatura.

En 1839 Edmond Becquerel demostró que el voltaje se produce cuando la luz es absorbida por un electrodo inmerso en un electrolito, éste fue, un experimento más de los materiales semiconductores, pero el primero del Efecto Fotovoltaico.

En 1873 W. Smith demostró un efecto análogo al de Becquerel utilizando selenio, donde observó una disminución de resistividad eléctrica bajo influencia de luz, fenómeno llamado " FOTOCONDUCTIVIDAD ".

Hacia 1915, basandose en la demostración hecha por H. Hertz, de la existencia de ondas electromagnéticas, se empezó a utilizar semiconductores para detectar las ondas de radio; y se comenzó a utilizar el cristal de galena como detector. En 1920 se utilizaban rectificadores de selenio y óxido de cobre. En 1923 aparece la primera contribución al estudio teórico de los semiconductores por Schottky con su teoría de los rectificadores.

En la década 1950-1959 se logran grandes avances en la investigación de propiedades eléctricas y ópticas de los semiconductores. [ 11,12 ]

#### 2.1.2. NATURALEZA Y CLASIFICACION DE LOS SEMICONDUCTORES.

Para el estudio de la materia en estado sólido, actualmente se ha clasificado en:

- a) Aislantes ( dieléctricos ).
- b) Semiconductores.
- c) Metales ( conductores ).

La diferencia básica entre ellos es el orden de magnitud de la conductividad.

Los valores de la siguiente tabla están reportados a temperatura ambiente. La conductividad del germanio puro es de alrededor de 0.02 SIEMENS, la del silicio es de  $5 * 10^{-6}$  y la del cobre es de  $6.25 * 10^5$  SIEMENS. Al  $\Omega^{-1}$  se le conoce como SIEMENS.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD ( $\Omega^{-1}$ )
METAL	$10^4 - 10^6$
SEMICONDUCTOR	$10^2 - 10^{-9}$
AISLANTE	$10^{-14} - 10^{-22}$

Tabla # 4. Intervalo de conductividades de materiales aislantes, semiconductores y conductores.

Un *semiconductor* es un cuerpo sólido del cual el número de cargas móviles responsables de la conductividad dependen de la temperatura, y es extremadamente sensible a toda modificación de la red cristalina y a la presencia de impurezas en la red. Un semiconductor a la temperatura del cero absoluto será teóricamente un aislante perfecto, ya que no cuenta con bandas parcialmente llenas - la banda de conducción está vacía y la de valencia llena -.

Los *semiconductores* son en su mayoría *no metales*, tales como el Silicio y el Germanio, sin embargo, existen semiconductores de sales iónicas de Arseniuro de Galio, Seleniuro de Arsénico, Seleniuro de Cadmio, etc.

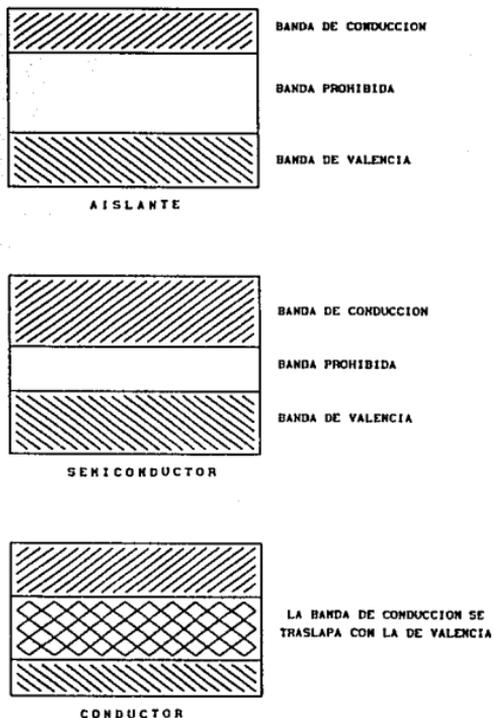
Existe una gran variedad de materiales semiconductores, los cuales pueden clasificarse de acuerdo al número de elementos que componen al semiconductor, resultando: *elementos* ( *Si, Sb* ); *compuestos binarios* (  $TiO_2, CdSe, Fe_2O_3$  ); *compuestos ternarios* (  $SrTiO_3, FeTiO_3$  ). También se les puede

clasificar basandose en su estructura química: elementos ( Sn ), compuestos intermetálicos ( GaAs ), óxidos metálicos (  $TiO_2$  ), sulfuros metálicos ( CdSe ), óxidos metálicos tipo mineral (  $MgTiO_4$  ) compuestos orgánicos (antracenos, cloruro de polivinilo, polietileno polipirrol ftalocianinas ). Otros compuestos de gran interés son los materiales amorfos - sin estructura cristalina - debido a su bajo costo.

Como puede apreciarse en la figura #3, en los conductores, las bandas de valencia y de conducción se traslapan en tanto que en los aislantes se encuentran muy separadas y en los semiconductores la separación es pequeña. El traslapamiento facilita que en los conductores los electrones se muevan en la banda de conducción. En los aislantes la gran separación hace imposible que los electrones se muevan, y en los semiconductores la separación pequeña hace que ellos se muevan con relativa facilidad.

A un semiconductor puro se le denomina también *Semiconductor Intrínseco* y a los que se les adiciona alguna impureza se les denominan *Semiconductor Extrínseco*, que a su vez se subdividen en *Semiconductor Tipo P* y *Semiconductor Tipo N*.

Se puede decir que los semiconductores están comprendidos entre los conductores y los aislantes. Los electrones de valencia no se encuentran libres por completo para moverse ni tan fuertemente ligados como en el caso de los aislantes. En el semiconductor los electrones de valencia se encuentran en realidad compartidos por los átomos. Este proceso se conoce como ENLACE COVALENTE y muchas de las propiedades de los semiconductores se producen gracias a él. El Enlace Covalente permite que los electrones se muevan de átomo a átomo sin que se encuentren libres por completo. Otra forma de visualizar la diferencia entre conductores, aislantes, y semiconductores es la Teoría de Bandas de Energía. ( 11, 12 )



**FIGURA # 3. Representación esquemática de la longitud de la banda prohibida de los materiales aislantes, semiconductores y conductores.**

Debido a su disponibilidad, el Silicio es el semiconductor más empleado, aunque también se utiliza el Germanio. En su estado natural el Silicio es un cristal; esto quiere decir que en un trozo de Silicio los átomos están localizados en puntos específicos en una red ordenada. En la figura # 4 se muestra un diagrama de la red cristalina del Silicio.

Cada átomo está rodeado por cuatro electrones de valencia. En un cristal perfecto cada uno de esos electrones es compartido con un átomo vecino. El cristal debería ser un dieléctrico o un aislante debido a que no hay electrones disponibles para que se establezca un flujo de corriente; pero cualquier imperfección ocasionaría una circulación de corriente.

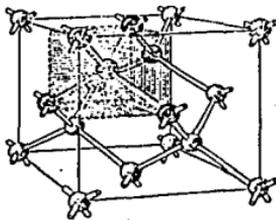


Figura # 4. Estructura cristalina del Silicio.

**BANDA DE VALENCIA. BANDA DE CONDUCCION. BANDA PROHIBIDA.**

Si se considera la capa electrónica externa o capa de valencia, que consta de un cierto número de sub-capas que, dentro del cristal son llamadas bandas. La que corresponde a la capa baja vecina al núcleo es llamada *banda de valencia* - a cero absoluto esta capa siempre se encuentra llena -.

Justo abajo de ésta se encuentra una banda permitida - pero siempre vacía al cero absoluto -. Se le llama *banda de conducción*. El espacio comprendido entre las *bandas de valencia* y de *conducción*, se denomina *banda prohibida*.

Si el número de electrones del átomo es el necesario para completar totalmente sus bandas *no prohibidas*, los electrones dentro de cada una de éstas bandas *no tienen ninguna movilidad*. El movimiento de los electrones como es imposible, el cuerpo es un *aislante perfecto en el cero absoluto*. [ 11, 12 ]

- En un cuerpo aislante la *banda de valencia* está llena, la *banda de conducción* está vacía y la longitud de la *banda prohibida* es grande ( $\Delta E \gg 1 \text{ eV}$ ). Por lo tanto todo movimiento de electrones es imposible.
- En un semiconductor como en el anterior, la *banda de valencia* está llena, la *banda de conducción* está vacía, pero la longitud de la *banda prohibida* es pequeña ( $\Delta E = 1 \text{ eV}$ ).

- En un cuerpo conductor la banda de valencia está llena, pero la banda de conducción está parcialmente llena. Los electrones de esta banda tienen por lo tanto espacios libres por donde se desplazan. Como ellos son numerosos, la conductividad es grande.

### 2.1.3. CONDUCTIVIDAD POR IMPUREZAS QUIMICAS.

#### 1. Efecto de una elevación de temperatura. Conductividad Intrínseca.

Si se aumenta la temperatura alrededor de su posición media adquiere una energía cinética creciente de  $KT = 0.863 * 10^{-4} T$  en electrón-volts. La probabilidad para que esta agitación térmica haga pasar un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción es muy alta.

Ahora bien, todas las veces que un electrón - por excitación térmica -, atraviesa la banda prohibida, la conductividad del cristal semiconductor aumenta por dos razones:

- El electrón de la banda de conducción es móvil. El se desplazará si se somete a la acción de un campo eléctrico  $\mathcal{E}$ .
- La banda de valencia no está totalmente llena. Los electrones restantes pueden desplazarse ( un electrón viene a tomar el lugar de este que falta y deja a su vez un espacio libre ).

Los mecanismos de la conductividad intrínseca del cristal son por excitación térmica :

\* Un electrón es arrancado de los electrones de valencia del cristal ( electrón de la banda de valencia ). Mientras que los átomos de la red tiene una posición media fija, éste electrón se propaga dentro del cristal: el se desplaza en línea recta hasta una colisión que lo devuelve, con una rapidez diferente a la inicial, en una dirección cualquiera hasta una nueva colisión. Si un campo eléctrico  $\hat{E}$  actúa sobre el cuerpo, un movimiento general o de conjunto se sobrepone al movimiento desordenado.

\* El lugar vacante dejado en la banda de valencia, por el electrón arrancado se llama " HUECO ". Este hueco puede fácilmente desplazarse. Permite que un electrón reemplace el lugar libre y dejando a su vez un lugar vacante. Un movimiento de electrones que se repite de esta manera se considera como el movimiento de un hueco. En presencia de un campo eléctrico, el hueco se desplaza en la misma dirección y en el mismo sentido que una carga positiva, por lo que se le designa con el nombre de hueco positivo al punto donde falta un electrón. Se demuestra, en efecto que los huecos tienen propiedades idénticas a las cargas positivas de masas muy cercanas a la del electrón. ( 11 )

Se conocen dos cuerpos solamente ( el estaño gris y el grafito ) que poseen este tipo de conductividad.

