



IF

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

JUN 2013

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



R E C I B I D O	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE INGENIERÍA DE INVESTIGACIÓN
	59 14 JUN 2013
	HORA: 10.25 FIRMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE INVESTIGACIÓN
RECIBIDO

402
14 JUN 2013

C.
CI

DOCUMENTO
ENTRADO

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**"GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PERSPECTIVAS PARA SU
INTEGRACIÓN CON MATERIA PRIMA LOCAL"**

PROFESOR: ÁLVARO H. VELARDE ZEVALLOS

- PERIODO DE EJECUCIÓN DEL 01.06.2012 AL 31.05.2013 ✓
- APROBACIÓN DEL PROYECTO: R. R. N° 503-12-R ✓

**CALLAO - 2013
PERU**

INDICE

I			
II	III.	INTRODUCCIÓN	5
III	IV.	MARCO TEÓRICO.....	6
		1.- ESTRUCTURAS CRISTALINAS DE LOS METALES Y METALOIDES	6
		1.1. Introducción	6
		1.2. Estructura de los Metales y Metaloides.....	6
		1.3. Estructuras Cristalinas.....	8
		1.4. Polimorfismo y alotropía.....	14
		1.5. Planos Cristalográficos	14
		1.6. Cristalización	15
		1.7. Fases de la cristalización	16
		1.8. Imperfecciones en los Cristales	21
		2.- BANDAS DE ENERGÍA.....	25
		2.1. Introducción	25
		2.2. Teoría de las Bandas de Energía	26
		2.3. Bandas de energía de un sólido.....	26
		2.4. Características eléctricas de un cristal	28
		2.5. Estructura de banda de los metales.....	29
		2.6. Estructura de banda de los aisladores	30
		2.7. Estructura de banda de los semiconductores	31
		PROCESOS METALÚRGICOS PARA LA OBTENCIÓN DEL SILICIO Y SU REFINACIÓN.....	35
		3.1. Introducción	35
		3.2. Procesos metalúrgicos para la obtención del Silicio.....	36
		3.2.1. Silicio Grado Metalúrgico Si – GM	36
		3.2.2. Silicio Grado Electrónico Si – GE	37
		3.2.3. Silicio Grado Solar SI-GS	38
		3.3. Células solares constituidas por Silicio grado Metalúrgico GM.....	38
		3.4. Aspectos generales de manufactura de las células solares.....	39
		3.4.1. Juntura P-N.....	40
✓	IV.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
✓	V.	RESULTADOS	43
✓	VI.	DISCUSIÓN	43
		6.1. Conclusión.....	43
✓	VII.	REFERENCIALES	45

VIII. APÉNDICE (ELABORACION PROPIA)	46
IX. ANEXOS	47




II. RESUMEN

El tema desarrollado en el proyecto tiene un propósito social, como es el de resolver la carencia de energía eléctrica en los pueblos muy pequeños, pero que gozan de energía solar la mayor parte del año.

Es preciso señalar que la ingeniería también tiene respuestas técnicas adecuadas para resolver problemas sociales, para lograr este objetivo *es menester, encontrar la mejor alternativa, a pesar de sacrificar la eficiencia y la calidad del servicio, cuando el fin que se desee resolver, propone mejores beneficios en calidad de vida y dignidad humana.*

En este caso nos propusimos generar energía eléctrica fotovoltaica, a partir del uso de los minerales que contienen Silicio, para lo cual es necesario procesarlo.



Se ha desarrollado con algún detalle todo lo relacionado, con la estructura cristalina de los metales y metaloides, para entender la conducción eléctrica cuando sobre estos incide la energía solar, apoyados en la teoría de bandas de conducción, no se ha pretendido hacer un texto de física electrónica, pero si los conceptos adecuados para su mejor entendimiento y su uso para profesionales o entendidos interesados en el tema.


Se han dado los conceptos, para mejorar la conducción eléctrica en los metaloides, al agregar impurezas por difusión.

Se ha recomendado en el proyecto el uso del Silicio Grado Metalúrgico, en la generación eléctrica fotovoltaica por su bajo costo, pero quedando pendiente las pruebas de laboratorio para verificar con certeza su uso, para esto es necesario manufacturar prototipos, esto no ha sido posible en el desarrollo del proyecto por sus altos costos y la forma como desarrollamos los proyectos de investigación.

III. INTRODUCCIÓN

Lo peculiar del proyecto de investigación identificado con resolver la carencia de energía eléctrica con consumidores especiales, como son los pequeños poblados de los lugares más apartados de la geografía del país, a partir del uso de la energía solar, convirtiéndola en energía eléctrica a través de la generación fotovoltaica.

Es pertinente señalar que, en este caso particular, no se ha tenido en cuenta la escasez de los combustibles convencionales ni la contaminación ambiental que esta produce en la generación eléctrica, debido a que no representa ninguna solución por sus altos costos y tarifas sociales que tendrían que aplicarse, para este tipo de consumidores a los cuales está dirigido el proyecto.



Tampoco es posible disponer de la energía eléctrica generada, mediante paneles fotovoltaicos, que usan Silicio Grado Solar por su alto costo de generación.

El proyecto desarrolla con cierto detalle, las estructuras cristalográficas de los metales y metaloides, también la teoría de las bandas de conducción en los metales, metaloides y aisladores, para entender a cabalidad la forma como se conduce la energía eléctrica en los semiconductores al incidir la energía solar, finalmente trata la obtención del Silicio Metalúrgico, Solar y Electrónico, determinándose la conveniencia de la generación eléctrica fotovoltaica utilizando Silicio Grado Metalúrgico, por su bajo costo, pero sacrificando la eficiencia y la calidad de la energía eléctrica generada.

La importancia del tema desarrollado se justifica plenamente por tener un propósito social, ya que pretende resolver la carencia de energía eléctrica en los lugares más apartados, de tal forma que se saquen del aislamiento y se integren a muchos pobladores con el resto del país.

IV. MARCO TEÓRICO

1.- ESTRUCTURAS CRISTALINAS DE LOS METALES Y METALOIDES

1.1. Introducción

Para entender como se construye un Panel Fotovoltaico, hay que partir del conocimiento, de la estructura cristalográfica de los sólidos, de esta manera interpretaremos mejor la conducción de la corriente eléctrica, mediante la teoría de bandas de conducción, esto se logra mediante el enfriamiento lento de los metales y metaloides, en general vamos a describir, el enfriamiento de los metales teniendo como genuino al Hierro, dando a conocer su carácter Alotrópico, y sus diferentes estructuras cristalinas, así como los defectos de las estructuras cristalográficas, para que por analogía lo hagamos con el Silíceo. Son estos temas los que desarrollaremos en el presente informe.



1.2. Estructura de los Metales y Metaloides

Diámetro atómico.-

Cuando dos átomos metálicos se aproximan, la energía interna varía bajo la acción de dos fuerzas opuestas, una de atracción entre los electrones y ambos núcleos positivos, y otra de repulsión entre los núcleos positivos así como también entre los electrones. La primera tiende a disminuir el valor de la energía interna, y la segunda a aumentarlo. Para un determinado valor de la distancia interatómica, ambas fuerzas se equilibran, adquiriendo la energía interna total E_0 un valor mínimo correspondiente a la posición de equilibrio, tal como se detalla en la Figura 1.

Variación de la energía interna con la distancia interatómica.

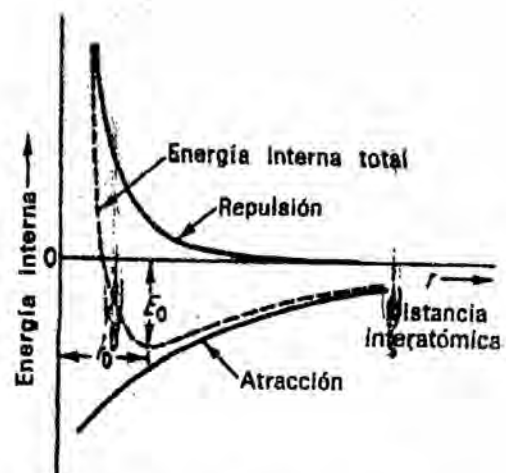


Figura 1: Variación de la energía interna con la distancia interatómica

La separación de equilibrio r_0 varía para cada elemento y su valor se determina midiendo la mínima distancia a que se encuentran los átomos en el estado sólido. Si representamos los átomos en posición de equilibrio por esferas tangentes, la distancia entre sus centros puede tomarse como un valor aproximado del diámetro atómico. Este valor aumenta con el número de capas ocupadas por los electrones como se observa en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1
Diámetro atómico de los elementos de los Grupos IA y IIA

Diámetro atómico de los elementos de los Grupos IA y IIA de la tabla periódica *

Elemento	Número atómico	Diámetro atómico, angstroms†
----------	----------------	------------------------------

Grupo IA

Litio	3	3,03
Sodio	11	3,71
Potasio	19	4,62
Rubidio	37	4,87
Cesio	55	5,24

Grupo IIA

Berilio	4	2,22
Magnesio	12	3,19
Calcio	20	3,93
Estroncio	38	4,30
Bario	56	4,34

Y disminuye al aumentar el número de *electrones de valencia*, como se observa en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2
Diámetro atómico y valencia de los elementos del Grupo A

Diámetro atómico y valencia de los elementos del Grupo A del cuarto período *

Elemento	Valencia	Diámetro atómico, angstroms
Potasio	1	4,62
Calcio	2	3,93
Escandio	3	3,20
Titanio	4	2,91
Vanadio	5	2,63
Cromo	Variable	2,49
Manganeso	Variable	2,37
Hierro	Variable	2,48
Cobalto	Variable	2,50
Níquel	Variable	2,49



1.3. Estructuras Cristalinas

En el estado sólido, los átomos acusan cierta permanencia de posiciones que da lugar a la formación de cristales.

Sin embargo, los átomos no permanecen fijos en sus posiciones sino que oscilan alrededor de ellas, estableciéndose un equilibrio dinámico. Al agruparse los átomos ordenadamente en el espacio, podemos considerar que determinan una red tridimensional llamada **red espacial**, obtenida al unir todos los átomos entre sí mediante rectas imaginarias y que el cristal está constituido por una serie de células o celdillas iguales, de simetría igual a la del cristal. La menor de estas celdillas, que posea los mismos elementos de simetría que el cristal, se denomina **celdilla unitaria o fundamental**, la cual, en cada metal, viene definida por los parámetros **a, b, c**, que indican la longitud de sus aristas y por los ángulos α (formado por b y c), β (formado por a y c), y γ (formado por a y b), como se observa en la Figura 2:

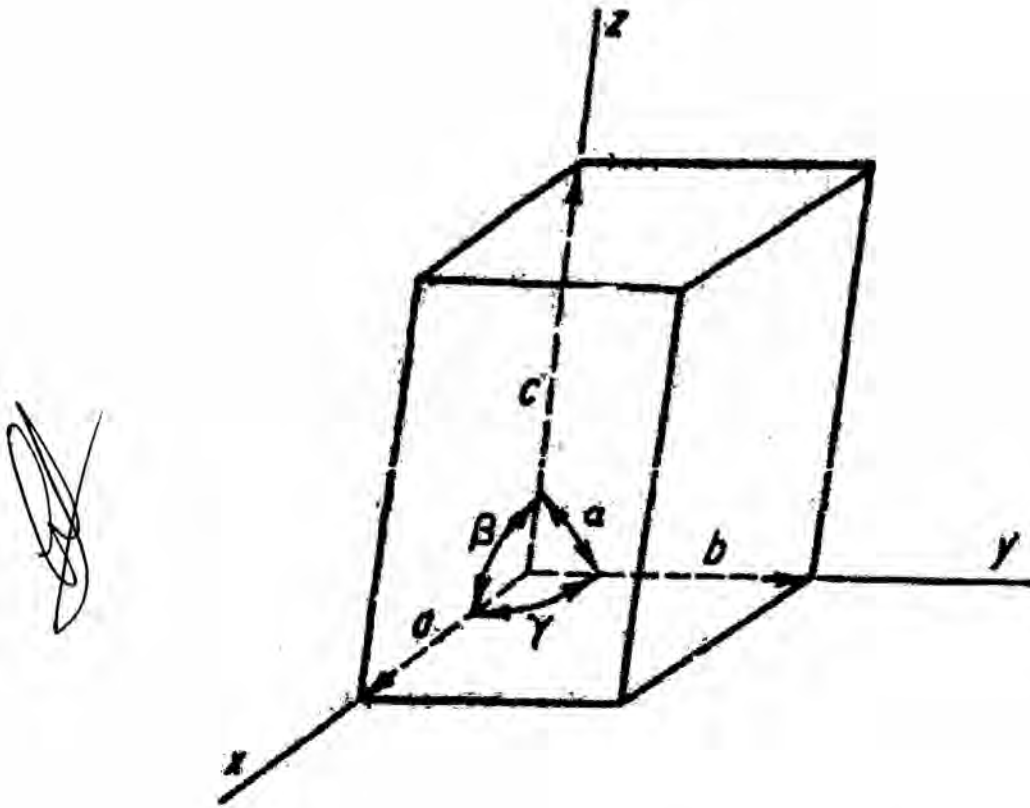


Figura 2: Red Espacial

Existen solamente 14 tipos de redes espaciales, clasificados en los siete sistemas cristalinos indicados en la siguiente tabla.

