



ACTIVO FIJO 155488



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería  
en Electricidad y Computación**

**“Diseño y construcción de un Prototipo  
Experimental Didáctico para controlar  
Electrónicamente el Suministro Eficiente de  
Electricidad a partir de Sistemas no con-  
vencionales de Energía para ser utilizado  
en el Laboratorio de Electrónica Médica  
de la FIEC”**

**TESIS DE GRADO**

Previa a la Obtención del Título de  
**Ingeniero en Electricidad**  
**Especialización: Electrónica**

**PRESENTADO POR:**

***Daniilo Miguel Molina Villacís***

**Guayaquil - Ecuador**

**2000**

## AGRADECIMIENTO

AL ING. MIGUEL YAPUR A.  
Director de Tesis, por su  
colaboración en la elaboración de  
la tesis.

AL ING. RODRIGO  
BERREZUETA por sus sabios  
consejos y enseñanzas para la  
elaboración de esta tesis.

Al Sr. FRANKLIN RODRIGUEZ  
por su colaboración en la  
construcción de las tarjetas  
impresas.

A la Srta. PATRICIA  
CORONADO por su ayuda en la  
digitalización de la Información.

## DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A FLOR

A DANIELITA

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in purple ink, enclosed in a purple oval. The signature appears to read "Danilo Molina V." with a stylized flourish below it.

---

ING. DANILO MOLINA V.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



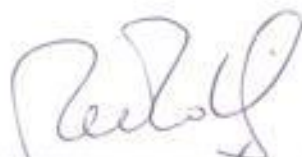
ING. CARLOS MONSALVE  
SUBDECANO DE LA FIEC



ING. MIGUEL YAPUR  
DIRECTOR DE TESIS



ING. NORMAN CHOOTONG  
VOCAL



ING. WASHINGTON MEDINA  
VOCAL

## RESUMEN

El propósito de esta tesis es el de utilizar fuentes de energía no convencionales como son la eólica y la solar para obtener energía eléctrica y suministrar la misma en lugares donde no existen líneas de distribución o para disminuir el consumo de electricidad proveniente de la red pública

Para conseguir este propósito en esta tesis se trata sobre la construcción de un sistema electrónico que sensa durante todo el tiempo el voltaje que producen las fuentes de energía fotovoltaica y eólica, luego determina cual de ellas es la que tiene un nivel suficiente para cargar un banco de baterías y permitirá que esa entrada sea la que alimente al banco. Si ambas entradas tienen el nivel suficiente se activarán las dos y en el caso de que ninguna lo tenga se activará una tercera entrada que permite que las baterías se carguen directamente de la red o en su defecto de algún generador a diesel. El sistema también puede instalarse en lugares remotos y trabajar únicamente con las fuentes eólica y solar. Se trabajará con una etapa de inversión después del banco de baterías para obtener una salida de 110 voltios listos para el consumo doméstico. Se ha realizado una recopilación de datos de radiación solar y de velocidades de los vientos en las centrales meteorológicas del país, para poder estimar cuanta cantidad de energía podemos obtener en dichos lugares y en base a esta información determinar cuales de ellos tienen las mejores características ambientales para la instalación del sistema.

# INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
INDICE DE TABLAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ABREVIATURAS	VII
INTRODUCCIÓN	I
I. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ENERGÍA SOLAR, PANELES FOTOVOLTAICOS, ENERGÍA EÓLICA Y GENERADORES EÓLICOS.	
1.1. La energía solar y su aplicación en los paneles fotovoltaicos	4
1.1.1. Clasificación	4
1.1.2. Espectro solar y su interpretación desde el punto de vista energético.	4
1.1.3. Cantidad de radiación solar en la superficie terrestre	6
1.1.4. ¿Cómo genera electricidad un panel solar?	7
1.1.4.1. Materiales tipo n y tipo p	10
1.1.4.2. Efecto fotovoltaico en la unión p-n	11
1.1.5. Rendimiento de un panel solar	15
1.1.6. Curvas de potencia de un panel solar	20



- 1.2. La energía eólica y principios de fundamentos de un generador eólico. 25
  - 1.2.1. Fuerza electromotriz inducida. 25
  - 1.2.2. Voltaje trifásico 41
  - 1.2.3. Regulador de carga 45
  - 1.2.4. Curvas de potencia de un generador eólico 50
  - 1.2.5. Horas efectivas de viento en un día. 54
  
- II. DETERMINACIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS CONVENIENTE PARA OBTENER ELECTRICIDAD PROVENIENTE DE LAS FUENTES EÓLICAS Y SOLARES.
  - 2.1. Costo del kilowatio-hora (kwh) obtenido de la energía solar en el Ecuador 58
  - 2.2. Determinación de la velocidad de viento mínima para la cual el generador eólico es preferible sobre los paneles solares. 59
  - 2.3. Determinación de la velocidad de viento para la cual el precio del kilowatio- hora obtenido del generador eólico es igual al producido por la empresa eléctrica. 61
  
- III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA DOTAR DE ELECTRICIDAD AL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA MÉDICA DE LA FIEC.
  - 3.1. Diseño del Circuito Seleccionador Jerárquico 64
    - 3.1.1. Criterios para determinar el orden de prioridad de las entradas de energía al circuito. 64
      - 3.1.1.1. Etapa de Comparación de los niveles de voltaje de las fuentes eólica y solar 65
      - 3.1.1.2. Etapa de selección de las entradas que alimentarán al banco de baterías. 68



3.1.2. Voltaje de polarización para el circuito de prioridad	70
3.1.2.1. Circuito de oscilación y duplicación de voltaje	70
3.1.2.2. Regulación del voltaje de polarización	74
3.2. Regulación del voltaje para alimentar a la carga	75
3.3. Circuito de protección contra sobrecarga y descarga excesiva del banco de baterías	75
3.4. Circuito de autopolarización del sistema usando fuentes no convencionales	79
3.5. Inversor de Voltaje	80
3.5.1. Etapa de Oscilación	80
3.5.2. Etapa de amplificación de corriente	81
3.6. Gráficas en Pspice	92
<b>IV. DIMENSIONAMIENTO DEL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA MÉDICA DE LA FIEC</b>	
4.1. Cálculo de la energía requerida por el laboratorio	89
4.2. Determinación de la potencia suministrada por los generadores cólicos	89
4.3. Determinación de la potencia suministrada por los paneles fotovoltaicos	90
4.4. Costos de instalación	90
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
<b>APÉNDICES</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	El Espectro Solar	5
Figura 1.2	Irradiación Solar versus longitud de onda	6
Figura 1.3	Estructura atómica del germanio y del silicio	8
Figura 1.4	Unión Covalente del átomo del Silicio	8
Figura 1.5	Banda de valencia para aislantes, semiconductores y Conductores	9
Figura 1.6	Impureza de Antimonio en el material tipo N	10
Figura 1.7	Flujo de electrones en función del flujo de huecos	11
Figura 1.8	Unión en la cual se muestran los portadores minoritarios y los mayoritarios	12
Figura 1.9	Campo Eléctrico formado desde N hasta P	13
Figura 1.10	Representación Eléctrica de una celda fotovoltaica	13
Figura 1.11	Espectro de Energía de los Fotones	15
Figura 1.12	Espectro de Potencia	16
Figura 1.13	Curva de Potencia de una panel solar real	19
Figura 1.14	Característica Voltaje versus corriente de un panel solar en el cual se indica el punto de máxima potencia	21
Figura 1.15	Curva de potencia de un panel solar ARCO SOLAR SX 110	22

Figura 1.16	Curvas de Equipotencia	23
Figura 1.17	Curvas de potencia bien adaptadas y mal adaptadas	24
Figura 1.18	Campo Magnético de un imán y una barra deslizante	26
Figura 1.19	Regla de la mano derecha	27
Figura 1.20	Corriente inducida en la barra CD	28
Figura 1.21	Flujo Magnético a través de una superficie	29
Figura 1.22	Flujo Magnético a través de una superficie que se inclina	31
Figura 1.23	Corriente Inducida que crea un campo contrario	33
Figura 1.24	Polos Norte y Sur con dos bobinas	35
Figura 1.25	Voltajes en la bobina ab, bobina bc y bobina ca	36
Figura 1.26	Crecimiento de voltaje inducido pico a medida que aumenta la velocidad angular	37
Figura 1.27	Dos polos nortes y dos polos sures	38
Figura 1.28	Enlaces de flujos en una estructura con cuatro polos	39
Figura 1.29	Curvas de Voltaje con frecuencia duplicada y rectificadas	40
Figura 1.30	Generador con un solo imán y cuatro bobinas bifásico	41
Figura 1.31	Voltajes generados en el generador bifásico	42
Figura 1.32	Generador Trifásico	42
Figura 1.33-a	Puentes Rectificadores de Voltajes	43
Figura 1.33-b	Ondas generadas en el generador trifásico	43
Figura 3.4	Estructura de la realimentación negativa	71

Figura 1.33-c	Voltaje Trifásico Rectificado	43
Figura 1.34	Esquema Eléctrico de un sistema Trifásico	44
Figura 1.35	Estructura en Y	44
Figura 1.36	Electroimán	45
Figura 1.37	Variación del flujo Magnético contra la corriente que lo genera.	46
Figura 1.38	Generador Trifásico con Electroimán	47
Figura 1.39	Diagrama Eléctrico de un generador trifásico incluyendo puentes de diodos, baterías y regulador de carga	48
Figura 1.40	Variación del Voltaje generado para varias corrientes de armadura y para varias revoluciones	49
Figura 1.41	Salida de un generador trifásico para varias RPM	50
Figura 1.42	Curva de Potencia de un generador de 300 vatios	51
Figura 1.43	Curva de Potencia de un generador de 500 vatios.	52
Figura 1.44	Salida de Voltaje para un generador eólico para varias RPM	53
Figura 3.1	Voltaje de Histéresis en el cual se muestra Voltaje de referencia, de subida y de bajada	65
Figura 3.2	Etapa de comparación de voltajes de entrada de las fuentes no convencionales de energía	67
Figura 3.3	Circuito de Selección de la entradas que alimentaran al banco de baterías	68

Figura 3.4	Estructura de la realimentación negativa	71
Figura 3.5	Estructura de la realimentación positiva	72
Figura 3.6	Oscilador utilizado para polarizar los opamps del circuito seleccionador de entradas	73
Figura 3.7	Circuito de protección contra sobrecarga y descarga excesiva del banco de baterías	78
Figura 3.8	Carga de la batería a través de un regulador y considerando la resistencia interna	79
Figura 3.9	Diagrama del circuito seleccionador Jerárquico para determinar el orden de prioridad de las entradas de energía al banco de baterías	85
Figura 3.10	Circuito de Inversión de 12 v d.c. a 110 v a.c.	86
Figura 3.11	Curva de voltaje de molino de viento y del panel solar	87
Figura 3.12	Señales de Activación vs señales de corriente	88
Figura 3.13	Señales de Activación versus señales de Voltaje vs señales de corriente	89
Figura 3.14	Corriente de carga del banco de baterías	90

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.	
Tabla I	Variacion de la potencia total irradiada por el sol en diferentes Condiciones atmosféricas	17
Tabla II	kilowatio hora por mes para diferentes modelos y diferentes Velocidades de viento	104
Tabla III	Ecuaciones que definen las curvas de potencia de algunos Generadores eolicos comerciales	54



## SIMBOLOGIA

Ge.	Germanio
Si	Silicio
Eg	Energía de banda prohibida
eV.	Electrón voltio
V.	Voltaje o Potencial
Q.	Carga del electrón
J.	Joules
P	material tipo p
N	material tipo n
B.	Inducción Magnética
F.	fuerza
V.	Velocidad
I	Corriente

A:	Area
$\theta$ :	Angulo entre A y B
$\epsilon$ :	fuerza electromotriz inducida
w:	trabajo
$\lambda$ :	longitud de onda
$\Phi$ :	enlace de flujo
$\Phi_m$ :	flujo magnético máximo
w:	frecuencia angular
$E_{RMS}$ :	Valor de Raiz Media Cuadrada de Voltaje Generado
N:	Número de vueltas de espiras
f:	frecuencia en hertz
Kwh	kilowatio-hora
$V_o$ :	Voltaje de Salida del Operacional.
$V_{ref}$ :	Voltaje de Referencia
$V_l$ :	Voltaje de umbral inferior.
$V_{up}$ :	Voltaje de umbral superior.
$V_{fnc}$ :	Voltaje de fuente no convencional
d.c.	Corriente Directa
a.c.	Corriente Alterna

## INTRODUCCIÓN

La MISIÓN Y VISION del INGENIERO del siglo XXI es diferente a la que fue en el pasado. La época de los científicos puros, encerrados y aislados en sus laboratorios como Tomás Alva Edison ha pasado. Hoy en día, el ingeniero se involucra en la solución de problemas que afectan directamente a la sociedad tales como: la contaminación del agua, la solución del transporte urbano, la degradación de los recursos naturales, el problema de la energía, la optimización de los recursos no renovables, el aumento de la productividad, el mejoramiento de las especies vegetales y animales para enfrentar la desnutrición, la predicción de los fenómenos ambientales, la optimización de la administración de los servicios básicos en las ciudades y en muchas otras aplicaciones que el quehacer humano involucra.

El ingeniero actual debe enfrentarse a un gran desafío que es el de trabajar interdisciplinariamente con otros profesionales de ramas, aparentemente desligadas de la suya, pero que en realidad están muy vinculadas para poder encontrar las soluciones a los problemas actuales.

La solución a los problemas actuales no involucra únicamente a un profesional determinado sino a un grupo de los mismos, debido a que en el mundo real no existe un problema puramente físico, químico, eléctrico, mecánico, biológico o

computacional, sino que en su solución se van presentando varias etapas que implican la participación de profesionales diferentes en cada una de ellas.

Toda solución a un problema real implica un estudio profundo, tiene una base electro-mecánica, física química o biológica, la cual puede ser modelada matemáticamente, mejorada a través de métodos de optimización, controlada a través de métodos computacionales, analizada desde el punto de vista económico, regida por los criterios de la administración de empresas, sus resultados medidos a través de métodos de cuantificación y en su etapa final participarán publicistas que se encargaran de convencer al público que esta solución es conveniente para ellos. De esta manera debemos acostumbrarnos a trabajar.

Para la realización de este trabajo tuve que consultar con ingenieros mecánicos, eléctricos, electrónicos, navales, físicos, estudiantes de computación y maestros de la rama metal mecánica.

Debido a que uno de los grandes problemas de nuestro tiempo consiste en como ahorrar energía, es que nace la idea de realizar este trabajo. El problema energético en el mundo se agudiza y particularmente en nuestro país. Desde muchos años se vienen probando nuevas formas de energía

alternativa en todas partes del mundo, pero en nuestro país, esto, recién empieza.

El presente trabajo no busca solucionar el problema energético sino interesar a estudiantes, profesionales, organizaciones no gubernamentales y gubernamentales u otros organismos internacionales en el estudio e investigación de estas nuevas fuentes de energía en el Ecuador, presentando para ello un prototipo experimental para el uso de energía eólica, solar y su respectiva conversión a energía eléctrica.

Se puede obtener energía eléctrica usando paneles solares y generadores eólicos; y la cantidad obtenida dependerá de las condiciones ambientales del lugar escogido. Estos dispositivos pueden instalarse en lugares donde no existe tendido eléctrico o para ahorrar energía en aquellos lugares distantes de la red que usen generadores a diesel, para ahorrar el consumo de combustible con la energía que se puede obtener del medio ambiente y presenta la ventaja que no contamina. El sistema se encarga de priorizar las entradas ya sea eólica, solar, red o generador para cargar un banco de baterías en el cual se almacenará la energía. Si no existe sol en ese momento el que carga a las baterías es el generador eólico, si no existe viento el que carga es el panel solar y si no existiese ninguno de los dos, la tercera entrada se activaría y el

que cargaría a las baterías sería el generador a diesel o la red eléctrica, según sea el caso.

En los apéndices se presentan la cantidad de radiación solar y velocidades de los vientos en diferentes lugares del país y basados en ellos, la cantidad de energía posibles de obtener en los mismos.



## **CAPÍTULO I**

**CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ENERGÍA SOLAR,  
PANELES FOTOVOLTAICOS, ENERGÍA EÓLICA Y  
GENERADORES EÓLICOS.**

Existen muchas formas de utilizar la energía eólica y la solar como por ejemplo: el calentamiento de agua para la industria, agricultura y edificios; utilizando colectores solares, para secar granos y mantener la temperatura en invernaderos. La energía eólica se puede usar para ahorrar combustible en embarcaciones a vela, para extraer agua de pozos o moler granos. Sin embargo, el objetivo de esta tesis es trabajar con ellos, únicamente, en su aplicación para generar electricidad.

## **1.1 La Energía Solar y su aplicación en paneles fotovoltaicos.**

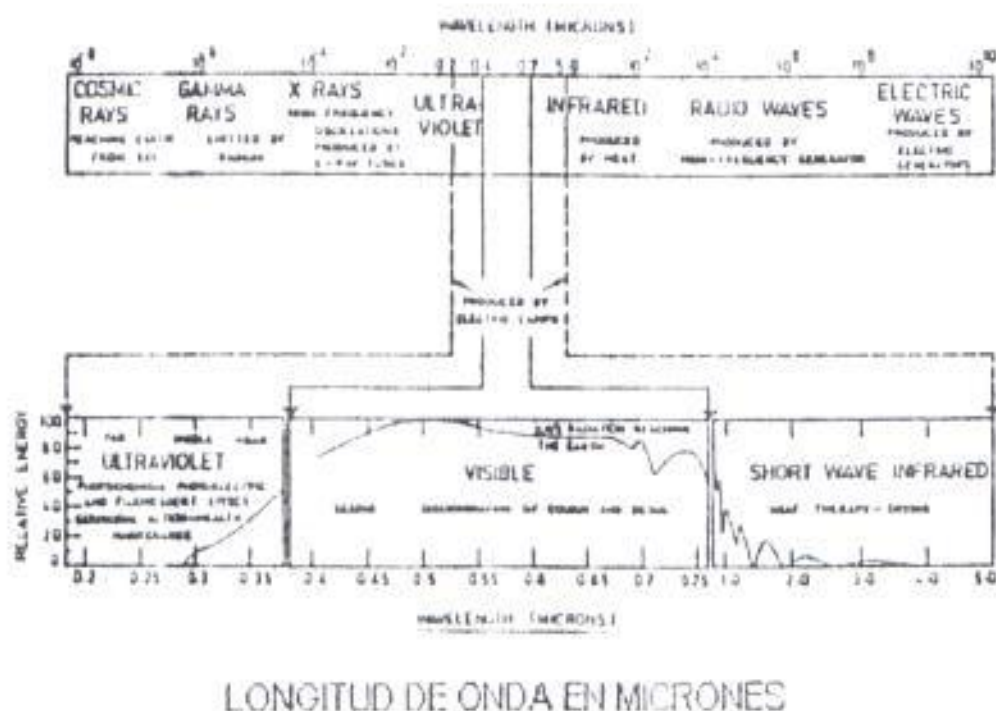
### **1.1.1. Clasificación.**

La radiación solar se divide en dos tipos: la difusa y la directa. Ambas forman la radiación solar total. La que nos interesa a nosotros propiamente es la directa, puesto que es la que incide sobre la superficie del panel solar y produce la energía eléctrica. La radiación difusa es aquella que se pierde en el trayecto a la superficie del suelo debido a que se refleja en las nubes.

### **1.1.2. Espectro Solar y su interpretación desde el punto de vista energético.**

En la figura 1.1 podemos apreciar el espectro electromagnético y en ella hemos indicado la porción del mismo que corresponde a las radiaciones solares que emiten energía. Podemos apreciar que abarca desde los 0.25

micrómetros hasta los 4 micrómetros de longitud de onda. Podemos ver que la mayor cantidad de energía corresponde a la región de la luz visible que abarca desde los 0.4 micrómetros de la luz violeta hasta los 0.72 micrómetros del color rojo. Las ondas que están fuera de este rango, hasta los 4 micrómetros, poseen energía, pero en menor cantidad. Lastimosamente, no podemos aprovechar todo este rango, debido a que el material fotovoltaico, e es el que se utiliza para la conversión, trabaja hasta valores de longitud de onda muy cercanos a uno, como 1.13, 1.14, 1.15. El resto de la energía se convierte en calor.



**Figura 1.1: EL ESPECTRO SOLAR**  
(tomado del libro Energía Solar Fotovoltaica)

### 1.1.3. Cantidad de radiación solar en la superficie terrestre

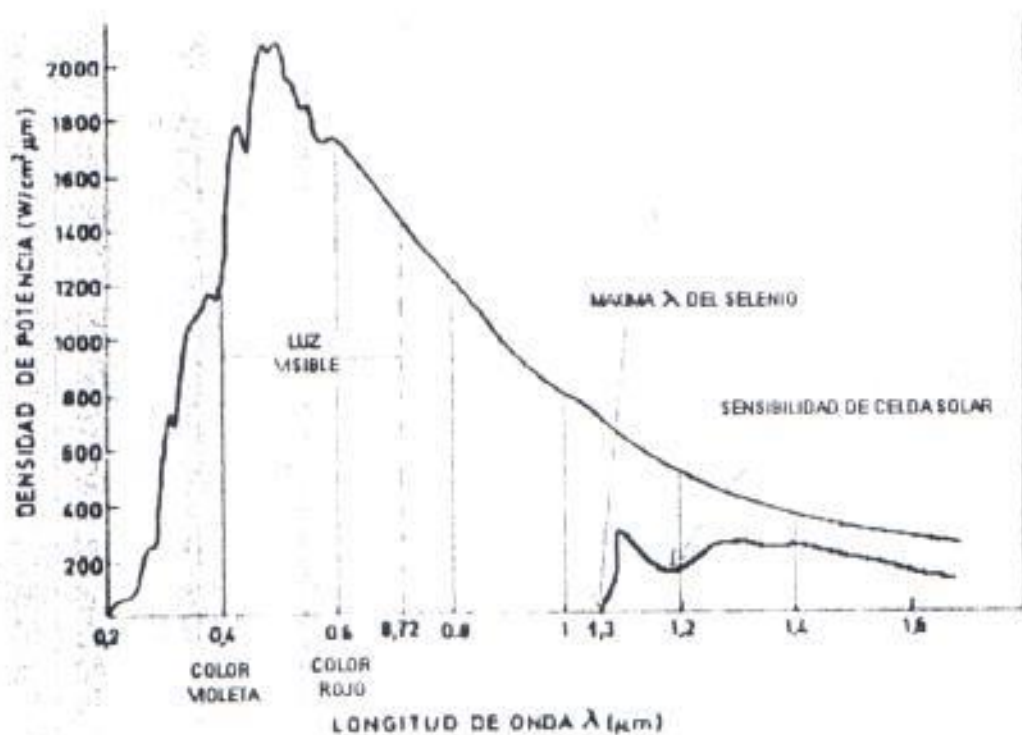


Figura 1.2: RADIACIÓN SOLAR VERSUS LONGITUD DE ONDA

Observando la figura 1.2, vemos que la luz visible abarca desde color violeta cuya longitud de onda es de  $0,4 \mu\text{m}$  hasta el rojo que es  $0,72 \mu\text{m}$ . La longitud de onda del selenio es  $1,13 \mu\text{m}$  y éste es el límite para la conversión de energía. Lo que en otras palabras quiere decir que la energía que podemos obtener es igual a la integral de la curva de irradiación solar desde cero hasta  $1,13 \mu\text{m}$  que es la longitud de onda del silicio. Para aumentar el rendimiento deberíamos encontrar un elemento que sea semiconductor y cuya longitud de onda

sea mayor, pero eso no es posible hasta ahora. Así, las posibilidades de obtener energía eléctrica de los paneles solares son muy limitadas.