Un fenómeno muy importante se produce cuando se adiciona a un cristal de un semiconductor pequeñas impurezas químicas convenientemente escogidas.

1. Si se introduce en un cristal de germanio una traza de un elemento pentavalente - Plomo, Arsénico o Antimonio -, cuya capa electrónica externa posee 5 electrones. Los átomos de impurezas toman dentro de la red cristalina el lugar de los átomos de germanio e intercambian los electrones de su capa externa con los átomos vecinos de la misma manera que los átomos de germanio entre ellos.

Pero, los 4 átomos vecinos de germanio no pueden fijarse más que 4 de los electrones periféricos del elemento pentavalente. El quinto electrón gravita alrededor del resto positivo que consta de 4 electrones de valencia.

Por consecuencia en cuanto la temperatura se eleva, la agitación térmica permite a este electrón independiente liberarse de la atracción del núcleo y es por tanto el responsable de conducción eléctrica. Precisando, la partida del electrón de la impureza pentavalente - por consecuencia inmediata la creación de una carga positiva fija, que se distingue de un hueco móvil-, que puede resultar de la creación de un par electrón-hueco.

( 11,12 )

2. Por el contrario, si se introduce en el cristal de germanio una traza de un cuerpo simple trivalente - boro, aluminio, galio o indio -, cada átomo de estos elementos sólo tienen 3 electrones a intercambiar con los 4 átomos de germanio vecinos. Hay entonces una plaza vacante, un hueco positivo que como un electrón independiente no demanda ser liberado, tiene una ligera energía, y, el también es responsable de la conducción eléctrica.

La impureza de la primera categoría - elemento pentavalente -, se le denomina elemento donador y el semiconductor que lo recibe es del tipo N.

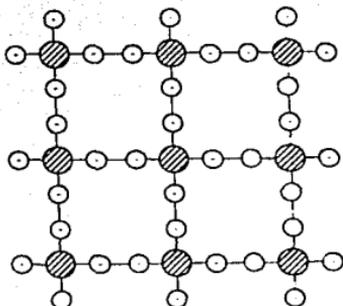
La impureza de la segunda categoría - elemento trivalente -, se le denomina elemento aceptor y el semiconductor que lo recibe es del tipo P.

Igualmente adicionando impurezas, el semiconductor puede permanecer neutro.

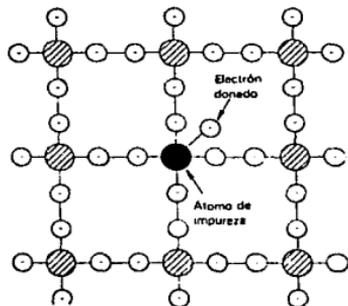
De acuerdo a los portadores de carga que intervienen en el proceso de conducción tenemos :

\* *Semiconductores electrónicos. En donde los portadores de carga son electrones y huecos.*

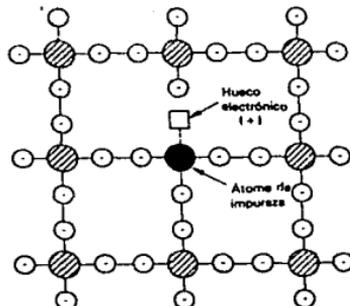
\* *Semiconductores iónicos. En los cuales la corriente es transportada por los iones que forman el material semiconductor, por lo que son inestables. [ 11,12 ]*



Estructura atómica del Silicio puro



a) Semiconductor Tipo N.



b) Semiconductor Tipo P.

Figura #5. Materiales Semiconductores.

SEMICONDUCTOR	TIPO	LONGITUD DE LA BANDA PROHIBIDA
$Sr_2Nb_2O_7$	N	3.86
ZnO	N	3.20
$SrTiO_3$	N	3.20
SiC	P	3.00
$TiO_2$	N	3.00
CdS	N	2.40
$GeFe_2O_4$	P	2.30
$CdFe_2O_4$	N	2.30
GaP	P	2.30
ZnTe	P	2.30
$Fe_2O_3$	N	2.30
$Hg_2Ta_2O_7$	N	1.80
$Hg_2Nb_2O_7$	N	1.80
CdSe	N	1.70
CuO	P	1.70
CdTe	N	1.40
GaAs	P	1.40
Si	P	1.10

Tabla # 5. Energía de banda prohibida en electrón-Volts de algunos materiales semiconductores. ( 13, 14 )

## 2. C O N V E R S I O N

### F O T O V O L T A I C A

### 2.2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

La conversión directa de luz solar en energía eléctrica se logra por medio de baterías solares, compuestas de " celdas solares ", y con base en un proceso llamado " EFECTO FOTOVOLTAICO ". Este término fue adoptado para diferenciarlo del efecto fotoconductor, siendo ambos efectos fotoeléctricos que ocurren en todas las materias semiconductoras, dependiendo de la temperatura. En el efecto fotoconductor, los fotones de la luz incidente generan cargas eléctricas libres. Esto se produce por la fotoionización interna de los átomos o iones que constituyen el cristal del material semiconductor. La nuevas cargas móviles incrementan la conductividad eléctrica de la sustancia. Este efecto no genera energía pero se puede emplear en elementos sensores de la luz. El efecto fotovoltaico, por el contrario, sólo ocurre cuando existe una barrera potencial en un material semiconductor no iluminado. Este tipo de proceso de conversión no depende del calor: a medida que aumenta la temperatura la eficiencia de conversión disminuye.

Esta conducta responde al hecho de que los fotones de la luz transmiten su energía directamente a los electrones, sin un paso térmico intermedio. Consecuentemente, las celdas solares no sólo son apropiadas en las regiones soleadas, sino también en las zonas templadas de baja insolación. Bajo cielos cubiertos, los aparatos de concentración - como los utilizados en la conversión termodinámica de la energía solar -, no pueden funcionar y los rendimientos de los colectores de calor de placa plana descienden hasta valores muy bajos. Las celdas solares continúan funcionando con el mismo rendimiento en cielos nublados que cuando hay luz solar.

Se puede conseguir un efecto de conversión fotovoltaica en todos los semiconductores. Los aislantes son inapropiados a causa de su baja conductividad y los metales son insensibles a la luz a causa de su alta concentración de electrones en la oscuridad. Los semiconductores que mejor conversión de la luz solar son aquellos que dan el mayor producto de corriente-voltaje, es decir; los que tienen una mayor bandgap.

Como se ha mencionado la energía solar es limpia e ilimitada, por lo que la generación de energía solar fotovoltaica puede ser explotada gracias a las propiedades de las celdas solares. ( 8,16 )

Las celdas solares o celdas fotovoltaicas son dispositivos capaces de transformar la radiación solar en electricidad; son dispositivos estáticos, es decir; carentes de partes móviles.

Para que una celda solar expuesta al Sol produzca energía eléctrica debe reunir, al menos, tres características fundamentales:

1. Ser capaz de absorber una gran parte de la radiación solar que recibe para que la generación de pares electrón-hueco sea eficiente.
2. Tener un campo eléctrico interno que separe las dos cargas de cada par impidiendo su posterior recombinación.
3. Finalmente, las cargas separadas deben ser capaces de viajar a través de la celda hasta los electrodos desde donde se pasan al circuito exterior.

Las celdas solares tienen muchas ventajas, sin embargo; presentan las siguientes desventajas:

1. La generación toma lugar cuando hay luz solar, estas celdas no almacenan electricidad.
2. La generación de gran cantidad de poder requiere una gran área para que estas tengan gran eficiencia.
3. Los materiales necesarios para su construcción son caros y se desperdicia mucho material durante su manufactura. Su armado es una labor intensiva. ( 2 )

Celdas solares. Limite de desempeño. En el intervalo de energía de 1.4 - 1.5 eV., se puede obtener la máxima eficiencia de conversión en una celda solar. Los materiales conocidos al exhibir intervalos de energía en este rango son el GaAs y CdTe. Los procesos y manufacturas del Silicio están bien establecidos, aunque este no es una buena elección para la manufactura de celdas solares, su eficiencia de conversión es casi del 22 %. Para el arseniuro de galio los procesos están bien establecidos, aunque es utilizado en la estructura de heterounión:

GaAlAs / GaAs

formando GaAlAs en la superficie y obteniéndose una eficiencia de casi el 25 %.

Adicionando fosforo de indio al silicio, la unión P-N es formada en la capa InP obteniéndose una celda solar barata y eficiente. ( 4 )

MATERIAL	% DE RENDIMIENTO
SILICIO	22
ARSENIURO DE GALIO	20
SULFURO DE CADMIO	8
TELURO DE CADMIO	4
POSFURO DE INDIO	3
POSFURO DE GALIO	1
SELENIO	1

Tabla # 6. Materiales utilizados en celdas solares y su rendimiento obtenido. ( 1 )

*Rendimiento del proceso fotovoltaico.* El rendimiento de la operación de una celda solar se define como el cociente entre la energía eléctrica producida y la energía solar interceptada por su superficie. Cuando se optimiza la carga que la celda debe alimentar, el rendimiento es máximo y esta dado por:

$$\eta = \frac{P_m}{I} = \frac{I_m V_m}{I} = \frac{(FF) \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{I}$$

## 2.2.2. TIPOS DE CELDAS Y SU EVOLUCION.

### 1. La celda solar de silicio.

Bajo un punto de vista histórico las primeras aplicaciones del efecto fotovoltaico dieron origen a celdas con rendimientos bajos (  $\approx 4\%$  ) debido a que los materiales utilizados no eran de la calidad adecuada. Fue en el año de 1954 cuando gracias a la utilización del silicio monocristalino como material fotovoltaico, se obtienen celdas con un rendimiento de aproximadamente 6%. Dichas celdas basadas en las propiedades fotovoltaicas de las uniones P-N fueron comercializadas. Desde 1955 el silicio ha sido el material semiconductor más utilizado para la Conversión Fotovoltaica de Energía Solar, y también ha sido el material básico para la industria electrónica.

La energía necesaria para crear un par electrón-hueco en el silicio es de  $\approx 1.12$  eV. - anchura de la banda prohibida o bandgap del semiconductor -, y sólo los fotones solares de energía igual o superior a este valor pueden pasar - equivalente a una longitud de onda de  $1.1 \mu\text{m}$  -, lo cual implica que una gran fracción de la radiación solar que recibimos (  $\approx 40\%$  ) no es útil para producir el efecto fotovoltaico en este semiconductor. Por otra parte, si los fotones son de alta energía - correspondientes, por ejemplo, a la radiación ultravioleta - son fuertemente absorbidos en la superficie del silicio y generan pares de carga que se recombinan antes de ser separados por el campo eléctrico existente en la unión P-N. Las celdas de « bajo costo » son redondas porque están hechas a partir de láminas cortadas de barras tal como éstas resultan de la fusión. Estas celdas utilizan menos material en comparación con las de silicio cristalino y su fabricación es más sencilla, por lo tanto: su costo es menor. [ 8 ]

donde:

I. Producto de la insolación por la superficie efectiva de la celda. (  $\text{kW/m}^2$  ).

Isc. Corriente en corto circuito. ( A ).