- | | |
|---------------------------|---|
| 1. Triclínico | Tres ejes desiguales formando ángulos desiguales no rectos.
$a \neq b \neq c$; $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ |
| 2. Monoclínico | Tres ejes desiguales, uno de los cuales es perpendicular a los otros dos.
$a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$. |
| 3. Ortorrómbico | Tres ejes desiguales que se cortan en ángulos rectos
$a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ |
| 4. Romboédrico (trigonal) | Tres ejes iguales, formando ángulos iguales, distintos de 90°
$a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ |
| 5. Hexagonal | Tres ejes coplanarios iguales, a 120° y un cuarto eje distinto, perpendicular al plano de los otros tres.
$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$ |
| 6. Tetragonal | Tres ejes que se cortan en ángulos |

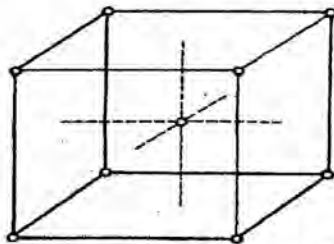
rectos siendo uno desigual
 $a = b \neq c ; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

7. Cúbico

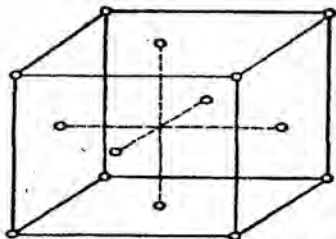
Tres ejes iguales perpendiculares entre
 Si

$a = b = c ; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

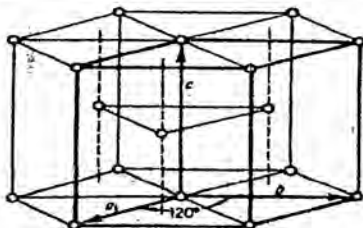
Afortunadamente, la mayor parte de los metales y metaloides mas importantes **crystalizan** en los sistemas, **cúbico o hexagonal**, y las **redes espaciales** con que normalmente nos encontramos son: la **b.c.c** (cúbica de cuerpo centrada), la **f.c.c** (cúbica de caras centrada) y la **c.p.h.** (hexagonal compacta), cuyas celdillas fundamentales vienen representadas esquemáticamente en las figuras siguientes. En cada caso, el átomo se representa en la parte izquierda de la figura en forma puntual, y en la parte derecha, y de forma más aproximada a la realidad, por esferas, tal como se observa en la Figura 3.



Celdilla fundamental de la estructura b.c.c. representada por puntos (izquierda) y con esferas (derecha).



Celdilla fundamental de la estructura f.c.c. representada por puntos (izquierda) y con esferas (derecha).



Estructura c.p.h. A la izquierda la celdilla fundamental está representada por puntos y líneas gruesas, y a la derecha con esferas.



Figura 3: Sistemas Cúbico o hexagonal

Red cúbica de cuerpo centrado.- b.c.c.

Sus átomos se representan por esferas, el átomo central toca a los que ocupan los vértices del cubo, pero éstos no se tocan entre sí. Como los átomos de los vértices son compartidos entre las ocho celdillas vecinas, y el del centro pertenece por entero a la celdilla que estamos considerando, el número de átomos que contiene la celdilla unitaria de la red b.c.c. es :

$$8 \text{ átomos en los vértices} \times 1/8 = 1 \text{ átomo}$$

$$1 \text{ átomo en el centro} = 1 \text{ átomo}$$

$$\text{Total} = 2 \text{ átomos}$$

Algunos de los metales que cristalizan en la red b.c.c. son el cromo, wolframio, hierro alfa (α), hierro delta (δ), molibdeno, vanadio, y el sodio.

Red cúbica de caras centradas.- f.c.c.

En esta configuración los átomos pueden considerarse como situados uno en cada vértice del cubo y otro en cada cara, no existiendo ninguno en el centro del cubo. Los átomos de cada cara son tangentes a los en los vértices de dicha cara. Como los átomos de los vértices pertenecen a los ocho cubos que existen alrededor de cada vértice, y los de las caras, a los dos cubos de la red que tengan esa cara común, el número real de átomos que contiene la celdilla fundamental es:

$$8 \text{ átomos en los vértices} \times 1/8 = 1 \text{ átomo}$$

$$6 \text{ átomos en el centro de las caras} \times 1/2 = 3 \text{ átomos}$$

$$\text{Total} = 4 \text{ átomos}$$

Algunos de los metales que cristalizan en la red f.c.c. son el aluminio, níquel, cobre, oro, plata, plomo, platino y el hierro gamma (Γ)

Red hexagonal compacta.- c.p.h.

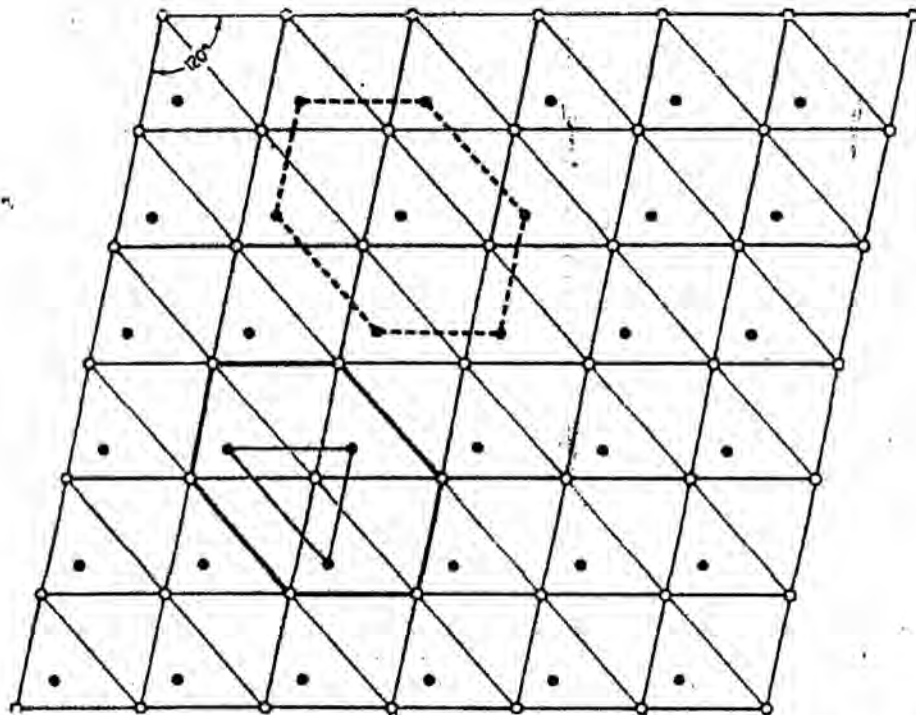
En este tipo de red los átomos se hallan distribuidos en los vértices de un prisma hexagonal y en el centro de las bases del mismo, existiendo además otros tres átomos que se sitúan en los centros de los prismas triangulares alternativos en que puede descomponerse el prisma hexagonal.

La repetición paralela de este prisma hexagonal no nos permite obtener el conjunto de la red, ya que la verdadera celdilla fundamental de la red hexagonal es solamente la porción representada en la Figura 3 **por línea gruesa**. Por tanto, el prisma hexagonal contiene dos celdillas fundamentales completas y dos medias celdillas.

Considerando únicamente la celdilla fundamental, es difícil llegar a comprender por qué a este tipo de red se le denomina hexagonal. Para ello hay que demostrar que si se agrupan paralelamente cierto número

de celdillas unitarias, de una manera similar a como se encuentran dispuestas en la red espacial, se obtiene un prisma hexagonal.

En la Figura 4, se representa la proyección plana de una serie de celdillas fundamentales, correspondiendo las circunferencias a los átomos situados en el plano de la figura, y los círculos en negro a los átomos situados en los planos medios de los prismas, por encima y por debajo del plano de la figura. La formación de la red hexagonal, a partir de las celdillas fundamentales, puede realizarse partiendo de las circunferencias o de los círculos.



Formación de la red hexagonal a partir de una serie de celdillas fundamentales.

Figura 4: Formación de la Red hexagonal

En cualquier caso, siete circunferencias o círculos representan los átomos situados en el plano de la base, y los tres vértices del triángulo interior corresponden a los centros de los prismas triangulares alternativos.

Como cada átomo de los vértices de la celdilla fundamental es compartido por las ocho celdillas vecinas, y el del centro pertenece a la celdilla, ésta contiene dos átomos. Algunos de los metales que presentan una estructura de este tipo son el magnesio, berilio, zinc, cadmio, y el hafnio.

La celdilla fundamental del sistema cúbico queda definida conociendo un parámetro de la red, pero para determinar la celdilla fundamental del sistema hexagonal se requiere conocer el lado del hexágono a y la

distancia entre ambas bases **c**. Estos valores determinan la relación **c/a**, la cual es la que algunas veces se da. Matemáticamente se demuestra que la relación axial de una estructura formada por esferas tangentes es 1,633. En la práctica, la relación axial de los metales que presentan una **estructura c.p.h.** varía de 1,58 en el berilio a 1,88 en el cadmio. Por tanto, suponiendo que los átomos están en contacto mutuo, esto nos indica que su forma no debe ser esférica, sino esferoidal.

Se resume los tipos de estructura cristalina, parámetros de la red y valores correspondientes a otras propiedades físicas de los metales más comunes, tal como se observa en la Tabla N° 3

Tabla N° 3.

Valores correspondientes a las principales físicas de algunos elementos

Valores correspondientes a las propiedades físicas de algunos elementos

Metal	Símbolo	Densidad a 20°C en g por cm ³	Punto de fusión, °C	Punto de ebullición, °C	estructura cristalina	Parámetro de la red angstroms†	Mínima distancia interatómica, angstroms
Aluminio	Al	2,6994	660,2	2450	f. c. c.	4,0471	2,861
Antimonio	Sb	6,6149	630,5	1380	Romboédrica	4,5055	2,904
Berilio	Be	1,8500	1.277,8	2.771,1	C. p. h.	a = 2,2858 c = 3,5642	1,221
Bismuto	Bi	9,8008	271,3	1.560	Romboédrica	4,7457	3,111
Cadmio	Cd	8,6657	323,9	765	C. p. h.	a = 2,9787 c = 5,617	2,971
Carbono (grafito)	C	2,2425	3.725,7	4.832,2	Hexagonal	a = 2,4614 c = 6,7041	1,42
Cromo	Cr	7,1981	1.873	2.665	b. c. c.	2,884	2,498
Cobre	Cu	8,9701	1.083	2.595	f. c. c.	3,6153	2,556
Oro	Au	19,3243	1.063	2.771,1	f. c. c.	4,078	2,882
Hierro (α)	Fe	7,8626	1.536,5	2.998,9	b. c. c.	2,8664	2,482
Plomo	Pb	11,3430	327,4	1.725	f. c. c.	4,9419	3,495
Magnesio	Mg	1,7387	650	1.107	C. p. h.	a = 3,2088 c = 5,2095	3,191
Manganeso	Mn	7,4732	1.245	2.148,0	Cúbica (compleja)	8,912	2,24
Molibdeno	Mo	10,2161	2.610	5,160	b. c. c.	3,1468	2,725
Níquel	Ni	8,9149	1.452,8	2.732,2	f. c. c.	3,5238	2,491
Paladio	Pd	21,4566	1.769,4	4.529,4	f. c. c.	3,9310	2,775
Silicio	Si	2,3256	1.410	2.682,2	Cúbica (diamantina)	3,428	2,351
Plata	Ag	10,4936	960,5	2.210	f. c. c.	4,086	2,888
Estañ	Sn	7,3004	231,9	2.271,1	b. c. ortorr.	a = 5,8314 c = 3,1815	3,016
Titanio	Ti	4,5403	1.668,3	3.260	C. p. h.	a = 2,9503 c = 4,681	2,91
Tungsteno	W	19,2971	3.410	5.530	b. c. c.	3,1585	2,734
Vanadio	V	6,0910	1.898,9	3.398,5	b. c. c.	3,039	2,632
Zinc	Zn	7,1430	419,4	906,1	C. p. h.	a = 2,6649 c = 4,9410	2,664

1.4. Polimorfismo y alotropía

El polimorfismo es la propiedad que presentan algunos materiales de existir en estado sólido en distintas redes espaciales. Si estos cambios de estructura **son reversibles**, la transformación polimórfica se denomina **Alotropía**. Por lo menos quince metales o no metales presentan esta propiedad, y de ellos el ejemplo más conocido es el del hierro. Cuando el hierro cristaliza a 1,537 °C lo hace según una red cúbica centrada en el cuerpo (**b.c.c.**), **hierro delta** ($Fe \delta$), a 1,400°C, la estructura de la red cambia a cúbica centrada en las caras (f.c.c.) **hierro gamma** ($Fe \Gamma$), y a 910 °C, vuelve a cambiar adoptando nuevamente la estructura cúbica centrada en el cuerpo **hierro alfa** ($Fe \alpha$)



Para entender como se construye un Panel Fotovoltaico, hay que partir del conocimiento, de la estructura cristalográfica de los sólidos, de esta manera interpretaremos mejor la conducción de la corriente eléctrica, mediante la teoría de bandas de conducción, esto se logra mediante el enfriamiento lento de los metales y metaloides, en general vamos a describir, el enfriamiento de los metales teniendo como genuino al Hierro, dando a conocer su carácter Alotrópico, y sus diferentes estructuras cristalinas, así como los defectos de las estructuras cristalográficas, para que por analogía lo hagamos con el Silicio. Son estos temas los que desarrollaremos en el presente informe.