### **1.1.3. Cómo genera electricidad un panel solar.**

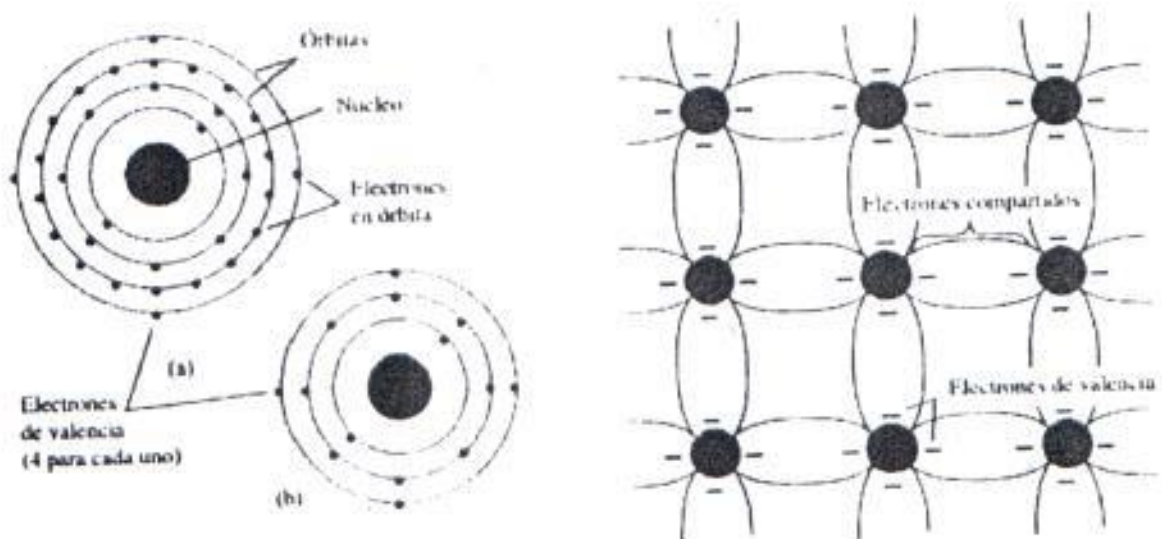
Para entender mejor la conversión, debemos analizar las características y el funcionamiento de las células fotovoltaicas y de los materiales usados en su construcción.

La estructura atómica del átomo se compone de tres partículas básicas: protón, electrón y neutrón, de los cuales el protón y el neutrón forman el núcleo; y los electrones forman órbitas alrededor del núcleo.

Existen unos materiales llamados semiconductores, de los cuales los más usados son el germanio (Ge) y el Silicio (Si), que son los que se utilizan como material fotovoltaico, pero entre ambos el más usado es el Silicio.

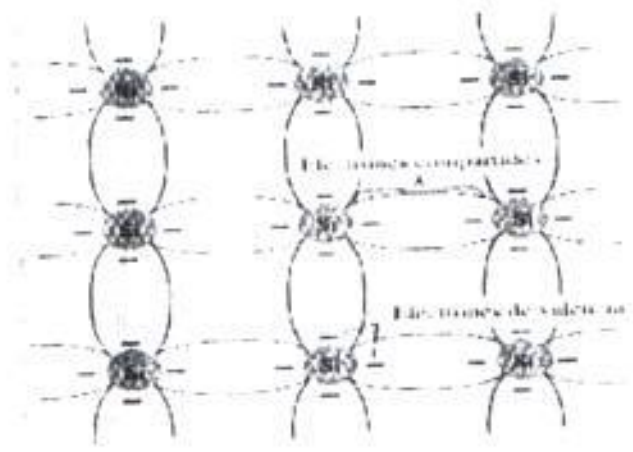
El Germanio posee 32 electrones en sus órbitas y el Silicio 14; pero ambos tienen en su última órbita, llamada banda de Valencia, 4 electrones como se puede apreciar en la figura 1.3.





**Figura 1.3: ESTRUCTURA ATOMICA DEL GERMANIO Y DEL SILICIO.**

Estos electrones se unen a otros cuatro y se denomina a esto unión covalente, cuya representación es como se muestra en la figura 1.4

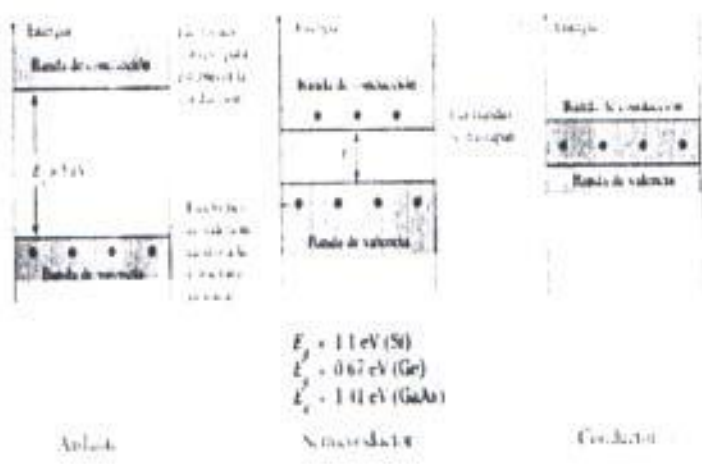


**Figura 1.4: UNION COVALENTE DEL ATOMO DEL SILICIO**



Para que estos electrones pasen de la banda de Valencia a la banda de conducción deben pasar por la banda prohibida, para esto, un electrón debe absorber suficiente energía para separarse de su estructura atómica; a este proceso se le llama ionización. La unidad de energía asociada a cada electrón se denomina electrón-voltio (eV).

Esto podemos verlo mejor en la figura 1.5.



**Figura 1.5: BANDA DE VALENCIA PARA AISLANTE SEMICONDUCTORES Y CONDUCTORES**

Esta medida se obtiene de la definición de voltaje que es

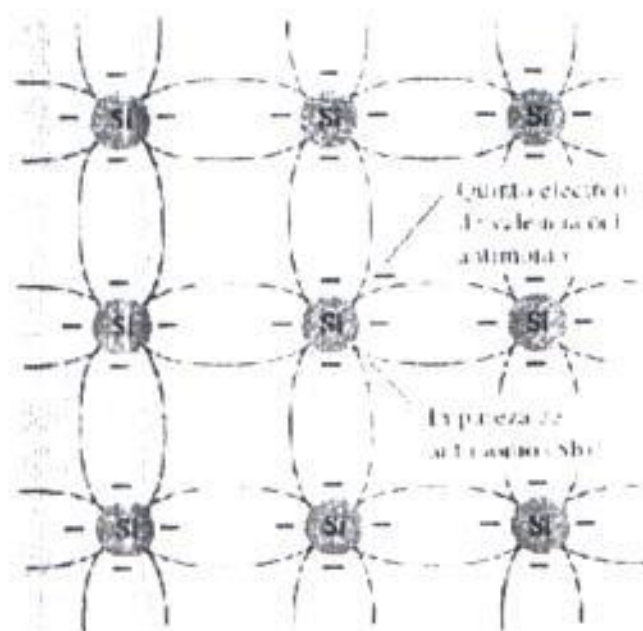
$$V = W/q \quad ; \quad \text{donde } q \text{ es la carga de 1 electrón}$$

$$W = V \cdot q \quad \text{entonces} \quad W = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1v.$$

Por lo cual  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$

### 1.1.4.1. Materiales tipo p y tipo n.

A los semiconductores se los "dopa", esto es se le agrega cierta cantidad de impurezas para dar origen a dos tipos de materiales el tipo n y el tipo p.

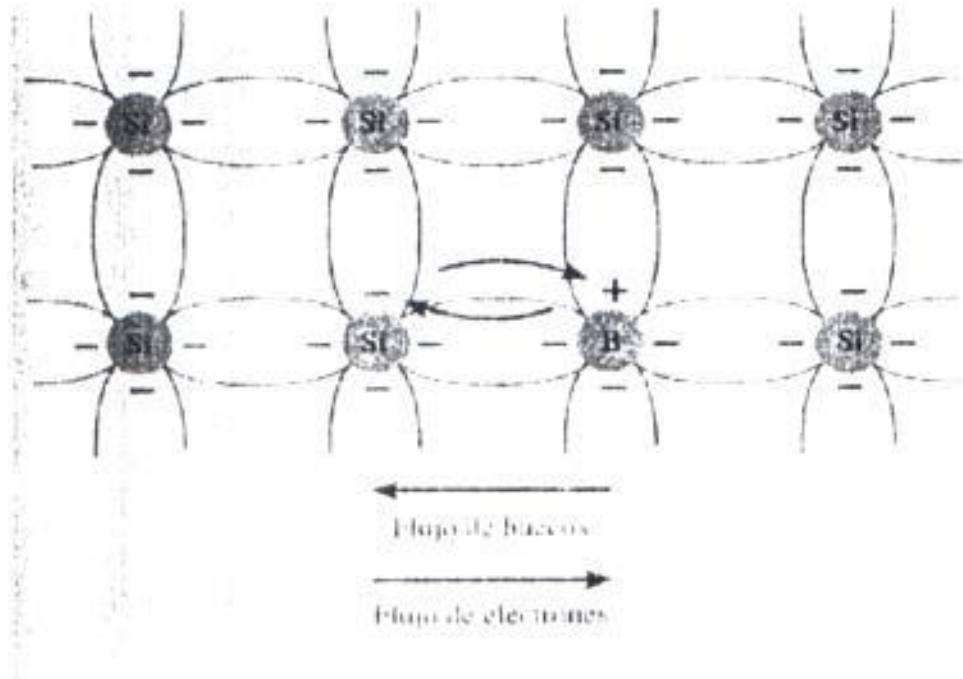


**Figura 1.6: IMPUREZA DE ANTIMONIO EN EL MATERIAL TIPO N**

El material tipo n se forma agregando impurezas de cinco electrones de Valencia como Antimonio, Arsénico y Fosforo. Como podemos ver en la figura 1.6, el quinto electrón, está unido debilmente a su órbita y se necesita un nivel de energía menor, que en las otras órbitas, para que pueda pasar a la banda de conducción.

El material tipo p se forma agregando átomos que contengan 3 electrones de Valencia como el Boro, Galio e Indio, por lo tanto queda un espacio vacío.

El flujo de electrones y los huecos se representa en la figura 1.7



**Figura 1.7: FLUJO DE ELECTRONES EN FUNCION DE FLUJO DE HUECOS**  
(tomado del libro Circuitos Electrónicos de Boylestad)

#### 1.1.4.2. Efecto fotovoltaico en la unión p-n.

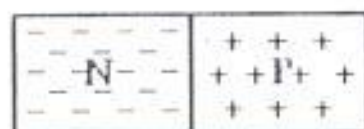
Ahora sí, con estos fundamentos podemos explicar el funcionamiento de la célula fotovoltaica

Al incidir los rayos solares sobre la superficie del semiconductor, los fotones, que son partículas de nivel de energía muy semejante a la de los electrones de Valencia, hacen que se rompan los enlaces y aparezca el par electrón-hueco, pero estos se recombinan rápidamente impidiendo el flujo de corriente eléctrica.

Para que exista la corriente eléctrica deben orientarse los electrones en una dirección y los huecos en la dirección opuesta. Esto se consigue creando un campo eléctrico que los oriente. Pero, ¿Cómo se puede hacer aparecer un campo eléctrico dentro de un semiconductor con distinta afinidad electrónica?

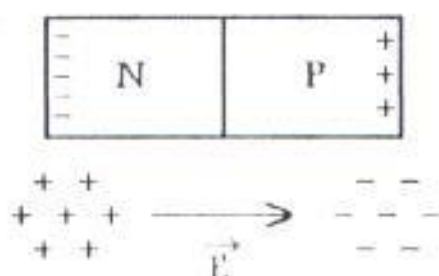
Al utilizar los materiales tipo p y n, en la unión se crea un campo eléctrico dirigido de n a p que envía los electrones a la zona n y los huecos a la zona p.

Veamos la figura 1.8:



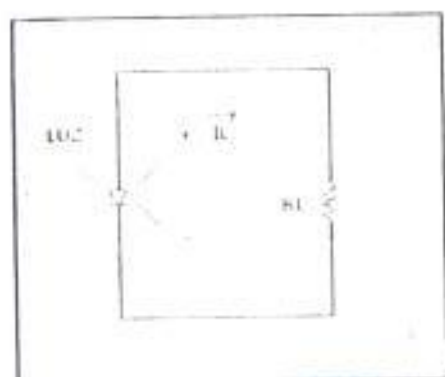
**Figura 1.8: UNIÓN PN EN LA CUAL SE MUESTRAN LOS PORTADORES MINORITARIOS (-) Y LOS PORTADORES MAYORITARIOS (+)**

Al haber exceso de electrones en la zona n y falta de ellos (huecos) en la zona p, de manera natural unos electrones fluyen hacia la zona p, creando de esta manera una especie de polo positivo en la zona n y una especie de polo negativo en la zona p, como se ve en la figura 1.9.



**Figura 1. 9: CAMPO ELECTRICO FORMADO DESDE N HASTA P.**

Al formarse esta polarización, la celda está lista para conducir y cuando la energía solar incida sobre la celda, los electrones libres se dirigirán de la zona p hacia la zona n y los huecos de la zona n hacia la p. Como la corriente convencional, es de sentido contrario a la electrónica, se suele representar a la celda fotovoltaica como un diodo que conduce inversamente. Ver figura 1. 10:



**Figura 1.10: REPRESENTACIÓN ELÉCTRICA DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA.**

No todos los fotones son útiles para la conversión en energía eléctrica porque si poseen menor energía que el nivel de la banda prohibida ( $E_g$ ), no podrán romper el enlace covalente. Sólo sirven aquellos que tienen energía igual o superior a  $E_g$  porque si podrán romper el enlace y habrá corriente, pero aún así parte de su energía se perderá como calor.

Para saber cuáles fotones son los útiles, analizaremos su longitud de onda, ( $\lambda$ ) mediante la ecuación:

$$\lambda \leq hc/E_g$$

donde:

-h es la constante de Planck

-c es la velocidad de la luz



- $E_g$  anchura de banda prohibida

- $E_g$  del Silicio es 1.11 eV.

$$\lambda \leq (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})(6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}) / 1.1(1.6 \cdot 10^{-19}) = 1.13 \mu\text{m}.$$

Esto lo podemos entender mejor observando la figura 1.11:

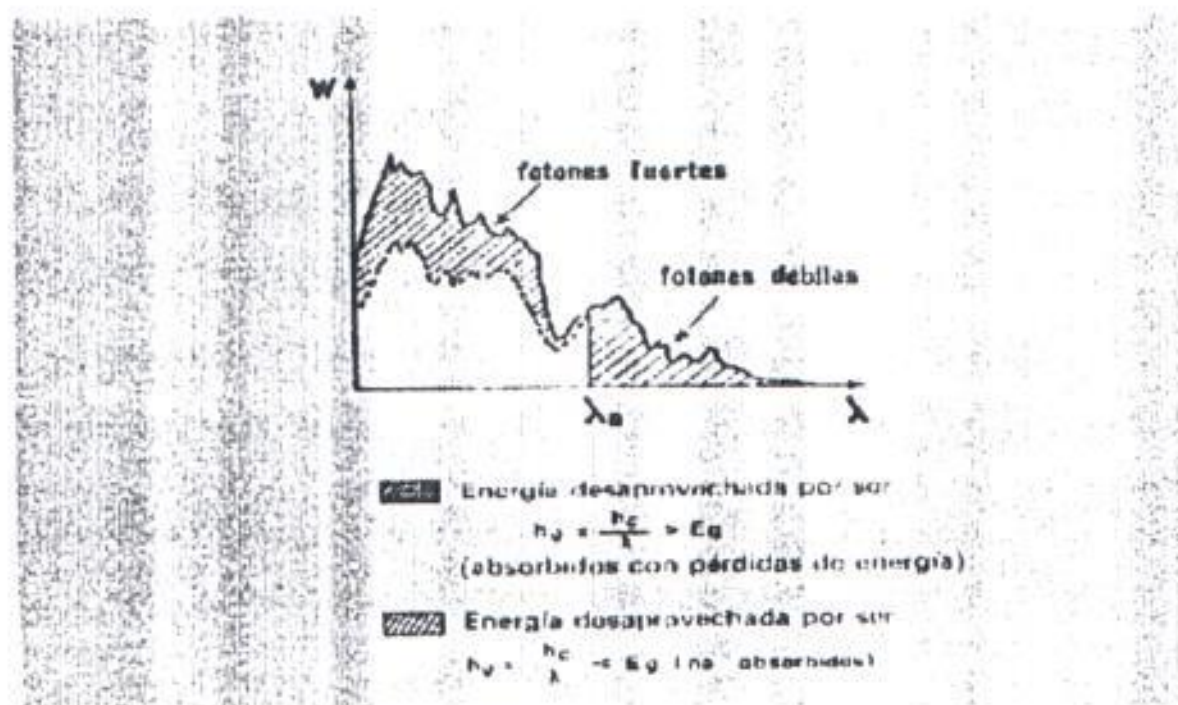


Figura 1.11: ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS FOTONES  
(tomado del libro Energía Solar Fotovoltaica)

#### 1.1.4. Rendimiento de un panel solar.

Los paneles solares tienen una eficiencia de conversión aproximada del 10 por ciento de la cantidad de radiación solar que reciben. La radiación solar que incide en la superficie terrestre es aproximadamente 5 kilowatios por metro cuadrado, pero ésta la constituyen algunos tipos de ondas, como las caloríficas y las lumínicas, de estas últimas hay las que son visibles para el ojo humano y otras que no lo son. Las que nos interesan a nosotros, para poder utilizar los paneles solares son únicamente las lumínicas. Éstas son aproximadamente la quinta parte del total; esto es, 1 kilowatio por metro cuadrado. Esto nos indica que tomando en cuenta el 10% de eficiencia del panel solar, disponemos de 100 watios por metro cuadrado de celda solar. Debemos tomar en cuenta que esto será únicamente mientras haya un ciento por ciento de radiación solar. A medida que ésta vaya bajando también lo hará la cantidad de energía que genere el panel solar. Debe quedar bien claro que si se tiene un panel solar de determinada potencia nominal, éste no va a dar esa potencia durante las doce horas de luz que tienen el día, lo cual debe tomarse en cuenta para el correcto dimensionamiento de la potencia instalada.

En la figura 1.12 podemos observar el espectro de potencia de la energía solar fuera de la atmósfera. La potencia total recibida por unidad de superficie es

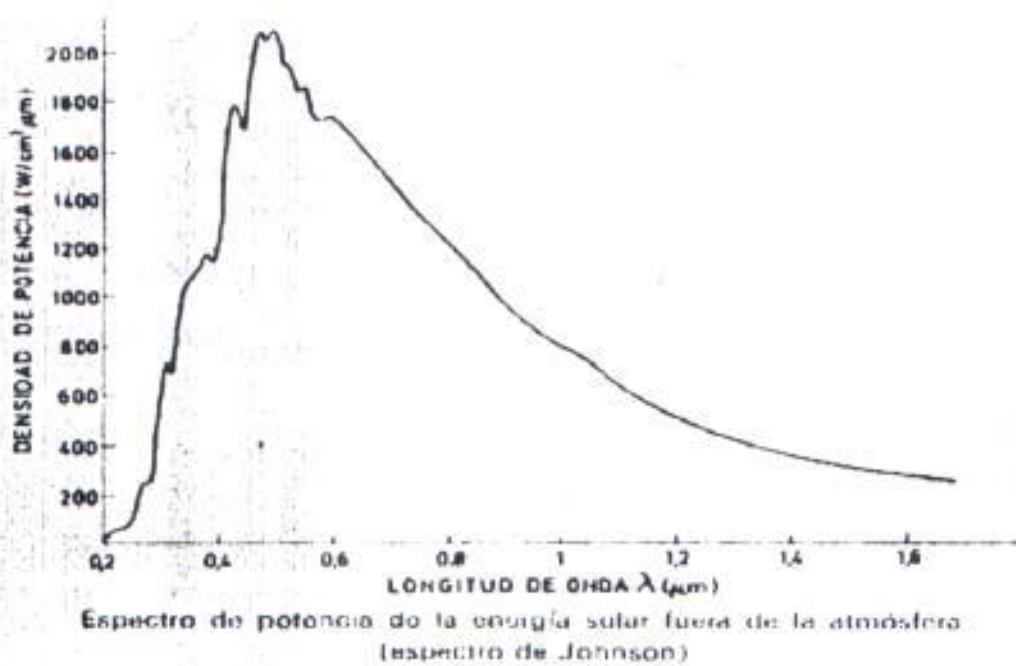


Figura 1.12: ESPECTRO DE POTENCIA.

La tabla 1 muestra la variación de la potencia solar total en diferentes condiciones ambientales.

TABLA I

VARIACIÓN DE LA POTENCIA TOTAL IRRADIADA  
POR EL SOL EN DIFERENTES CONDICIONES  
AMBIENTALES

CONDICIONES ATMOSFERICAS	POTENCIA TOTAL ( $mW/cm^2$ )
Fuera de la atmosfera	135
Nivel del mar. Sol en el cenit día claro	106
Nivel del mar. Humedad relativa del 50 %	89
Nivel del mar. Día claro Sol a 60° del cenit	88

Potencia total entregada por el Sol en diversos casos de condiciones atmosféricas.

Debemos analizar el concepto de celda solar, pues ésta es el área que va a generar la energía y no toda el área del panel solar. Esto se debe a que el módulo completo tiene filamentos metálicos y espacios intersticiales, entre celda y celda y las células fotovoltaicas propiamente dichas. Con esta información podemos crear el concepto de "área efectiva" que es el parámetro que realmente nos interesa. Se calcula de la siguiente manera

1. Se toma el área de la celda que es dato de fábrica o se puede medir si no lo tenemos
2. Se cuenta el número de celdas
3. Se multiplica el área de una celda por el número de las mismas

Así se obtiene el área efectiva

Luego, multiplicamos por 1000 watios que es la cantidad de energía que recibe el panel y luego multiplicamos por la eficiencia del panel (10%). De esta manera obtenemos la energía obtenida del panel a plena intensidad solar.

Ejemplo

Se tiene un panel de 1290 mm de largo por 330 mm de ancho y 36 celdas cuadradas de 101.6mm de lado. ¿Cuanta energía producirá?