Voc. Tensión en circuito abierto. ( V ).

Im. Corriente en el punto de máxima potencia. ( A ).

Vm. Tensión en el punto de máxima potencia. ( V ).

$\eta$ . Rendimiento obtenido.

Los factores que influyen en el rendimiento de una celda solar son de dos tipos:

- a) Internos o externos ( características del material, espesor de la celda, superficie activa, geometría de los contactos, etc. ).
- b) Ambientales ( temperatura de operación, composición espectral de la radiación, etc. ).

Entre los factores ambientales que afectan al rendimiento de la celda solar de silicio ( no necesariamente a las fabricadas con otros materiales ) es la temperatura: por encima de la ambiental el rendimiento disminuye, razón por la cual es necesario refrigerar las celdas cuando su temperatura de operación es superior a los  $40^{\circ}\text{C}$ . En general, la temperatura depende de la intensidad de la radiación solar que también afecta a los parámetros de la celda: la corriente en corto circuito es proporcional a la intensidad de la radiación y la tensión en circuito abierto varía muy poco con ella. ( 4,8,16 )

## 2. La celda solar de sulfuro de cadmio.

Después del silicio, el material que más ha atraído a la investigación es el sulfuro de cadmio. Este material ofrece buenos rendimientos de conversión cuando se emplea asociado con sulfuro de cobre en heterounión  $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$ .

Se considera que la celda solar de sulfuro de cobre es apta para fabricar celdas solares a bajo costo, tales como las utilizadas para la conversión fotovoltaica a gran escala en centrales solares. Ante todo, implican un consumo muy bajo de material ya que son extremadamente delgadas: una celda solar de sulfuro de cadmio es un ejemplo de una - celda solar de capa fina -, y como están hechas de material policristalino representa un menor costo respecto del silicio monocristalino.

La celda solar de sulfuro de cadmio no ha tenido un buen desarrollo por la poca estabilidad en su tiempo de vida. Aunque, recientemente, se ha demostrado la viabilidad de este tipo de celdas solares a  $90^\circ\text{C}$ , y las perspectivas del sulfuro de cadmio en la producción de electricidad a gran escala. Estas celdas aún son inapropiadas para el funcionamiento bajo luz altamente concentrada, ya que al alcanzar altas temperaturas de funcionamiento -  $90 - 100^\circ\text{C}$  a pesar de una refrigeración externa - podrían sufrir algunos deterioros que afecten la vida útil del sistema. ( 6 )

### 3. La celda solar de arseniuro de galio.

En la forma de celdas de capa delgada policristalina, ésta celda tiene bajo rendimiento pero cuando se utiliza este material en la forma monocristalina como en el caso de las celdas de silicio, se pueden obtener buenos rendimientos de conversión. No obstante, el consumo de material que se utiliza para la fabricación de una celda es mayor que para las celdas de sulfuro de cadmio, ya que se necesita un sustrato de arseniuro de galio monocristalino. El arsénico es un elemento raro y caro. El galio es más abundante, pero si más caro, la desventaja del costo del arseniuro de galio comparado con las celdas de sulfuro de cadmio es mayor incluso si se considera que primero debe ser transformado al estado monocristalino. Por lo que se considera a este material inapropiado para la fabricación de celdas solares.

[ 8 ]

### 4. Celda de combustible.

Las celdas de combustible son celdas electroquímicas en las que se suministran continuamente materiales reaccionantes frescos a las celdas a medida que el material original reacciona. La estructura de las celdas y de los electrodos permanece inalterada mientras que se está añadiendo las sustancias químicas. Actualmente se están realizando investigaciones muy activas sobre este tipo de celdas, los altos rendimientos de éstas estimulan las investigaciones. Se ha logrado una conversión de Energía Eléctrica hasta un 70 %.

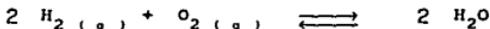
La mayor parte de las celdas de este tipo funcionan con gas y necesitan superficies catalíticas en los electrodos, tales como el platino para el hidrógeno y de hidrocarburos, y plata para el oxígeno. En la mayor parte de las celdas la actividad de los electrodos disminuye a causa de su contaminación o de la desintegración de las superficies sólidas ya que la vida de algunos de ellos es menor a un año.

Sin embargo, se ha pensado que éstas celdas reemplazarán a los dinamos para la generación en gran escala de electricidad, pero cuando las reservas mundiales de platino se extingan, será necesario buscar un catalizador alternativo.

( 7 )

#### 5. Celda de hidrógeno.

Es la más antigua, pero la más investigada. En su forma más sencilla el hidrógeno está en contacto con un electrodo inerte. Los electrodos tienen superficies catalíticas y se mantienen separados sumergidos en una disolución de hidróxido sódico o en otro electrolito. La reacción que tiene lugar es:



Esta celda tiene especial interés para la conversión de la Energía Solar porque es un método efectivo para su

almacenamiento. La Electricidad se genera en las Celdas Fotovoltaicas y el hidrógeno por electrólisis del agua. Este puede transportarse y almacenarse para ser utilizado en las celdas de combustible y regenerar electricidad con un buen rendimiento. ( 7 )

Entre las dos guerras mundiales se efectuaron investigaciones para el desarrollo de las celdas solares en varios países, principalmente en Estados Unidos, Alemania, Francia, Gran Bretaña y URSS. Los materiales estudiados eran principalmente el selenio y el óxido de cobre. Pero al no contar con los monocristales - ya que la metalurgia no estaba muy avanzada -, se estudió más a fondo la teoría del efecto fotovoltaico.

También se realizaron investigaciones para el desarrollo de las celdas solares de arseniuro de galio, telurio y sulfuro de cadmio. Además de las celdas monocristalinas, se estudiaron las celdas de arseniuro de galio de capa fina. En los Estados Unidos, la mayor parte de las investigaciones para la mejora de este tipo de celdas se abandonaron a mediados de los años sesentas, debido a la falta de resultados satisfactorios. Al comenzar la década de los setenta, cuando progresó la metalurgia se reanudó el trabajo sobre las celdas monocristalinas de arseniuro de galio obteniendo un rendimiento del 20%.

En lo referente al telurio de cadmio, la mayor parte de las investigaciones se desarrollaron sobre las celdas solares de capa fina de  $CdTe-Cu_2Te$ . Se han demostrado rendimientos de un 6%. Pero, por los problemas de estabilidad, el trabajo en los Estados Unidos se abandonó en 1968 y en Francia en 1971. ( 8 )

### 2.2.3. CONVERSION DE LA ENERGIA SOLAR EN ENERGIA ELECTRICA.

*Energía Solar Fotovoltaica.* La energía eléctrica no está presente como fuente de energía primaria y, en consecuencia, sólo podemos disponer de ella obteniéndola por transformación de alguna otra forma de energía. Las primeras pilas desarrolladas por el hombre generaban energía eléctrica a partir de la química de determinados compuestos. Algún tiempo después, la energía mecánica fue la principal fuente de electricidad gracias a la utilización de dinamos y alternadores. En último término la transformación controlada de la energía térmica en mecánica ha permitido llegar a los procedimientos de producción de electricidad que actualmente se explotan: las centrales eléctricas, en las que la energía térmica liberada por una fuente de energía primaria - madera, carbón, petróleo, gas -, se transforma en electricidad a través de un proceso sumamente elaborado que exige la utilización de turbinas y alternadores, los cuales cubren la etapa final de conversión de energía mecánica en eléctrica. [ 8 ]

Recientemente, el hombre ha aprendido a transformar la energía solar mediante diferentes procedimientos. Los denominados fotovoltaicos han supuesto una simplificación respecto a los procedimientos energéticos convencionales: convertir una energía primaria, la solar, en electricidad de modo directo, es decir, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía - como la mecánica -. [ 3 ]

La conversión directa de la Energía Solar en la Energía Eléctrica puede realizarse mediante:

- i. *Generadores Fotoeléctricos.*
- ii. *Generadores Termoeléctricos.*
- iii. *Generadores Termoiónicos.*
- iv. *Generadores Fotovoltaicos.*

Se ha observado en los *Generadores Fotoeléctricos*, que determinados metales emiten electrones cuando se iluminan. La emisión de electrones sólo tienen lugar cuando hay luz, energía radiante, que incide sobre el metal, y tienen una frecuencia mínima llamada " umbral ". Por lo tanto, no toda la energía procedente del sol es eficaz para expulsar electrones de un metal. No obstante, al principio se pensó que el *Efecto Fotoeléctrico* podría ser aprovechado para transformar la Energía Solar en Energía Eléctrica pero actualmente, todas las investigaciones realizadas en este sentido han terminado por el éxito de las " Celdas Solares o Generadores Fotovoltaicos ".

[ 7 ]

Los *Generadores Termoeléctricos* funcionan de manera análoga a los anteriores. La única diferencia reside en la manera en que se producen esos dos " depósitos a distinto nivel ". Mientras que en las celdas solares es la luz solar la causante del fenómeno, en éstos lo es el calor proporcionado por el sol.

Al calentar sólo un extremo del cristal semiconductor tipo N se establece una diferencia de potencial del signo indicado en la figura # 8. Lo mismo sucede en el cristal semiconductor de tipo P. Calentando localmente; la única

diferencia reside en que la polaridad será opuesta. Los distintos cristales semiconductores pueden conectarse, como pilas en serie, uniendo sus extremos calientes con una varilla metálica. Pero, para alcanzar más eficiencia de conversión mayor diferencia de potencial para una misma cantidad de Energía Solar es necesario un material que,

\* sea mal conductor del calor y,

\* buen conductor de la corriente eléctrica

el único material que ha dado buenos resultados es el telurio de plomo ( II ). [ 7 ]

Los Generadores Termoiónicos están basados en el Efecto Termoiónico, es decir; los metales emiten electrones cuando se calientan. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor es el número de electrones emitidos. Los electrones emitidos por el cátodo son atraídos por el ánodo, surgiendo una corriente eléctrica que es la que produce el trabajo. No obstante ser el principio de este esquema muy sencillo, las elevadas temperaturas que se necesitan para la generación de electrones llevan consigo serios problemas aún no resueltos. Se prevee su utilización dentro de algunos años y se espera alcanzar rendimientos superiores al 40% y que se pueda trabajar a una temperatura de 800 K. [ 7 ]

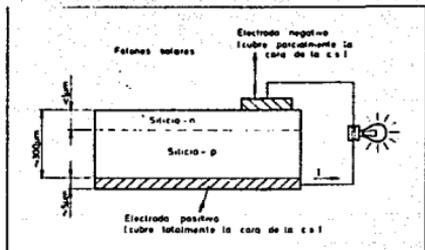


Figura #7. Funcionamiento esquemático de una celda solar.

