



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**Facultad de Ciencia y Tecnología**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**

*“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTÓNOMO  
BASADO EN ENERGÍA SOLAR”*

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico

**Autores:**

Xavier Eugenio Calle Morquecho

Christian Augusto Parra Torres

**Director:**

Francisco Eugenio Vásquez Calero

**Cuenca, Ecuador**

**2012**

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, a mis padres: Moisés Calle R. y María Morquecho A., quienes con su apoyo, cariño y ayuda incondicional se hicieron presentes a lo largo de mis estudios.

A mi querida esposa María Leonor Ramón, que es la persona que da color y sentido a mi vida, también va dedicado para mi añorada hija Brenda que se encuentra en camino como un regalo de Dios.

A mis dos hermanas Sandra y Martha, les dedico este trabajo, de forma especial a mi hermano José que se encuentra lejos, que de alguna manera me ayudó motivándome y de manera económica.

**Xavier Calle Morquecho.**

A Dios por regalarme la vida y la oportunidad de haber concluido con este objetivo que bien vale la pena.

A mi esposa María Augusta, por el apoyo incondicional brindado para concluir con mis estudios, a mis padres por encaminarme y motivarme a tomar mis estudios universitarios y a mis dos amados hijos Paulette y Joaquín, la máxima muestra de amor de Dios para mi vida.

Por lo tanto, este éxito conseguido es por ellos y para ellos. Conserven este trabajo como un agradecimiento de mi parte.

Solamente el conocimiento  
logra liberar a la persona  
de las cadenas de la ignorancia,  
y lo lleva a un mundo con  
mejores oportunidades

**Christian Parra Torres.**

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay, por darnos la oportunidad de educarnos en esta tan importante institución y formarnos con una educación de calidad, proyectándonos en miras de un futuro mejor.

A nuestro director de tesis el Ing. Francisco Vásquez, quien nos brindó su apoyo en todo momento y al mismo tiempo facilitó algunos de los equipos. Además a cada uno de nuestros maestros, gracias por impartirnos sus conocimientos en los laboratorios para formarnos como buenos profesionales en la sociedad.

En fin a nuestros familiares quienes son los que forjaron este paso importante en nuestras vidas, a los amigos quienes nos supieron dar su apoyo y ayuda desinteresada, siendo todos ellos dignos de expresarles este sentimiento y piezas fundamentales en el transcurso de nuestras vidas estudiantiles y en la culminación del presente trabajo de tesis, queremos expresarles un gracias nuevamente.

090412

## RESUMEN

### “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTÓNOMO BASADO EN ENERGÍA SOLAR”

Para obtener una energía alternativa, sin necesidad de utilizar la energía eléctrica de la empresa proveedora, se ha construido un sistema que consta de 3 Módulos: el Seguidor Solar, el Regulador y el Inversor. El Seguidor Solar controla la posición del panel solar en dirección perpendicular al Sol; el Regulador controla los niveles de voltaje del panel solar y de los acumuladores, al mismo tiempo que prolonga la vida útil de los mismos, y el Inversor transforma la corriente continua en corriente alterna. Este sistema está diseñado para ser utilizado en zonas aisladas del planeta o también en las grandes urbes.

**Palabras Claves:** Inversor, seguidor solar, regulador, panel solar, acumuladores.

  
Xavier Calle Morquecho  
Autor

  
Christian Parra Torres  
Autor

  
Ing. Francisco Vásquez  
Director

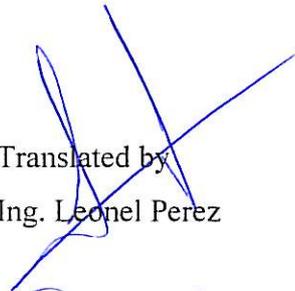
*8*  
*090412*

## ABSTRACT

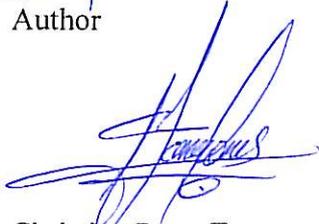
### DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN SYSTEM AUTONOMOUS BASED ON SOLAR ENERGY