1.5. Planos Cristalográficos

Considero que el análisis de este tema en detalle no es necesario profundizarlo, por cuanto no es el propósito del presente proyecto, trataremos de describir lo suficiente para que se entienda, pero si al final del proyecto es indispensable lo haremos.

Una red espacial puede considerarse descompuesta por infinitos sistemas de planos que pasan por los centros de todos los átomos de la red. Estos sistemas de planos se denominan **planos atómicos o cristalográficos**. La relación de estos planos con los ejes de las celdillas fundamentales se indica mediante los **índices de Miller**. Para ello se trazan por uno de los vértices de la celdilla fundamental tres ejes de referencia y se determinan las coordenadas de los puntos de intersección del sistema de planos sobre cada eje, cuyos valores inversos son los índices de **Miller**. La unidad que se toma para graduar los ejes de coordenadas es el parámetro de la red cristalina. Cuando el sistema de planos es paralelo a un eje, el punto de intersección con éste se encuentra en el infinito, tal como se aprecia en la Figura 5.

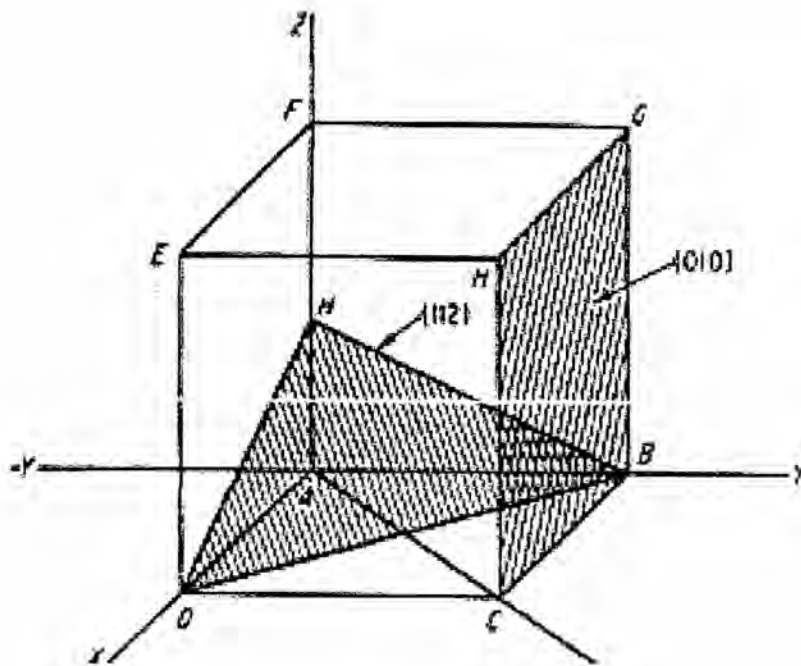


Figura 5: Determinación de los índices de Miller. Los planos rayados son los (010) y (112)


1.6. Cristalización

Estados de la materia

La materia puede presentarse en cualquiera de los tres estados, perfectamente diferenciados, gaseoso, líquido y sólido. El estado gaseoso se caracteriza por que los átomos del metal ocupan un volumen considerable, debido a la rapidez del movimiento de que están animados. En este estado, los átomos se hallan pues en continuo movimiento y describen trayectorias arbitrarias, durante las cuales chocan entre sí y con las paredes del recipiente que los contiene. Estos últimos choques serán una manifestación de la presión que ejerce el gas. En el estado gaseoso, los átomos se mueven con completa independencia unos de otros y, por lo general, las distancias que los separan son muy grandes, por lo que las fuerzas de atracción entre ellos son despreciables. De todo ello se deduce que en un gas, los átomos están en completo desorden.

Conforme se enfría el gas, la energía cinética de los átomos disminuye hasta que llega un momento en que las fuerzas de atracción dejan sentir su acción y la mayoría de los átomos se agrupan dando lugar a la aparición del estado líquido. No todos los átomos pasan a formar parte de él. Algunos

permanecen en el vapor situado sobre el líquido, existiendo un intercambio continuo de átomos a través de la interface líquido-vapor. En un recipiente cerrado que se encuentra a una determinada temperatura, llegará un momento en que el número de átomos que pasen del vapor al líquido será igual al de átomos que escapen de este último, alcanzándose el equilibrio y manteniéndose constante el valor de la presión de vapor del gas situado sobre el líquido. Por el contrario, si el recipiente está abierto, el vapor escapará sin que se logre alcanzar un estado de equilibrio, ya que el número de átomos que escaparán del líquido al vapor será mayor que el número de los que vuelven de éste al líquido, dando lugar al fenómeno de la evaporación. Antes hemos dicho que en el estado líquido se ponen de manifiesto las fuerzas de atracción entre los átomos, lo cual puede comprobarse mediante la aplicación de una presión. Los gases pueden comprimirse fácilmente, reduciéndose notablemente el volumen que ocupan, pero para comprimir un líquido se requieren presiones sumamente elevadas. **Sin embargo, en el estado líquido la separación entre los átomos** les permite todavía una amplia libertad de movimientos.



Conforme disminuye la temperatura de un líquido, la energía cinética de los átomos va siendo cada vez menor y, por tanto, las fuerzas de atracción *originan el agrupamiento de los átomos hasta que, finalmente, el líquido se solidifica*. La mayoría de los materiales al solidificarse experimentan una contracción de volumen, lo que indica una separación menor entre los átomos en el estado sólido. En este estado los átomos no permanecen en reposo sino que vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio, dando lugar a la disposición ordenada de las estructuras cristalinas explicadas en los capítulos anteriores.

1.7. Fases de la cristalización

Se entiende por cristalización al paso del estado líquido al estado sólido, el cual se realiza en dos fases.

- a. Formación de los núcleos
- b. Crecimiento de los cristales

Aunque en el estado líquido los átomos no tienen una distribución ordenada definida, puede ocurrir que, en un instante cualquiera, algunos de ellos se agrupan ocupando posiciones muy similares a las que les corresponden en la red espacial que se forme al solidificarse el líquido, tal como se observa en la Figura 6.

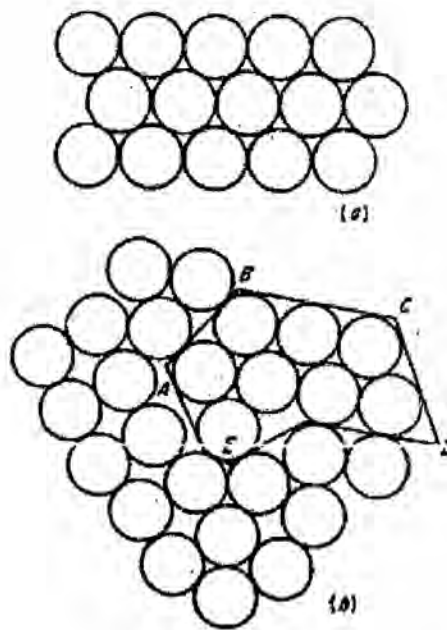


Figura 6: Representación esquemática de una estructura:
(a) cristalina y (b) de un líquido.

El área ABCDE presenta la misma ordenación en el líquido y en el cristal. (Tomado de "Physical Metallurgy", de Chalmes Jhon Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1959)

Estas agrupaciones atómicas que se inician no son permanentes sino que son destruidas rápidamente y se vuelven a formar en otros puntos, dependiendo su duración de la temperatura y de su tamaño, de tal modo que cuanto mayor es la temperatura, mayor es la energía cinética de los átomos y más corta la vida de los grupos. Las agrupaciones pequeñas son muy inestables, porque están formadas por un número pequeño de átomos, y la pérdida de uno de ellos puede ocasionar su destrucción. A medida que disminuye la temperatura del líquido, los átomos pierden libertad de movimiento, lo que da lugar a un aumento de la vida del grupo, coexistiendo al mismo tiempo un número mayor de ellos.

En cualquier material los átomos poseen energía cinética y potencial.

La primera es función de la velocidad con que se mueven los átomos y depende solamente de la temperatura. Al crecer ésta aumenta la actividad de los átomos y, por consiguiente, su energía cinética. **En cambio la energía potencial** depende de la separación entre átomos. Cuanto mayor es la distancia media interatómica, mayor es la energía potencial que poseen los átomos.



Supongamos que un metal puro se encuentra a la temperatura correspondiente al punto de solidificación, coexistiendo los estados sólido y líquido. La energía cinética de los átomos pertenecientes al estado líquido y la de los que se encuentran en el estado sólido tiene que ser la misma, pero no así las energías potenciales que difieren notablemente debido a que en el estado sólido, las distancias interatómicas son menores que en el estado líquido, por lo que la solidificación de los líquidos va acompañada de un desprendimiento o cesión de energía. La diferencia entre las energías potenciales de ambos estados **se denomina calor latente de fusión**. Sin embargo, al iniciarse el proceso de solidificación, para que se establezca una separación entre ambos estados, se requiere cierto consumo de energía. En los materiales puros a la temperatura del punto de solidificación, la energía desprendida por el calor de fusión es insuficiente para que se pueda formar una separación estable, por lo que para que se creen núcleos estables es necesario siempre que exista un subenfriamiento. Conforme vayan desprendiéndose nuevas cantidades de calor de fusión, la temperatura se elevará nuevamente hasta alcanzar la correspondiente al punto de fusión. La magnitud del subenfriamiento se reducirá por la presencia en el líquido de impurezas sólidas, las cuales disminuyen la cantidad de energía superficial que se necesita.

Cuando la temperatura del metal líquido disminuye lo suficiente por debajo del punto de solidificación, se forman espontáneamente en distintos puntos del líquido, agrupaciones o núcleos estables. Estos núcleos, que son porciones de líquido solidificadas, actúan como gérmenes de cristalización. A medida que continúa el enfriamiento, se solidifican más átomos, los cuales se agregan a los núcleos ya formados o constituyen nuevos núcleos de cristalización. Cada núcleo atrae nuevos átomos del líquido que se van ordenando con arreglo a la red espacial del metal, y éstos van continuamente creciendo en las tres direcciones, agrupándose los átomos a lo largo de determinadas direcciones preferentes, que por lo general son los ejes cristalográficos. Este proceso de solidificación da origen a una estructura característica de tipo arborescente denominada **dendrítica**, recibiendo estas arborescencias el nombre de **dendritas**, tal como se observa en la Figura 7:



Figura 7: Crecimiento de las dendritas en el magnesio líquido

Como los núcleos se crean de forma arbitraria, la orientación de los ejes cristalográficos también presentará el mismo carácter, y las dendritas que en ellos se formen tendrán direcciones diferentes en cada cristal. Las arborescencias que forma a la dendrita se desarrollan hasta que al disminuir la cantidad de líquido presente, tropiezan con las arborescencias de las dendritas inmediatas, en cuyo momento cesan en su desarrollo, lo que hace que su forma externa sea muy irregular. Esta diferencia en la forma externa de los distintos cristales ha dado lugar a que los cristales que se encuentran en todos los metales comerciales se denominen **granos**, caracterizadas por su irregularidad, de acuerdo a la Figura 8.