Solución

1. Área de celda es  $(101.6\text{mm})^2 = 0.010\text{ m}^2$
2. Número de celdas: 36
3. Área por celdas  $(0.010) \cdot (36) = 0.3716\text{m}^2$

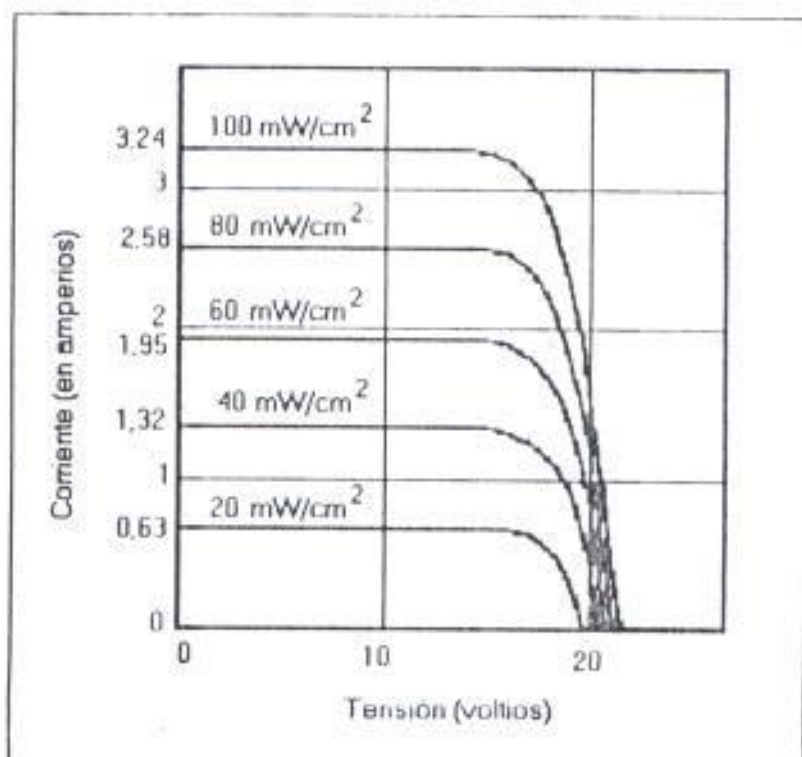
Si multiplicamos 0.3716 por 1000 watios y por 10% de eficiencia obtenemos:

$$(0.3716) \cdot (1000) \cdot (0.10) = 37.16 \text{ watios}$$

Como podemos apreciar el área efectiva es  $0.3716\text{ m}^2$  y el área del panel es 1290mm por 330 mm lo que nos da  $0.4257\text{m}^2$ . Por lo tanto, no se debe trabajar con las dimensiones del panel sino con el área efectiva.

Analicemos la figura 1.13 en la cual tenemos una curva de potencia de un panel solar.





**Figura 1.13: CURVAS DE POTENCIA DE UN PANEL REAL MARCA KYOCERA**

La intensidad solar es proporcional a la corriente de corto circuito del panel

Por lo tanto a un 100% de intensidad solar, esto es,  $1000 \text{ w/m}^2$ , se obtendrá la mayor corriente de cortocircuito que puede dar el panel. Para el módulo solar LA361651S, de la marca KYOCERA, esto es 3.24 A. Si medimos en diferentes momentos del día la corriente de cortocircuito sabremos la cantidad de intensidad solar que está presente en esos respectivos momentos.

Cuando la corriente llega a 2.58 A, la intensidad solar habrá disminuido a  $800 \text{ w/m}^2$  u 80%. A lo largo del día la intensidad solar irá variando y por ende la



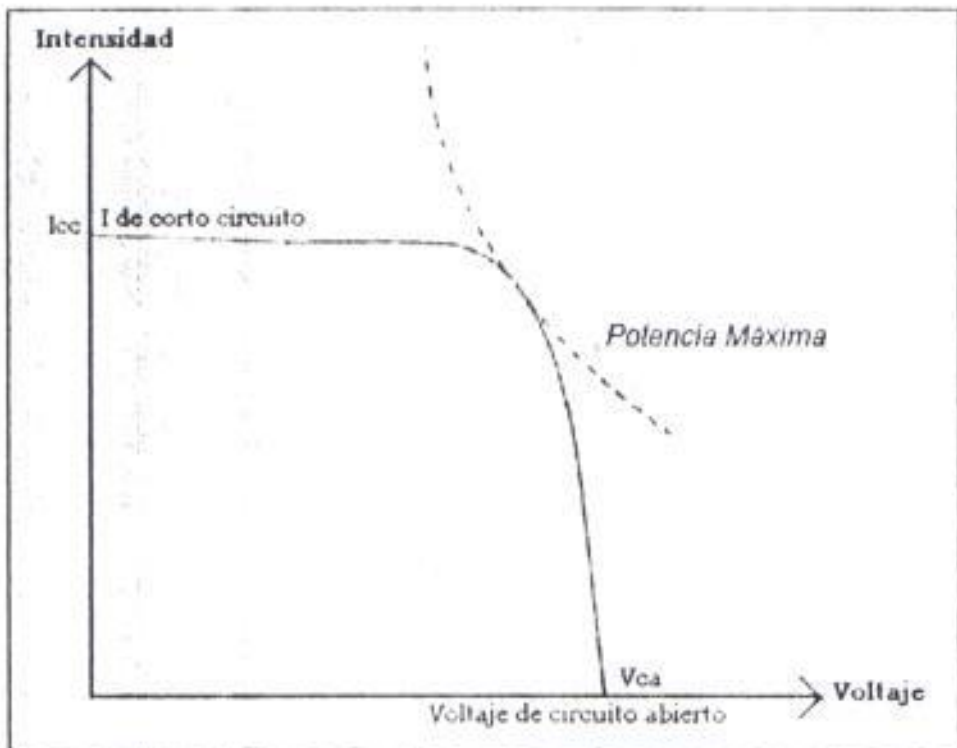
corriente también lo hará. Así es como cuando la corriente indique 1.95 A la intensidad será  $600 \text{ w/m}^2$  o 60%.

Si la corriente es 1.32 A la intensidad será  $400 \text{ w/m}^2$  o sea 40%. Si la corriente es 0.63 A la intensidad será  $20 \text{ w/m}^2$  o 20%.

Puede observarse en la curva voltaje vs corriente de la figura 1.13, que ésta presenta un codo, en ese lugar es que se obtiene la mayor potencia del panel ya que ésta es producto del voltaje por la corriente y es en el codo precisamente que este valor es más alto. Se debe tratar que el panel esté en este punto de operación para lograr el máximo rendimiento del panel.

#### **1.1.5. Curvas de potencia de un panel solar.**

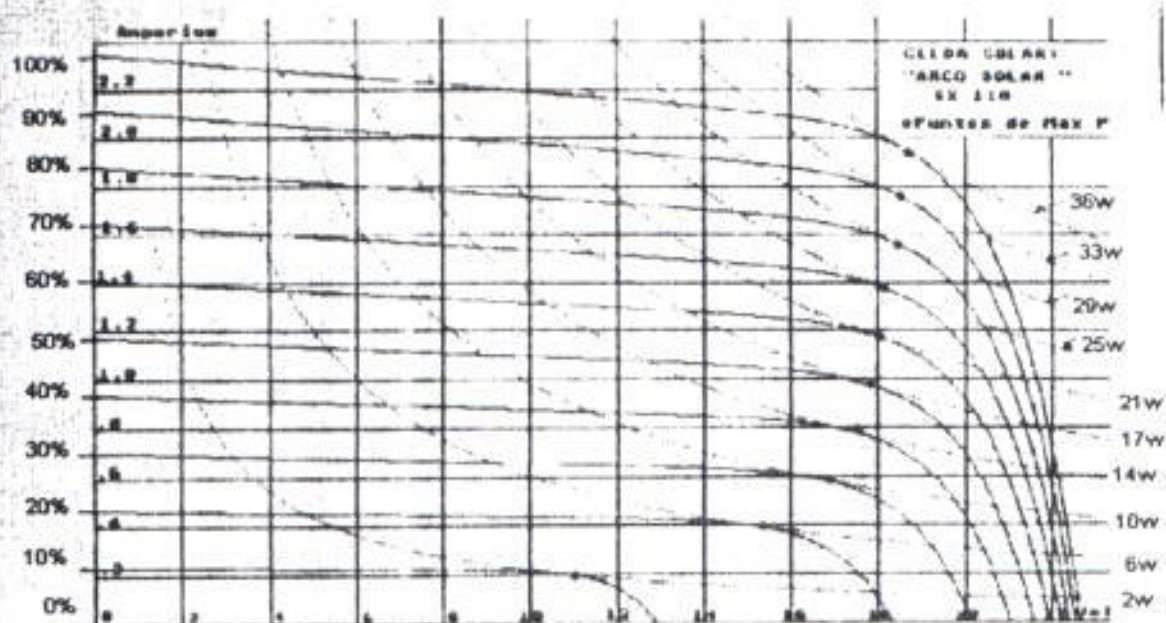
La célula fotovoltaica por ser un dispositivo eléctrico posee su característica de voltaje y corriente como podemos apreciar en la figura



**Figura 1.14: CARACTERÍSTICA VOLTAJE VERSUS CORRIENTE DE UN PANEL SOLAR EN EL CUAL SE INDICA EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA**

Si se coloca un voltímetro en paralelo y un amperímetro en serie con el panel solar se obtendrá una curva como la de la figura 1.14. Si se multiplican los valores de corriente y los de voltaje se obtendrán valores de potencia y se verá que el punto de máxima potencia corresponde al codo de la curva.

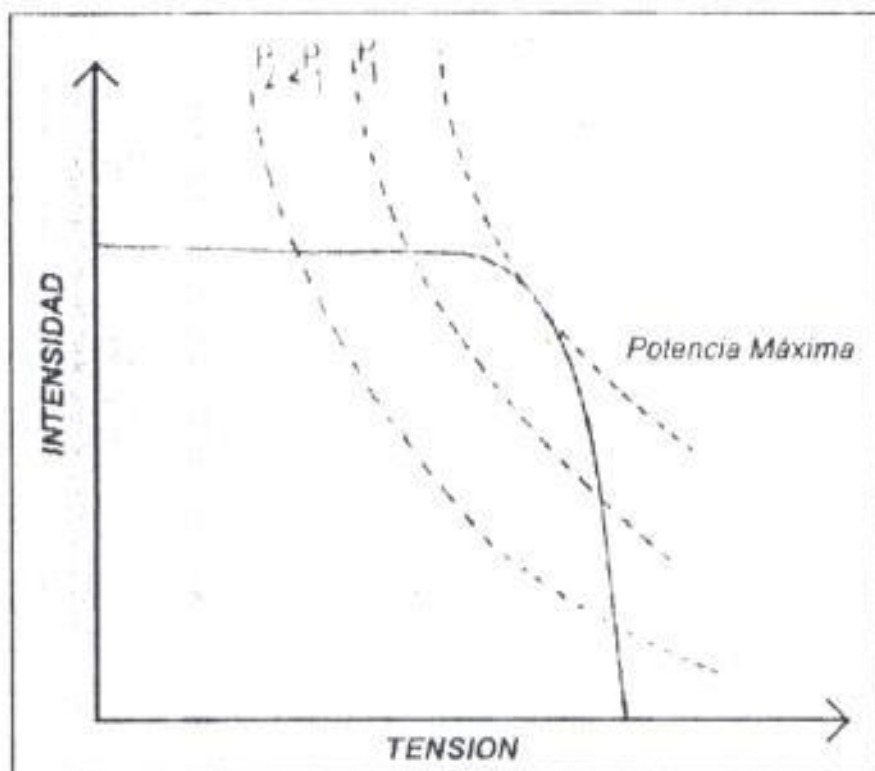
Dependiendo de la variación de la intensidad solar durante el día se pueden obtener curvas similares como muestra la figura 1.15.



**FIGURA 16: LA CURVA DE POTENCIA DE UN PANEL SOLAR ARCO**  
**Figura 1.15: LA CURVA DE POTENCIA DE UN PANEL SOLAR SX 110.**

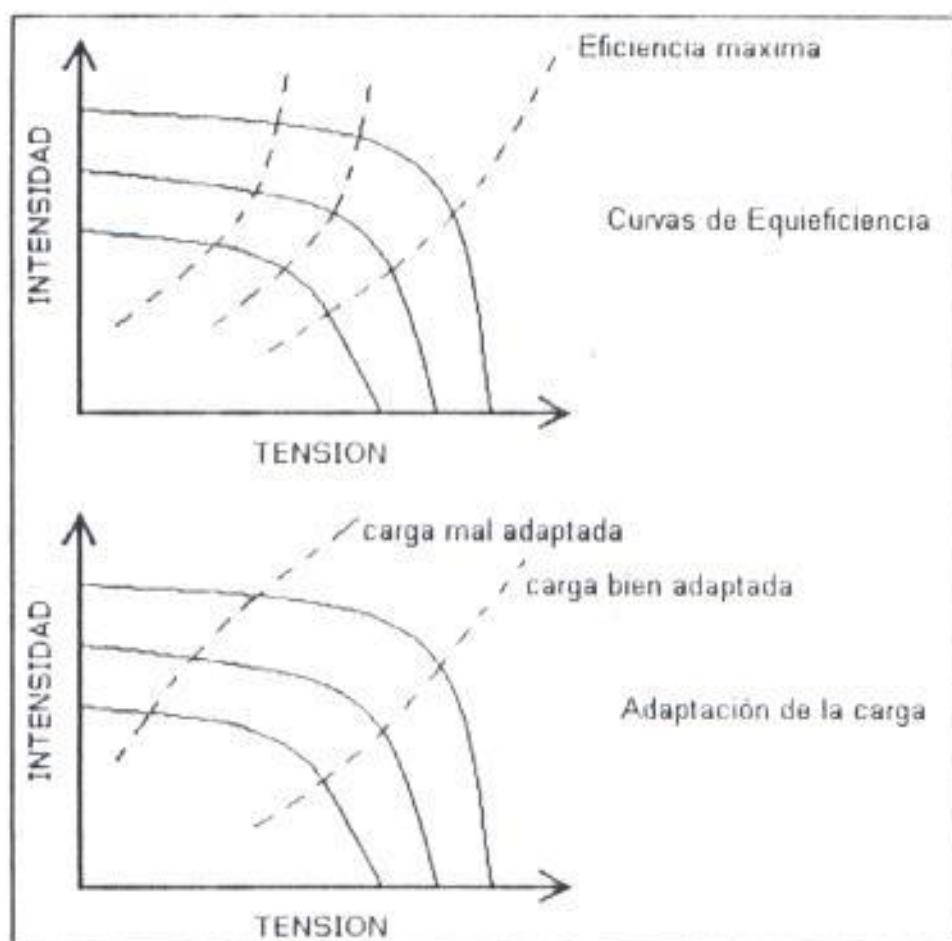
(Cedida gentilmente por el Ing. Rodrigo Berrezueta profesor de la Fiec)

Se pueden trazar también curvas de equipotencia como en la figura 1.16.



**Figura 1.16: CURVAS DE EQUIPOTENCIA**  
 (Tomado de Primeras Jornadas de Energía Solar en Ecuador)

Para conseguir la máxima transferencia de potencia a la carga debe procurarse que a medida que vaya variando la intensidad solar la carga vaya siguiendo el punto de máxima potencia, esto es, que trate de ubicarse en el codo de la curva que se vaya formando. La figura 1.17 lo explica mejor.



**Figura 1.17: CURVAS DE POTENCIA BIEN ADAPTADAS Y MAL ADAPTADAS**

La energía eléctrica de origen fotovoltaico es del tipo directo y debido a su propia naturaleza sólo permite obtener cantidades relativamente pequeñas de energía, útil principalmente para el uso doméstico, mas no para el industrial.

## 1.2. La Energía Eólica y principios de funcionamiento de un generador eólico.

La energía eólica es la segunda fuente no convencional que utilizaremos.

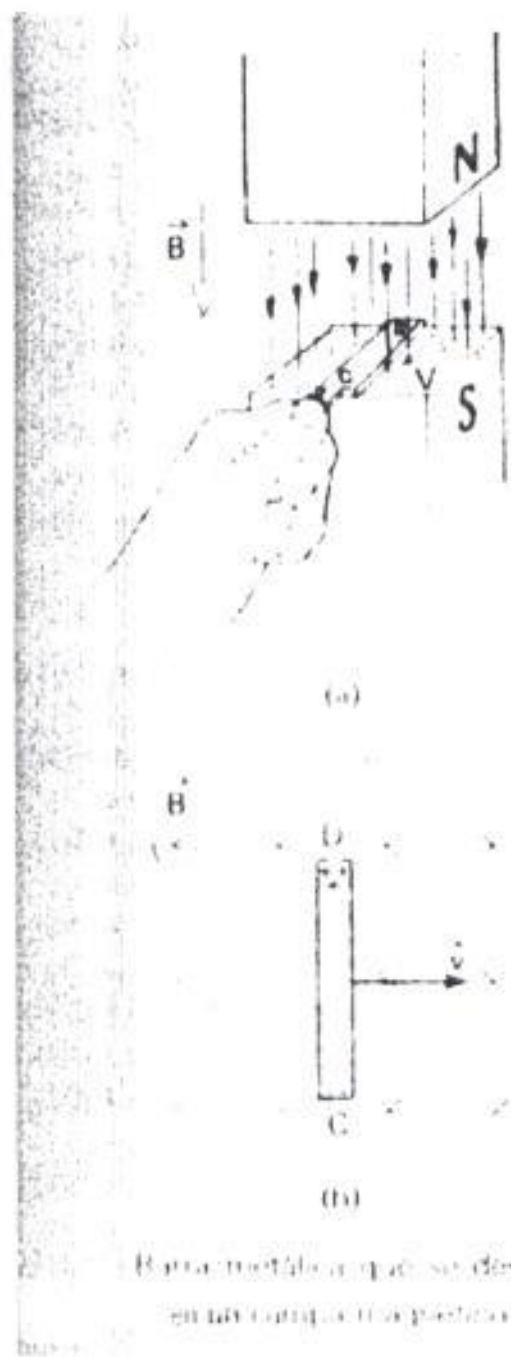
Vamos a explicar primeramente como el generador eólico convierte la energía del viento, de tipo mecánico, en energía eléctrica.

### 1.2.1. Fuerza Electromotriz Inducida.

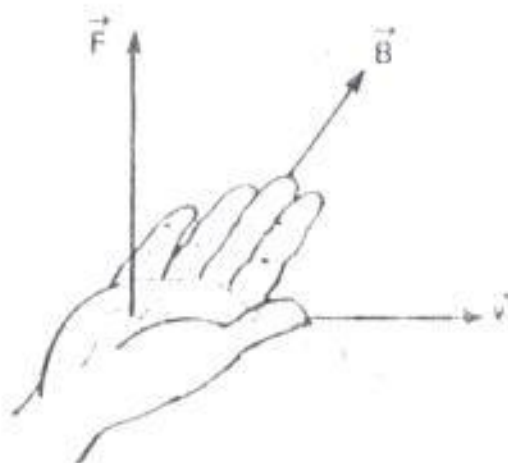
Si tenemos un imán permanente se presentarán en él unas líneas de flujo que tienen dirección norte-sur, como lo muestra la figura 1.18.

El vector  $B$  se llama vector de inducción magnética y como vemos es entrante en el plano. La barra metálica que se mueve en el interior del campo magnético posee electrones que se ven sujetos a una fuerza  $F$ , cuya dirección se obtiene a través de la "regla de la palma derecha", la cual nos dice que los dedos apuntan al campo  $B$ , el pulgar en dirección del movimiento y el sentido hacia donde se doblan los dedos nos da, la dirección de la fuerza  $F$  como lo muestra la figura 1.19.





**Figura 1.18: CAMPO MAGNETICO DE UN IMAN Y UNA BARRA DESLIZANTE** (tomado del libro de Física de Alvarenga y Máximo)



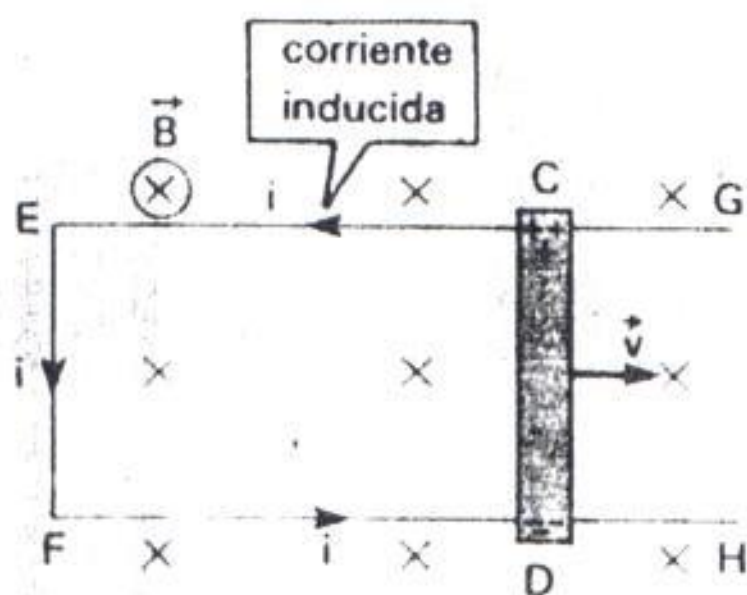
**Figura 1.19: REGLA DE LA MANO DERECHA**

Esta fuerza empuja las cargas positivas hacia arriba, o lo que es lo mismo, los electrones hacia abajo de la barra, produciendo la corriente eléctrica en sentido de C a D en la barra deslizante.

Esta es la corriente inducida. Si de alguna forma hacemos que ahora la barra se mueva en sentido contrario, la fuerza será en sentido contrario la corriente de igual manera.

Si movemos alternadamente la barra de izquierda a derecha obtendremos una corriente unas veces en un sentido y otras veces en sentido contrario, esto es lo que se le llama una corriente alterna.

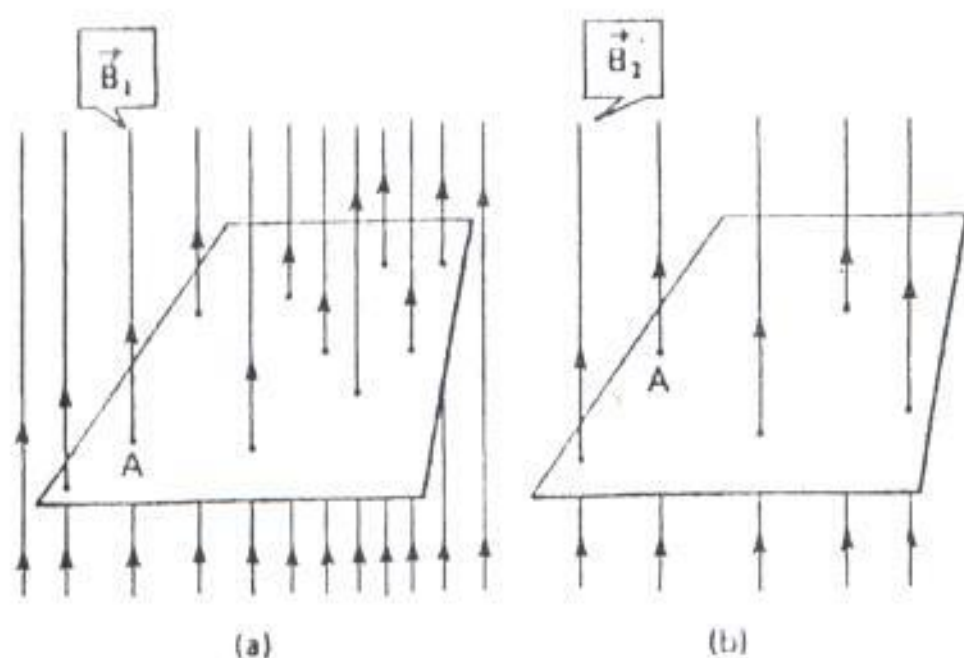
Esto lo podemos visualizar mejor viendo el gráfico 1.20



Una corriente inducida, cuyo sentido es el indicado, se establece en el circuito  $CEFD$ , cuando la barra  $CD$  se desplaza sobre el carril  $GEFH$  hacia la derecha.