In order to obtain an alternative energy, without using the electrical energy of the supplier, a system has been constructed that consists of 3 Modules: the Solar Follower, the Regulator and the Inverter. The Solar Follower controls the position of the solar panel in perpendicular direction to the Sun; the Regulator controls the levels of voltage of the solar panel and the batteries, at the same time as it prolongs the useful life of them, and the Inverter transforms DC into AC. This system is designed to be used in isolated zones of the planet or also in big cities.

**Key Words:** Inverter, solar follower, regulator, solar panel, batteries.

  
Translated by  
Ing. Leonel Perez

  
Xavier Calle Morquecho  
Author

  
Christian Parra Torres  
Author

## ABSTRACT

## Índice de Contenidos

Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento .....	iii
Resumen .....	iv
Abstract .....	v
Índice de Contenidos .....	vi
Índice de Anexos .....	ix
Introducción .....	1
<b>CAPÍTULO 1: PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS, ACUMULADORES E INVERSORES</b>	
1.1. Efecto Fotoeléctrico .....	2
1.2. Célula Fotovoltaica .....	3
1.2.2. Teoría básica de los semiconductores .....	4
1.3. Panel Solar Fotovoltaico .....	10
1.4. Técnicas de Fabricación .....	10
1.4.1. Células de silicio amorfo .....	12
1.4.2. Células de silicio policristalino .....	13
1.4.3. Célula multiunión .....	14
1.5. Investigación y Desarrollo .....	15
1.6. Las tres generaciones de células fotoeléctricas .....	17
1.6.1. Primera generación .....	17
1.6.2. Segunda generación .....	18
1.6.3. Tercera generación .....	19
1.7. Evolución de la energía fotovoltaica .....	19
1.8. Parámetros de la célula solar y del panel solar fotovoltaico .....	21
1.9. Potencia y Costos .....	31
1.10. Teoría y construcción .....	32

1.11. Subsistema de Acumulación (Baterías).....	33
1.11.3. Parámetros eléctricos .....	34
1.11.4. Tipos de baterías para aplicaciones fotovoltaicas.....	36
1.11.5. Diferencias entre baterías solares y de vehículos .....	42
1.11.6. Requisitos ambientales .....	44
1.12. Funcionamiento de los inversores y principios de operación.....	44
1.12.1. Configuración del circuito de potencia.....	46
1.12.2. Configuración en puente monofásico .....	46
1.12.3. Configuración en puente trifásico.....	47
1.12.4. Configuración trifásica mediante múltiples puentes .....	49
1.12.5. Amplificador en contrafase de simetría complementaria .....	50
1.12.5.1. Distorsión de cruce por cero .....	52
1.12.5.2. Cálculo de la potencia y rendimiento en un.....	53
Amplificador	
1.12.5.2. Transistores Darlington .....	55
1.12.5.4. Modelo a pequeña señal Darlington.....	57
1.12.5.5. Configuración simetría complementaria con par .....	58
Darlington	
1.13. Modo de conmutación de inversores.....	59
1.14. Requerimientos de los inversores autónomos .....	61
1.14.1. Formas de Onda.....	62
1.14.3. Sobrecarga .....	63
1.15. Requerimientos de los inversores conectados a la red .....	64
1.15.3. Compatibilidad con la red.....	65
1.15.4. Calidad de la señal.....	66
1.16. Seguridad.....	67
1.16.2. Protecciones.....	68
1.17. Instalaciones Fotovoltaicas.....	69