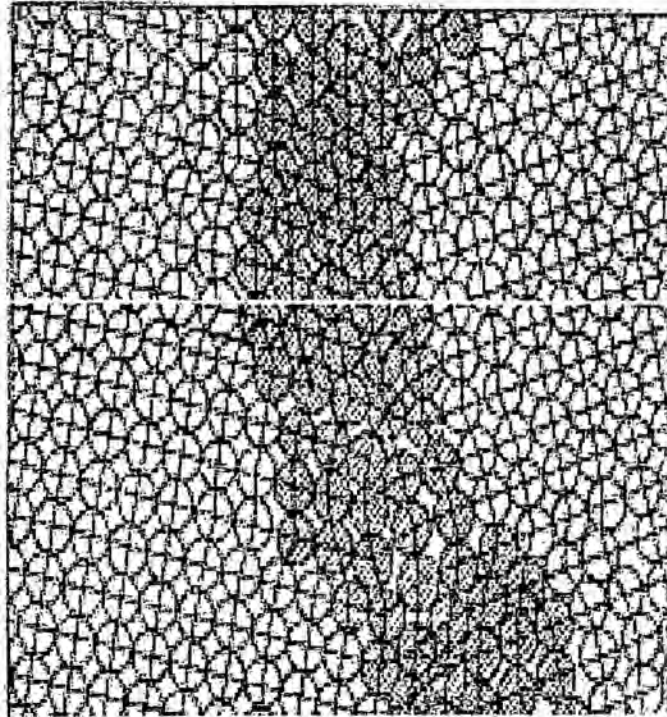


Figura 8: Representación esquemática del contorno de grano entre dos cristales

Los átomos rayados son los que forman el material de unión entre los cristales. (tomado del "Engineering Metallurgy", McGraw-Hill Book Company, Inc, Nueva York, 1955.)

Esto da lugar a que las uniones intergranulares presenten una estructura cristalina (amorfa) con los átomos dispuestos irregularmente. Como la última porción de líquido que solidifica es, generalmente, la que se encuentra en el contorno del grano, presenta una concentración en impurezas superior a la media del líquido, tal como se aprecia en la Figura 9.

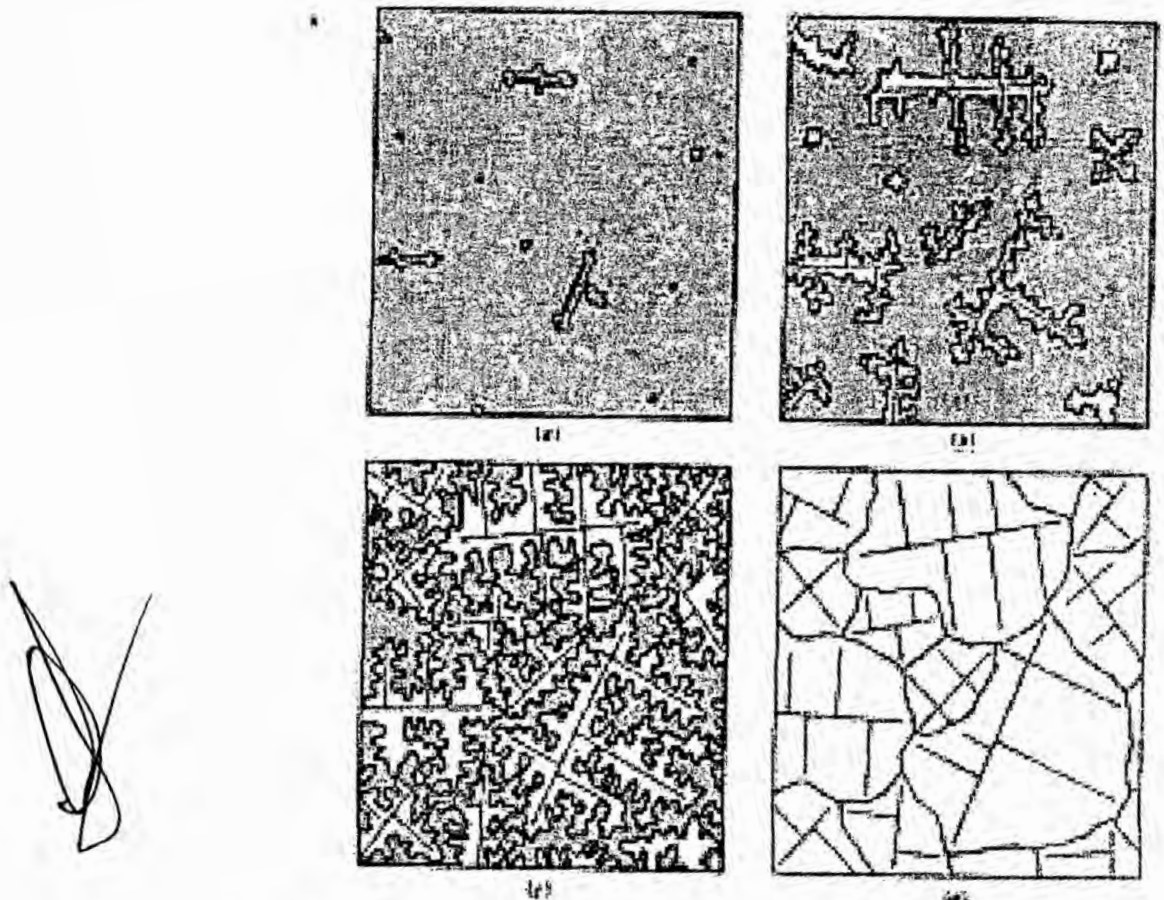


Figura 9: Representación esquemática del proceso de cristalización por nucleación y de crecimiento dendrítico.

(Tomado del "Engineering Metallurgy", McGraw-Hill Book Company, Inc, Nueva York, 1955.)

Muestra esquemáticamente el proceso de cristalización desde que se forman los núcleos hasta que se obtienen los granos finales.

1.8. Imperfecciones en los Cristales

Resulta instructivo conocer cómo se realiza el fenómeno del crecimiento del grano y las cifras que reflejan este crecimiento. A título de curiosidad, diremos que una velocidad de crecimiento pequeña, por ejemplo 1 mm diario, implica la colocación sobre la superficie de, aproximadamente, 100 capas de átomos por segundo.

Todos estos átomos deben colocarse de una manera perfectamente determinada para que el cristal sea perfecto. No es extraño, por tanto, que el número de los cristales que resultan perfectos sea pequeño y que a escala atómica se presenten imperfecciones.

Las imperfecciones más importantes en los cristales son; las vacantes, inserciones-intersticiales y dislocaciones:

Las vacantes, son simplemente lugares que debían estar ocupadas por átomos y se encuentran vacíos, de acuerdo a la Figura 10.

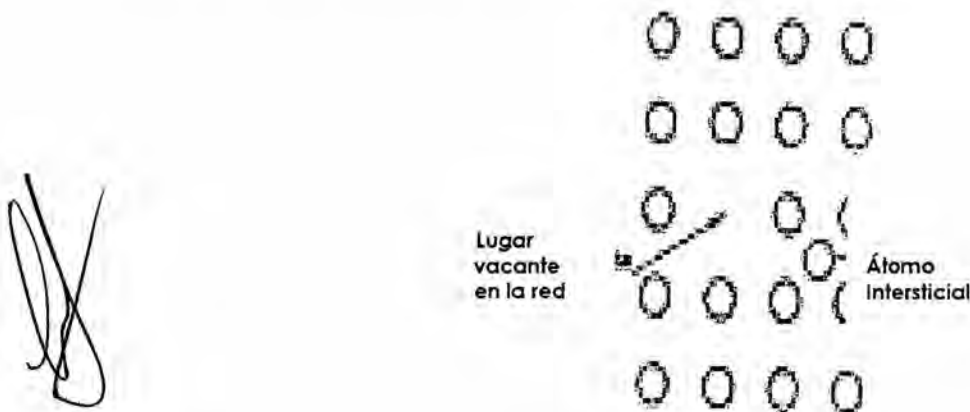


Figura 10: Defectos en los cristales, vacantes e intersticiales.

Termodinámicamente se demuestra que la existencia de estas vacantes de la red constituye una característica de los metales a temperaturas superiores al cero absoluto. Al ser ocupada una vacante por un átomo, el cual a su vez deja otra vacante, y así sucesivamente, resulta que la vacante se desplaza a través de la estructura cristalina, jugando por tanto un importante papel en el fenómeno de difusión.

Las inserciones- intersticiales, en algunas estructuras cristalinas, principalmente en las de densidad atómica pequeña, pueden ocurrir que los átomos se intercalan en los espacios interatómicos de dicha red o posiciones intersticiales, de acuerdo a la anterior figura. Estos dos tipos de imperfecciones, **las vacantes** y **las inserciones-intersticiales**, ocasionan importantes distorsiones locales, rompiendo la regularidad de la red espacial. La existencia de vacantes en la red permite a los átomos que rodean aproximarse entre sí ligeramente, por lo que la separación entre éstos es inferior a la normal, mientras que los átomos colocados en posiciones intersticiales empujan a los átomos vecinos separándolos. Las vacantes se producen no solo a consecuencia de la solidificación sino también al elevarse la temperatura del cristal, o al estar sometido éste a la irradiación de partículas nucleares a gran velocidad. Los átomos intersticiales pueden ser debidos a una distorsión local de importancia producida durante la deformación plástica del metal, como en los procesos de trefilación o laminación en frío o el caliente, o ser consecuencia de la irradiación del material.

Las dislocaciones, se pueden definir como una irregularidad cristalina que se presenta entre dos partes del cristal que individualmente pueden considerarse como perfectas, de acuerdo a la Figura 11:

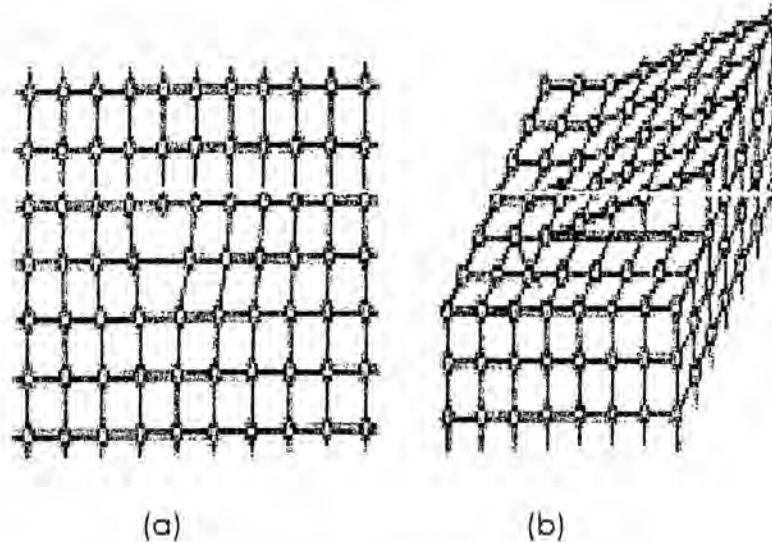


Figura 11: Dislocaciones (a) en arista, (b) en hélice.

(Tomado del "Engineering Metallurgy", McGraw-Hill Book Company, Inc, Nueva York, 1955.)

Que representa esquemáticamente dos tipos sencillos de dislocaciones. **La dislocación en arista**, se produce cuando en una red cristalina se origina un nuevo semiplano atómico. **La dislocación en hélice o helicoidal**, recibe este nombre a causa de la superficie en espiral que forman los planos atómicos situados alrededor del frente de dislocación. Una dislocación causa una distorsión en la red del cristal produciendo fuerzas de compresión por debajo de ella y fuerzas de extensión por encima. Cuando la diferencia de orientación entre dos granos contiguos no es muy grande, los límites de separación entre ellos pueden representarse por cierto número de dislocaciones paralelas en arista, de acuerdo a la Figura 12.

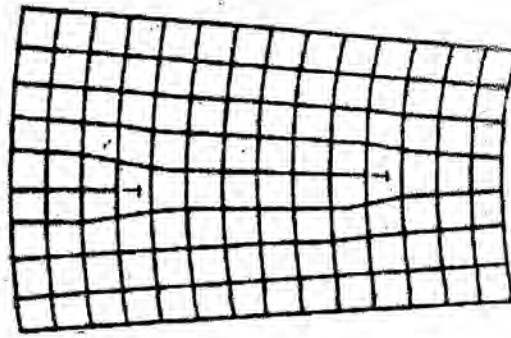


Figura 12: Límite de separación entre granos de orientación muy aproximada, formados por cierto número de dislocaciones en arista, representada por los símbolos T.