**Figura 1.20: CORRIENTE INDUCIDA EN LA BARRA CD**  
(tomado del libro de Física de Alvarenga y Máximo)

Volviendo a nuestro imán de la figura 1.18, las líneas van de norte a sur y a la cantidad de líneas que atraviesan una superficie se le denomina flujo magnético y se la representa con la letra  $\Phi$ . El flujo magnético se lo representa así  $\Phi = B \cdot A$  se puede tener una idea de esto viendo la figura 1.21



**Figura 1.21: FLUJO MAGNETICO A TRAVES DE UNA SUPERFICIE.**

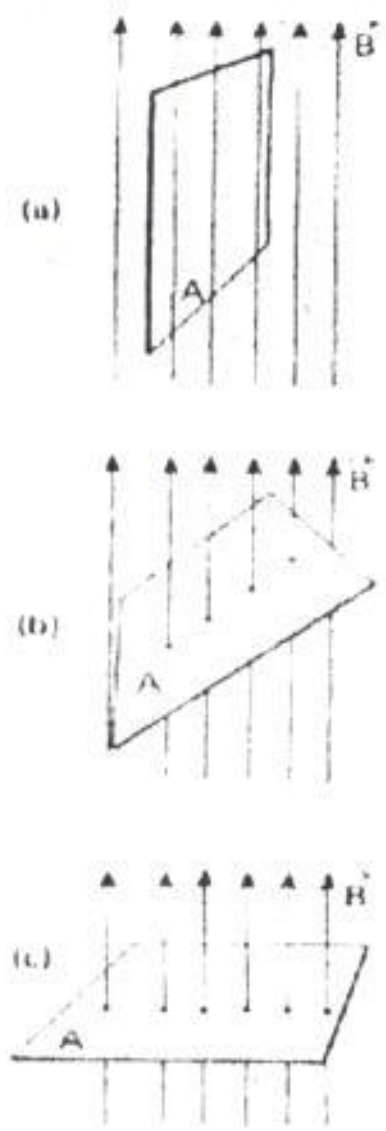
Como se puede observar el flujo a través de  $A_1$  es mayor que el flujo a través de  $A_2$ . La ecuación de flujo magnético se puede escribir así  $\Phi = AB \cos \theta$ , siendo  $\theta$  el ángulo entre el área  $A$  y el vector  $B$ .

A medida que varía el ángulo entre estos dos vectores, el flujo también variará como lo muestra la figura 1.22.

En la figura 1.22-a todas las líneas atraviesan la superficie, en la 1.22-b sólo unas cuantas lo hacen y en la 1.22-c ninguna lo hace.

Estos conceptos básicos son importantes para poder entender una de las leyes más importantes de la electricidad, la ley de Faraday

Esta ley dice que: "Siempre que un flujo magnético variable en el tiempo atraviesa un circuito, se induce una fuerza electromotriz en éste cuya magnitud es directamente proporcional a la intensidad de cambio de flujo magnético con respecto al tiempo."



El flujo magnético a través de una superficie de área  $A$  en un campo magnético  $\vec{B}$  es  $\Phi = BA \cos \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre  $\vec{B}$  y la normal a la superficie.

**Figura 1.22: FLUJO MAGNETICO A TRAVES DE SUPERFICIE QUE SE INCLINA.**  
 (tomado del libro de Fisica de Alvarenga y Máximo)



Explicado en otra forma, siempre que el flujo magnético cambie, en el tiempo, se producirá un voltaje inducido llamado fuerza electromotriz (fem)

El flujo magnético  $\Phi$  puede variar respecto al tiempo variando el área del circuito, el ángulo  $\theta$  que existe entre el vector área y el vector inducción magnética o la inducción magnética misma. Cualquiera manera es válida y se obtendrá una fem.

La Expresión de la ley de Faraday es

$$\mathcal{E} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

$$\phi = \phi_{\text{max. Estático}}$$

$$\phi = \phi_n [ \text{Cos } \omega t ]$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = - \phi_n \cdot \omega \cdot \text{Sen } \omega t$$

$$\mathcal{E} = \phi_n \cdot \omega \cdot \text{Sen } \omega t$$

$$\mathcal{E}_{\text{rms}} = \frac{\phi_n \cdot \omega}{\sqrt{2}}$$

Si generalizamos para N espiras, tenemos:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

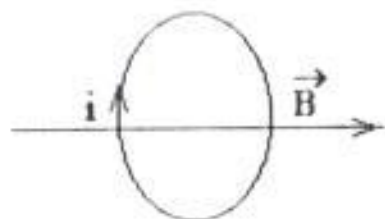
$$\mathcal{E} = N \cdot \phi n \cdot \omega \cdot \text{Sen } \omega t$$

$$\mathcal{E}_{\text{rms}} = \frac{N \cdot \phi n \cdot \omega}{\sqrt{2}}$$

El signo negativo en la expresión de E lo explica la ley de Lenz que se refiere a los efectos físicos de la ley de Faraday. Su enunciado es el siguiente:

"Las corrientes inducidas fluyen de manera que sus propios efectos magnéticos se opongan al cambio en el flujo que las creó inicialmente."

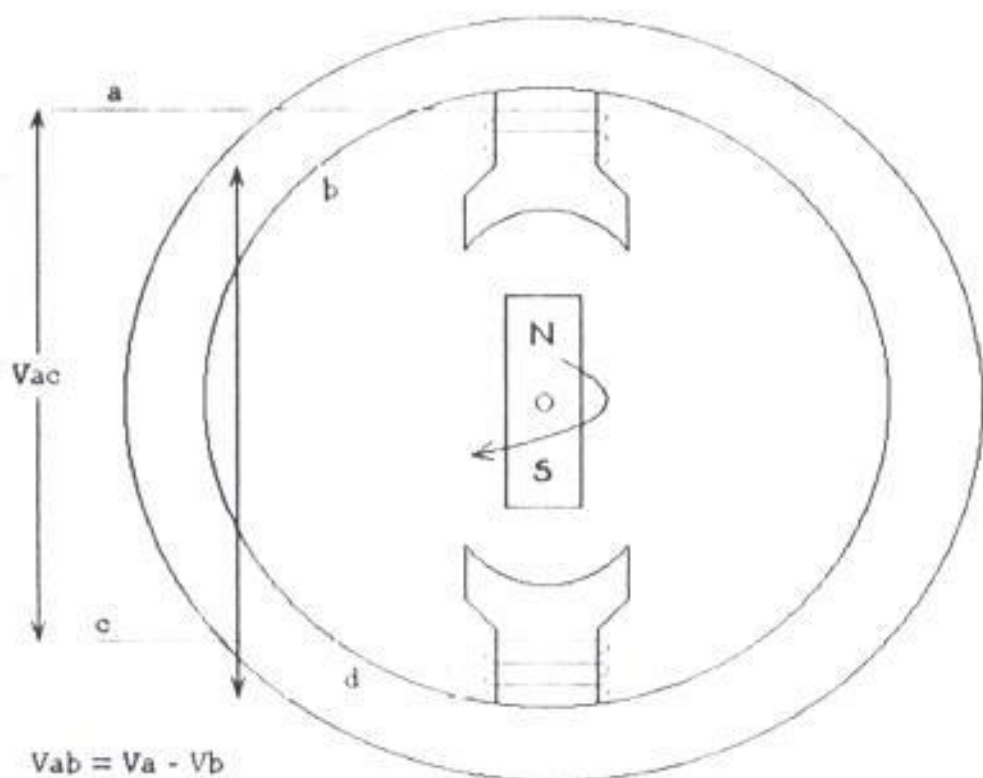
Con la figura 1.23 podemos entenderlo mejor.



**Figura 1.23:** CORRIENTE INDUCIDA QUE CREA UN CAMPO CONTRARIO AL QUE LA ORIGINÓ

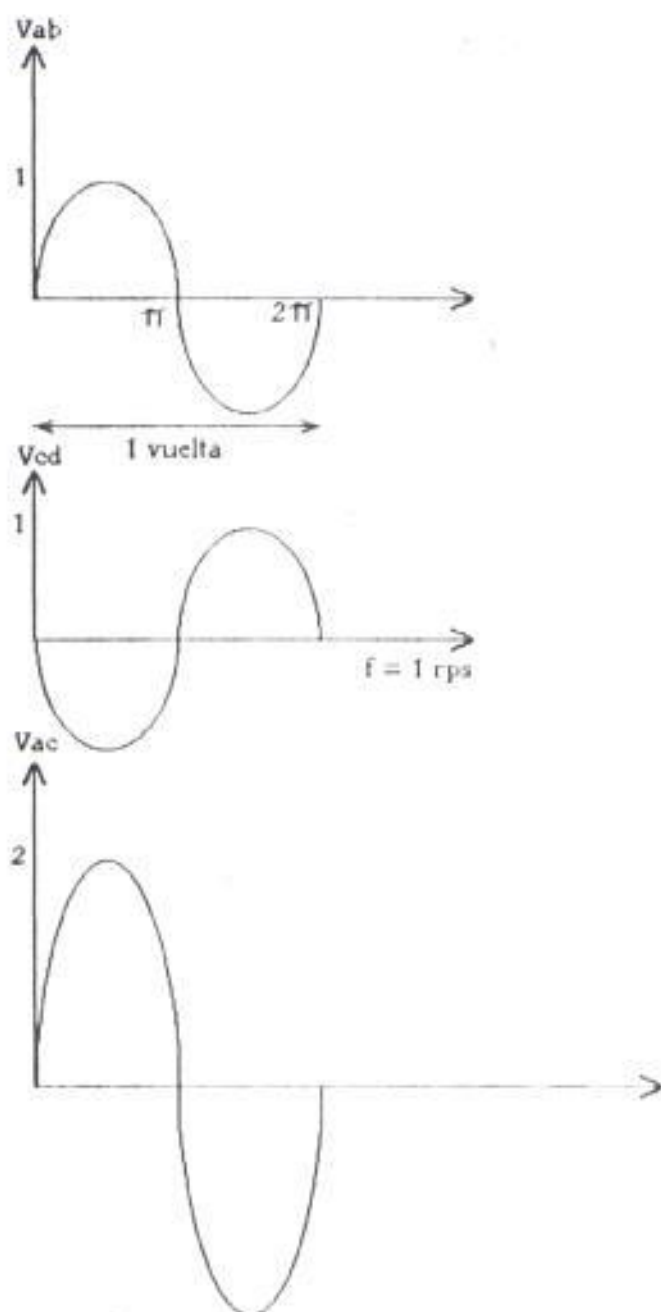
El campo primario  $B$  va hacia la derecha; pero el campo generado por  $i$  por la ley de la mano derecha va hacia la izquierda.

Éste es el principio que se utiliza para los generadores de corriente alterna, ya sean eólicos, hidráulicos, o a combustibles, etc. Veamos la figura 1.24 para comprenderlo mejor. Colocamos un imán permanente dentro de una estructura de hierro cerrado para que viaje el flujo magnético. En dos extremos de la misma estructura colocamos un cierto número de espiras, la misma cantidad a cada lado, y luego por algún medio externo hacemos girar el imán; de esta manera la cantidad de líneas de flujo que atraviesan las espiras irán variando y aparecerá la fem. La aparición de las corrientes dependerá si se cierra el circuito o no. En cada bobina se produce un voltaje, al de la primera le llamamos  $V_{ab}$  y al segundo  $V_{cd}$ ; unimos una terminal de la una bobina con la terminal de la segunda bobina de manera que obtengamos a la salida un voltaje que sea la suma de ambos. A este voltaje se le llama  $V_{ac}$ .



**Figura 1.24: POLO NORTE Y SUR CON DOS BOBINAS**

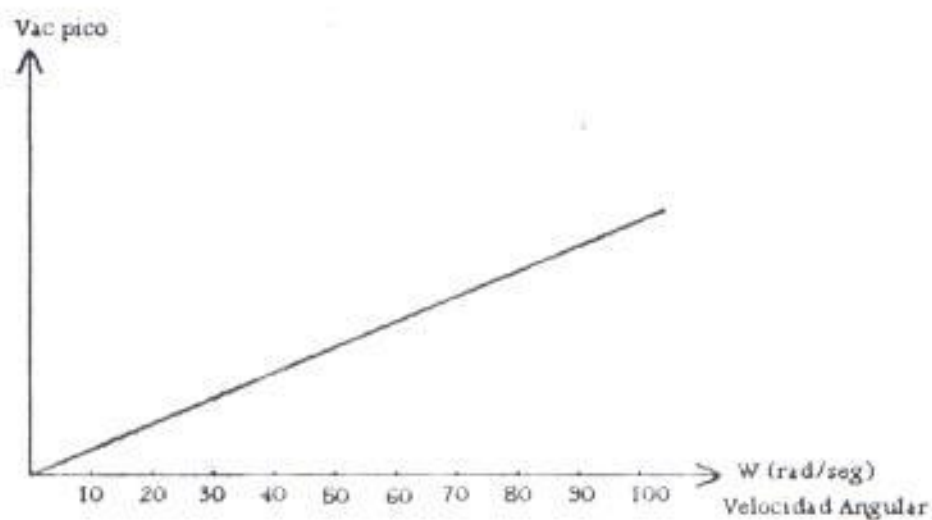
Podemos ver la figura 1.25



**Figura 1.25: VOLTAJES EN LA BOBINA AB, EN LA BOBINA BC, Y EN LA BOBINA AC**

Al hacer un análisis de la ecuación de Faraday podemos observar que si se aumenta la frecuencia aumentará el voltaje pico inducido.

Podemos ver el gráfico 1.26



$$\mathcal{E} = N \cdot \phi_n \cdot \omega \cdot \text{Sen } \omega t$$

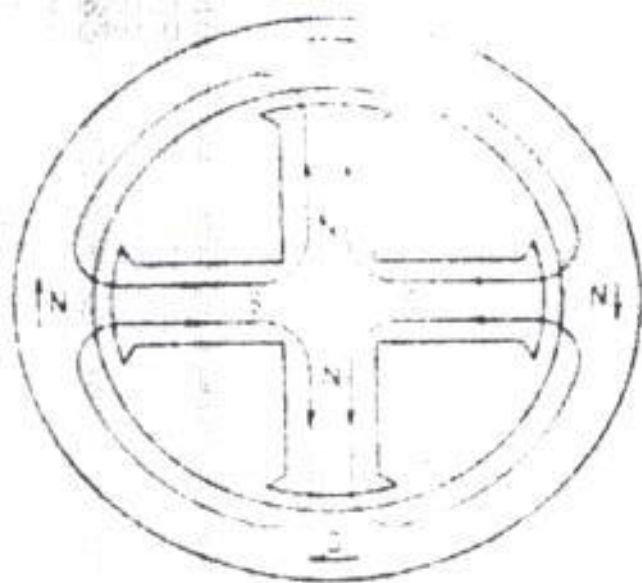
N: número de espiras

$\phi_n$ : flujo magnético

$\omega$ : velocidad angular

**Figura 1.26: CRECIMIENTO DEL VOLTAJE INDUCIDO PICO A MEDIDA QUE AUMENTA LA VELOCIDAD ANGULAR.**

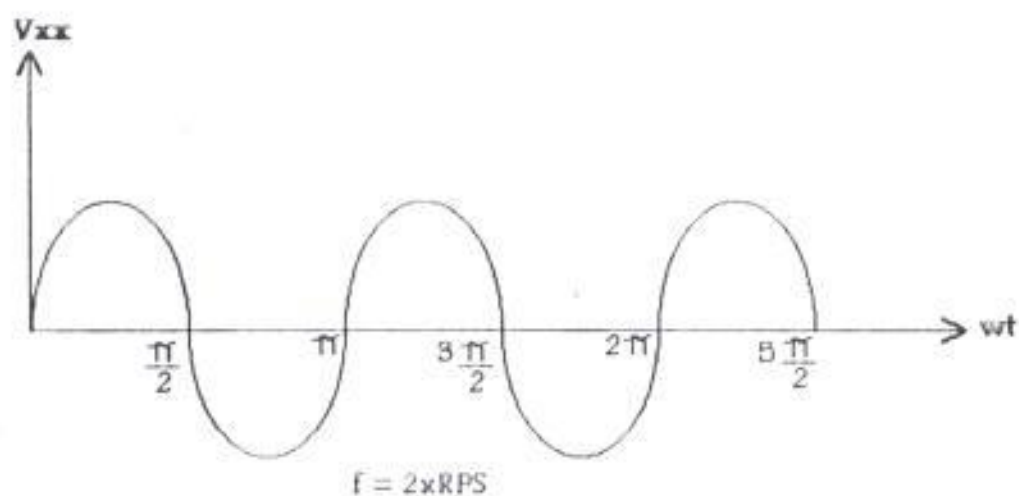




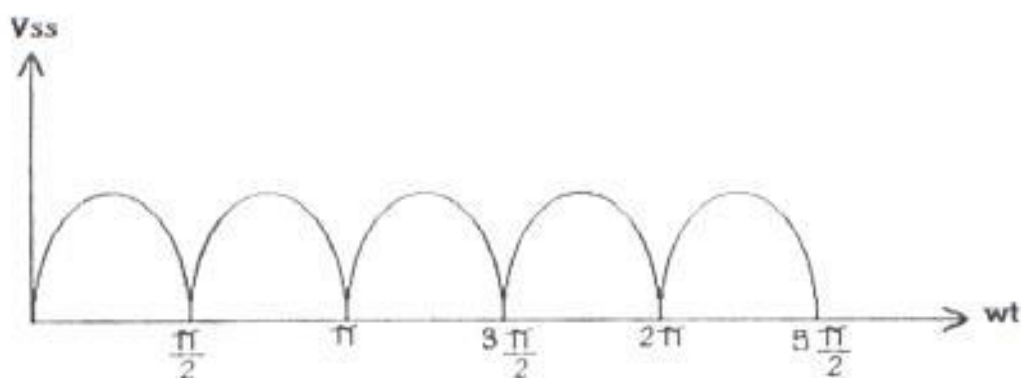
**Figura 1.28:** Enlaces de flujos en una estructura con 2 polos norte y 2 polos sur.

Al dar una vuelta de  $360^\circ$  mecánicos cada bobina ve que el polo norte ha pasado 2 veces frente a ella, por lo tanto, respecto a la estructura anterior luce como que la velocidad es el doble. Por este motivo la frecuencia  $f$  se ha duplicado.

a)



b) pasando por puente de diodos

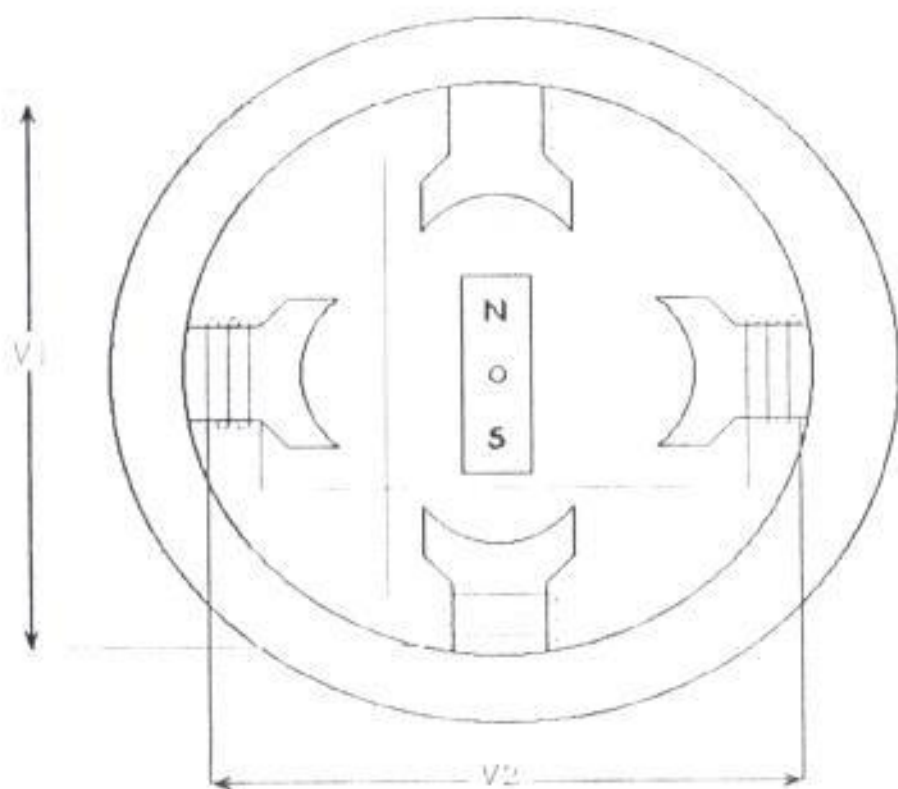


**Figura 1.29: EN LA PARTE A SE MUESTRA UN VOLTAJE EN LA CUAL SE HA DUPLICADO LA FRECUENCIA Y EN LA PARTE B EL VOLTAJE RECTIFICADO DESPUES DE PASAR POR EL PUENTE DE DIODOS.**

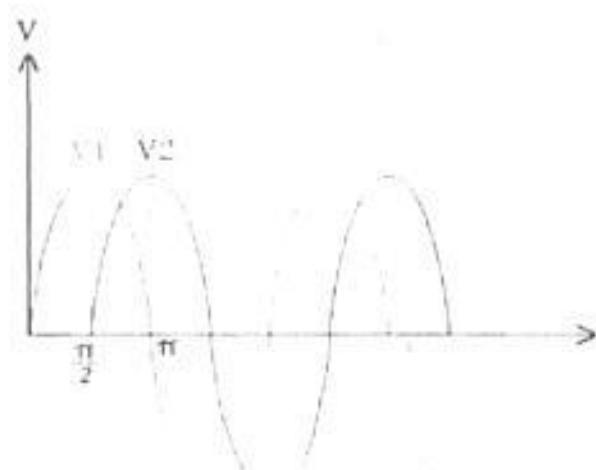
Esto se puede expandir para estructuras imantadas con varios polos nortes y varios polos sures para poder ir variando la frecuencia.

### 1.2.2. Voltaje Trifásico.

Si nosotros observamos la figura 1.30 apreciamos que se generan dos tipos de voltajes desfasados entre si  $90^\circ$  cuyas formas de onda podemos ver en la figura 1.31.