## **CAPITULO 2: SISTEMA DEL SEGUIDOR SOLAR**

2.1. Estructura Metalmecánica.....	70
------------------------------------	----

- 2.2. Módulo Central de Procesamiento ..... 71
  - 2.2.1. Circuito general del Módulo central de procesamiento ..... 72
  - 2.2.2. Descripción del Diagrama de flujo del MCP ..... 73
  - 2.2.3. Codificación en Mplab del programa seguidor solar ..... 74
- 2.3. Módulo sensor de intensidad solar ..... 74
- 2.4. Módulo control de motores ..... 78
  - 2.4.3. Motor de Corriente Continua ..... 80
- 2.5. Medición y Problemas de acoplamiento ..... 84

**CAPITULO 3: REGULADOR O CONMUTADOR AUTOMÁTICO DE CARGA**

- 3.2. Módulo Conmutador automático de carga ..... 90
  - 3.2.1. Módulo Conmutador circuito de control..... 90
  - 3.2.2. Módulo Conmutador Circuito de Carga..... 92
    - 3.2.2.1. Panel Solar ..... 93
- 3.3. Diagrama de flujo del regulador..... 94
- 3.4. Programa del conmutador para el microcontrolador..... 95
- 3.5. Medidas y Problemas de Acoplamiento del Conmutador..... 95
- 3.6. Módulo Inversor ..... 96
  - 3.6.2. Diagrama del Inversor ..... 96
    - 3.6.2.1. Inversor circuito de control..... 97
  - 3.6.3. Inversor circuito de fuerza ..... 101
    - 3.6.3.5. Transformador de 4V/120V, 120W ..... 103
  - 3.6.4. Programa del inversor para el microcontrolador ..... 107
- 3.7. Módulo Secuencia para los transformadores ..... 107
  - 3.7.1.1. Secuencia para transformadores circuito de control ..... 107
  - 3.7.1.2. Secuencia para transformadores circuito de potencia ..... 109
  - 3.7.2.1. Diagrama de flujo de la secuencia de transformadores ..... 112
  - 3.7.2.2. Programa de la secuencia de transformadores ..... 113
- Conclusiones ..... 114
- Recomendaciones..... 115

Referencias Bibliográficas .....	117
Referencias Electrónicas .....	118

### **Indice de Anexos**

Anexo 1. Programa Seguidor Solar.....	119
Anexo 2. Programa Regulador .....	120
Anexo 3. Programa Generación de Onda Senoidal.....	129
Anexo 4. Programa Secuencia de Transformadores .....	134

**Xavier Eugenio Calle Morquecho**  
**Christian Augusto Parra Torres**  
**Trabajo de graduación**  
**Francisco Eugenio Vásquez Calero**  
**Abril, 2012**

## **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTÓNOMO BASADO EN ENERGÍA SOLAR**

### **INTRODUCCIÓN**

Durante mucho tiempo, la temperatura de la Tierra se ha mantenido relativamente estable, circunstancia que ha permitido el desarrollo de la vida. Los gases invernadero han conservado su equilibrio gracias, fundamentalmente, a la acción de la lluvia y de los árboles, que regulan las cantidades de dióxido de carbono en la atmósfera.

No obstante, en los últimos años, se están sufriendo las consecuencias del calentamiento global, fruto de las malas acciones humanas, lo que ha provocado cambios drásticos en el planeta, tales como: inundaciones, derretimiento de las zonas polares, destrucción de la capa de ozono, sequías severas, etc.; y las causas han sido entre otras creación de energías derivadas del petróleo, que traen consigo muchas formas contaminantes.

Tomando en cuenta lo dicho anteriormente, en el presente proyecto se ha creado una forma de producir energía eléctrica basada en la luz solar, constituida de un sistema autónomo que consta de: seguidor solar, baterías, regulador, inversor y secuencia de transformadores, orientada a la realización de ensayos e investigaciones sobre la gestión de la energía obtenida de paneles solares.

Dicho proyecto se encuentra desarrollado en 3 capítulos: Capítulo 1, paneles solares fotovoltaicos, acumuladores e inversores; Capítulo 2, sistema del seguidor solar; y Capítulo 3, regulador o conmutador automático de carga, cada uno de ellos constantes de subtemas para un mejor entendimiento del lector

## CAPÍTULO 1

### PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS, ACUMULADORES E INVERSORES

#### 1.1. EFECTO FOTOELÉCTRICO

##### 1.1.1. Introducción:

El **efecto fotoeléctrico** consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general), la fotoconductividad es el aumento de la conductividad eléctrica de la materia o en diodos provocada por la luz, entonces efecto fotoeléctrico es la transformación parcial de la energía luminosa en energía eléctrica.