(Tomada de C. S. Barrett, "Structure of Metals", 2ª ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1952.)

La creación, multiplicación e interacción entre las dislocaciones permite explicar satisfactoriamente muchas de las propiedades de los metales.

Todo aquel que desee profundizar en el estudio de los tipos y teoría de las dislocaciones, encontrará al final del proyecto una extensa bibliografía de obras dedicadas al tema.

2.- BANDAS DE ENERGÍA

2.1. Introducción



Como ya he mencionado anteriormente, el proyecto de investigación no pretende competir, con los modernos paneles fotovoltaicos ni en tecnología ni en eficiencia, ni siquiera como una forma de generación de energía eléctrica alternativa de gran consumo. El propósito del proyecto es Manufacturar los paneles fotovoltaicos con tecnología y materiales propios, aunque sea rudimentaria y con escasa eficiencia, orientado a proporcionar energía eléctrica, de baja calidad a nuestras poblaciones andinas o amazónicas muy alejadas de las ciudades, poblados compuestos por 10 o 20 viviendas, con una generación eléctrica mínima de 2 Kw. Semejante a lo ocurrido con los paneles solares térmicos, con los cuales se produce agua caliente y otros usos, con las simplificaciones tecnológicas lo cual ha permitido un desarrollo de esta industria con conocimientos y materiales locales y al alcance de familias humildes, como se demuestra la masificación de su uso en Cajamarca, Arequipa y Cuzco. **Los paneles para generar energía fotovoltaica, presentan la dificultad principal en la obtención, del Silicio con un alto grado de pureza,** actualmente existen varios procesos de manufactura para la obtención del Silicio Electrónico monocristalino cuya pureza alcanza el 9.99 % de Silíceo, teniendo en cuenta que el Silicio se encuentra en abundancia, en la corteza terrestre formando diversos compuestos minerales. Luego de la obtención del Silicio que es un Semiconductor extrínseco, hay que agregar impurezas para mejorar su conductibilidad, en un caso serán: donoras, que suministra electrones de conducción, en este caso es el Antimonio **Sb** nivel 5to de la tabla periódica, convirtiendo al semiconductor en "**N**" el suministro se hace en su estructura cristalina por **difusión**, igualmente agregando impurezasceptoras que suministran huecos de conducción, el donante es el Boro **B** nivel 3ro de la tabla periódica, convirtiendo al semiconductor en "**P**" este proceso también se hace por difusión, a este proceso yo no le veo inconveniente, es una tecnología conocida semejante al endurecimiento superficial de los aceros por Nitruración, Carbonitruración, Cianuración y otros que se realizan por el proceso de difusión. Por lo tanto el reto consiste en obtener el Silicio mediante un proceso simplificado, por este motivo se ha desarrollado el proyecto con algún detalle, el conocimiento de las estructuras cristalinas de los, Monocristales, Policristalinos y Amorfo, asimismo los defectos en las estructuras cristalográficas.

Se desarrollara la teoría de las bandas de conducción, para que el proyecto este completo, entendiéndose que no se hará en profundidad, debido a que no es el propósito del proyecto.

Tampoco se hará un desarrollo teórico en profundidad, de los demás equipos que completan, la generación eléctrica Fotovoltaica, como son: el **regulador de Tensión**, la **Batería** de acumulación de energía, ni del **Convertidor** de Tensión Continua el Tensión Alterna.

2.2. Teoría de las Bandas de Energía

Sabemos por conceptos básicos de física que, los diversos electrones atómicos pueden adoptar órbitas, o niveles de energía, caracterizadas por los momentos cinéticos. Sin embargo, existen ciertas discrepancias cuantitativas entre los distintos niveles de energía que se le pueden asignar a un átomo aislado y los niveles de un átomo que forma parte de un cristal. Estas diferencias pueden atribuirse a que en un sólido los electrones no son completamente libres, sino que están influenciados por los átomos del retículo cristalino y por los restantes electrones. Al estudiar en detalle estas discrepancias, veremos que aparecen ciertas características nuevas **que permiten comprender a los aisladores, los semiconductores y los metales**. Esta teoría extendida se llama **teoría de bandas** y nos referimos solamente a sus aspectos cualitativos.

Deseamos estudiar la naturaleza de los niveles de energía disponibles para un electrón que se mueve bajo la influencia de los núcleos atómicos y los electrones. Una característica básica del problema es el **carácter periódico** de la **función energía potencial**.

La energía potencial debe tener, si se desprecian los efectos producidos por los contornos del cristal, la misma periodicidad del cristal mismo y, por lo tanto, cabe esperar cierto grado de simetría y periodicidad en la función de onda del electrón.

En principio, trataremos el problema cualitativamente para dar una imagen clara de la naturaleza de los niveles de energía.

2.3 Bandas de energía de un sólido

Consideremos a continuación un modelo cristalino formado por un número muy grande de átomos idénticos, un monocristal, dispuestos de la misma manera que un cristal verdadero, e imaginemos que la distancia entre los átomos puede variarse a voluntad.

Tendremos una idea de la estructura de los niveles energéticos de un cristal, si analizamos la transición gradual de nuestro modelo desde un estado de separación interatómico muy grande a uno de separación muy pequeño.

Si la distancia interatómica es muy grande, los niveles de energía de los electrones en el cristal coinciden con los niveles correspondientes al **átomo aislado** y no hay posibilidad alguna de que un electrón pase de un átomo a otro.

Si a continuación reducimos la distancia interatómica, de manera que los electrones exteriores de cada átomo se aproximen lo suficiente a otro átomo como para quedar sometidos a las fuerzas ejercidas por éste, cabe esperar que los niveles de energía se alteren considerablemente. Los electrones de estos niveles podrían intercambiar su posición y pasar de un átomo al siguiente.

Esto efectivamente ocurre, y cada nivel de energía del átomo aislado se divide en un número muy grande de niveles distintos (tantos como átomos tenga el cristal). Estos niveles son tan numerosos y su separación promedio tan pequeña, que es mejor considerarlos como una **distribución continua** con una cierta densidad $\rho(E)$, que se extiende desde un nivel de energía superior, $E_{m\acute{a}x}$, a otro nivel inferior, $E_{m\acute{i}n}$.

Puede probarse, mediante consideraciones teóricas, que la distribución de la densidad de probabilidades $\Psi \Psi^*$ tiene exactamente la misma simetría y periodicidad del retículo cristalino. Por consiguiente, para un dado estado de energía, es igualmente probable encontrar un electrón en las proximidades de cualquier átomo y no debe asociársele con ningún átomo en particular, tal como se observa en la Figura 13.

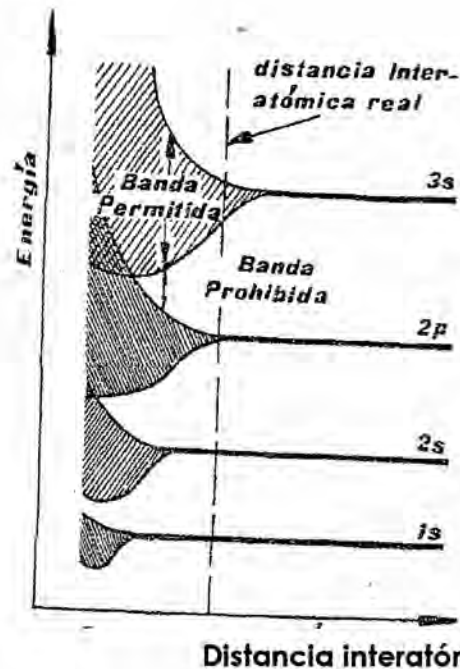


Figura 13: Bandas de energía en un cristal hipotético en el que se considere variable la distancia entre átomos

Para algunos niveles atómicos, se observa, que para un dado espacio interatómico, el ancho de la banda **1s** es considerablemente menor que el de las bandas **2s** y **2p**. Esto es consecuencia de que las perturbaciones sobre un nivel de energía es grande, sólo si las funciones de onda se superponen lo suficiente. Así, los estados superiores de energía, o sea los más externos, tienen bandas más anchas que los inferiores, pues la superposición de las funciones de onda es mayor.

A distancias interatómicas reales, indicada en la figura anterior por la línea de trazos, tan sólo los niveles de energía exteriores, o estados de los electrones de valencia en el átomo aislado, se modifica apreciablemente.

Obsérvese en la figura anterior la formación de **bandas de energía permitidas y de bandas prohibidas**. El ancho de las bandas permitidas aumenta a medida que se reduce la distancia interatómica.

Otra característica señalada en la figura anterior es la probabilidad de *superposición de las bandas para distancias interatómicas* suficientemente pequeñas. Este hecho tiene un marcado efecto en las propiedades físicas del cristal.

Por otra parte, cabe destacar que la división de los niveles de energía en bandas, es independiente de que esos niveles estén o no ocupados por electrones.



2.4 Características eléctricas de un cristal

Para describir las propiedades eléctricas de un elemento determinado, debemos combinar las ideas expuestas anteriormente sobre **las bandas de energía de un cristal** con el **principio de exclusión de Pauli**, el cual limita la posibilidad de ocupación de cada uno de los niveles de una banda a solamente un electrón.

Sabemos que durante el corto intervalo de tiempo que transcurre entre sucesivas colisiones del electrón con el retículo cristalino, **debido a un campo eléctrico exterior aplicado**, éste no puede modificar su cantidad de movimiento o su energía en una cantidad muy grande. Además, un requisito esencial que debe satisfacer un conductor eléctrico, es que tenga un gran número de electrones cuyas energías estén dentro de un rango en el cual haya muchos estados no ocupados con energía muy próxima a la de los electrones en cuestión. En la teoría de las bandas que estamos considerando, esta condición se verifica sólo si una dada banda de niveles de energía está parcialmente ocupada por electrones, y no se verifica si la banda está completamente ocupada ni si la banda desocupada más próxima está separada de la banda ocupada por una banda prohibida, suficientemente grande.

Por consiguiente, un conductor se caracteriza por la presencia de numerosos niveles vacíos adyacentes al nivel más alto ocupado. Para un elemento químico o compuesto dado, la población de las distintas bandas, y por consiguiente las características eléctricas, están determinadas por el número de electrones de cada átomo, por el principio de exclusión de Pauli, por las condiciones de separación o superposición de las bandas y también por la temperatura.

2.5 Estructura de banda de los metales

En el apartado anterior vimos que las características eléctricas de los sólidos están relacionadas con el concepto de ocupación de los niveles cuánticos permitidos en las bandas de energía.

Los metales se caracterizan por tener una estructura de bandas cuyos niveles superiores ocupados son contiguos a un número muy grande de niveles vacíos. Esta condición se verifica si una banda está parcialmente llena, o si bandas adyacentes próximas al tope de los niveles ocupados se superponen, lo cual da la continuidad necesaria en la distribución de niveles. Realmente, la mayor parte de los metales tiene una estructura de banda en la cual hay una superposición muy grande en los niveles ocupados superiores, tal como se aprecia en la Figura 14.



Figura 14: Representación convencional de las bandas de energía de un conductor

Se representa el diagrama de bandas de energía para el caso de un metal. La banda llena más externa se denomina **banda de valencia** y la inmediata superior, parcialmente ocupada, **banda de conducción**.

Consideremos como ejemplo el caso de los metales alcalinos. Estos elementos tienen todas las bandas interiores llenas, excepto la última, que es siempre una capa **s**, que contiene un único electrón y puede contener dos. Es decir, en la banda más externa hay dos niveles disponibles por átomo, pero sólo uno está ocupado. Esto explica porque el cobre y los otros metales alcalinos son buenos conductores de la electricidad.

2.6 Estructura de banda de los aisladores

A diferencia de lo que ocurre en los metales, en un aislador las bandas se distribuyen de acuerdo a la Figura 15.



Figura 15: Bandas de energía de un aislador

Las bandas que contienen electrones están totalmente ocupadas. La banda de conducción no contiene ningún electrón y está separada de la banda de valencia por una banda prohibida, cuya altura es de varios electrón-volt. Para el diamante (una estructura cristalina parecida al carbono), la banda prohibida tiene una altura de 6 a 7 eV.

En general, la **banda prohibida es tan grande en los aisladores**, que a temperatura ambiente difícilmente algún electrón adquirirá suficiente energía como para saltar a la banda vacía de conducción

2.7 Estructura de banda de los semiconductores

Se denomina **semiconductor** a un sólido que presenta una **conductividad intermedia** entre la de los buenos conductores y los buenos aisladores. La característica de un semiconductor es su angosta banda prohibida. Estas sustancias son aisladores a temperaturas suficientemente bajas (próximas a 0°K), pero a temperatura ambiente ($\sim 300^\circ \text{K}$), un apreciable número de electrones pueden pasar a la banda vacía de conducción, debido a la agitación térmica, atribuyéndole conductibilidad.