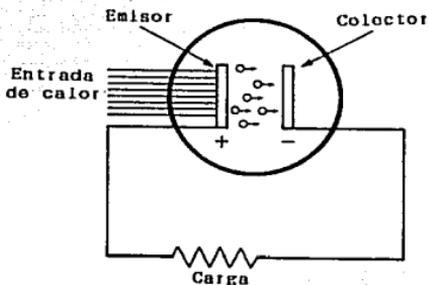


Figura #8. Principio del Generador Termoiónico.

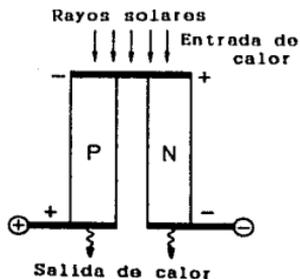


Figura #9. Principio del Generador Termoiónico.

Suele denominarse *Generador Fotovoltaico* o *Celda Solar* al conjunto de elementos, debidamente acoplados, que permiten utilizar la energía eléctrica obtenida por conversión de la solar. La estructura de un generador es variable según la aplicación a la que está destinado. Bajo un punto de vista descriptivo existen dos grandes grupos de generadores: *autónomos*, que constituyen una fuente de energía eléctrica disponible durante las 24 horas del día, y los *no autónomos*, que operan en conjunción con algún otro tipo de generador o con apoyo de la red general de electricidad. La diferencia esencial entre ambos es que el primero contiene un sistema de acumulación de energía eléctrica y el segundo prescinde de él. Los *generadores fotovoltaicos autónomos* se componen de tres subsistemas: el *panel fotovoltaico*, donde la energía solar se convierte en corriente continua, el *regulador-conversor electrónico* y el *subsistema acumulador* formado, generalmente, por baterías electroquímicas. El acoplamiento de esos tres subsistemas se realiza en función de consumo que vaya a satisfacer el generador fotovoltaico, tal y como se puede apreciar en la figura 12. El sistema de panel o paneles se obtiene por integración de módulos como se observa en la figura 13. El sistema de acumulación de energía eléctrica de un generador fotovoltaico tienen un cometido múltiple. Por un lado debe actuar como fuente de energía parcial o total en épocas de menor insolación - invierno - y en horas de no insolación -noche-. Debe, además, garantizar que el generador proporcione energía en el caso de que se presenten días nublados en otras palabras, debe dotar de autonomía al sistema. Actúa también, en conjunción con el regulador electrónico, como estabilizador de la tensión de funcionamiento de la instalación en valores definidos. Finalmente, gracias al sistema de acumulación se asegura que el generador pueda alimentar equipos de alta potencia durante periodos cortos. Los acumuladores que se

utilizan actualmente en los generadores fotovoltaicos son de Pb-ácido, tanto del tipo Pb-Sb como Pb-Ca, la unión entre un semiconductor de tipo N y de tipo P produce siempre una diferencia de potencial. Pero el equilibrio queda destruido si la unión P-N recibe una iluminación diferente que las uniones metal-semiconductor tipo N y metal-semiconductor tipo P.

El contacto negativo está constituido por una estrecha franja metálica, colocada en el borde y con delgadas ramificaciones. El contacto positivo está formado por una delgada placa metálica que cubre la parte posterior de la celda. Cada celda produce 0.40 a 0.45 Volts de diferencia de potencial.

[ 2,3,7,8 ]

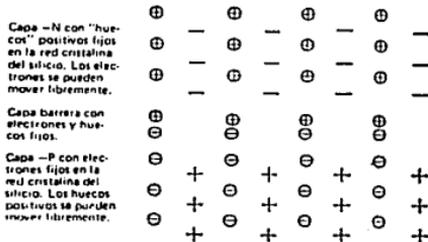
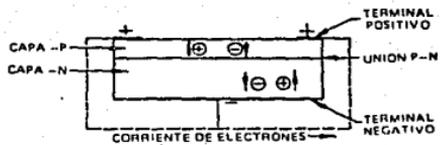
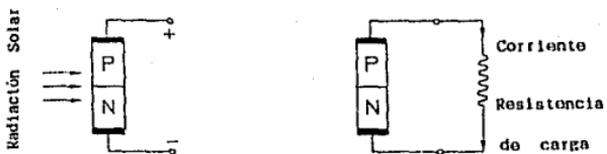


Figura # 10. Principio de la Celda Fotovoltaica.



a) Disposición de la celda.



b) Efecto Fotovoltaico.

Figura #11. Celda Fotovoltaica.

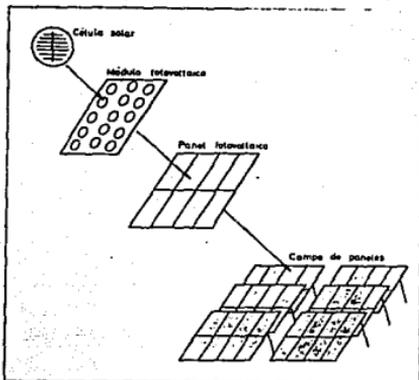


Figura # 12. Evolución desde la celda al campo de paneles, base de Contrales Fotovoltaicas.

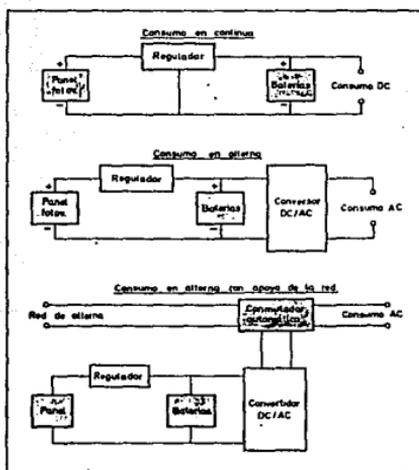


Figura # 13. Diagrama de la estructura de los Generadores Fotovoltaicos.

#### 2.2.4. FOTOVOLTAICA EN MEXICO.

El desarrollo de la heliotecnología en MEXICO es reciente. A principios de los setentas las actividades se limitaban a los organismos especializados de la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO y del INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL. En ese tiempo los trabajos se concentraron principalmente en la investigación básica sobre celdas fotoelectroquímicas y fotovoltaicas y en la investigación aplicada sobre dispositivos de refrigeración, secadores de granos, calentadores de agua, desalación de agua, calentamiento y enfriamiento de casas, desarrollo tecnológico de colectores planos y sistemas de bombeo.

Algunas de las principales Universidades emprenden la investigación y desarrollo de sistemas pasivos, que son los que han recibido la mayor atención en el país. Empresas privadas han recibido e ingresado al negocio de construir casas solares y el gobierno, a través del INFONAVIT, han trabajado en un programa de construcción de casas solares pasivas a bajo costo. Las instituciones académicas citadas han creado cursos de extensión y posgrado en arquitectura solar. Pero no son ya las únicas interesadas en la disciplina, trabajan también el Instituto de Investigaciones Eléctricas, el Colegio de México, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, la Comisión Federal de Electricidad, la Secretaría de Asentamientos Urbanos y Obras Públicas, algunas Universidades regionales y algunas empresas industriales. ( 5 )

El esfuerzo conjunto de estas instituciones, que destinan todavía pocos recursos a la actividad solar, es prácticamente la base del desarrollo helioenergético en MEXICO. En sus esfuerzos y en el apoyo académico que pudiera recibir, descansa el grado de autonomía con que pueda desenvolverse esta actividad para la cual el país, por su grado de insolación, esta excepcionalmente dotado. Por su ubicación geográfica, MEXICO cuenta con un gran potencial de energía solar aún no aprovechado. El país se encuentra en la franja de mayor insolación del mundo, el Trópico de Cáncer, que cubre buena parte del territorio nacional. MEXICO cuenta con un promedio anual de 2000 KW/m<sup>2</sup>, que hace posible un gran aprovechamiento pero, sólo hay avances en la investigación.

En un diagnóstico sobre fuentes alternas de energía, ENERGETICOS - órgano informativo de este campo -, destaca que en el aspecto tecnológico, el país cuenta con una modesta pero sólida infraestructura de investigación, desarrollo y experiencia de campo en varias tecnologías solares, y un potencial de desarrollo considerable, siempre y cuando reciba el fomento adecuado, pero una limitación importante es la inversión inicial, ya que la heliotecnología requiere una aportación cuantiosa de capital para la creación de infraestructura y la reducción de costos en los proyectos. No se han tomado todavía medidas que apoyen el uso de la energía solar, o la fabricación masiva de dispositivos solares. En FOTOVOLTAICA hay un considerable avance, se cuenta con una línea piloto de módulos de silicio monocristalino y se investiga otro tipo de materiales y diseños. Las aplicaciones de esta tecnología son para la generación de Electricidad, Energía Mecánica y Telecomunicaciones. ( 5,6 )

## ORGANISMOS DE INVESTIGACION.

La *Helioenergía* en MEXICO comprende la investigación básica y los proyectos de demostración.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas se han investigado y desarrollado sistemas de conversión de energía no convencional en Energía Eléctrica, Mecánica y Térmica. El Instituto trabaja desde 1979 en el estudio de plantas *Helioenergéticas* de receptor central, plantas fotovoltaicas y plantas helioeléctricas de estanque solar.

Las tecnologías de estas plantas han estado al alcance de los grupos de investigación y la industria nacional tiene la capacidad para producir los componentes que requieren éstos sistemas. Las investigaciones del Instituto se centran en el análisis de los problemas de aprovechamiento de la energía en los grandes sistemas y en el estudio de la Tecnología para la solución de proyectos concretos. Dentro de éstos se tiene mayor atención a la refrigeración. Los científicos pretenden aportar soluciones para la región noroeste del país, donde en los últimos años el consumo de electricidad para el acondicionamiento climático de viviendas ha aumentado considerablemente.

En BAJA CALIFORNIA NORTE existen serios problemas técnicos y económicos que hacen necesario buscar caminos viables para el uso de electricidad. La refrigeración solar por absorción se considera acertada para sustituir equipo convencional de refrigeración. El valle tiene un clima caluroso y seco con 300 días de sol intenso.