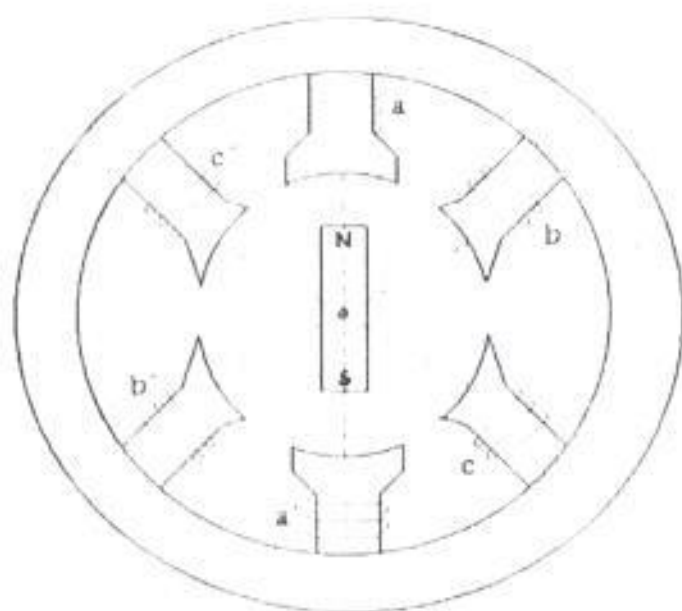


**Figura 1.30: GENERADOR CON UN SOLO IMAN Y CUATRO BOBINAS EN EL CUAL SE GENERARA VOLTAJE BIFÁSICO.**



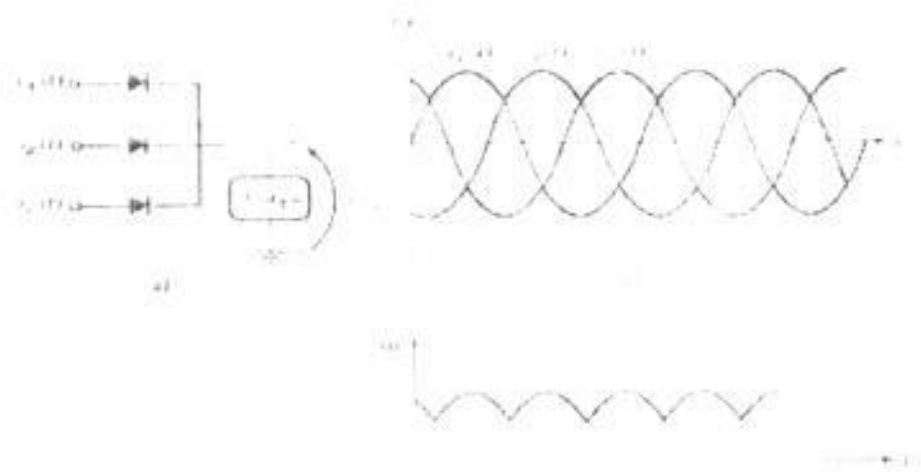
**Figura 1.31: CURVAS DE LOS VOLTAJES GENERADOS EN LA ESTRUCTURA DE LA FIGURA 1.30**

Por el mismo principio podemos obtener un voltaje trifásico desfasado  $120^\circ$  cada uno. Lo podemos apreciar en la figura 1.32.



**Figura 1.32: GENERADOR TRIFÁSICO**

El voltaje obtenido de este generador trifásico es de tres ondas sinusoidales desplazadas 120 grados como se muestra en la figura 1.33-b. Estos voltajes se los hace pasar por tres puentes de diodos, como se aprecia en la figura 1.33-a, para obtener un voltaje regulado en la carga, el voltaje resultante se muestra en la figura 1.33-c



**FIGURA 1.33: PARTE B: TRES VOLTAJES GENERADOR. PARTE A: DIODOS QUE RECTIFICAN EL VOLTAJE. PARTE C: VOLTAJE TRIFASICO RECTIFICADO**

1.2 Su esquema eléctrico se muestra en la figura 1.34:

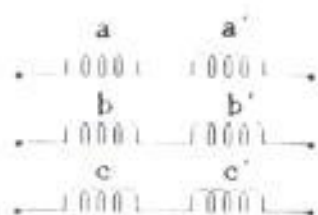


Figura 1.34: ESQUEMA ELECTRICO DE UN SISTEMA TRIFÁSICO.

Se puede representar como una estructura en Y así:



Figura 1.35: ESTRUCTURA EN Y.



### 1.2.3. Regulador de Carga

Veamos ahora un concepto necesario para poder entender lo que sigue.

Si se tiene un pedazo de hierro dulce y se le enrolla un alambre de cobre y entre los extremos del alambre se aplica un voltaje  $V$ , aparecerá una corriente que producirá un campo magnético en el hierro dulce y lo hará funcionar como un imán, el cual se llama electroimán. Este flujo magnético  $\phi$  existirá mientras exista la corriente  $I$ .

Veamos la figura 1.36

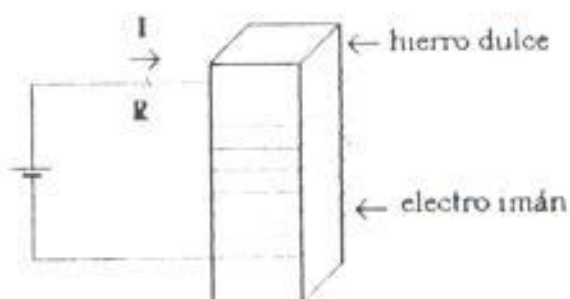
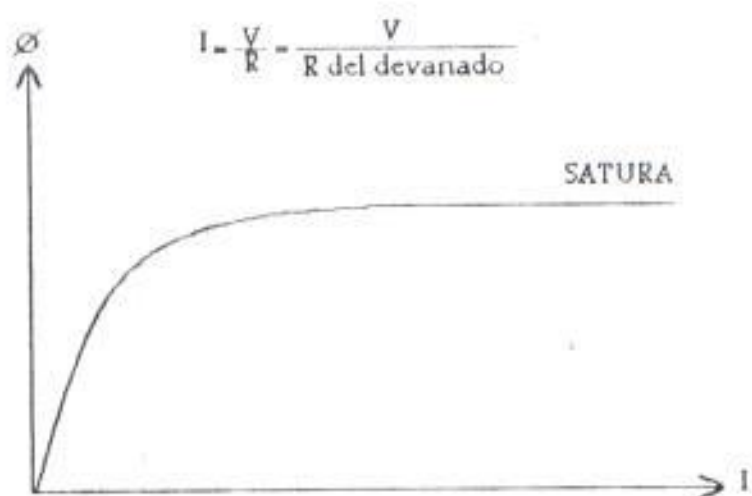


Figura 1.36: ELECTROIMÁN.

Este flujo magnético se incrementará hasta cierto valor y luego se saturará como lo muestra la figura 1.37



**Figura 1.37: VARIACIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO CONTRA LA CORRIENTE QUE LO GENERA**

En la figura 1.38 se ve el gráfico de un generador con sus polos Nortes y Sures, sus escobillas y la fuente que genera la corriente  $I$  para que se forme el electroimán.

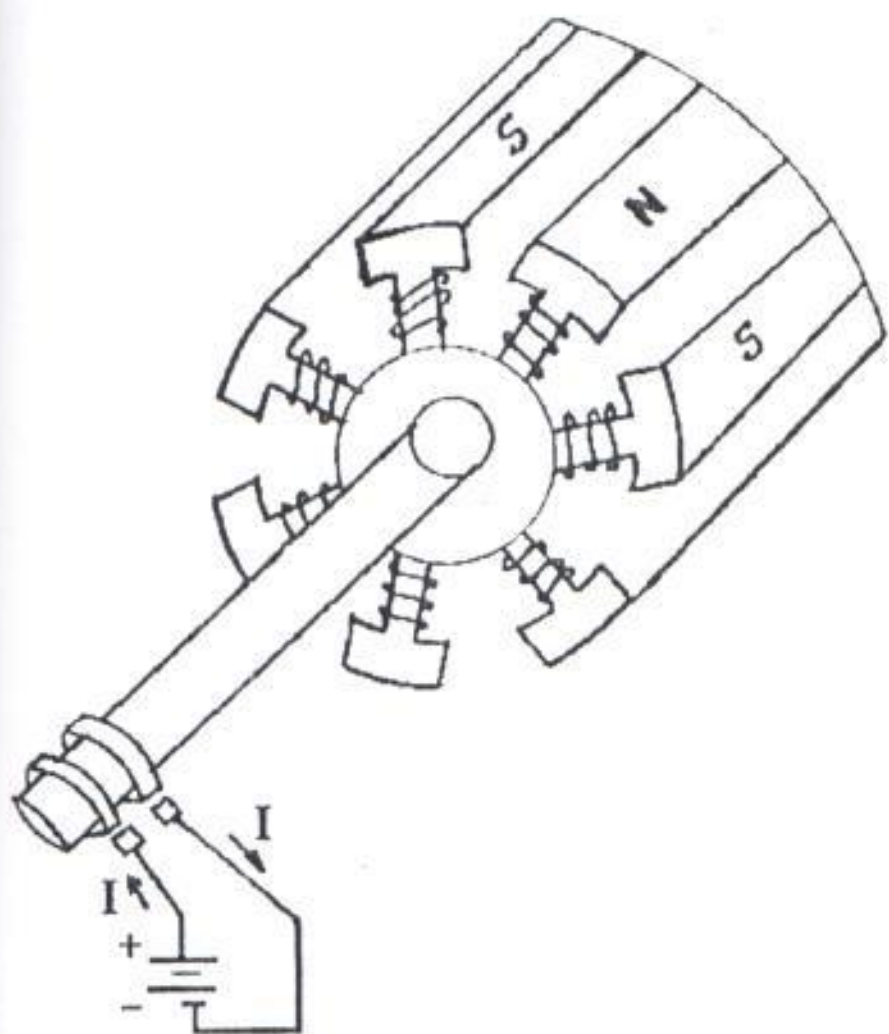
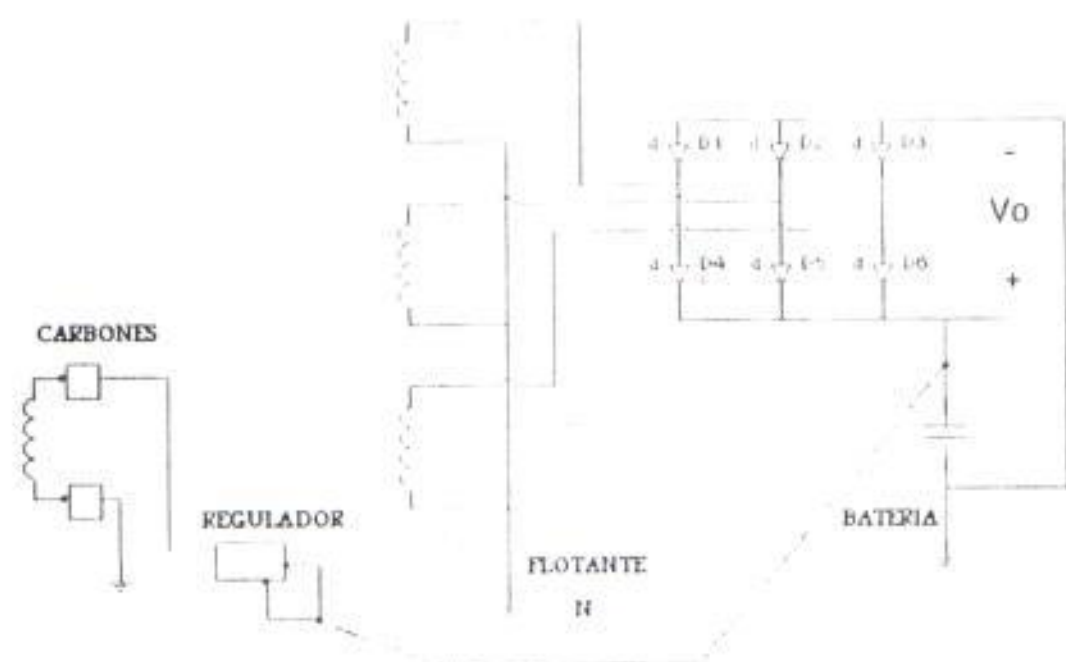


Figura 1.38: GENERADOR TRIFÁSICO CON ELECTROIMÁN

En la figura 1.39 apreciamos el diagrama eléctrico.



**Figura 1.39: DIAGRAMA ELÉCTRICO DE UN GENERADOR TRIFÁSICO INCLUYENDO PUENTES DE DIODOS, BATERÍAS Y REGULADOR DE CARGA**

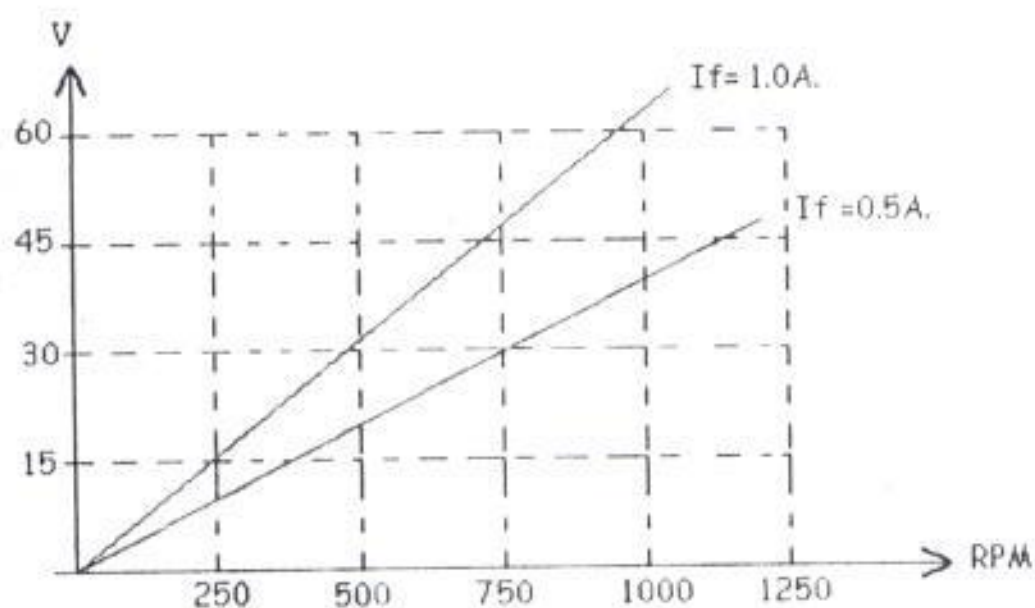
Cada una de las bobinas llamadas en este caso A, B y C están conectadas a un puente de diodos rectificadores. En paralelo con los diodos rectificadores se coloca la batería que es la que proporciona la corriente eléctrica para el electroimán interno del generador. Después de la batería está el regulador de carga que es el que se encarga de enviar mayor o menor corriente al electroimán para mantener un voltaje de salida constante, el cual puede ser 12 ó 24 voltios.

De esta manera si la batería está con un voltaje bajo, el generador envía más corriente y si está subiendo el voltaje, disminuye la corriente

Este es el principio de todo generador y también de nuestro generador eólico.

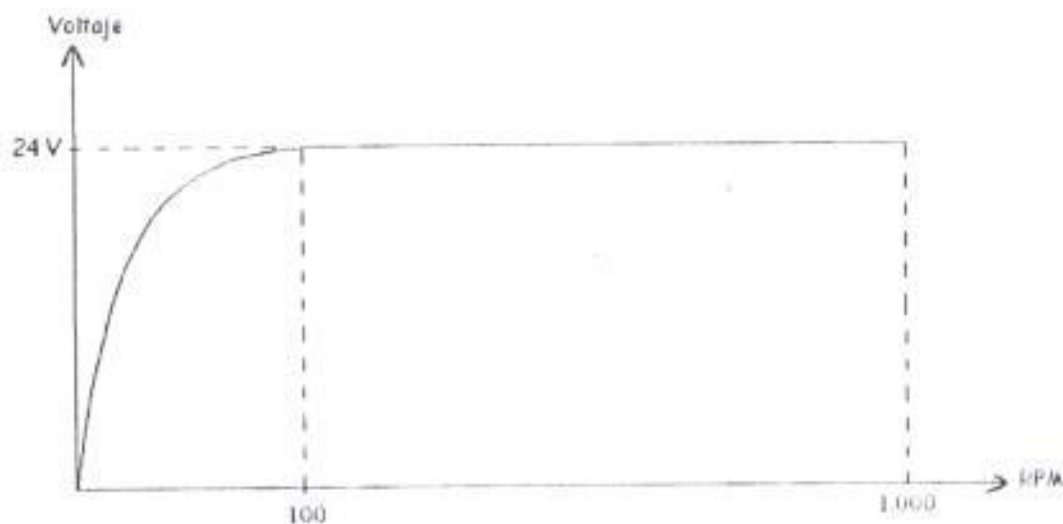
El voltaje del generador dependerá del número de revoluciones y de la corriente del electroimán

Un ejemplo podemos observar en la figura 1.40



**Figura 1.40: VARIACIÓN DEL VOLTAJE GENERADO PARA VARIAS CORRIENTES DE ARMADURA Y PARA VARIAS REVOLUCIONES.**

La salida  $V_o$  será como muestra la figura 1.41.



**Figura 1.41: SALIDA DE UN GENERADOR TRIFÁSICO PARA VARIAS RPM**

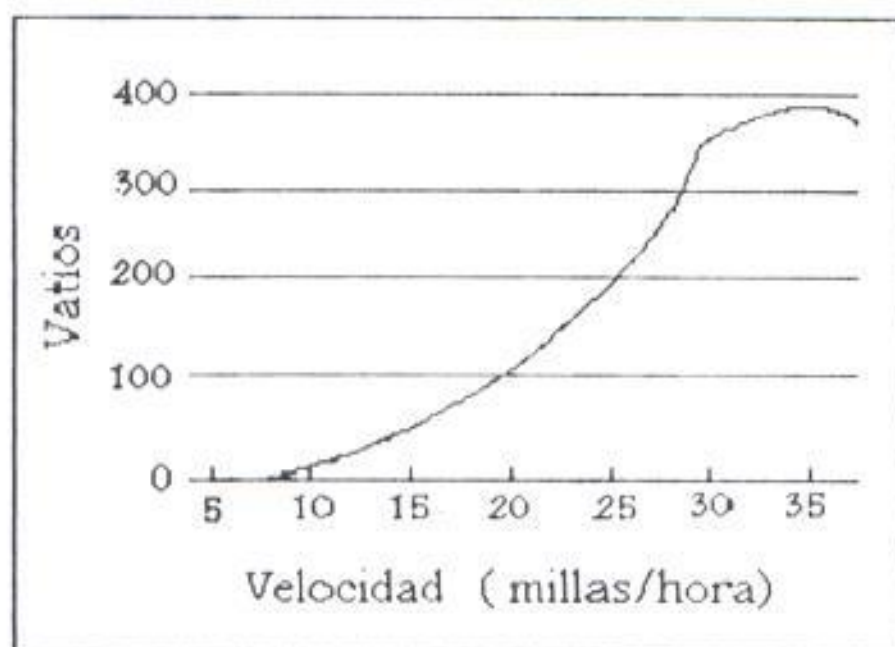
#### 1.2.4 CURVAS DE POTENCIA DE UN GENERADOR EÓLICO.

Aquí podemos ver el comportamiento de la potencia de un generador eólico en función de la velocidad del viento. De esta manera podemos saber cuánta potencia debemos esperar de acuerdo a la velocidad del viento imperante en el lugar que lo deseemos instalar. Podemos observar las curvas correspondientes a dos generadores diferentes. El incremento de la potencia es en forma cuadrática, llega a un máximo y en cierto momento empieza a decrecer. En estas curvas se observa la velocidad a la cual se espera obtener la



potencia nominal. Por debajo de esta velocidad la potencia obtenida será menor.

Veamos la figura 1.42



**Figura 1.42: CURVA DE POTENCIA DE UN GENERADOR DE 300 WATIOS**

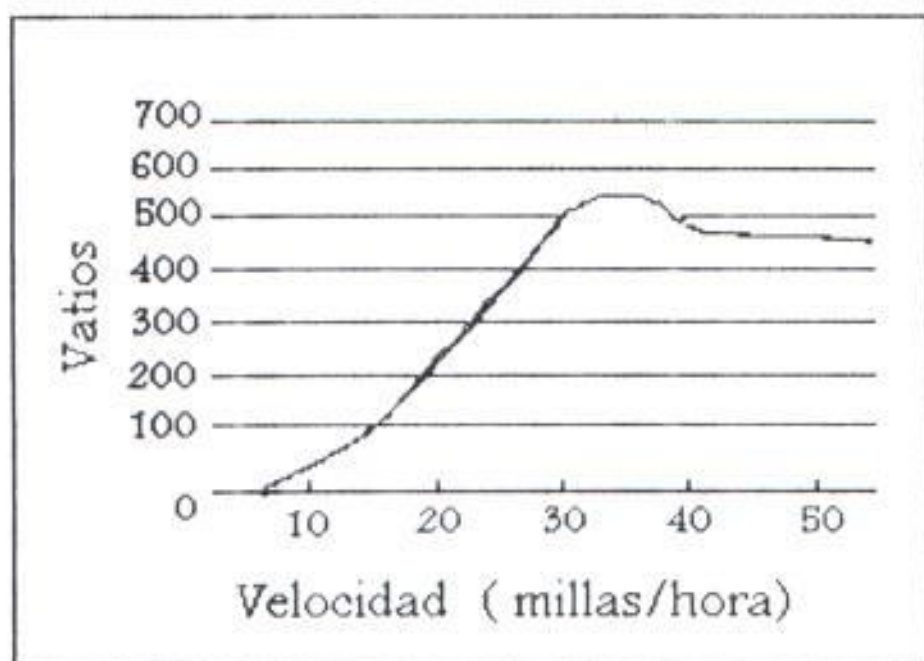
La figura 1.42 corresponde a un modelo de 300 vatios, el cual alcanza su potencia nominal a los 12.5 metros por segundo y empieza a generar a los 3 metros por segundo. Su salida puede ser de 12 o 24 voltios d.c.

La ecuación característica de este generador es

$$P(w) = 0.68(v-7)^2$$

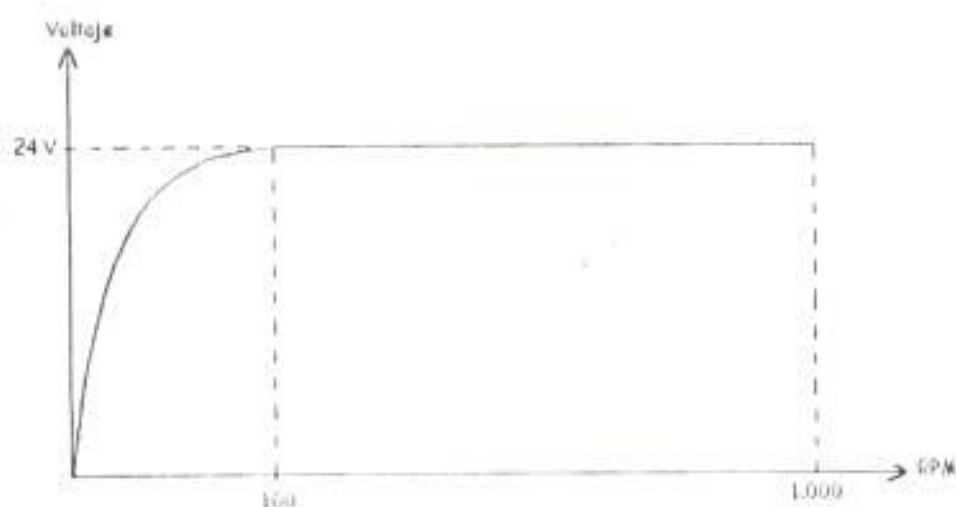
donde  $v$  es la velocidad del viento expresada en millas por hora.

La figura 1.43 nos muestra un generador de 500 vatios



**Figura 1.43: CURVA DE POTENCIA DE UN GENERADOR DE 500 WATIOS**

Este generador alcanza su velocidad nominal a 12.5 metros por segundo también Su velocidad para iniciar es de 2 metros por segundo Debemos recordar que únicamente a estas velocidades es que podemos esperar la potencia que indica el generador. Veamos ahora la figura 1.44



**Figura 1.44: SALIDA DE VOLTAJE DE UN GENERADOR EÓLICO PARA VARIAS RPM.**

Como podemos ver en esta gráfica voltaje versus revoluciones por minuto, el voltaje va creciendo a medida que aumentan las revoluciones, o lo que es lo mismo la velocidad del viento, en cierto momento cuando las revoluciones llegan a un valor determinado en este caso 100 el voltaje ha llegado a 14 voltios, allí el regulador interno evita que el voltaje siga creciendo y lo estabiliza hasta un valor que en este caso es de 1000 r p m , después de este valor el voltaje empieza a decrecer. En otras palabras de 100 a 1000 revoluciones por minuto es el rango en que nuestro generador funciona como nosotros esperamos.