Un material con las propiedades descritas se denomina **semiconductor intrínseco**. La estructura de bandas de un semiconductor intrínseco se indica en la Figura 16.

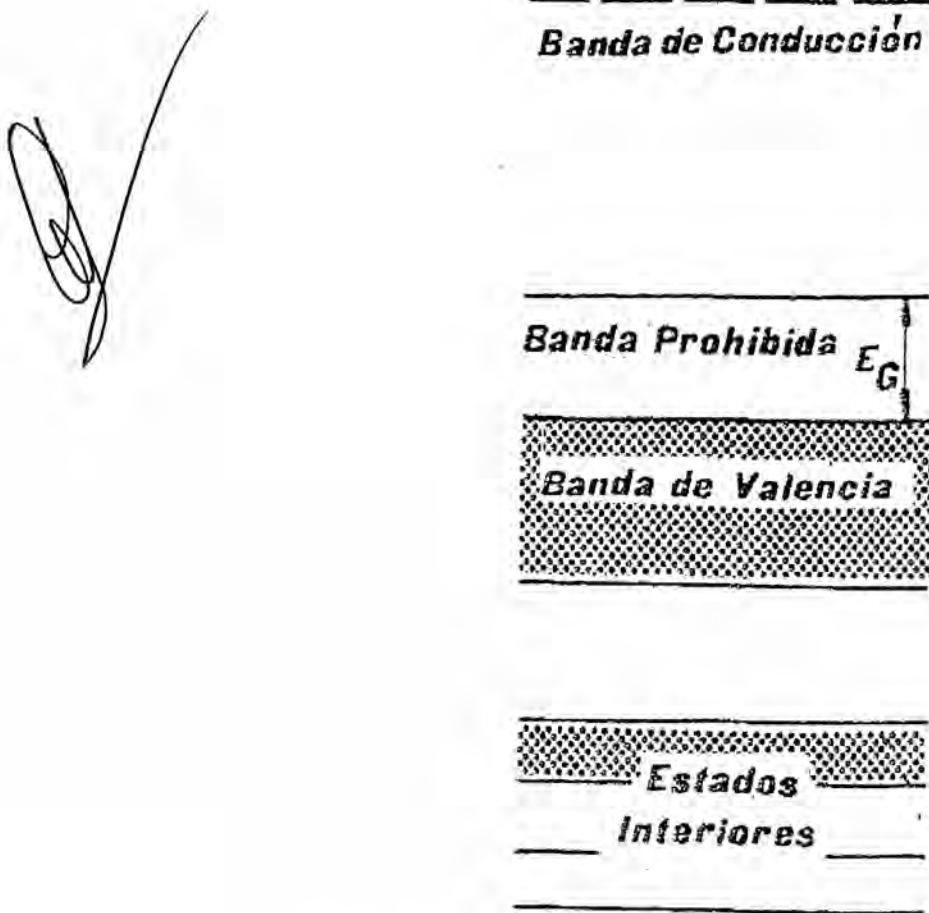


Figura 16: Bandas de energía de un semiconductor intrínseco

Los materiales semiconductores prácticos más importantes son el **germanio (Ge)** y el **silicio (Si)**. Para estos elementos el ancho de la banda prohibida es a 0°K

Ge 0.785 (eV)

Si 1.21 (eV)

Puesto que el ancho de la banda prohibida es función de la separación interatómica, no es sorprendente que dependa de la temperatura. Se ha determinado experimentalmente que, efectivamente, el ancho de la banda prohibida disminuye algo con la temperatura. Para temperatura ambiente ($\sim 300^\circ \text{K}$), es:

Ge 0.72 (eV)

Si 1.1 (eV)

Hasta ahora hemos considerado estructuras cristalógicas de cristales semiconductores perfectos. **Sin embargo, la presencia de impurezas afecta marcadamente las propiedades eléctricas del cristal.** Esto es consecuencia de que tales impurezas interrumpen la regularidad del retículo cristalino e introducen portadores adicionales dentro de las bandas. Estos semiconductores se denominan **semiconductores extrínsecos.**

La clase más simple de semiconductores extrínsecos son aquellos en los cuales una pequeña fracción (10^{-5} a 10^{-10}) de los átomos del cristal ha sido reemplazados por átomos de un elemento cuya valencia es diferente a la del material que forma el sólido.

Las impurezas de mayor interés son las pertenecientes a los grupos **III y V** de la tabla periódica. En cualquiera de los dos casos, el átomo de impureza reemplaza a un átomo del cristal semiconductor sin alterar para nada la estructura cristalina desde el punto de vista cristalográfico.

No obstante, puesto que el átomo de impureza tiene o un electrón de valencia de más, o uno de menos que el átomo del material semiconductor, el resultado de la sustitución es la aparición de un electrón en exceso o la falta de un electrón en la estructura.

Consideremos primero el caso de impurezas pentavalentes, como el antimonio **Sb**. Puesto que este elemento tiene cinco electrones de valencia, al sustituir a un átomo de silicio en el cristal, cuatro de los cinco electrones entran en las **ligaduras-enlaces covalentes** con cuatro átomos de silicio próximos. **El quinto electrón queda sólo débilmente ligado al núcleo y la energía de ionización requerida para liberarlo es mucho menor que la necesaria para romper un enlace covalente.** Debido a ello, aún a bajas temperaturas este electrón puede liberarse y convertirse en un electrón de conducción.

Esta descripción se observa en la siguiente Figura 17:

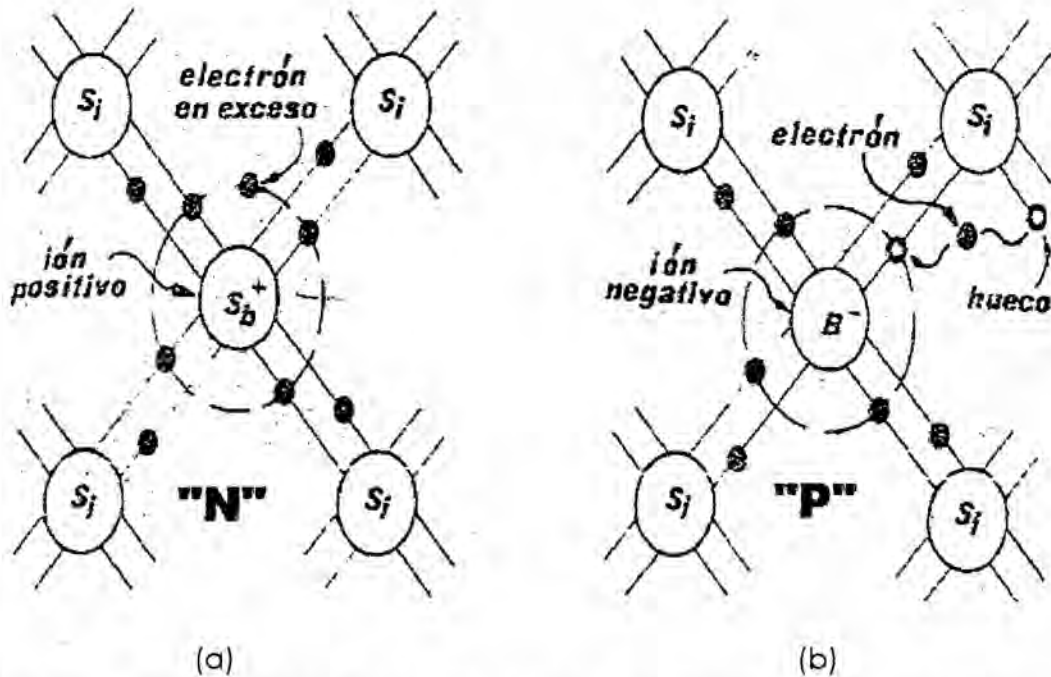


Figura 17: Representación simbólica en dos dimensiones de la estructura cristalina de un semiconductor extrínseco. (a) Agregado de impurezas donoras que suministra electrones de conducción. (b) Agregado de impurezas aceptoras que suministran huecos de conducción.

Puesto que cada átomo de antimonio, o en general cada átomo del grupo **V**, da lugar a la aparición de electrones en exceso, se las denomina **impurezas donoras**.

Por otro lado, si un elemento del grupo **III** como el boro B, que tiene tres electrones en su última órbita, sustituye a un átomo de silicio, sólo tres de los cuatro átomos vecinos ven satisfechos sus **enlaces covalentes**. Esto crea un déficit de enlace o **hueco**, como se indica en la figura anterior parte b. Para satisfacer los cuatro enlaces, las impurezas del grupo **III** aceptarían fácilmente un electrón del cristal. Por esta razón, estos elementos **se llaman impurezas aceptoras**. La aceptación de un electrón por parte del átomo aceptor debe, por supuesto, crear un hueco en alguna parte del cristal y transforma al átomo aceptor en un ión negativo. Así, el movimiento del hueco puede considerarse como una transferencia de la ionización de un átomo a otro, efectuada por el movimiento de los electrones ligados entre sus enlaces covalentes.

Obsérvese que los átomos de impurezas donoras y aceptoras aparecen, respectivamente, como iones positivos y negativos fijos en el retículo cristalino y no contribuyen a transportar la corriente eléctrica.

Un semiconductor que tiene impurezas donoras se llama semiconductor tipo N, mientras que uno que contenga impurezas aceptoras se denomina semiconductor de tipo P.

La presencia de impurezas modifica ligeramente la distribución de los estados cuánticos dentro del cristal. Las impurezas donoras crean nuevos estados de energía permitidos dentro de la banda prohibida, ligeramente por debajo del fondo de la banda de conducción, y por lo tanto, a temperatura ambiente, casi todos los electrones en "exceso" del átomo donor pasan a la banda de conducción. De igual manera, las impurezas aceptoras crean niveles permitidos ligeramente por encima del tope de la banda de valencia. Puesto que se necesita muy poca energía para que un electrón alcance el nivel aceptor, a temperatura ambiente se producirán huecos en la banda de valencia, son los que intervienen en el proceso de conducción.

Estos niveles de energía están dibujados en la Figura 18.

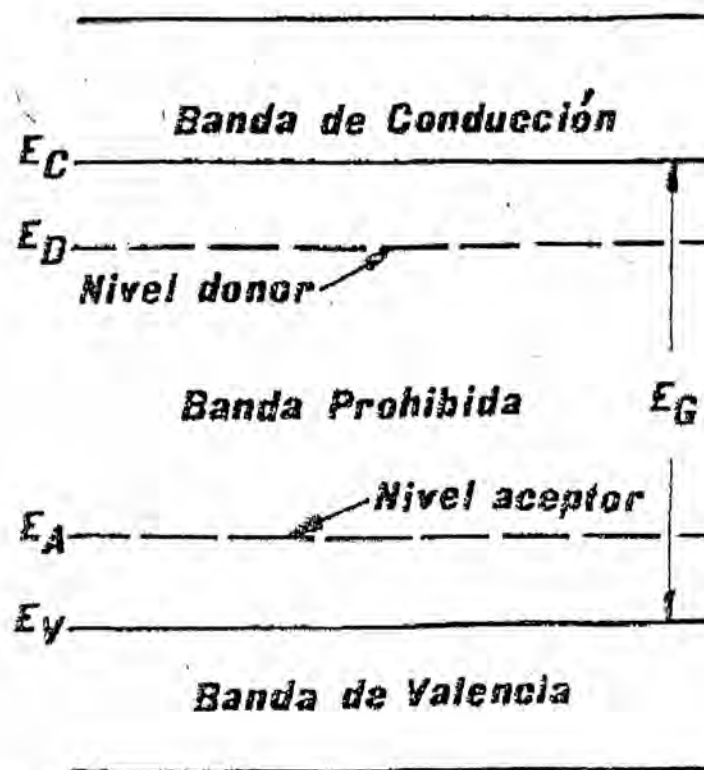


Figura 18: Diagrama de niveles de energía de un semiconductor con impurezas

III. PROCESOS METALÚRGICOS PARA LA OBTENCIÓN DEL SILICIO Y SU REFINACIÓN

3.1 Introducción

En este capítulo, trataremos de explicar lo más claro que podamos y en forma simplificada, los procesos metalúrgicos del Silicio, para obtener el Silicio Solar Electrónico derivado del Silicio Metalúrgico, ya hemos comentado antes, que existe la tecnología y muy desarrollada (**método de CZHRALSKY**) en poder de Corporaciones que han monopolizado el mercado, reiteramos que nuestro propósito no es competir en tecnología, mi ambición es crear inducir el desarrollo de tecnología nacional con un fin social y no es otro que, satisfacer las necesidades eléctricas de nuestros pueblos mas olvidados. Debo señalar sin embargo, que el aporte del proyecto será limitado y de carácter teórico basado en mi experiencia en las áreas de manufactura, en este caso de fundición del Aluminio por gravedad y por inyección en cámara fría, asimismo inyección del Zamac 3 y 5 (composición de Zinc, Magnesio y Cobre), en cámara caliente.