Tomando en cuenta eso, el Instituto de Investigaciones Eléctricas estableció un proyecto sobre enfriamiento de viviendas con energía solar, cuyos objetivos principales fueron:

1. *Evaluación técnica y económica del comportamiento del sistema de enfriamiento bajo condiciones reales de operación.*
2. *Evaluación del potencial de los sistemas solares de enfriamiento para sustituir el equipo convencional.*
3. *Determinación de las repercusiones sociales y económicas que resultarían de esta sustitución de energía.*

De este modo, el Instituto coordina esfuerzos en ciertas áreas de trabajo con los centros similares del I.P.N. y la U.N.A.M. En 1981, el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. terminó la construcción de una planta experimental destinada a la captación de Energía Solar para convertirla sucesivamente en Energía Térmica, Mecánica, y Eléctrica. La planta opera desde 1983, automatizada, produciendo Energía Térmica.

En la U.N.A.M. funciona también el Instituto de Investigaciones de Materiales, cuyos primeros estudios sobre energía solar empezaron en 1972, año en que fundado este Instituto. Las investigaciones se dirigieron a las celdas solares de Silicio cristalino y a los problemas sobre transferencia de calor. La importancia que fue adquiriendo esta nueva tecnología hizo posible que en 1979 apareciera el Departamento de Energía Solar, uno de los cuatro centros de investigación que componen el Instituto. Son dos las áreas de trabajo: la fototérmica y la fotovoltaica. En el área fotovoltaica, el Instituto desarrolla dos actividades centrales. Entre ellas el estudio de las celdas de silicio amorfo para colectores.

En 1977, la Secretaría inició un proyecto conjunto con el gobierno de la República Federal Alemana para el diseño, la construcción y la experimentación de una planta de desalación de agua de mar con energía solar. Instalada en La Paz, Baja California Sur, su capacidad nominal era para producir 10 m<sup>3</sup> de agua dulce por día. [ 5,6 ]

Desde el punto de vista técnico-científico, los generadores fotovoltaicos afrontan esencialmente tres problemas uno de costo, que exige esfuerzos para reducir los costos de producción otro de vida útil y un tercero de diseño de los sistemas que sean capaces de responder a las necesidades de consumo. [ 8,10 ]

Actualmente, los convertidores solares fotovoltaicos están restringidos al tipo de 1 kW cuyo uso se está desarrollando rápidamente. Los paneles solares se combinan con acumuladores de plomo ( o con baterías de níquel-cadmio ) para los suministros de baja potencia, es decir; de 1 watt, por ejemplo: para relojes digitales. [ 1 ]

Hoy día es técnicamente factible generar electricidad con una planta fotovoltaica de potencia, pero a causa de los costos aún elevados de las celdas, sólo existen unidades de potencia baja e intermedia. En estas plantas, el desarrollo de la tecnología en equilibrio con el sistema se encamina hacia la optimización de los diseños fotovoltaicos, la del subsistema de acondicionamiento de potencia y la de baterías. [ 1,7 ]

A fines de 1984 el Instituto se trasladó a Temixco, Morelos donde la Universidad construyó el Laboratorio Solar. Este lugar disfruta de un elevado porcentaje de insolación durante el año y su clima, semihúmedo se considera ideal para la experimentación. Los edificios han sido construidos con los criterios de la Arquitectura Solar.

Desde 1964 el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional realiza trabajos básicos en la Conversión de la Energía Solar en Eléctrica por vía Fotovoltaica. ( 5 )

#### **2.2.5. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.**

La tecnología fotovoltaica tuvo una gran madurez en la década de los setentas, cuya meta era la simplificación y el descubrimiento de nuevas tecnologías, procesos, e investigaciones de nuevos materiales, que condujeron al abaratamiento de las celdas solares y demás componentes del generador fotovoltaico. Para hacerlo competitivo con los sistemas de generación ya en uso en la sociedad actual. Dichos esfuerzos, tanto humanos como económicos han rendido amplios resultados y es de esperar que otros muchos estén por venir.

## *I. Viviendas de nueva construcción y electrificación rural.*

Las viviendas de nueva construcción son aquellas en las que no se han incorporado a la red general, bien por su aislamiento geográfico o por su reciente construcción en zonas no urbanizadas. El uso de estas viviendas es, con frecuencia, intermitente - fines de semana, períodos vacacionales, etc. - y los consumos de energía eléctrica en ellos no son tan elevados como en las viviendas urbanas. En estas circunstancias, es cada vez más frecuente que la instalación de un generador fotovoltaico sea más rentable que costear la extensión de la línea general.

La electrificación de ciertas zonas rurales por los medios convencionales supone, generalmente, una inversión de baja rentabilidad, ya que deben realizarse extensiones de líneas amplias y difíciles o núcleos de población reducidos y con muy bajo consumo eléctrico.

Los planes convencionales de electrificación rural aportan soluciones escasas a los problemas existentes. Por el contrario, se hace cada vez más lógica y aceptable la posibilidad de realizar la electrificación rural mediante generadores fotovoltaicos, posibilidad que fue analizada y discutida en el Congreso Mundial de Energía Solar en 1976. Desde entonces no ha cesado la insistencia de los expertos en esta aplicación y, en la actualidad, la idea está totalmente aceptada. El carácter modular del generador fotovoltaico permite la electrificación progresiva de un pueblo en función de su incremento demográfico y aumento de consumo.

## *II. Comunicación, Navegación y Transportes.*

Los generadores fotovoltaicos, son una excelente solución cuando hay necesidad de transmitir cualquier tipo de señal o información desde un lugar aislado en el que no hay tendido eléctrico que alimente los equipos necesarios; las reemisoras de señales de radio y televisión, plataformas de telemetría, radio-enlaces, estaciones meteorológicas etc., se engloban en esta gama de aplicación.

Para la navegación la electricidad obtenida por medio de la fotovoltaica ayuda a sus señalamientos. Las dificultades de alimentar eléctricamente a los faros, boyas, balizas, plataformas y embarcaciones, han hecho que los generadores fotovoltaicos se desarrollen ampliamente.

Numerosos aspectos problemáticos de la trasportación terrestre han encontrado una adecuada solución gracias a los sistemas fotovoltaicos. La seguridad vial se ha visto favorecida por generadores solares que iluminan cruces de carreteras, túneles, radioteléfonos de emergencia o puestos de socorro instalados lejos de las líneas eléctricas. También el ferrocarril se ha visto favorecido, donde la energía solar fotovoltaica ya se utiliza en aplicaciones que varían desde señalación exterior de vagones a la alimentación de niveles automáticos, cambios etc.

### *III. Agricultura y ganadería.*

En relación a las instalaciones agrícolas y ganaderas, hay que constatar que diferentes tipos de granjas de crianza - pollos, cerdos, etc. - obtienen la energía eléctrica que consumen - iluminación, ventilación etc. - a partir de generadores fotovoltaicos. Sin embargo, las aplicaciones de mayor impacto y futuro en la agricultura serán para la alimentación de sistemas de bombeo de agua y riego por goteo de productos de alto valor, riego a baja presión, bombeo para viveros etc.

Otros aspectos relacionados con las aplicaciones fotovoltaicas serán para la vigilancia forestal para prevención de incendios, el bombeo de agua depósitos contra-incendios, etc. Y en aplicaciones menores cabe citar pastores eléctricos, sistemas de fumigación, y trampas para insectos entre otras.

### *IV. Aplicaciones en la industria.*

En la industria química-metalúrgica una aplicación común es para la obtención y refinado de cobre y aluminio, en la electrólisis y fabricación de acumuladores electroquímicos, en la lucha de la corrosión a través de la protección catódica por corriente en oleoductos, obras civiles y, en general construcciones metálicas en contacto con un medio corrosivo.

En los Estados Unidos ya están disponibles, desde 1985, las baterías cuya investigación y desarrollo recibieron el apoyo del Departamento de Energía: plomo-ácido, sodio-azufre, cinc-cloro y litio-sulfurometálico. Los avances más relevantes se efectúan en ese país y Europa, en diferentes aplicaciones de la fotovoltaica.

En Europa, aproximadamente 20% de la energía eléctrica generada se consume como corriente de locomotoras, motores, etc. En los Estados Unidos los esfuerzos se orientan a aplicaciones de convertidores en baterías para nivelar la carga de los sistemas eléctricos en unidades de generación a base de celdas de combustibles controladores de velocidad de motores de corriente alterna, etc.

Gracias a la disminución drástica en el precio de las fotoceldas y a perspectivas favorables para que esta tendencia continúe. Diversos países han decidido experimentar en el diseño, la construcción y operación de plantas fotovoltaicas y al mismo tiempo promover el mercado de las celdas. Las tendencias técnicas y económicas de desarrollo y comercialización de las celdas fotovoltaicas permiten estimar que estas plantas serán una realidad - desde el punto de vista económico -, a fines de esta década.

Dentro de unos 10 ó 15 años se tendrá una gran reducción de los costos de fabricación hasta el nivel deseado por las centrales de energía solar. Un primer argumento a favor del descenso de los costos es la << economía de escala >>. Los progresos en la industrialización traen consigo una reducción en el costo de la unidad. A mayor mercado, menor costo del producto.

Existen avances tecnológicos que experimentan los componentes de los subsistemas fotovoltaicos para conducir a costos más bajos y mayor viabilidad económica para todas las industrias, por ejemplo: la eficiencia de las celdas de silicón cristalino se ha incrementado del 22% al 25%.

Todavía hay muchas perspectivas por ejemplo: diseños que muestren un mejoramiento en la eficiencia y una reducción en los costos y avances en la tecnología electrónica. Y los más importante, que éstos mejoramientos no afecten la tecnología de los sistemas.

Sin embargo, las bombas de agua y refrigeración de sistemas ofrecen un nuevo mercado para la fotovoltaica, y especialmente en el desarrollo del láser. Como los costos de los colectores solares decrecen y los costos de operación compiten con las otras fuentes de energía sus límites de viabilidad económica están en expectativa para su expansión.

En conclusión, en éste momento las únicas aplicaciones que tienen los sistemas fotovoltaicos son sólo en telecomunicaciones, sistemas de refrigerado y bombas de agua ya que sólo en éstos los procesos son económicamente viables.

La electricidad fotovoltaica ha comenzado a ser aceptada porque su transformación es más barata. Los esfuerzos de investigación y desarrollo conducirán, a que los costos de los generadores fotovoltaicos sean más bajos y se prevee que al final de ésta década la electricidad fotovoltaica sea competitiva con la generada por centrales.