Si a 1000 r.p.m. nosotros podemos obtener la potencia nominal del generador supongamos que fueran 500 wattios la corriente I que podemos obtener será  $500/14$  esto es: 35.8 A. En la tabla II podemos observar la cantidad de energía generada por diferentes generadores eólicos por mes a diferente potencia nominal y a diferentes velocidades de vientos. A continuación en la tabla III podemos ver las curvas de potencia características de algunos modelos comerciales.

**TABLA III**

**ECUACIONES QUE DEFINEN LAS CURVAS DE POTENCIA DE ALGUNOS GENERADORES EOLICOS COMERCIALES.**

Generador de 500 W	$3.6(v-1.3)^2$
Generador de 600 W	$5.4(v-1.3)^2$
Generador de 900 W	$5.5(v-1.33)^2$
Generador de 1000 W	$8.2(v-1.265)^2$

Estas ecuaciones han sido obtenidas basados en la información proporcionada por el fabricante, la cual se encuentra en la tabla II, al final de la tesis. Con ellas podemos saber la potencia de un generador a cierta velocidad.

### 1.2.5. HORAS EFECTIVAS DE VIENTO EN UN DIA

Como dijimos anteriormente la velocidad del viento es la que determina el comportamiento del generador eólico, pero debemos analizar el comportamiento del viento también para saber exactamente que es lo que realmente podemos obtener.

Se debe trabajar con mediciones realizadas en el sitio, esto es con la velocidad y la frecuencia del viento.

Con las ecuaciones mostradas anteriormente podemos obtener la potencia para determinada velocidad.

Pero la velocidad del viento no es constante todo el tiempo por ello debemos considerar otros factores como la frecuencia. Por ejemplo: Si se tiene un viento de 3 m/s y una frecuencia de 10% eso significa que durante el 10% de las horas del día, esto es, 2.4 horas el viento soplo a 3 m/s. La dirección no importa porque el generador tiene una veleta que lo orienta en la dirección que sopla el viento.

Con este valor de 2.4 horas nosotros vamos a la ecuación de potencia del generador y reemplazamos los 3 m/s y obtenemos el valor de potencia que es de 10.4 vatios si nosotros multiplicamos por 2.4 horas obtenemos la energía total generada en esas 2.4 horas, así tenemos que hacer con el resto de horas del día y obtendremos el total generado en el día.



## CAPÍTULO II

DETERMINACIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS  
CONVENIENTE PARA OBTENER ELECTRICIDAD  
PROVENIENTE DE LAS FUENTES EÓLICAS Y  
SOLARES.

Para saber cual alternativa es la más conveniente para obtener energía eléctrica ya sean los generadores eólicos o los paneles solares, o tal vez una combinación de ambos, es necesario conocer la cantidad de radiación solar, para el caso de los paneles solares; y de la velocidad del viento, para los generadores eólicos, en el sitio que se desea dar el servicio.

Veamos algo sobre irradiación solar, el cual es un parámetro muy importante, puesto que con él podemos hacer cálculos precisos para saber cuanta energía podemos obtener de un panel solar y con ello dimensionar correctamente la potencia instalada para dar servicio a una carga

De acuerdo a la información proporcionada por el INE (INSTITUTO NACIONAL DE ENERGIA) en la Costa se dispone de 2 3 horas de radiación solar máxima y en la región de la Sierra, de 3 horas

La radiación máxima se tiene cuando existe un cielo completamente despejado y el mayor aprovechamiento cuando el sol incide perpendicularmente sobre la superficie del panel. En el apéndice 2, podemos observar datos de radiación solar en algunos sectores del país

En otros países se poseen mapas completos sobre radiación solar divididos por zonas y por horas de irradiación. Indicando cuantas horas existe determinada cantidad de

radiación. Ejemplo 100% por 3 horas, 80% por 4 horas, 50% por 2 horas y así sucesivamente.

Con esta información se puede calcular aun mejor el rendimiento que tendrá un panel. Como se indicó anteriormente la cantidad de irradiación solar que existe sobre la superficie terrestre es de  $5 \text{ kw/m}^2$ , pero la conforman algunos tipos de ondas y a nosotros sólo nos interesan las luminicas, esto equivale aproximadamente a  $1000 \text{ w/m}^2$ . Este valor es el que se usa como radiación solar máxima en todos los estudios hechos sobre paneles solares y es el que usaremos en este trabajo.

Las horas durante las cuales se mantiene cierta intensidad solar serán diferentes de lugar en lugar debido a la nubosidad del sitio. Nosotros tomaremos los datos del INE, que indican aproximadamente 3 horas de intensidad solar maxima. Las otras horas con menor intensidad contribuirán en algo a la energía obtenida, pero al trabajar con 3 horas nos aseguramos que la energía obtenida no será menor a la esperada. Para los generadores eólicos debemos trabajar con la velocidad del viento en la zona. Los generadores eólicos tienen una curva de potencia versus velocidad de viento y con ella podemos saber de acuerdo a la velocidad del viento presente, cuanta potencia está generando en ese instante. En las especificaciones técnicas del generador viene dada la potencia nominal y a qué velocidad se obtiene esa potencia, a menores velocidades obviamente la potencia será menor.

En la tabla II podemos observar la energía obtenida en kilowatios-hora por mes de algunos generadores eólicos de diferente potencia nominal, a distintas velocidades del viento. Esta tabla es una buena referencia para dimensionar la carga a la que se quiere dar servicio; pero si se tienen datos detallados con frecuencias de viento es mucho mejor.

Con los datos de la tabla II se puede deducir la ecuación de potencia de cualquier generador de los que allí aparecen. Luego se reemplaza, en la ecuación, la velocidad del viento y ese resultado se lo multiplica por el número de horas que estuvo presente esa velocidad. El número de horas que estuvo presente ese viento se obtiene multiplicando el porcentaje de frecuencias por las 24 horas que tiene el día. Así se obtiene la energía generada en ese tiempo, luego se repite la misma operación para otra velocidad que estuvo presente en ese día y la cantidad de horas de ese día que hubo esa otra velocidad. Así, sucesivamente, hasta cubrir todas las velocidades que hubo en ese día. Al final se suman todos los resultados y esa es la energía total obtenida en ese día.

## **2.1 Costo del kilowatio-hora obtenido de la energía solar en el Ecuador**

Para poder dimensionar nuestra potencia solar instalada primero debemos conocer cuanta energía nosotros necesitamos y luego hacer los cálculos correspondientes. La inversión inicial es alta, pero se amortiza con los años de servicio que van a dar los paneles.

Tomemos un kilovatio hora por ejemplo:

Si tomamos un panel Arco Solar SX11, de 36 vatios y consideramos las 3 horas de máxima radiación que indica el INE; obtendremos:

Energía = 36 vatios \* 3 horas = 108 vatios-hora por día.

Para saber cuántos paneles necesitamos dividimos 1000 vatios para 108 vatios y obtenemos aproximadamente 10 paneles. Como cada panel vale \$330, la inversión es de \$3300.

Si tenemos 1 kilovatio por día, si multiplicamos por 365 días del año tendremos:

1 kwh \* 365 días = 365 kwh por año.

Por 20 años de vida media de un panel solar nos da:

365kwh /año \* 20 años = 7300kwh

Si dividimos \$3299/7300 kwh obtendremos \$0.438/ kwh

Lo que significa \$0.438 por kwh

## **2.2 Determinación de la velocidad de viento mínima para la cual el generador eólico es preferible sobre los paneles solares.**

Para los generadores eólicos el cálculo es diferente que el de los paneles solares por cuánto el rango de variación del viento es muy grande. De acuerdo a la



velocidad del viento que tenemos podemos seleccionar el generador que nos conviene. Para velocidades superiores a los 2.2 m/s los generadores empiezan a funcionar, pero no están funcionando a su capacidad nominal sino a una mucho menor. Es importante conocer la velocidad de viento a la cual el kwh obtenido del generador eólico es más barato que el producido por paneles solares. Si nos remitimos a la tabla II observamos los distintos tipos de generadores y varias velocidades de los vientos. Si ubicamos un modelo y cierta velocidad obtenemos la salida en kwh por mes. Tomamos la salida en kwh por mes y la multiplicamos por 12 meses al año y por 20 años de vida útil de un generador y obtenemos la cantidad total de energía que producirá este generador. La dividimos para el precio del generador y obtenemos el precio del kwh. Del análisis de esta tabla concluimos que se necesita una velocidad mínima de 3.13 m/s para que el kilovatio hora eólico sea más barato que el solar.

Veamos como:

Si tomamos el modelo Whisper 600 de \$1190 y ubicamos en 3.13 m/s, en la tabla obtenemos 20 kwh por mes, luego lo multiplicamos por 12 meses y por 20 años

$$20 \text{ kwh/mes} * 12 \text{ meses/año} * 20 \text{ años} = 4800 \text{ kwh}$$

Si dividimos \$1190 para 4800 kwh tenemos

$$\$1190 / 4800 \text{ kwh} = \$0.2477 / \text{kwh}$$



Como podemos ver el kwh es mas barato que el obtenido del panel solar.

Con una velocidad de 2.68 m/s y el modelo whisper de 4500 watios prácticamente se iguala el valor por eso es preferible tomar desde 3 m/s en adelante.

Tomemos ahora para una velocidad de 4 m/s. Veamos el primer modelo Mariner H500:

$26 \text{ kwh/mes} \cdot 12 \text{ meses} \cdot 20 \text{ años} = 6240 \text{ kwh}$  por los 20 años

Si dividimos \$1390 para 6240 kwh tenemos:

$$\$1390 / 6240 \text{ kwh} = \$ 0,222/\text{kwh}$$

Si nos vamos al final de la tabla II tenemos el WHISPER 4500 Hacemos el cálculo igual que el anterior.

Vemos en la tabla que este generador produce 236 kwh y multiplicamos por 12 meses y por 20 años

$$236 \text{ kwh/mes} \cdot 12 \text{ meses/año} \cdot 20 \text{ años} = 56640 \text{ kwh}$$

Si dividimos \$5790 para 56640 kwh tenemos

$$\$5790/56640\text{kwh} = \$0.1022/\text{kwh}$$

Como podemos ver a medida que aumenta la velocidad del viento disminuye el valor del kwh, además hay que tomar en cuenta que a medida que aumenta la potencia instalada el precio disminuye aún más.

### **2.3 Determinación de la velocidad de viento para la cual el precio del kilowatio hora obtenido del generador eólico es inferior al producido por la empresa eléctrica.**

Hasta ahora hemos visto como se abarata el costo del kilowatio-hora a medida que aumenta la velocidad del viento y la potencia instalada. Pero surge ahora la pregunta obligada: ¿Es en algún momento la energía eólica más económica que la energía proporcionada por las empresas eléctricas? La respuesta es sí, pero veamos en qué condiciones.

Si nos remitimos a la tabla II y buscamos al final de la tabla cuando la velocidad es 7.15 m/s y analizamos el primer modelo, el Whisper 500, vemos que la energía obtenida es:

$$116 \text{ kwh/mes} * 12 \text{ meses/año} * 20 \text{ años} = 27840 \text{ kwh}$$

Si lo dividimos por \$1390 nos da

$$\$1390 / 27840 \text{ kwh} = \$ 0.049928/\text{kwh}$$

Si tomamos el Whisper 4500, observamos que tiene 1070 kwh/mes entonces tenemos:

$1070\text{kwh/mes} \cdot 12\text{ meses/año} \cdot 20\text{ años} = 256800\text{ kwh}$

Si dividimos \$5790 para 256800 kwh nos da:

$\$5790/256800\text{ kwh nos da } \$0.022546/\text{kwh}$

El costo del kwh producido por la empresa eléctrica es de 8 centavos de dólar,  
esto es \$2000.

### **CAPITULO III**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO  
EXPERIMENTAL PARA DOTAR DE ELECTRICIDAD  
AL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA MEDICA DE  
LA FIEC.**

En este capítulo se tratará sobre el diseño y la construcción del circuito jerarquizador de las entradas de energía al circuito y del inversor para obtener una salida de 110 voltios de corriente alterna para uso doméstico.

Conseguir la conmutación de las fuentes no es tarea difícil, pero hay que tomar en cuenta otras consideraciones para poder instalar este dispositivo en cualquier lugar y conseguir que funcione bien. En primer lugar se debe fijar un voltaje de referencia para establecer la comparación entre éste y los voltajes que provienen de las fuentes eólica y solar. El voltaje de referencia no puede venir directamente de la batería porque el voltaje que provee va a estar variando de acuerdo al consumo de carga, así que hay que buscar una solución y la encontramos cuando se duplica la tensión de la batería y utilizando un regulador de voltaje para fijar el voltaje de referencia. Luego, se trata sobre la polarización de los amplificadores operacionales que sirven como comparadores, para lo cual usamos la misma solución anterior: el duplicador de tensión. En adelante vamos a explicar detalladamente los pasos que se siguieron para diseñar el sistema de jerarquización completo, obtener la duplicación de tensión de la batería y la inversión para obtener 110 voltios a c.

### **3.1. Diseño del Circuito Seleccionador Jerárquico.**

#### **3.1.1. Criterios para determinar el orden de prioridad de las entradas de energía al circuito**

El objetivo es controlar cual o cuales de las tres entradas (eólica, solar o eléctrica) son las que van a alimentar al banco de baterías. Lo que se persigue es que preferiblemente sean las entradas naturales las que carguen al banco de baterías. Esto es, si existe suficiente luz solar debe activarse el panel solar, si existe suficiente, viento debe activarse el generador eólico, y si se dan ambas condiciones deben activarse ambos generadores; y si no existe ninguno de los dos, en ese momento y sólo en ese momento debe activarse la tercera entrada que es la alimentación de la red eléctrica o de algún generador a diesel.

#### **3.1.1.1. Etapa de comparación de los niveles de voltajes de las fuentes eólica y solar.**

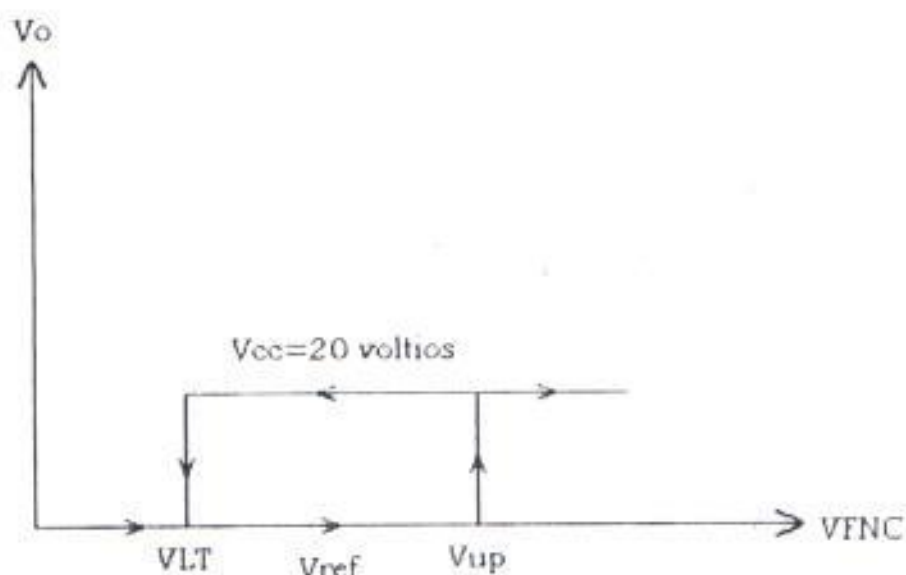
Se comparan independientemente los voltajes que producen el generador eólico y el panel solar con un voltaje de referencia fijado en 13 voltios proveniente de un regulador de voltaje alimentado por el duplicador de tensión, se escogió este valor por cuanto se van a cargar baterías de 12 voltios. El elemento de comparación usado es un amplificador operacional



(opamp) La salida de este operacional varia entre 0 y 22.6 voltios porque está polarizado con el voltaje proveniente del duplicador de tensión de la batería que produce 24 voltios. La diferencia de 1.4 voltios se debe a la caída de voltaje en los diodos al conectar los operacionales al duplicador de tensión. Cuando la entrada correspondiente a la energía no convencional está por encima de un valor determinado, que es el mínimo para que pueda cargar la batería de 12 voltios, la salida del operacional envía una señal alta de 22.6 voltios. Si está por debajo de otro valor determinado hará que la salida conmute a 0 voltios. Esto se consigue utilizando el concepto de histéresis. La curva de histéresis podemos verla en la figura 3.1.

El voltaje de referencia se lo fijó con un regulador de voltaje LM317  $V_{r1}$  fijado en 13 voltios y los voltajes de umbrales se los fijó con las resistencias de 2.2k y 30k. El voltaje de umbral superior se fijó en 14 voltios y el de umbral inferior en 11.3 voltios. Cuando la fuente no convencional esté por encima de 14 voltios (voltaje de umbral superior) enviará una señal de voltaje alto que irá a polarizar la compuerta G de un mosfet. Cuando el voltaje empieza a descender la salida del operacional seguirá siendo alta aún cuando el voltaje sea menor al de referencia. Lo será hasta que llegue al voltaje de umbral inferior, el cual ha sido fijado en 11.3 voltios.





$V_{cc}$ :	Voltaje de Polarización
$V_o$ :	Voltaje de salida del operacional
$V_{ref}$ :	Voltaje de referencia
$V_{lt}$ :	Voltaje de umbral inferior
$V_{up}$ :	Voltaje de umbral superior
$V_{FNC}$ :	Voltaje de fuente no convencional

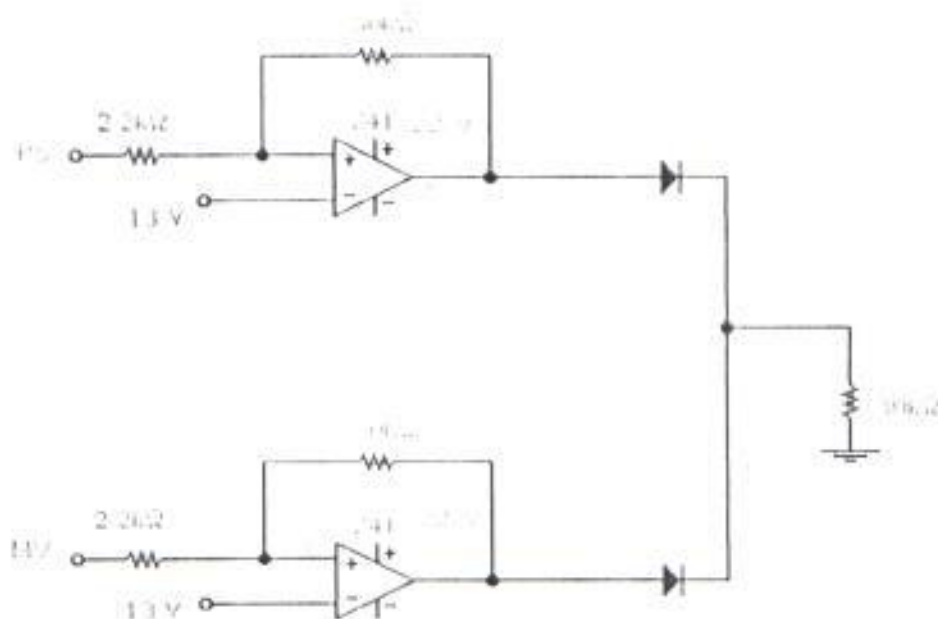
**Figura 3.1: VOLTAJE DE HISTERÉSIS EN LOS CUALES SE MUESTRA EL VOLTAJE DE REFERENCIA, EL VOLTAJE DE SUBIDA Y EL VOLTAJE DE BAJADA**

En ese momento la salida del operacional conmutará a 0 voltios. Se le ha agregado la histéresis para darle un rango de voltaje para conmutar y evitar que el circuito cambie brusca e innecesariamente su salida. Por ejemplo: en

el caso del panel solar, una nube pasajera o un ave puede ocultar el sol por un instante y el circuito lo tomaría como que se ha ido el sol y desactivaría el circuito, pero cuando ya haya pasado la nube, el ave o el avión lo volvería a activar; o sea que habría una conmutación innecesaria.

Esto se evita colocando la histeresis

El circuito podemos verlo en la figura 3.2.



**Figura 3.2: ETAPA DE COMPARACIÓN DE VOLTAJES DE ENTRADA DE LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA**

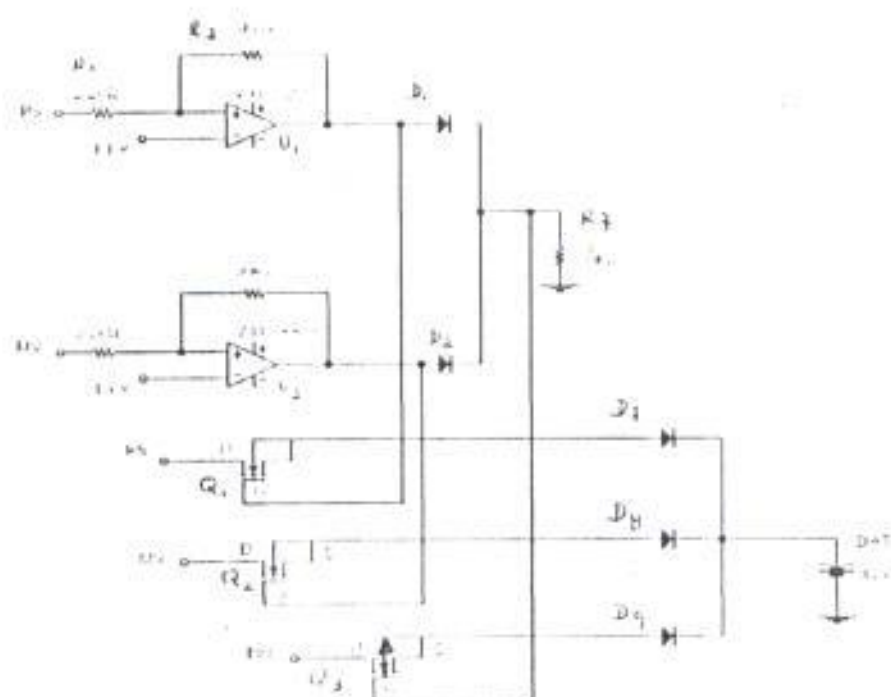
Como podemos apreciar la fuente no convencional puede ser el generador eólico o el panel solar y llega al terminal positivo del operacional a través de la resistencia de 2.2k y a la terminal negativa llega el voltaje de referencia que lo hemos fijado en 13 voltios. Las salidas de ambos operacionales conmutarán de 0 a 20 voltios dependiendo del nivel de voltaje que cada una

de las fuentes no convencionales tenga en cierto instante. El sistema sensa las fuentes en todo momento.

En la siguiente parte veremos como estas señales se usan para discriminar cuáles entradas pasan a cargar al banco de baterías.

### **3.1.1.2. Etapa de selección de las entradas que alimentarán banco de baterías.**

En esta parte veremos como se selecciona la o las entradas que cargarán el banco de baterías. Para hacerlo más fácil ayudémonos con la figura 3.3:



**Figura 3.3: CIRCUITO DE SELECCIÓN DE LAS ENTRADAS QUE ALIMENTARÁN AL BANCO DE BATERIAS**

Las fuentes no convencionales están conectadas a la batería a través de un transistor de efecto de campo, más conocido como MOSFET y de un diodo, cuya función es evitar que la corriente vaya de la batería a las fuentes y las pueda dañar.