El Silicio constituye el 27.7 % en peso de la composición elemental de la litosfera. No se encuentra en estado libre, sino combinado formando numerosas sustancias naturales o minerales entre los cuales podemos mencionar.

- **Cuarzo o sílice.**- su componente es el **dióxido de silicio** y se presenta en forma de numerosas variedades denominadas: Arenas, ágata, amatista, topacio, ópalo, cristal de roca. **La composición química del Cuarzo en (ppm) es la siguiente.**

La composición química del cuarzo en (ppm)										
Al	Li	K	Na	Ca	Fe	Ti	Mg	Cu	B	Si O ₂
18	0.5	2	2.3	1.8	1.8	4.6	0.4	0.3	0.5	> 99.96 %

- **Feldespatos.**- $K_2 O \cdot Al_2 O_3 \cdot 6 Si O_2$
- **Mica.**- $k_2 O \cdot Al_2 O_3 \cdot 6 Si O_2 \cdot 2 H_2 O$
- **Caolín.**- $Al_2 O_3 \cdot 2 Si O_2 \cdot 2 H_2 O$
- **Talco.**- $3 Mg O \cdot 4 Si O_2 \cdot H_2 O$
- **Rocas y otras.**- Granito = cuarzo + feldespatos + mica

Para obtener el Silicio Metalúrgico recomendaremos partir de dióxido de Silicio por abundar en nuestro país

3.2 Procesos metalúrgicos para la obtención del Silicio

Se hará a continuación una descripción simplificada de la obtención del Silicio con fines estrictamente académicos para tener un conocimiento global del tema.

3.2.1 Silicio Grado Metalúrgico Si – GM

Para la obtención del Silicio Grado Metalúrgico, se parte de los minerales de Silicio en este caso el "cuarzo" que contiene un porcentaje elevado de dióxido de Silicio, de acuerdo al esquema productivo, como se observa en la Figura 19.

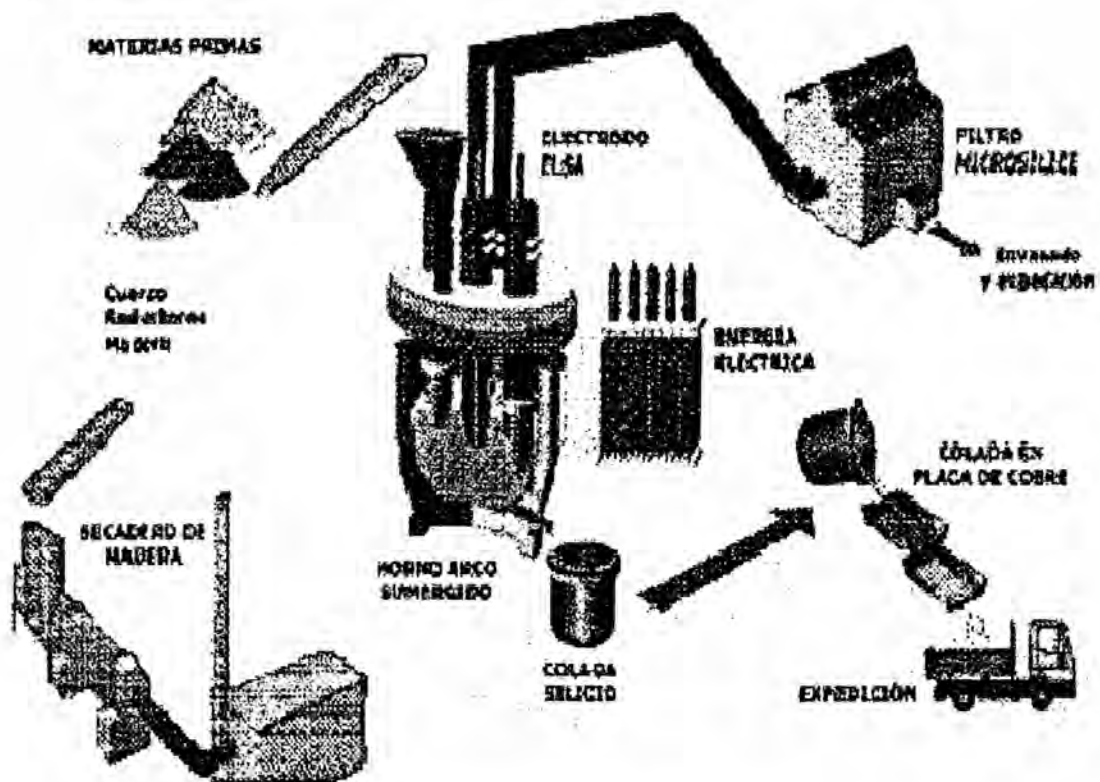


Figura 19: Esquema de producción

El proceso se puede acondicionar de acuerdo al tamaño de producción deseado, de este proceso es imprescindible el horno eléctrico de arco sumergido, debido a que la fusión de la mezcla debe alcanzar alrededor de 2000 °C, y además como el cuarzo es un mineral estable es necesario grandes energías para extraerle el oxígeno de alrededor de 6.4 Kwh/ Kg de Si-GM, además el horno eléctrico no introduce impurezas al proceso por ser una energía limpia, es una reacción química endotérmica de reducción en la cual hay que utilizar como agente reductor el carbono, contenido en el carbón de hulla o coque y madera troceada exenta de humedad, las proporciones en peso se acondicionan de acuerdo a la

producción deseada, la reacción química simplificada se puede expresar de la siguiente manera



3.2.2 Silicio Grado Electrónico Si – GE

Para obtener el Silicio de grado electrónico GE se parte de Silicio de grado Metalúrgico GM de acuerdo a la Figura 20.

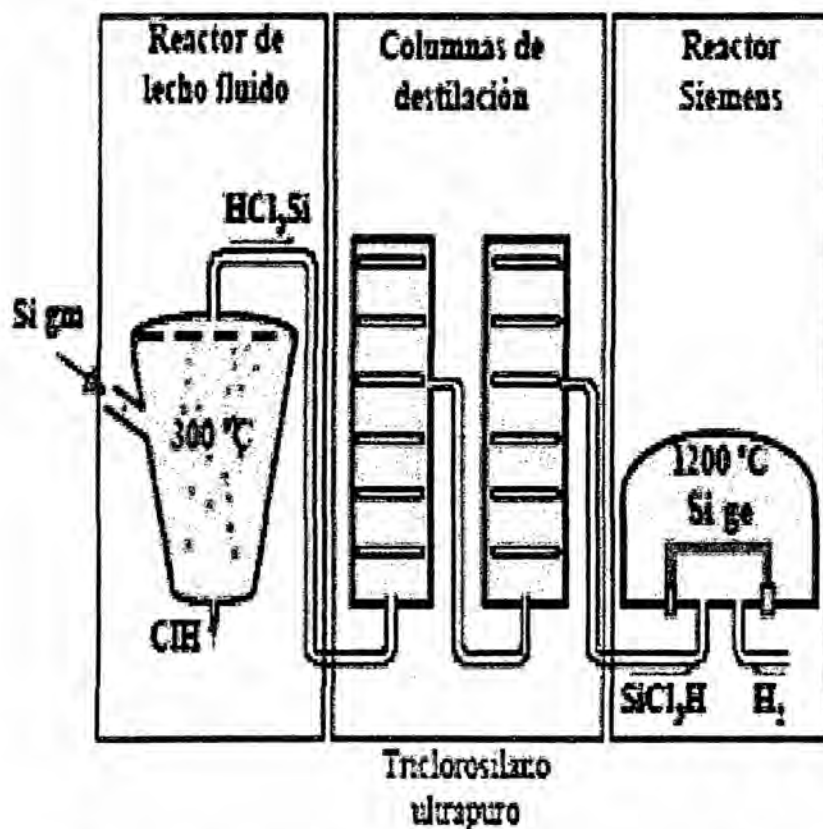
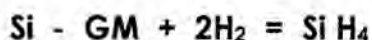


Figura 20: Obtención del Silicio de grado electrónico GE

En este caso el Si GM debe estar finamente molido con un tamaño de mech de alrededor de 400, luego se hace reaccionar a 300°C con cloruro de hidrogeno anhidro en presencia de un catalizador para obtener el triclorosilano (Si H Cl_3) de acuerdo a la siguiente ecuación

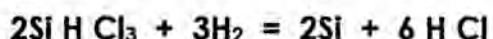


O a altas presiones con dihidrógeno obteniéndose el Silano, de acuerdo a la ecuación



El tricosilano puede purificarse mediante un proceso iterativo de destilación, que consiste en calentar el líquido con control estricto de la temperatura condensando y recogiendo el gas que se produce a un valor específico de temperatura. Si este proceso se realiza varias veces, se incrementa así la pureza del líquido recolectado.

Una vez purificado el tricosilano es necesario descomponerlo para sintetizar el silicio de alta pureza. **La descomposición térmica del tricosilano en una atmosfera de dihidrógeno, de acuerdo a la siguiente reacción da como resultado el silicio denominado "polisilicio" de grado electrónico Si - GE o feedstock**



El polisilicio ultra puro es **policristalino**, y se muele finamente para ser utilizado en la industria electrónica de semiconductores.

3.2.3 Silicio Grado Solar SI-GS

El Silicio de grado solar GS no necesita de tanta pureza como el silicio de grado electrónico GE, de ahí que pueda usar los restos de silicio de la industria electrónica. Por lo que los procesos químicos antes mencionados no necesitan de requerimientos tecnológicos tan específicos e iterativos para la obtención del silicio de GS. El silicio de grado solar se puede encontrar como, **Monocristalino, Policristalino y Amorfo**, el primero se obtiene mediante los métodos de, **Czochralski (CZ) y de zona flotante (ZF)**, **con esta calidad de Silicio se producen la células solares que darán como resultado la generación eléctrica mediante paneles Fotovoltaicos**


3.3. Células solares constituidas por Silicio grado Metalúrgico GM

Aclarados los conceptos, como ya se menciono anteriormente, el propósito del proyecto es **dar una alternativa social** a la generación

eléctrica fotovoltaica, en este caso particular partiendo del silicio grado metalúrgico, debido a esto y a no usar el silicio con alto grado de pureza no tendremos la mas eficiente generación eléctrica, ya que dejamos de lado los altos costos y el monopolio de la tecnología para la obtención del Silicio Grado Electrónico GE y el Silicio Grado Solar GS.

De todas formas al utilizar el silicio grado metalúrgico GM, tendremos dos alternativas.

1. Silicio GM o semiconductor intrínseco, sin elementos donantes
2. Silicio GM semiconductor extrínseco, con elementos donantes



Por lo tanto definido el propósito del proyecto como idea innovadora, el usar el Silicio Metalúrgico **con un fin social**, cuyo costo es de alrededor de 2 dólares por kilogramo mientras el Silicio Grado Salar es de 70 dólares el kilogramo, y dando por sentada las consideraciones que se dispondrá de generación eléctrica limpia fotovoltaica con menos eficiencia y calidad eléctrica, sustentada en su bajo costo y en la liberación de los aspectos tecnológicos, además de disponer de la materia prima en abundancia.

Restaría dar a conocer aspectos generales de la manufactura de las células fotovoltaicas, luego ensamblar prototipos de paneles fotovoltaicos tanto con semiconductores intrínsecos como extrínsecos, luego tener consideraciones de vida útil con pruebas de sobrecarga eléctrica, para determinar la durabilidad y posibles averías.


3.4. Aspectos generales de manufactura de las células solares

Partiendo de los lingotes de Silicio Metalúrgico SI-GM, y teniendo en consideración que las obleas o células fotovoltaicas serán de dimensiones cuadradas de 10 cm por lado y con un espesor de 0.25 mm, de lo que se desprende que el área de la célula es 100 cm^2 , es conveniente aclarar que cuando se usa semiconductor extrínseco, el espesor del semiconductor tipo N sobre el que incide la luz solar es mas delgado que el semiconductor tipo P, pero todos estos casos, son aspectos de diseño que solo se resolverán mediante pruebas de eficiencia en el laboratorio.