El campo de las celdas solares evoluciona muy rápidamente y las investigaciones con nuevos materiales es el reto de cada día. Es de esperarse que a un plazo no muy lejano podremos disponer de celdas fabricadas con materiales y técnicas superiores a las actuales. [ 1,2,3,10 ]

### 3. VOLTAMETRIA CICLICA

## VOLTAMETRIA CICLICA.

La técnica electroanalítica más utilizada para el estudio de la electroactividad de las especies es la Voltametría Cíclica . Su versatilidad combinada con la facilidad y comodidad de las mediciones teniendo como resultado un extensivo uso en el campo de la Electroquímica, Química Orgánica y Bioquímica. Es frecuentemente el primer experimento realizado en el estudio electroquímico de un compuesto, material biológico o de la superficie de algún electrodo. Su efectividad resulta de su capacidad de observar el comportamiento de una reacción redox en un amplio intervalo de potencial. Esta técnica ha llegado a ser muy útil en investigaciones químicas en los últimos 50 años para el estudio de reacciones electroquímicas encaminadas hacia la conversión de energía solar y modelo de estudio en catálisis enzimática. [ 15,21 ]

La Voltametría Cíclica consiste en ciclos de potencial en un electrodo, el cual está inmerso en una solución no agitada, y en medir la corriente resultante en el proceso. El potencial de este electrodo de trabajo es controlado por el electrodo de referencia, como el electrodo de calomel saturado o el de Ag/AgCl. Es un barrido lineal que equivale a la señal de excitación que se puede representar como una onda triangular.

En ésta técnica se pretende medir dos parámetros fundamentalmente: el potencial al cuál se lleva a cabo una reacción electroquímica y la corriente implicada en el proceso.

En el Voltamograma Cíclico lo que se registra, es el potencial en un intervalo de barrido contra la corriente que

circula por la interfase del electrodo de trabajo. Así, el Voltamograma Cíclico indica potenciales selectivos en los cuales se pueden tener reacciones de oxidación y de reducción de las mismas especies, así como la cinética de esa reacción para las condiciones del sistema, cuando la cinética es controlada sólo por la resistencia a la transferencia de carga.

Las especies electroactivas reaccionantes pueden viajar por la solución por tres mecanismos:

\* Convección que se elimina evitando la agitación o por el calentamiento del medio.

\* Migración que es evitada agregando un electrolito soporte.

\* Difusión que no es evitada pero su influencia no es muy fuerte. ( 15,21 )

La Voltametría Cíclica está caracterizada por los siguientes parámetros: ( véase la figura 14 )

- \* Potencial de Pico Catódico (  $E_{pc}$  )
- \* Potencial de Pico Anódico (  $E_{pa}$  )
- \* Corriente de Pico Catódica (  $i_{pc}$  )
- \* Corriente de Pico Anódica (  $i_{pa}$  )
- \* Potencial de Media Onda (  $E_{1/2}$  )
- \* Potencial Catódico de medio pico (  $E_{p/2}$  )

La corriente depende de dos pasos en el proceso total:

\* Movimiento del material electroactivo de la superficie.

\* Transferencia de electrones.

La irreversibilidad electroquímica es causada por un intercambio lento de electrones, es caracterizada por la separación de los picos de potencial. [ 22,23 ]

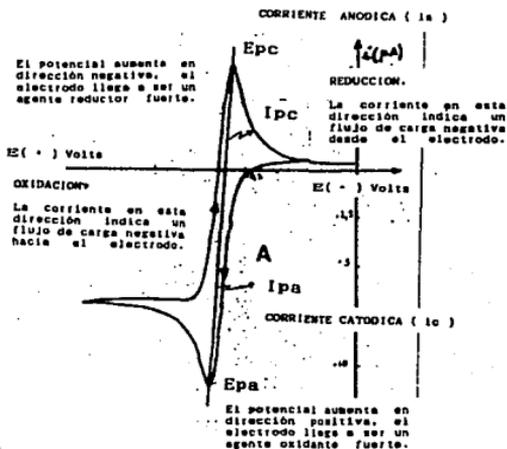


Figura #14. Representación de un Voltamograma Cíclico.

#### 4. MATERIAL EMPLEADO

#### OXIDO DE ZINC.

El óxido de zinc se presenta en la zincita o mena roja de zinc, y del 7 al 12% de óxido rojo de Manganeseo. Se le puede encontrar en forma de cristales rojos o amarillo-naranjas de forma hexagonales o bien en masas granulares.

Es un polvo blanco cuando está finamente dividido, a la temperatura ambiente, sublima a temperaturas mayores de  $1800^{\circ}\text{C}$ , su densidad específica es de 5.68.

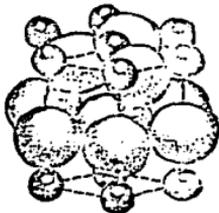
Es clasificado como compuesto no-estequiométrico, es decir; tiene el 0.033% de exceso en su estequiometría, este exceso de zinc es porque los iones  $\text{Zn}^{2+}$  existen en sitios intersticiales, esto se observa por el gran tamaño del ion oxígeno con respecto al de zinc. La figura 15 muestra la estructura hexagonal del  $\text{ZnO}$ .

Estos defectos son los que lo hacen un *semiconductor intrínseco tipo N*, se forma un nivel donante de 0.05 eV cercano a la banda de conducción, mientras que de estudios ópticos se ha establecido que el ancho de la banda prohibida es de 3.2 eV. Tiene una conductividad eléctrica entre  $10^{-7}$  y  $10^3$  S/cm.

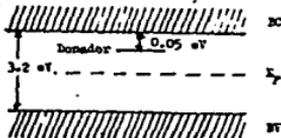
El óxido de zinc es un material anfótero, reacciona con ácidos para formar sales de zinc y con álcalis fuertes para formar sales incoloras y de sabor desagradable, es prácticamente insoluble en el agua - 23600 partes de agua por una de óxido de zinc -, es soluble en ácido acético y ácidos minerales diluidos, en amoníaco su dilución es total.

Se utiliza como acelerador de elastómeros, como cemento dental, en manufactura de vidrios, en la industria electrónica, tiene aplicación en la oxidación fotocatalítica de hidrocarburos.

Forma vapores que pueden causar ansiedad y escalofríos, fiebre, tensión en el pecho, tos y leucemia, su tolerancia en el medio ambiente según el reglamento OSHA ( Occupational Safety and Health Administration ) es de  $5\text{mg}/\text{m}^3$ . Las sales de zinc son peligrosas tanto para vegetales como para animales, estas sales actúan como eméticos. [ 28,29 ]



Estructura del ZnO. Las pequeñas esferas negras son zinc.



Energía asociada con defectos electrónicos en ZnO.

## **CAPITULO III**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

**1. DESARROLLO**

**EXPERIMENTAL**

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los electrodos de trabajo utilizados, se prepararon mediante pastillado, enseguida se sinterizaron para obtener mayor cohesión entre los polvos y mejorar su resistencia mecánica.

Se estudió el comportamiento semiconductor del óxido de zinc puro, en oscuro e iluminado. Realizado mediante la técnica electroanalítica de Voltametría Cíclica.

### 3.1.1. Preparación de materiales.

Se elaboraron 5 comprimidos de aproximadamente 0.8 g de óxido de zinc puro cada uno; empleando una pastilladora, el control de la presión es un factor que afecta la calidad del comprimido; se aplicó una presión de 100 Kg/cm<sup>2</sup>.

Después de haberse elaborado el prensado, se efectuó la sinterización, que se realizó a una temperatura de 1100°C por un lapso de 12 horas.

Ya sinterizados los comprimidos, se les acondicionó para ser utilizados como electrodos, a base de un contacto óhmico hecho por medio de alambre de Cobre adherido con pintura de plata conductora. Ahora bien, con el fin de evitar el contacto del cobre con el electrolito soporte, y de proteger el comprimido se recubrieron con silicón sellador.

Esto es muy importante ya que si no se hubiese sellado bien, el comportamiento registrado no correspondería al óxido de zinc sino al del cobre.

Se elaboraron 5 electrodos con el fin de elegir, los más representativos.

Los 2 errores en lo que se puede incurrir más fácilmente son:

- \* No existir contacto entre la pastilla y el alambre de cobre. Si esto ocurriese no habría respuesta al aplicar corriente a la celda.
- \* No cubrir bien la pastilla con el silicón, donde se hace contacto el alambre de Cobre y el semiconductor, si esto ocurriese la respuesta obtenida sería el comportamiento del Cobre.

### 3.1.2. Arreglo de la celda de trabajo.

La celda de trabajo utilizada consta de un vaso de precipitados con un tapón trihoradado, tres electrodos: Ag/AgCl como electrodo de referencia, Pt como electrodo auxiliar y ZnO como electrodo de trabajo y solución del electrolito soporte ( KCl 1 M. ).

### 3.1.3. Elección del electrolito soporte.

Es una de las partes más importantes de un sistema electroquímico, por lo que se debe hacer una buena elección. Las características principales que debe presentar un electrolito son:

- \* Que no tenga reacciones con los electrodos.
- \* No presente respuesta en el intervalo de potencial elegido.
- \* Ser transparente, con el objeto de que el semiconductor pueda iluminarse.

Se utilizó KCl 1 M. en función de trabajos previos en los que se realizó un estudio de estabilidad del óxido de zinc con diferentes electrolitos soportes. [ 30,31 ]

### ESTUDIO ELECTROQUIMICO.

#### 3.1.4. Equipo utilizado para el estudio voltamétrico.

Se empleó para la Voltametría Cíclica un potencióstato Bioanalytical Systems Inc. ( BAS ) modelo CV-1B, al cual se acopló a un registrador Ommigraphic Houston Instrument modelo 100.

En el BAS se eligieron los potenciales iniciales, el límite superior e inferior así como la dirección inicial del barrido para las condiciones de operación deseadas.

La iluminación se llevó a cabo con una lámpara de arco de Hg-Xe marca ORIEL SDC 020 Serie 87-B y se eligió una fuente luminosa que fuese la apropiada, ya que de la longitud de onda incidente depende que ocurra o no la respuesta. La energía está relacionada con la longitud de onda, de la siguiente manera:

$$E = \frac{h c}{\lambda}$$

de donde:

- h. Constante de Planck
- $\lambda$ . Longitud de onda incidente
- c. Velocidad de la luz

Se utilizó una lámpara de arco de Xenón y Mercurio ya que las longitudes de onda que emite se encuentran dentro del visible.

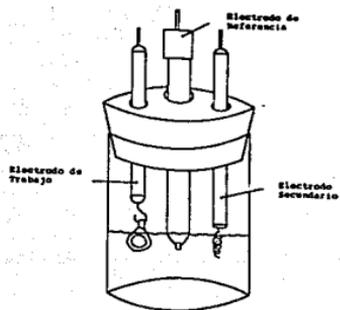
La producción de Ozono se debe a una radiación de 200nm por lo que las lámparas de arco de bajo voltaje, -hasta 500 watts- deben utilizarse en los laboratorios ventilados, mientras que las de mayor wattaje deben colocarse fuera del laboratorio. ( x )

Para el estudio de las propiedades semiconductoras en oscuro fue necesario cubrir la celda de la luz del laboratorio.