El transistor MOSFET en cambio funciona como un interruptor que puede estar en saturación o en corte, dependiendo de la señal de voltaje que exista

la entrada de la compuerta. Cuando recibe una señal de voltaje alto en la compuerta  $G$ , el transistor conduce y cuando recibe una señal de 0 voltios o voltaje bajo, no conduce. Así podemos ver como las salidas de los operacionales  $U_1$  y  $U_2$  están conectadas a las compuertas de sus respectivos transistores  $Q_1$  y  $Q_2$ . Por ejemplo, la salida del operacional que censa el voltaje que está produciendo el generador eólico, está conectada a la compuerta del mosfet que permite que éste envíe corriente a la batería.

Analicemos ahora la tercera entrada correspondiente a la red eléctrica o al generador a diesel. La red se debe habilitar únicamente cuando las dos fuentes no convencionales no estén en capacidad de cargar al banco de baterías, esto es, cuando ambas salidas de los opamps marquen cero voltios. Si alguna de ellas es alta no debe habilitarse la tercera entrada  $Q_3$ . Esto se consigue colocando un diodo después de cada operacional, luego uniéndolos y colocando a continuación una resistencia  $R_7$  de 30 k a tierra. Cuando una de las dos señales o ambas sean altas, el voltaje en la resistencia  $R_7$  será alto y únicamente cuando ambas sean cero, el voltaje en la resistencia será 0.

El voltaje de la resistencia  $R_7$  es el que se envía a la compuerta del mosfet  $Q_3$  que habilita la tercera entrada, pero hay que notar que este mosfet funciona de manera diferente a los anteriores. Este al recibir una señal de bajo permite el paso de corriente de la red a la batería y al recibir una señal

de alto funciona como un circuito abierto. Este comportamiento es precisamente el que nosotros necesitamos y con esto completamos el circuito de jerarquización.

### **3.1.2. Voltaje de Polarización para el circuito de prioridad.**

Hasta ahora hemos visto cómo funciona el circuito de jerarquización; pero se presenta un problema cuando se piensa en instalar el sistema en algún lugar remoto, debido a la forma de obtener los voltajes de polarización de los amplificadores operacionales y el voltaje de referencia, los mismos que deben venir de la única fuente de energía que existe inicialmente; esto es, el banco de baterías. Pero ¿cómo podemos polarizar operacionales que necesitan 20 voltios con una batería de 12 voltios?

La solución es elevar el voltaje de la batería y se lo consiguió utilizando un oscilador y un autotransformador  $T_4$  con relación de vueltas 1:2 para duplicar el voltaje.

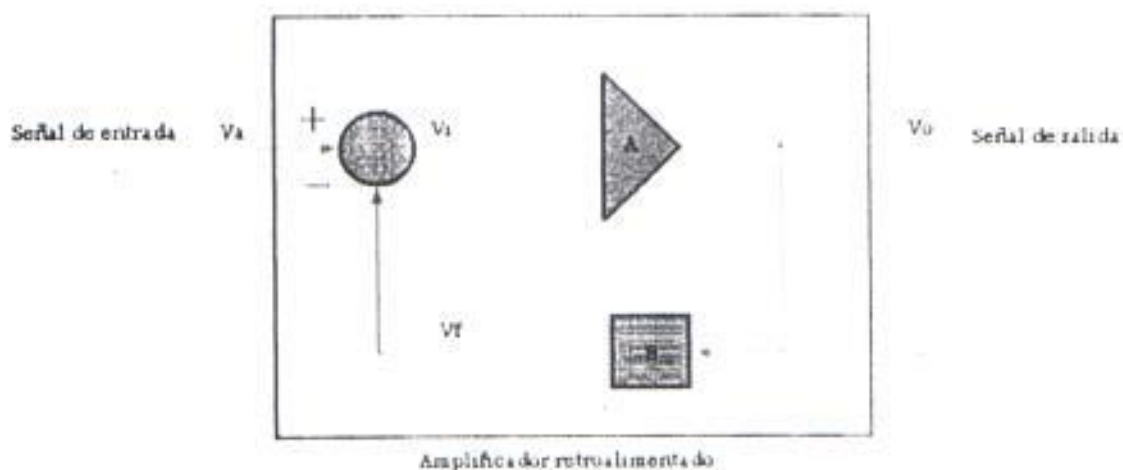
#### **3.1.2.1. Circuito de Oscilación y Duplicación del voltaje de la batería.**

Para entender la forma como funciona un oscilador debemos antes recordar los conceptos de retroalimentación positiva y negativa.

La realimentación negativa produce una disminución en la ganancia de voltaje, pero permite:

1. Ganancia de voltaje más estable.
2. Respuesta de frecuencia mejorada
3. Menor impedancia de salida
4. Ruido reducido
5. Mayor impedancia de entrada
6. Operación más lineal

Veamos en la figura 3-4, la estructura de la retroalimentación negativa

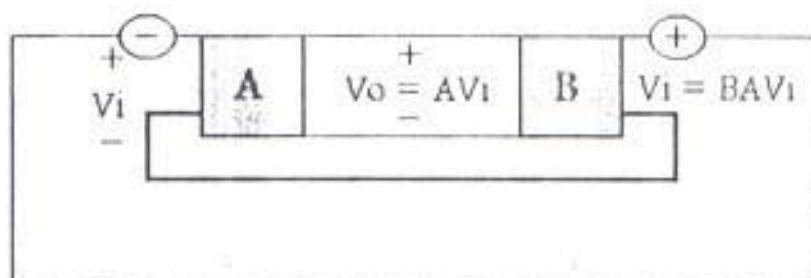


**Figura 3.4: ESTRUCTURA DE LA RETROALIMENTACIÓN NEGATIVA**

La retroalimentación positiva es la que se utiliza para obtener osciladores.

La figura 3.5 nos ayudara a entender el funcionamiento.

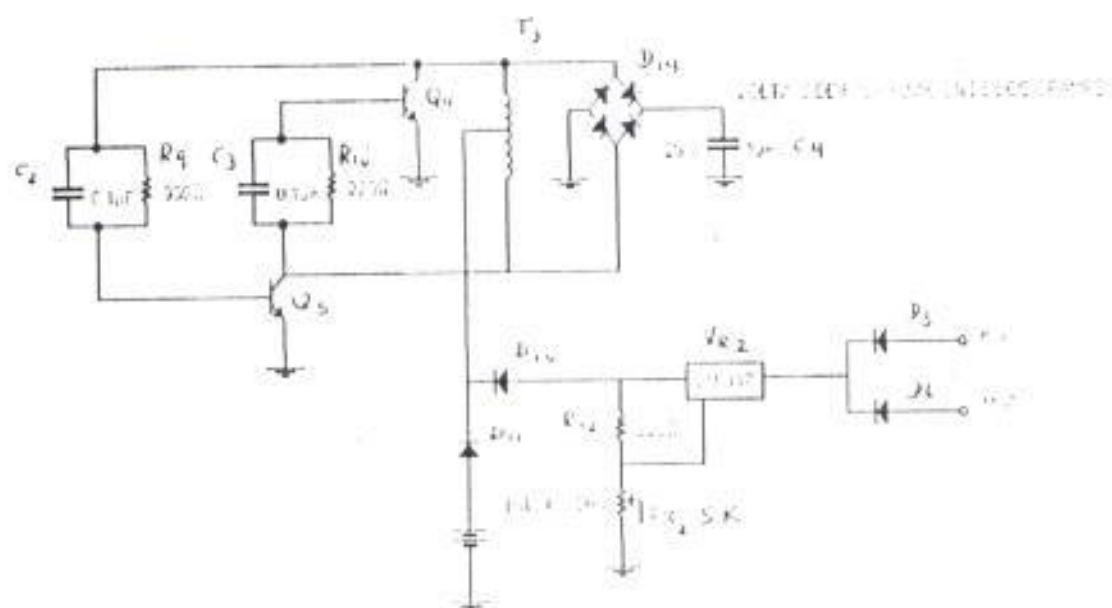




**Figura 3.5: ESTRUCTURA DE LA REALIMENTACIÓN POSITIVA**

Las redes A y B representan las ganancias del circuito y la ganancia total es el producto AB, para conseguir que sea un oscilador AB debe procurarse que sea igual a uno. Como esto no se puede obtener realmente, el ruido que existe en todo circuito inicialmente y que es en el orden de microvoltios es el que inicia la oscilación y se va amplificando hasta que en algún momento se producen unas oscilaciones autosostenibles, y quedando permanente la oscilación. La única condición que debe cumplirse es que AB sea igual a 1. Cuanto más cercano a uno sea este producto más senoidal será la oscilación. También existen osciladores de tren de pulsos, pero ese no lo analizaremos en este momento.

Veamos ahora nuestro oscilador



**Figura 3.6: OSCILADOR UTILIZADO PARA POLARIZAR LOS OPAMS DEL CIRCUITO SELECCIONADOR DE ENTRADAS**

En este oscilador también se cumplen las condiciones de realimentación positiva, pues podemos observar que la señal de voltaje del colector del transistor  $Q_4$  va a través de la red  $R_9C_2$  a la base del transistor  $Q_5$  y del colector de éste la señal de voltaje va por la red  $R_{10}C_3$  a la base del transistor  $Q_4$ . Como el voltaje de polarización es 12 voltios y como está colocado justo en la mitad del primer devanado se tienen 12 voltios pico para el transistor  $Q_4$  y 12 voltios pico también para el transistor  $Q_5$ . Al enlazarse el flujo en el secundario se obtienen 24 voltios pico y luego se los hace pasar por un puente de diodos  $D_{13}$  para rectificar la onda completa y después se coloca a

la salida un capacitor  $C_4$  para eliminar el rizado. El voltaje a través de este capacitor será el que se utilice para polarizar los opamps

### 3.1.2.2.Regulación del voltaje de Polarización

Para esta parte tomamos la salida del autotransformador gráfico anterior

Tenemos los 24 voltios en el capacitor  $C_4$  menos la caida en ambos diodos y luego los pasamos por un regulador LM317.  $V_{RI}$  lo colocamos como indica el gráfico y calibramos el potenciómetro  $P_1$  hasta obtener una salida de 13 V. Que es el voltaje que necesitamos para establecer la referencia para la comparación con los voltajes de las fuentes no convencionales.

### **3.2. Regulación del voltaje para alimentar a la carga.**

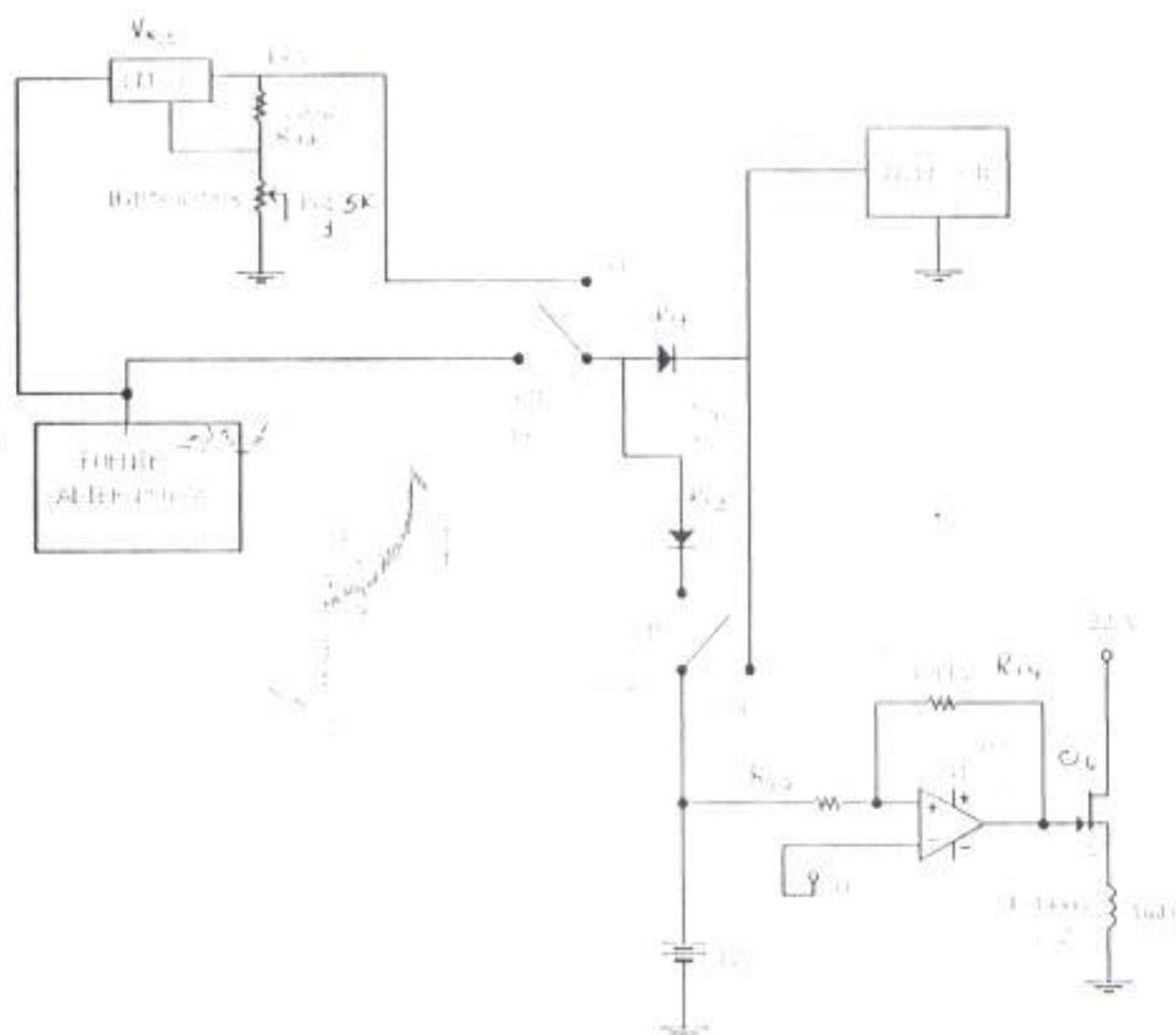
La regulación del voltaje se obtiene utilizando el banco de baterías ya que éste, aparte de almacenar la energía con una eficiencia del 80%, es el mejor que existe y con el se protege el circuito contra posibles fluctuaciones de voltaje provenientes del molino de viento y de los paneles solares, ya que estas magnitudes son cambiantes. La batería que se usó es una de níquel - cadmio de 12 voltios y 12 amperios-hora.

### **3.3. Circuito de protección contra sobrecarga y descarga excesiva del banco de baterías.**

Esta parte del circuito protege contra la sobrecarga del banco de baterías y contra la descarga excesiva. El voltaje máximo al que puede cargarse la batería es de 13.6 voltios, por encima de este valor la batería se dañará por cuanto el exceso de corriente producirá burbujeo del ácido que posee la batería en su interior ocasionando daños en la misma. Si la batería se descarga mucho, esto es, por debajo de los 11.5 voltios se dañará por eso hay que evitar que esto suceda. El circuito de protección consta de un operacional  $U_1$  con histéresis formada por las resistencias  $R_{14}$  y  $R_{15}$  que sensa el voltaje de la batería y lo determina si está dentro del rango de valores de voltajes fijados, o sea 13.6 voltios y 11.5 voltios. La salida del operacional conmutará entre 0 v y 22.6 v,

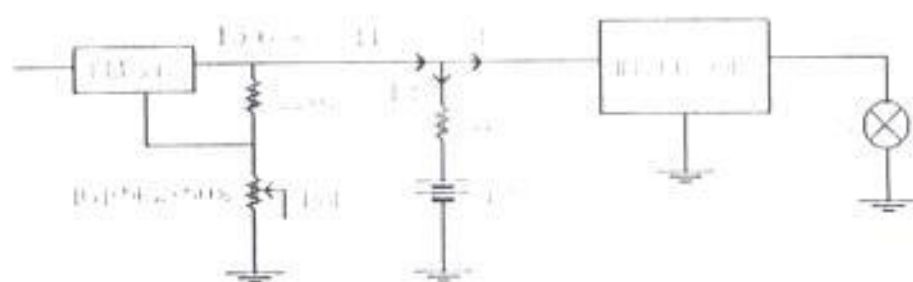
ésta irá a polarizar la compuerta de un mosfet  $Q_6$  que está conectado en serie con dos relés que actuarán al recibir una señal de alto, o sea 22.6 voltios. Cuando la batería se encuentre descargada el opamp  $U_3$  enviará una señal de 0 voltios al mosfet  $Q_6$  y éste no conducirá por lo tanto los relés se encontrarán en la posición de apagado. El relé 1 que comunica las fuentes no convencionales con la batería, en su posición de apagado, permite que la energía fluya hacia la batería a través del diodo  $d_{11}$  que se encuentra conectado a la batería debido a que el relé 2 se encuentra también en la posición de apagado.

El voltaje de la batería comienza a incrementarse y cuando llega a 13.6 voltios, el operacional  $U_3$  envía una señal de alto que polariza la compuerta del mosfet  $Q_6$  y envía una señal de alto a los relés los cuales en ese momento actúan. El relé 1 conecta la batería a un regulador LM317  $V_{K1}$  fijado en 14.3 voltios. La energía proveniente de las fuentes no convencionales pasará a través de aquel y del diodo  $d_{12}$ . Es posible que ese voltaje de 13.6 voltios no indique que la batería esté completamente cargada porque la corriente entra creando un potencial en la resistencia interna de la batería que se pone en serie con el de la misma. La batería estará completamente cargada cuando en el borne interno existan 13.6 voltios. Como el regulador entra a trabajar en ese momento, mantendrá el voltaje de carga fijo en 13.6 voltios y si acaso la batería no está completamente cargada continuará enviando energía hasta que el borne interno llegue a 13.6



**Figura 3.7: CIRCUITO DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGA Y DESCARGA EXCESIVA DE LA BATERÍA.**





$$\begin{aligned} H &= I_2 + I_3 \\ \text{Si } I_2 &= 0 \\ I &= I_3 \end{aligned}$$

Figura 3.8: CARGA DE LA BATERÍA A TRAVÉS DE UN REGULADOR Y CONSIDERANDO LA RESISTENCIA INTERNA.

### 3.4. Circuito de Autopolarización del sistema usando las fuentes no convencionales.

La polarización de los circuitos integrados se realiza a través de un voltaje proveniente del circuito duplicador de voltaje explicado en el acápite 3.1.2.1 y representado por la figura 3.7, pero el voltaje que entra al duplicador proviene de dos partes de la batería y de las fuentes no convencionales que la suministran a través de un regulador LM317  $V_{ref}$  fijado en 12 voltios. Cuando la batería está descargada esta se desconecta del sistema, pero los integrados que conforman el circuito deben seguir funcionando y lo harán a través del regulador que los conecta con las fuentes no convencionales de energía. Cuando desaparezca el sol y no haya viento el sistema no se polarizará y no trabajará lo cual es lógico porque que si no hay ninguna fuente no convencional.



proporcionando energía. Cuando regrese el sol o el viento el sistema se autopolarizara y empezara el suministro de energía hacia el banco de baterías o hacia la carga.

### 3.5. Etapa de Inversión

Lo que nosotros tenemos a la salida del Jerarquizador es, un banco de baterías de 12 voltios de corriente directa y lo que necesitamos son 110 voltios de corriente alterna para poder utilizarla para consumo residencial. Así que debemos convertir la energía proveniente de las fuentes no convencionales, que está almacenada en el banco de baterías, en energía eléctrica de tipo alterno y de 110 voltios para que nos sea útil, puesto que todos los equipos trabajan con 110 voltios a c. El circuito inversor que es que nos permite convertir los voltajes d.c. en voltajes a.c. consta de tres partes básicamente: una de oscilación, otra de amplificación de corriente y la última de elevación de voltaje.

#### 3.5.1. Etapa de Oscilación

La etapa de oscilación la realiza el circuito integrado cmos 4047, el cual está polarizado por la misma batería de 12 voltios a través de un diodo zener de 9 voltios y en caso de que se desconecte la batería lo polarizarán las fuentes no convencionales. Este circuito integrado genera dos salidas a las que llamamos O y  $\bar{O}$ . La primera salida es un tren de pulsos y la segunda es el

mismo tren de pulsos, pero invertido. La frecuencia es de 60 hertz y se lo fija con un potenciómetro de 50 k.

### 3.5.2. Etapa de Amplificación de Corriente.

La salida  $O$  pasa a una etapa de amplificación de corriente formada por tres transistores en configuración Darlington ( $Q_5$ ,  $Q_6$  y  $Q_7$ ). La salida  $\bar{O}$ , formada por los transistores ( $Q_8$ ,  $Q_9$  y  $Q_{10}$ ) pasa de manera similar a otra etapa de amplificación de corriente de manera que la parte superior conduce en la parte positiva del tren de pulsos correspondiente a la salida  $O$  y la parte inferior no conduce en ese instante porque la salida  $\bar{O}$  está en cero voltios. De igual forma usando la salida  $\bar{O}$  que está en cero voltios, la parte superior no conducirá, pero la salida  $\bar{O}$  será positiva, por lo cual conducirá la parte inferior. Que una etapa conduzca o no conduzca se debe a que las salidas  $O$  y  $\bar{O}$  generan voltajes de 0 ó de 9 voltios, porque un diodo zener de 9 voltios es el que polariza al CMOS 4047 y que están conectadas a la base del primer transistor de la configuración Darlington, por lo tanto en un momento la polariza y en otro no. La ventaja de un oscilador con una salida  $O$  y otra es que permite la conducción de corriente durante todo el tiempo ya que en la mitad de la onda conduce la una etapa y en la otra mitad conduce la otra etapa. Esta onda oscilante pasa por un transformador. Los colectores de los transistores de la etapa de amplificación se encuentran polarizados por la batería de 12 voltios a través de

una bobina, la cual se hizo tomando un transformador con tap central y polarizando los 12 voltios en el tap central y cada línea polariza a los colectores de cada una de las etapas de amplificación. En el primario del transformador debido al enlace de flujo y a la relación de vueltas se generan los 100 voltios pico y finalmente se coloca un autotransformador en cascada para aumentar el voltaje a 115 voltios pico.

### 3.6. Gráficas en PSPICE.

En esta parte trataremos sobre las simulaciones por computadora realizadas en el programa PSPICE sobre el funcionamiento del circuito desarrollado en esta tesis.

Como la intensidad solar y la velocidad del viento son variables durante el día igualmente lo serán los voltajes provenientes de estas fuentes. Para tratar de representar este fenómeno se han trazado curvas del voltaje proveniente del panel solar y del generador eólico basados en el comportamiento real de ambos dispositivos.

El voltaje fotovoltaico varía entre 0 y 22 voltios, el generador eólico tratará de dar un voltaje constante de 13 voltios aproximadamente. En algún momento el voltaje del panel estará por encima del eólico, luego decrecerá y se pondrá casi igual a este y finalmente lo igualará. La otra situación que se presenta es que el

voltaje eólico sea superior al fotovoltaico, esto es, lo que se observa en la figura 3.11 al trazar la curva de voltaje de molino de viento y del panel solar para tratar de representar el comportamiento de ambos dispositivos durante el día.