El lingote deberá ser de 320 mm de ancho por 120 mm de profundidad por 310 mm de longitud, de esta manera utilizando, electroherosionadora de corte por hilo, tendremos después de eliminar y cuadrar las medidas exteriores, tres lingotes cuadrados de 100 mm por lado por trescientos mm de longitud, entonces queda listo para cortar el espesor de 0.25 mm con la electroherosionadora de corte por hilo.

Hay consideraciones de acabado de la célula, como que la superficie debe absorber la luz solar por lo tanto no reflejarla, además de pulir la superficie y otros que no es el propósito del proyecto.

Posteriormente las células se encapsulan en silicona, asegurando la planitud, para después unir eléctricamente las células en serie y paralelo mediante procedimientos de serigrafía u otros.



Ahora si es conveniente utilizar **semiconductor extrínseco**, o sea utilizar dopantes, que significa agregar impurezas intencionalmente, en un semiconductor para modificar su comportamiento eléctrico, como el Boro (B) del grupo tres de la tabla periódica, que constituye impurezas aceptoras determinan el semiconductor tipo **P** o el Fosforo (P)-Antimonio (Sb) del grupo cinco de la tabla periódica, por lo que serán impurezas donoras, constituyendo el semiconductor tipo **N** esto se hace por difusión a temperatura en atmosfera controlada, esto es posible como ya lo mencionamos anteriormente, por las imperfecciones de la estructura cristalina, por vacancia-sustitución, esto es lo que ocurre en los semiconductores, o por átomo intersticial, esto mejora la conductividad del semiconductor al formar la célula uniendo el semiconductor **N con P, el lado del N es donde incidirá la luz solar.**

Es conveniente aclarar que cada átomo de Silicio en estado puro tiene 14 protones y 14 electrones **o sea se encuentra en estado neutro**, ahora al agregar impurezas, al tener un electrón extra en el semiconductor tipo N o al quedar un enlace libre sin electrón decimos que hay un hueco en el semiconductor tipo P, **por lo que concluimos que el semiconductor puro como los semiconductores con impurezas seguirán siendo neutros**, esta condición se modificara al incidir la energía solar, necesitando mas energía solar en el semiconductor puro intrínseco para movilizar a los electrones por tener un ancho de banda prohibido mayor, y menor energía solar en los semiconductores con impurezas extrínseco para movilizar a los electrones debido a tener un ancho de banda prohibida menor.

3.4.1 Juntura P-N

Una juntura P-N consta de un único cristal de silicio que está dopado para producir silicio tipo P de un lado y silicio tipo N del otro, tal como se observa en la Figura 21.

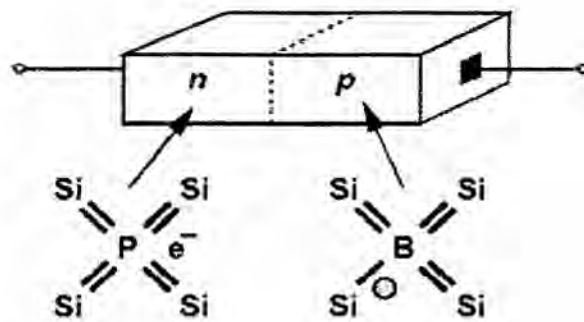


Figura 21: Juntura P-N



La cantidad de células fotovoltaicas a unir eléctricamente, que darán lugar a una superficie predeterminada que tendrá que ver con la cantidad de potencia que se desee generar, esto podría constituir unidades modulares, que por razones de uso podrían conectarse de ser la necesidad en varios módulos para sumar la potencia generada.

En el desarrollo del proyecto, hemos aportado un punto de vista distinto, al convencional, para apartarnos de la alta tecnología y al monopolio de la producción del Silicio Grado Electrónico y Grado Solar, de todas formas soy consciente que para usar Silicio Grado Metalúrgico es necesario adecuar la tecnología y realizar muchas pruebas de laboratorio para verificar la posibilidad real de generación de energía eléctrica mediante el uso del Si-GM

Tampoco hemos dicho demasiado, con relación a la contaminación ambiental, en estos procesos existe contaminación ambiental por el polvo de Silicio silicosis, o por el monóxido de carbono. Es conveniente también señalar que para este proceso se necesita una potencia considerable de energía eléctrica para el funcionamiento del horno eléctrico de arco sumergido, y la abundancia de agua para los circuitos de refrigeración.

No se ha tenido en cuenta muchos detalles de diseño, debido a que no es el propósito del proyecto.

Con relación al regulador de tensión, batería, e inversor equipos necesarios para la utilización de la energía eléctrica generada, no aportaremos consideraciones técnicas debido a que no es el propósito del proyecto, y además que son equipos estandarizados, bastaría con decir que habría que elegir el más adecuado a las necesidades de generación

Con esto consideramos acabado el proyecto, señalando claramente el propósito y su fin social, además de dar consideraciones generales de

diseño, que estoy seguro será de utilidad., tal como se observa en la Figura 22.

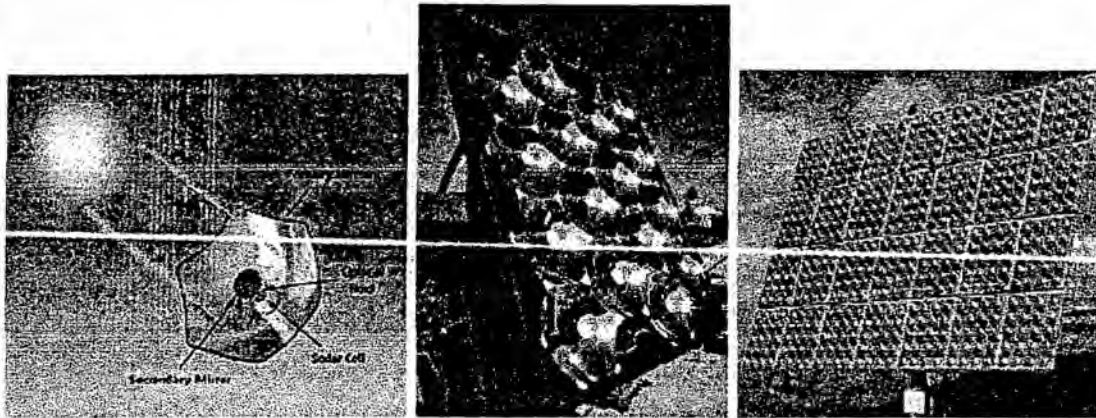


Figura 22: Células fotovoltaicas

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Por tratarse de un proyecto de investigación aplicada, no ha sido necesario precisar el universo ni la muestra.

Hemos utilizado técnicas descriptivas, teniendo en cuenta los siguientes temas.

- Formulación del índice, del desarrollo de los temas.
- Identificación de la información.
- Análisis de la información.
- Redacción del proyecto en función del índice.
- Revisión de la redacción y complementación
- Presentación del proyecto.



V. RESULTADOS

Se ha desarrollado una fundamentación académicamente rigurosa, de la conducción eléctrica en el Silicio al 99 % de pureza, semiconductor intrínseco y semiconductor extrínseco a partir del Silicio Grado Metalúrgico, aceptando una generación eléctrica fotovoltaica de menos calidad y eficiencia, con un propósito social de resolver la carencia de energía eléctrica en los pueblos del Perú profundo, pero que disponen de energía solar todo el año.


VI. DISCUSIÓN

La generación eléctrica fotovoltaica, con posibilidades de competir en costos con otras formas de generación eléctrica, Eólica, térmica, hidráulica y nuclear se hace a partir, del Silicio Grado Solar, con una pureza del 99.999 % esto encarece los costos para ser usado por pueblos muy pequeños y de escasos recursos económicos.

Nota, con los costos actuales de generación eléctrica fotovoltaica, es imposible competir con la generación de energía eléctrica convencional de BASE, inclusive la generación de la energía eléctrica Eólica técnicamente esta mas desarrollada que la fotovoltaica.

6.1 Conclusión

Hasta aquí el desarrollo del proyecto constituye la fundamentación teórica de las especialidades de metalurgia-mecánica, eléctrica y electrónica, de metalurgia-mecánica se ha desarrollado los procesos de cristalización de los metales, no se ha abundado específicamente en el Silicio debido a que debe existir poca bibliografía, esto no puede constituir



una limitación ya que las estructuras cristalográficas son generales a los metales y metaloides, de las especialidades de eléctrica y electrónica, se ha desarrollado los procesos de conducción eléctrica en las estructuras cristalinas, asimismo se ha expuesto la teoría de las bandas de conducción, de los metales, aisladores, y semiconductores, también se ha expuesto en términos claros, que significa, semiconductores intrínsecos e extrínsecos, **y las ventajas que presenta la utilización, de los semiconductores extrínsecos, de tipo N o P,** en la conducción de la corriente eléctrica, debido a que disminuyen el ancho de la banda prohibida, y por ende la energía necesaria que en este caso se utiliza la energía solar, **tenemos que tener claro, que, para que se produzca una corriente eléctrica cuando incide energía solar sobre el material semiconductor, es necesario que los fotones de energía solar tengan una energía mayor que un valor mínimo determinado, que, el ancho de banda prohibida E_g , en la jerga técnica a este ancho de banda se le conoce con el nombre de "gap" de energía y se le expresa en electrón-voltios $1 \text{ eV (electrón-voltio)} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Julios}$.**

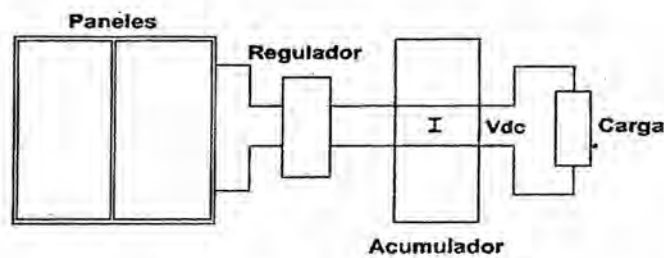
Nos falta desarrollar los procesos metalúrgicos para la obtención del Silicio Metalúrgico, tanto para utilizar los semiconductores intrínsecos o extrínsecos, de esto ya hemos hecho comentarios, debido a que existen procesos modernos y por ende demasiado onerosos, este nunca fue el propósito del proyecto, el aporte modesto que deseo hacer, es desarrollar los procesos metalúrgicos sencillos y no onerosos para que puedan ser utilizados por nuestros técnicos o industriales modestos, tal vez no obtengamos los procesos mas eficientes o los paneles fotovoltaicos para competir con los modernos, el propósito es propiciar tecnología para que haga de nuestra gente de los andes vivir dignamente con energía eléctrica para el uso de los artefactos eléctricos domésticos de uso común

VII. REFERENCIALES

1. **BROWN, G. Z:** Sun, wind & light: architectural design strategies. **New York: Wiley, c2001. (2º ed).**
2. **CASTRO GIL, M.** Sistemas de Bombeo Eólicos y Fotovoltaicos, Artes Gráficas Gala. S.L. Impreso en España
3. **CASTRO GIL, M.** Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red, Artes Gráficas Gala. S.L. Impreso en España
4. **GALLOWAY, TERRY:** La casa solar: guía de diseño, construcción y mantenimiento (1º ed). **A. Madrid Vicente, 2006.**
5. **GREEN, MARTIN A:** Energía fotovoltaica: de la luz solar a la electricidad usando células solares. **Zaragoza, España: Editorial Acribia, 2002.**
6. **GREEN, MARTIN A:** Power to the people: sunlight to electricity using solar cells. Sydney: University of New South Wales Press, 2000.
7. **PORTEOUS, COLIN:** Solar architecture in cool climates. **London; Sterling, VA: Earthscan, 2005**
8. **RINCÓN MEJÍA, EDUARDO A:** Estado del arte de la investigación en energía solar en México. **México: Fundación ICA, 1999.**
9. **SÁNCHEZ MAZA, MIGUEL ÁNGEL.** Energía Solar Fotovoltaica, Editorial Limusa, S.A. DE C.V. México. D.F.

VIII. APÉNDICE (ELABORACION PROPIA)

El proyecto se ha desarrollado para consumos aislados, familias individuales, cargas básicas, iluminación fundamentalmente, y pequeños electrodomésticos, las cargas podrían ser productos en corriente continua o eventualmente corriente alterna, sin ninguna posibilidad de interconexión con la red eléctrica convencional, la potencia de generación, se ha pensado en 500 watt, y el costo de todo el sistema se ha estimado que podría ser de alrededor de S/. 1,500 (un mil quinientos nuevos soles), la generación en corriente continua sería más económica por no necesitar del convertidor.



Esquema de generación en corriente continúa

IX. ANEXOS

GENERACION FOTOVOLTAICA