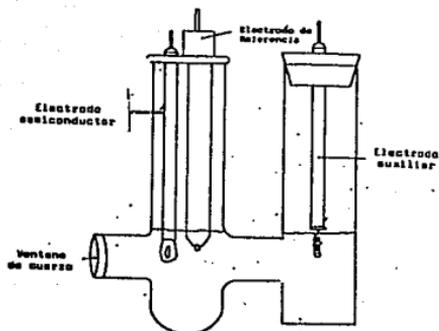
Para observar el efecto de la luz sobre el electrodo, se realizaron nuevamente Voltametrías Cíclicas pero iluminando la celda.

Para este estudio, la celda utilizada en oscuro presentó un inconveniente: absorción de la luz incidente por el vidrio. Por lo que una celda como la que se muestra en la figura # 16b es apropiada, ya que cuenta con una una ventana de cuarzo que no absorbe la luz incidente. En esta celda, el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar se encuentran en el mismo compartimiento y en el otro, se localiza el electrodo de  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ . Este electrodo debe cubrirse de la luz ya que es sensible a la iluminación, - se descompone por una reacción fotoquímica -.

Realizados ambos estudios se compararon sus resultados.



a) En oscuridad.



b) Bajo iluminación.

Figura # 16. Configuración de los celdas de trabajo utilizadas.

## 2 . RESULTADOS

### E X P E R I M E N T A L E S

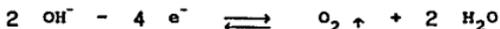
## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los estudios de Voltametría Cíclica para un electrodo de Pt en una solución de electrolito soporte de KCl 1 M. a una sensibilidad de corriente de 500  $\mu$ A, teniendo como electrodo auxiliar otro electrodo de Pt y como electrodo de referencia Ag/AgCl, nos proporcionaron las barreras de potencial : -0.95 y 1.25 Volts, para los procesos de reducción y oxidación respectivamente.

Estos límites de potencial nos definen el campo de electroactividad dentro del cual se puede obtener información de un sistema redox cualquiera. Ahora, el límite de potencial negativo, corresponde a la *reducción del hidrógeno* del agua:



mientras que el límite de potencial positivo, corresponde a la *oxidación del oxígeno* del agua:



De acuerdo con lo anterior el estudio de las propiedades semiconductoras del óxido de zinc puro se realizó entre los dos límites anteriores.

**Ejemplo del cálculo del Grado de Sinterización de los electrodos.**

" Dimensiones de la pastilla. "

$\phi$  . Diámetro.

$$V_{\text{cil.}} = ( \phi^2 * \pi * h ) / 4$$

m . Masa.

h . Espesor.

$$A_{\text{circ.}} = ( \phi^2 * \pi ) / 4$$

$\rho$  . Densidad.

V . Volumen.

$$\rho = m / V$$

Dimensiones de la pastilla ya sinterizadas:

$\phi = 1.2$  cm.

$$V_{\text{cil.}} = ( 1.2^2 * \pi * 0.2 ) / 4$$

m = 0.8 g.

$$A_{\text{circ.}} = ( 1.2^2 * \pi ) / 4$$

h = 0.2cm.

$$\rho = ( 0.8 / 0.2262 )$$

$V_{\text{cil.}} = 0.2262 \text{ cm}^3$ .

$A_{\text{circ.}} = 1.1310 \text{ cm}^2$ .

$\rho = 3.5368 \text{ g} / \text{cm}^3$ .

$$100 \% \text{ ————— } 5.7820 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$X \% \text{ ————— } 3.5368 \text{ g} / \text{cm}^3$$

**% de sinterización = 61.17**

El grado de sinterización de los electrodos utilizados se muestran en la tabla 7, así como sus características físicas.

	ELECTRODOS		
	3	5	7
DIAMETRO ( cm )	1.2	1.2	1.2
MASA ( g )	0.8	0.8	0.8
ALTURA ( cm )	0.2	0.2	0.2
% DE SINTERIZACION	61.17	61.17	61.17

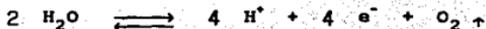
Tabla # 7. Características de los electrodos semiconductores utilizados.

**CURVA PATRON DE VOLTAMETRIA CICLICA.**

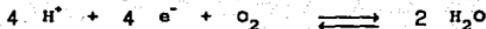
1. Volts totales de barrido. 2.2005 volts.  
 límite inferior. - 0.9505 volts.  
 límite superior. 1.2500 volts.
2. Escalas. X = 100 mV / div.  
 Y = 50 mV / div.
3. Sensibilidad (  $\xi$  ). 500  $\mu$ A / V.
4. Velocidad de barrido (  $\nu$  ). 50 mV / s.
5. Electrodos. Referencia. Ag/AgCl  
 Auxiliar. Pt  
 Trabajo. Pt
6. Electrolito soporta. KCl 1 M.
7. Dirección de barrido. Negativa.

8. Reacciones:

a ) Oxidación :



b ) Reducción :



9. Cálculos de la desviación con respecto a los datos teóricos.

9.1.Oxidación:

1.2505 V ——— 10 cm.

X V ——— 1 cm.

$X = 0.1205 \text{ V}$
------------------------

De la gráfica 17, se tienen 9.8 cm al límite de oxidación es decir; se necesitan 1.2255 volts para oxidar el agua.

## 9.2. Reducción:

1.0009 V ——— 10 cm  
Y V ——— 1 cm

$$Y = 0.10009 \text{ V}$$

De la gráfica 17, se tienen 9.1 cm al límite de reducción es decir; se necesitan 0.91082 volts para reducir el agua.

Ahora bien, estos valores son experimentales, los valores teóricos para ambos casos son: para el proceso de oxidación 1.2300 volts; mientras que para el proceso de reducción 0.9132 volts.

## 9.3 Errores experimentales.

PROCESO	ERROR ABSOLUTO	% DE ERROR
OXIDACION	0.45 %	0.3658
REDUCCION	0.24 %	0.2173

Tabla # 8. Errores experimentales obtenidos.

En la tabla siguiente se muestran las variables experimentales de los electrodos utilizados.

Volts totales de barrido	1.9828 V		
Sensibilidad ( $\xi$ )	500 $\mu\text{A} / \text{V}$		
	Referencia. Ag/AgCl		
Electrodos utilizados	Auxiliar. Pt		
	Trabajo. ZnO		
Electrolito soporte	KCl 1.0 M		
Velocidad y dirección	50 $\mu\text{V} / \text{s}$ *		
de los barridos	20 $\mu\text{V} / \text{s}$ **		
	Barrido negativo		
Escalas utilizadas ( mV / cm )			
ELECTRODO	EJE X	EJE Y	CONDICION
Platino ***	100	20	LUZ NATURAL
Cobre	100	500	LUZ NATURAL
Experimental	100	200	LUZ NATURAL
Experimental	100	1000	OSC. E ILUM.

Tabla # 9. Condiciones experimentales de los electrodos.

NOTAS:

- Estudio en oscuro y luz natural.
- \*\* Estudio en iluminación.
- \*\*\* Para la Curva Patrón.

Como se observa en la tabla # 8 para los dos procesos el error experimental obtenido es muy bajo por lo que se pueden considerar que éstas mediciones se ajustan a los datos teóricos.

En las páginas siguientes se muestran las Voltametrías de los electrodos que se elaboraron.

# DE GRAFICA	ELECTRODO QUE REPRESENTA
17	C U R V A P A T R O N
18	E L E C T R O D O D E C O B R E
19	ELECTRODO MAL SELLADO
20	ELECTRODO SIN CONTACTO
21	ELECTRODO EXPERIMENTAL
22	ELECTRODO EXPERIMENTAL EN OSCURO
23	ELECTRODO EXP. BAJO ILUMINACION

TABLA # 10. Indica de las graficas obtenidas experimentalmente.

#### CALCULOS VOLTAMETRICOS DE CADA ELECTRODO.

Algoritmo de cálculo.

De las gráficas obtenidas se calculó:

1.  $E_{pa}$ ,  $E_{pc}$ ,  $i_{pa}$  y  $i_{pc}$ .
2.  $(\Delta E / n) = \frac{E_a - E_c}{n}$ .
3.  $E' = \frac{E_{pa} + E_{pc}}{2} = E^{1/2}$ .
4. Factor de idealidad.  $\phi = \frac{i_{pa}}{i_{pc}} = 1$ .

CURVA PATRON



VOLTS TOTALES DE BARRIDO = 1.9828 V.  
 ESCALAS x = 100 mV/div.  
 y = 20 nA/div.  
 S = 500  $\mu$ A/V J = 50mV/s

ELECTRODOS:

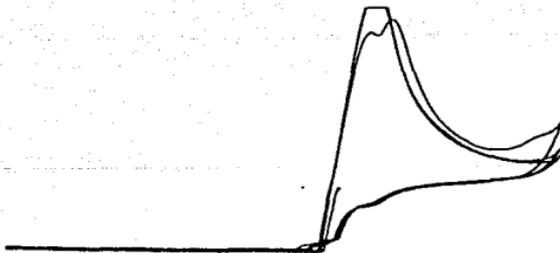
R. Ag/AgCl.

A. Pt.

W. Pt.

ELECTROLITO SOPORTE: KCl ( -1.0 M )

ELECTRODO DE COBRE



VOLTS TOTALES DE BARRIDO = 1.9828 V.  
 ESCALAS x = 100 mV div.  
 y = 500 nA div.  
 S = 500  $\mu$ A/V J = 50mV/s

ELECTRODOS:

R. Ag/AgCl.

A. Pt.

W. Cu.

ELECTROLITO SOPORTE: KCl ( -1.0 M )

## ELECTRODO MAL SELLADO



VOLTS TOTALES DE BARRIDO = 1.9828 V.

ESCALAS x = 100 mV/div.

y = 200 nA/div.

S = 500 mV/V v = 50 mV/s

ELECTRODOS:

R. Ag/AgCl.

A. Pt.

M. ZnO.

ELECTROLITO SOPORTE: KCl (-1.0 N)

## ELECTRODO SIN CONTACTO

VOLTS TOTALES DE BARRIDO = 1.9829 V.

ESCALAS x = 100 mV/div.

y = 200 nA/div.

S = 500 mV/div v = 50 mV/s

ELECTRODOS:

R. Ag/AgCl.

A. Pt.

M. ZnO.

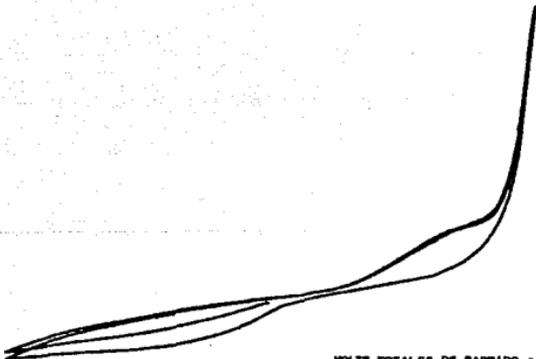
ELECTROLITO SOPORTE: KCl (-1.0 N)

OSCURO.