En la figura 3.12, se observan las curvas de las señales de activación y las señales de voltaje, cuando el voltaje del panel está por encima de los 14 voltios el operacional envía una señal de voltaje alto que activa al transistor que permite el paso de corriente cuando el voltaje desciende por debajo de los 13 voltios, aproximadamente, el operacional envía una señal de cero voltios y no activa al transistor y por lo tanto no habrá conducción, 13 voltios es el valor que necesita el generador para cargar un banco de baterías de 12 voltios, porque hay que tomar en cuenta las caídas de voltajes en los dos diodos que van al banco. Si el voltaje sube de nuevo, pero no sobrepasa los 14 voltios no se activará de nuevo la señal. Lo mismo sucede con el generador eólico como se ve en la figura 3.12 cuando el voltaje está por encima de los 13 voltios el operacional envía una señal de voltaje alto y polariza el transistor que permite la conducción. Se puede apreciar como el operacional envía una señal de 22.6 voltios, esto es, voltaje alto y cuando el voltaje del generador disminuye de 13 voltios, la señal cae a cero voltios. Cuando ambas fuentes de voltaje están por debajo del voltaje mínimo ambas salidas de los operacionales estarán en cero voltios. Cuando ambas fuentes superan nuevamente el voltaje mínimo las señales de activación nuevamente están en 22.6 voltios, o sea voltaje alto. En la figura 3.13 se puede

observar las señales de activación, las señales de corriente y las señales de voltaje. Aquí se puede apreciar el momento en que las señales de activación permiten el paso de la corriente ya sea del panel solar, el generador eólico o de la empresa eléctrica. Cuando ambas señales de activación sean cero, el transistor que controla el paso de la corriente proveniente de la red se activa pues es de canal diferente al usado en los otros dos casos y permite el paso de corriente de la red, esto, puede apreciarse en el diagrama en el intervalo entre los 7 segundo y los 11 segundos, esta corriente es constante, puesto que, el voltaje de la red será constante, salvo casos ocasionales de sobrecarga. En la figura 3.13 se ha representado la corriente total que entrega el circuito a la batería. Esta es la suma de la proveniente del panel solar, el generador eólico y cuando no hay éstas de la red





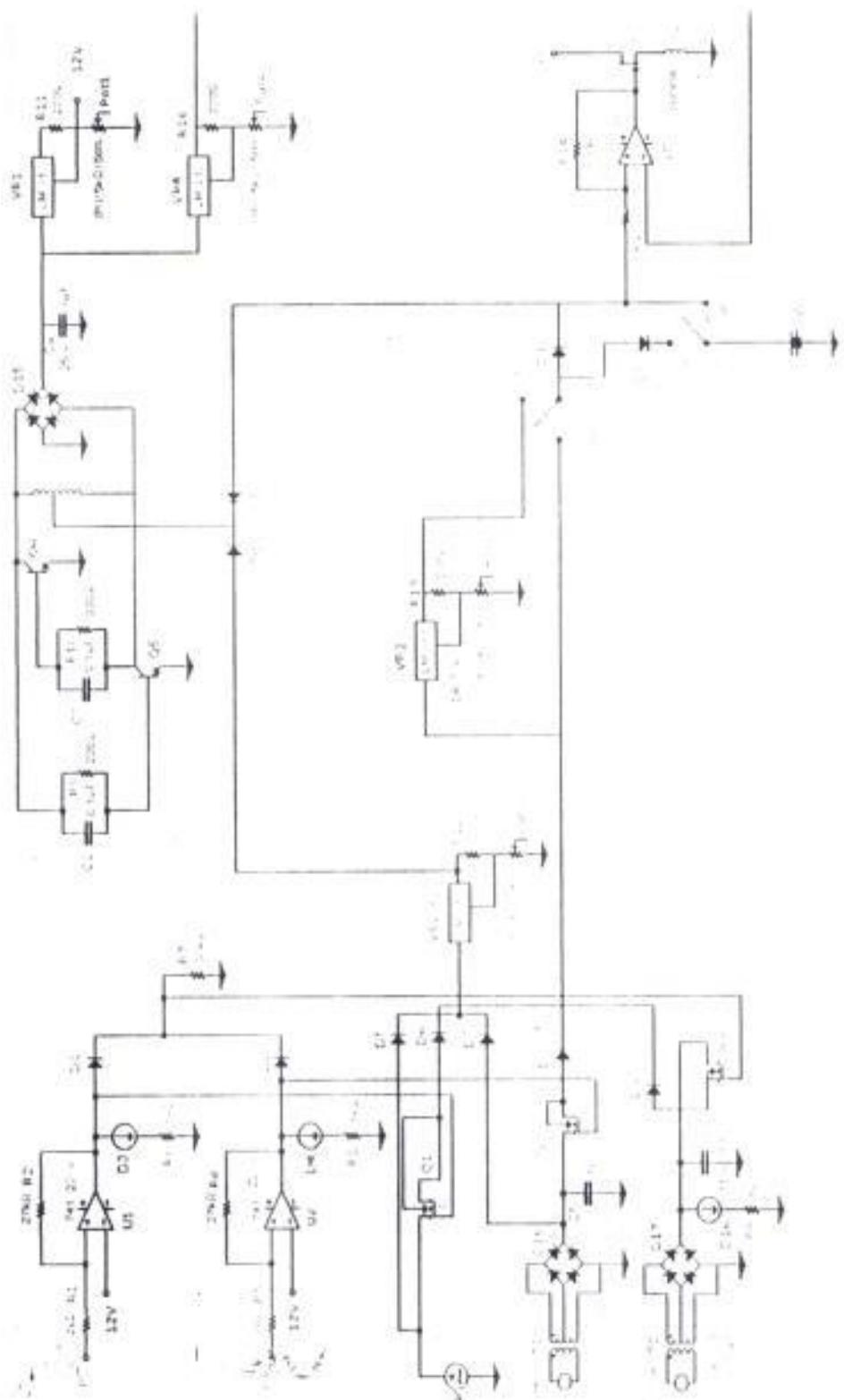


Figura 3.9: DIAGRAMA DEL CIRCUITO SELECCIONADOR JERÁRQUICO PARA DETERMINAR ORDEN DE PRIORIDAD DE LAS ENTRADAS DE ENERGÍA AL CIRCUITO

Figura 3.11: CURVA DE VOLTAJE DEL MOLINO DE VIENTO Y DEL PANEL SOLAR



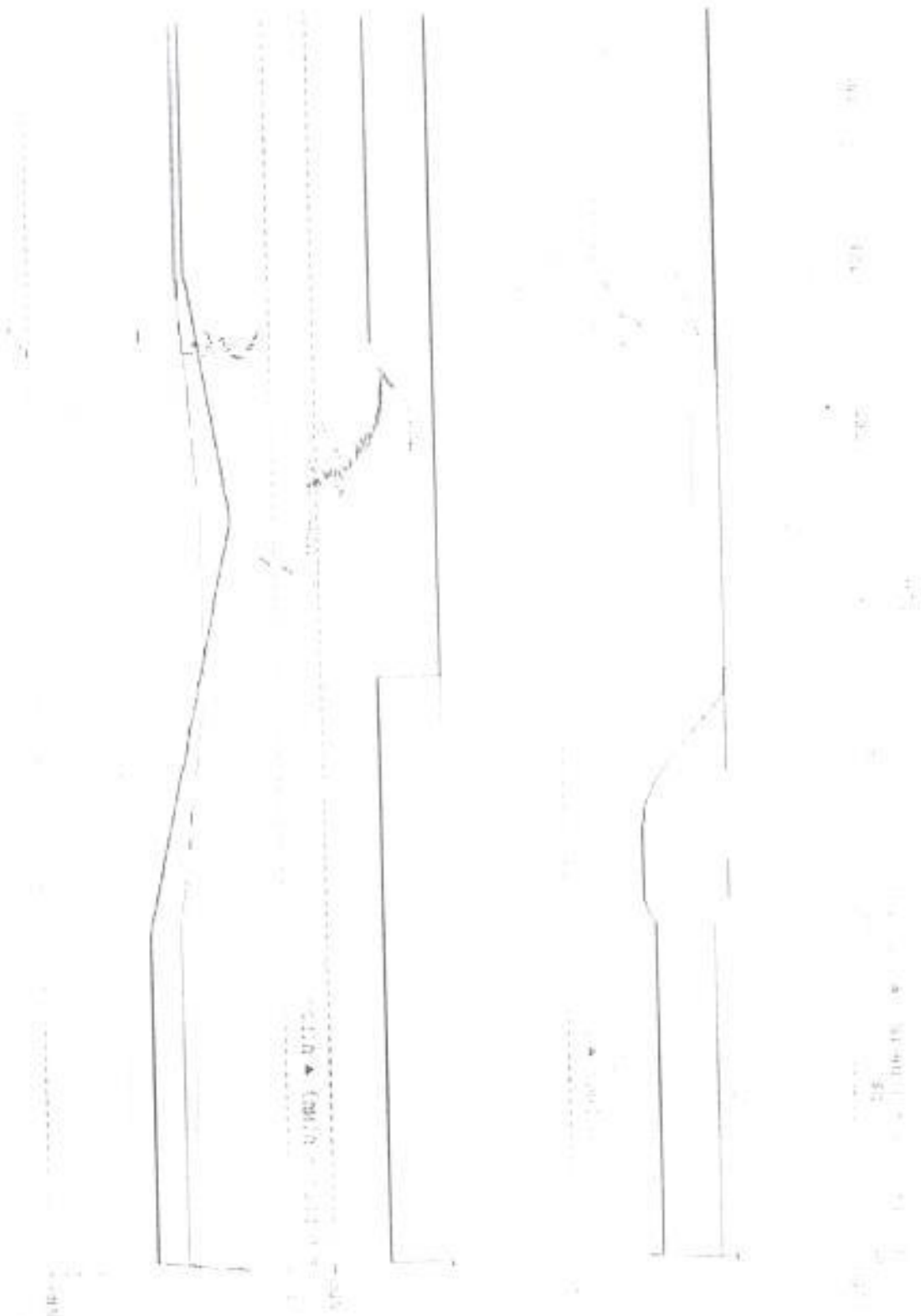


Figura 3.13: SEÑALES DE ACTIVACION VS. SEÑALES DE CORRIENTE VS. SEÑALES DE VOL

100



100



100

100

Figura 3.14: CORRIENTE DE CARGA DE LA BATERIA

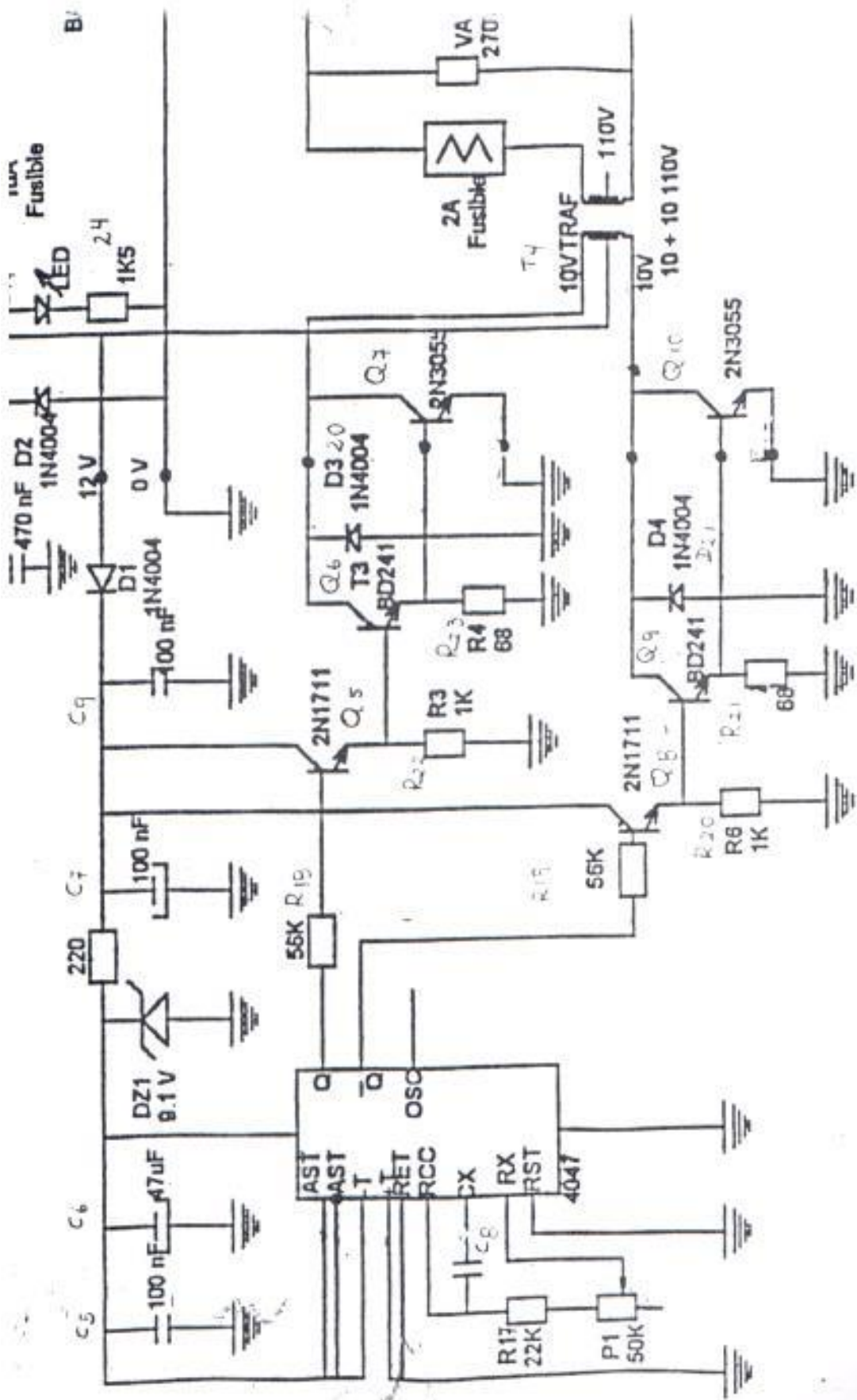


Figura 3.10: DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE INVERSIÓN DE 12V DC A 110V AC.

## **CAPÍTULO IV**

### **DIMENSIONAMIENTO DEL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA MÉDICA DE LA FIEC**

#### **4.1 Cálculo de la energía requerida por laboratorio de Electrónica Médica de la FIEC.**

El laboratorio utiliza 5 luminarias de 200 watos cada una lo que indica 1 kw utilizado para iluminación. Si tomamos 4 horas diarias de clase, esto significa 4 kwh por día por 22 días de clase al mes, esto implica 88 kwh mensuales.

Esto es lo que se necesita para la iluminación

#### **4.2 Determinación de la potencia suministrada por los generadores eólicos.**

Para hacer el dimensionamiento debemos saber las condiciones ambientales del lugar de instalación. En el Campus Prosperina se tiene velocidades promedio de 4 m/s en las noches. Si suponemos una incidencia del 50%, esto es, 12 horas de viento, podemos remitirnos a la Tabla 1 y escoger cuál es el modelo más conveniente para utilizar. Si dividimos la cantidad de kwh generada por cada modelo para el precio obtenemos aquel para el cual es kwh es más barato. Después de hacer esto, vemos que el modelo más conveniente es el Whisper 3000, cuyo valor es de \$4590. Para este modelo el precio por kwh instalado es de \$19.69.



Pero, para saber el precio real debe tomarse en cuenta la incidencia del viento y la amortización durante todo el tiempo de vida útil del generador eólico. Esto lo veremos en la parte de Costos de Instalación

En la tabla II tenemos que para una velocidad de 4 m/s, este modelo generará 233 kwh, si consideramos la incidencia tendremos la mitad, esto es, 116.5 kwh por mes. Si observamos que la batería tiene una eficiencia de almacenamiento de 80% nos quedan 93.2 kwh que cubre la necesidad de energía del laboratorio.

#### **4.3 Determinación de la potencia suministrada por los paneles fotovoltaicos.**

Un panel solar de 35 vatios puede generar 100 wh por día, su valor es de \$330, para obtener 1 kw debemos usar 10 paneles, lo cual implica una inversión de \$3300. Para los 4 kwh que se requiere sería \$ 13200. Por tanto, para este lugar esta alternativa no es conveniente y no debe usarse.

#### **4.4 Costos de Instalación.**

El modelo Whisper 3000 tiene un costo de \$4590, la torre de 10 m cuesta \$1000 lo cual suma \$5590. Si nosotros calculamos cuánto produciría en 20 años de vida útil obtendríamos:

$$233 \text{ kwh/mes} * 12 \text{ meses/año} * 20 \text{ años} = 55920 \text{ kwh}$$

Si consideramos una incidencia del 50% veremos que seria la mitad, o sea 27960 kwh y la capacidad de almacenamiento de la bateria del 80% tendremos 22368 kwh.

Si tenemos 4 kwh por día y dividimos para 12 voltios obtendremos 333,33 Ah.

Si dividimos 333 Ah para 45 Ah de la bateria obtendremos 7.4 o sea 8 baterias.

A \$40 cada una nos dan \$320. Si cambiamos cada 2 años tendremos 10 cambios o sea \$3200.

Si sumamos todo nos da:

Generador	4590
Torre	1000
Baterias	3200
Total	8790

Si dividimos \$8790 para los 22368 kwh que producirá en toda su vida útil obtendremos:

$$\$8790/22368\text{kwh} = \$0.3929/\text{kwh}$$

Existe otra forma de verlo:

Podemos tomar el valor del generador y la torre que dan \$5590 y dividirlo para 20 años de vida útil y obtendremos

$$\$5590/20 \text{ años} = \$279.5/\text{kwh}$$

Al tomar en cuenta las baterías nos dan \$320 entre 2 años de duración nos da \$160 / año. En total nos da \$439.5/ año o sea \$36.66/ mes que costaría dotar de electricidad al Laboratorio de Electrónica Médica de la FIEC.

TABLA II

KILOVATIO HORA POR MES PARA DIFERENTES MODELOS Y DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO.

MODELO	PRECIO	VELO- CIDAD	2.2	2.7	3.1	3.6	4	4.5	4.9	5.4	5.8	6.3	6.7	7.1	7.6	8
MARINER H500	1390		2.5	6	11	18	26	36	48	60	74	88	102	116	129	141
MARINER H600	1190		4.7	11	20	32	47	63	82	102	122	143	164	183	202	218
WHISPER H900	1590		4.4	11	20	32	47	65	86	109	134	160	187	214	240	264
WHISPER H1000	1990		7.8	19	34	54	78	105	136	169	204	238	273	305	336	364
WHISPER H1500	2690		7.4	18	34	54	79	108	143	181	223	267	312	357	400	440
WHISPER H3000	4590		23	56	102	162	233	316	408	507	611	715	818	916	1008	1091
WHISPER H 4000	5790		22	54	100	161	236	325	428	543	668	800	936	1070	1200	1321

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Debe realizarse mediciones en el lugar donde se desea instalar el sistema para saber con qué velocidades de viento contamos y cuánta irradiación solar existe para saber cuánta energía se puede esperar obtener de cada una de las fuentes alternativas en dicho sitio.
2. En Ecuador las horas de radiación solar máxima son más o menos constantes para todas sus regiones, esto, aproximadamente 3 horas por días. Por este motivo el precio del kwh obtenido de los paneles solares será fijo y calculado a 20 años de vida útil será \$0.45 el kwh.
3. Los paneles solares deben usarse para cargas pequeñas. El costo de instalación será de \$33 por kwh. En países donde la radiación solar es mayor como en Sudáfrica el precio es de \$24 por kwh.
4. El precio del kw obtenido de la energía eólica nunca podrá competir con el generado por las empresas eléctricas.
5. El precio del kwh obtenido de la energía eólica irá disminuyendo conforme aumenten la velocidad del viento y la potencia instalada.

6. Para velocidades superiores a 3 m/s es preferible usar generadores eólicos que paneles solares, puesto que el kwh costaría \$0.30, amortizado a 20 años, es decir, un precio mejor que el de los paneles solares. El costo de instalación sería de \$45 el kilovatio-hora.
7. Con velocidades de 4 m/s el costo de instalación sería de \$25 por kwh y amortizado a 20 años sería \$0.22 por kwh.
8. Cuando llegamos a velocidades de 7 m/s, el precio del kw obtenido iguala al generado por la empresa eléctrica y para sitios con velocidades superiores a 7 m/s, el kwh es más barato que el obtenido de la red.
9. Siempre será recomendable preferir la energía eólica sobre la energía solar por cuanto es más barato.
10. En lugares con velocidades inferiores a 3 m/s debe utilizarse la energía solar.  
En lugares con velocidades superiores a 3 m/s debe preferirse la energía eólica.
11. Se recomienda para mejorar el sistema diseñar un inversor con un rango de voltajes de entrada entre 12 y 24 voltios para poder aprovechar al máximo la energía proveniente de las fuentes alternativas porque existen pérdidas en el

regulador de voltaje utilizado actualmente. Al hacer la energía iría directo de las fuentes al inversor.

12. La iluminación debe hacerse directamente de las fuentes alternas o de la batería; es decir, con voltaje d.c. para evitar las pérdidas en el inversor.



## APENDICES

## APÉNDICE I

### DATOS DE RADIACIÓN SOLAR EN LAS ESTACIONES DEL INHAMI EN EL ECUADOR

ESTACIÓN	RADIACIÓN EN KWH/ POR DIA
IZOBAMBA-SANTA CATALINA	4.3639
NUEVO ROCAFUERTE	2.6348
PUYO	3.00
SAN CRISTOBAL	5.2729
PORTÓVIEJO	3.5279
PICHILUNGUE	3.3569
ISABEL MARIA	2.7406
INGUINCHO	5.4046

## APÉNDICE 2

### DATOS DE VELOCIDADES DE LOS VIENTOS EN LAS ESTACIONES DEL INHAMI Y EN LOS AEROPUERTOS DE LA FUERZA AÉREA ECUATORIANA.

AEROPUERTO	FRECUENCIA (%)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)
MANTA	65.8	3.23
BAHÍA DE CARAQUEZ	75.5	4.5
TACHINA-ESMERALDAS	60.3	3.75
MACAS	57.9	3.20
TENA	10	2.23
LAGO AGRIO	10.8	2.45
LA TOMA	55	4.94
CUENCA	52.2	2.71
LATACUNGA	50	6.68
SANTO DOMINGO	56	2.6
QUITO	75	2.53
ATAHUJALPA-IBARRA	41	4.21
TULCAN	53	5.5
MACHALA	73.5	3.45

PORTOVIEJO	48.4	4.4
------------	------	-----

ESTACIÓN DEL  
INHAMI

YANGANA	87	8.43
EL CARMELO	84	2.32
SAN LORENZO	80	2
PUNÁ	94	3
PUNGALES	83	4.6
CALUMA	83	3.4
EL PROGRESO-SOCAVÓN	83	4.4
ESMERALDAS- LAS PALMAS	83	4
LA ARJELIA-LOJA	68	3.2
MANTA	80	4.23
BABAHOYO	84	1.1

## BIBLIOGRAFÍA

1. GARG, H.P., FUNDAMENTALS OF SOLAR ENERGY, Nueva Delhi, 1982, 587 p.
2. INSTITUTO NACIONAL DE ENERGÍA, PRIMERAS JORNADAS DE ENERGIA SOLAR DEL ECUADOR, Quito, 1985, 356 p.
3. MUNDO ELECTRÓNICO, ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA, Barcelona, 1983, 270 p.
4. ALVARENGA, MAXINO, FÍSICA GENERAL, México, 1983, 976p.
5. BOYLESTAD, NASHESKY, ELECTRÓNICA: TEORÍA DE CIRCUITOS, México, 1997, 949 p.