VOLTS TOTALES DE BARRIDO = 1.9828 V.  
ESCALAS  $x = 100$   $\mu$ V/div.  
 $y = 1000$  nV/div.  
 $\Sigma = 500$   $\mu$ A/V  $\nu = 20$  mV/s  
ELECTRODOS:  
R. Ag/AgCl.  
A. Pt.  
C. ZnO.  
ELECTROLITO SOPORTE: KCl ( -1.0 M )

ILUMINACION.



VOLTS TOTALES DE BARRIDO = 1.9828 V.  
ESCALAS  $x = 100$   $\mu$ V/div.  
 $y = 1000$  nV/div.  
 $\Sigma = 500$   $\mu$ A/V  $\nu = 20$  mV/s  
ELECTRODOS:  
R. Ag/AgCl.  
A. Pt.  
C. ZnO.  
ELECTROLITO SOPORTE: KCl ( -1.0 M )

ELECTRODO EXPERIMENTAL  
LUZ NATURAL



VOLTS TOTALES DE BARRIDO \* 1.9828 V.  
ESCALAS x= 100 mV/div.  
y= 100 nV/div.  
S= 500 pA/V J= 50mV/s  
ELECTRODOS: R. Ag/AgCl.  
A. Pt.  
W. ZnO.  
ELECTROLITO SOPORTE: KCl ( -1.0 M )

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos y los cálculos ya elaborados en base al algoritmo anterior.

CONDICION	OSCURO	ILUMINADO	LUZ NATURAL
$E_{pc}$	0.90	0.91	0.90
$E_{pa}$	0.84	0.85	0.88
$E \cdot'$	0.87	0.88	0.87
$E_{p/2}$	0.84	0.85	0.84
$\psi^*$	0.58	0.58	0.58
$i_{pa}$	0.03	0.01	0.02
$i_{pc}$	0.03	0.01	0.02
$\varphi^{**}$	1.00	0.96	0.92

Tabla # 11. Resultados experimentales obtenidos.

Notas:

- Los valores reportados tienen unidades de volts.
- $\psi = E_{pc} - E_{p/2}$ . Valor real 0.0578.
- $\varphi = ( i_{pa}/i_{pc} )$  adimensional.

## C O N C L U S I O N E S

## **CONCLUSIONES**

En lo que se refiere al empleo de la Energía Solar como fuente alternativa de energía puedo destacar las siguientes ventajas:

- \* Sustituya las fuentes naturales no renovables, tales como el carbón, el petróleo y el gas natural.
- \* Reduce la contaminación atmosférica y térmica, que tan graves problemas está produciendo en el medio ambiente.
- \* Con ayuda de los colectores solares podremos convertir zonas desérticas en áreas productivas en las que la Energía Solar se transforme en Energía Eléctrica.
- \* Aprovechar una fuente energética inagotable, limpia y natural.

Se espera que en un futuro no muy lejano, se pueda utilizar al hidrógeno como una fuente energética universal, ya que en la mayoría de los casos no es necesario hacer modificaciones a la maquinaria existente, y podremos conservar el petróleo y sus derivados por más tiempo, así como reducir la contaminación ambiental.

En relación a la obtención de la electricidad por medio de la fotovoltaica, puedo decir, que ha simplificado a los procesos convencionales: convertir una energía primaria, la solar, en electricidad de modo directo, es decir; sin transformaciones intermedias en otras formas de energía como la mecánica.

#### PARTE EXPERIMENTAL.

Debe elegirse cuidadosamente la temperatura de sinterización, ya que una de las propiedades que la sinterización proporciona, es el incremento de la conductividad, por lo que a mayor grado de sinterización, mayor conductividad.

La elección del KCl como electrolito soporte fue acertada, ya que al realizar la Curva Patrón casi obtuve una línea recta, es decir; no se obtuvieron picos ni en la parte anódica ni en la catódica, lo cual significa que no hay respuesta en el intervalo de potencial elegido. Se recomienda que para estudios posteriores de este material se experimenten con otros electrolitos, para encontrar el óptimo es decir; al realizar la curva patrón se obtenga una línea recta.

Se deben cubrir perfectamente los electrodos con el silicón sellador, porque en caso de no hacerlo se obtendría un comportamiento que no correspondería al del electrodo semiconductor, ya que en éste caso se depositará  $\text{CuCl}_2$  que es fácil de identificar por su coloración azul-verdosa, y si por el contrario no existiese el contacto del semiconductor con el

alambre de cobre, no habría respuesta, y el voltamograma obtenido sería una línea recta. Lo cual resulta muy útil, ya que de esta manera podremos identificar un comportamiento erróneo y poder desechar este electrodo para el resto de la experimentación.

En el estudio de Voltametría Cíclica bajo iluminación, las velocidades de barrido elegidas fueron más bajas, que en el estudio en oscuro con el fin de observar con mayor claridad los picos anódico y catódico. Se encontró una mejor tendencia a la reversibilidad y una mejor definición de los picos de intensidad.

Para el estudio de Voltametría Cíclica en oscuro, se optó por trabajar con la misma escala de barrido que se utilizó en los estudios bajo iluminación, con el fin, de comparar su comportamiento, del cual concluyo, apoyándome en la tabla 11, que los valores obtenidos bajo condiciones de iluminación son mayores gracias a que los electrones son sensibles a la luz, es decir; los electrones se excitan aumentando la conductividad del semiconductor.

Finalmente, deben reforzarse los estudios con otros materiales semiconductores con mejores perspectivas de eficiencia que el óxido de zinc para obtener, la conversión de la Energía Solar en Energía Eléctrica con rendimientos mayores a los actuales, ya que gracias a esta fuente alterna de energía podremos conservar los combustibles fósiles reduciendo al mismo tiempo la contaminación ambiental.

B I B L I O G R A F I A

## B I B L I O G R A F I A

1. Brinkworth, Brian Joseph; *Energía Solar para el hombre*; Blume; España; 1981.
2. Daniels, Farrington; *Direct use of the sun's energy*; New Haven and London, Yale University Press; England; 1964.
3. Wilson, J. I. B.; *Energía Solar*; Alhambra Colección Exedra; España; 1982.
4. Winter, Carl-Jochen; *Solar Energy could be storage an distributed as Hydrogen*;
5. Covantes, Hugo; *La Energía Solar*; FCE, Biblioteca Joven; México; 1989.
6. Castro Acuña, Carlos M., Rius de Riepen M.; *La Química hacia la conquista del sol*; Serie " La Ciencia desde México ", SEP, FCE; México; 1981.
7. González Hurtado, Julia; *Energía Solar*; Alhambra. Serie P. Proyecto MT-62 Alhambra; España 1988.
8. Palz, Wolfgang; *Electricidad Solar. Estudio Económico de la Energía Solar*; Blume; España; 1980.
9. Takahasi, K.; *Progress in Photovoltaics*; CHEMTECH 18 [ 12 ] 744-749, ( 1989 ).
10. Justi, Edward W.; *Hidrógeno Solar. Energía para el futuro*; Marcombo; España; 1985.

11. Fouillé, André; *Électrotechnique a l'usage des Ingenieurs*; Dunod; France; 1966; 3ème. Volume " Convertisseurs Applications de l'énergie électrique ".
12. Surugue, J.; *Techniques Générales du Laboratoire de Physique*; Centre National de la Recherche Scientifique; France; 1966; 4ème. Volume.
13. Castro Acuña, C. M., Genesca, Joan, Rius de Riepen M.; *Celdas Fotoelectroquímicas*; AFINIDAD [ Marz-Abr ] 127-132, ( 1983 ).
14. Turner, John A.; *Energetics of the Semiconductor-Electrolyte Interface*; J. CHEM. ED. 60 [ 4 ] 327-329, ( 1983 ).
15. Carlier R., Simonet J.; *Voltammétrie Cyclique*; BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE, [ 5 ] 831-833, ( 1988 ).
16. Pool, Robert; *Solar Cells*; SCIENCE 241 900-901, ( 1988 ).
17. Hubbard, H.M.; *Photovoltaic Today and Tomorrow*; SCIENCE 244 [ 4920 ] 277-304, ( 1989 ).
18. Daiello, R.V.; *Photovoltaic device performance. An over view*; SOLAR CELL 18 [ 3-4 ] 243-249, ( 1987 ).
19. Post, H.N., Thomas, M.G.; *Photovoltaic Systems for Current and Future Applications*; SOLAR ENERGY. 41 [ 5 ] 465-473, ( 1988 ).

20. Bard, Allen J., Faulkner, Larry R.; *Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons; U.S.A. 1980.
21. Evans, D.H., O'Connell, K.M., Petersen, R.E., Kelly, M.J.; *Cyclic Voltametry*; J. CHEM. ED. 60 [ 4 ] 290-292, ( 1983 ).
22. Kissinger, Peter T., Heineman, William R.; *Cyclic Voltametry*; J. CHEM. ED. 60 [ 9 ] 702-706, ( 1983 ).
23. Maloy, J.T.; *Factors affecting the Shape of Current-Potential Curves*; J. CHEM. ED. 60 [ 4 ] 285-289, ( 1983 ).
24. Finklea, Harry O.; *Photoelectrochemistry: Introductory Concepts*; J. CHEM. ED. 60 [ 4 ] 325-327, ( 1983 ).
25. Mabbott, Gary A.; *An Introduction to Cyclic Voltametry*; J. CHEM. ED.; 60 [ 9 ] 697-702, ( 1983 ).
26. Bard, Allen J.; *Photoelectrochemistry*; SCIENCE 207 [ 11 ] 139-144, ( 1980 ).
27. Faulkner, Larry A.; *Understanding Electrochemistry: Introductory Concepts*; J. Chem. Ed. 60 [ 4 ] 262-265, ( 1983 ).
28. *The Merck Index; An Encyclopedia of chemical, drugs and biological*; 11th. Edition; Rahway, N. J.; U.S.A.;1989.

29. Thorpe, Edward Sir; *Enciclopedia de Química Industrial*; Labor S.A.; España 1982; Volumen VI.
30. Ayora Nieves, Miguel Angel; *Obtención de electrodos semiconductores del ZnO por sinterizado con adición de impurezas*; Tesis; Facultad de Química; UNAM; 1987.
31. Ramos Mejía, Aurora de los Angeles; *Investigación de propiedades de electrodos semiconductores sinterizados*; Tesis; Facultad de Química; UNAM; 1989.
32. Kissinger, Peter T. Heineman, William R.; *Laboratory Techniques in Electroanalytical Chemistry*; Denker; U.S.A.; 1984 .