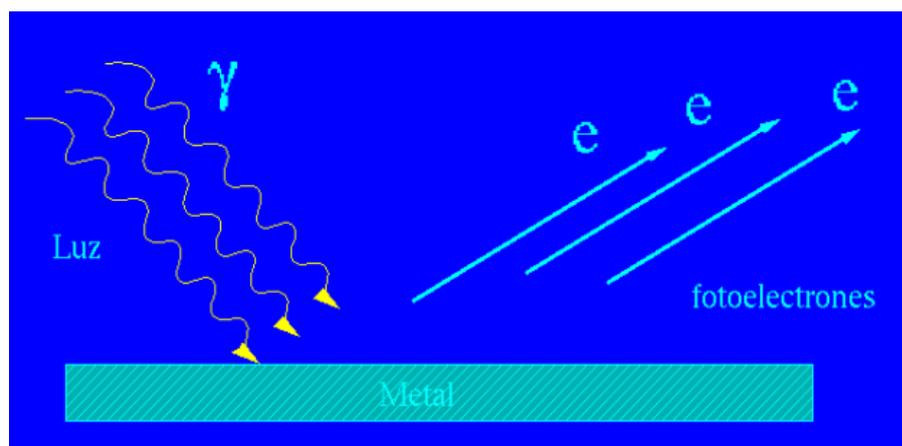


Figura 1.1. Efecto fotoeléctrico. Fuente: Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile, [fisica.usach.cl/~didactic/cuantica2\\_joel.pdf](http://fisica.usach.cl/~didactic/cuantica2_joel.pdf)

##### 1.1.2. Formulación matemática

Para analizar el efecto fotoeléctrico cuantitativamente utilizando el método derivado por Einstein es necesario plantear las siguientes ecuaciones:

Energía de un fotón absorbido = Energía necesaria para liberar 1 electrón + energía cinética del electrón emitido.

Algebraicamente:

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}mv_m^2,$$

o puede también escribirse como

$$hf = \phi + E_k.$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $f_0$  es la frecuencia de corte o frecuencia mínima de los fotones para que tenga lugar el efecto fotoeléctrico,  $\Phi$  es la función trabajo, o mínima energía necesaria para llevar un electrón del nivel de Fermi al exterior del material y  $E_k$  es la máxima energía cinética de los electrones que se observa experimentalmente.

- *Nota:* Si la energía del fotón ( $hf$ ) no es mayor que la función de trabajo ( $\Phi$ ), ningún electrón será emitido.

En algunos materiales esta ecuación describe el comportamiento del efecto fotoeléctrico de manera tan sólo aproximada, debido a que el estado de las superficies no es perfecto (contaminación no uniforme de la superficie externa).

## 1.2. CÉLULA FOTOELÉCTRICA

### 1.2.1. Introducción:

Una célula fotoeléctrica o celda fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) mediante el efecto fotovoltaico.

Las células fotovoltaicas se utilizan a veces solas (iluminación de jardín, calculadoras, etc.) o agrupadas en paneles solares fotovoltaicos, se utilizan para reemplazar a las baterías (cuya energía es mucho más cara para el usuario), las células han invadido las calculadoras, relojes, aparatos, etc.

Es posible aumentar su rango de utilización almacenándola mediante un condensador o pilas, cuando se utiliza con un dispositivo para almacenar energía es necesario colocar un diodo en serie para evitar la descarga del sistema durante la noche.

Se utilizan para producir electricidad para muchas aplicaciones (satélites, parquímetros, etc.), para la alimentación de los hogares o en una red pública en el caso de una central solar fotovoltaica.

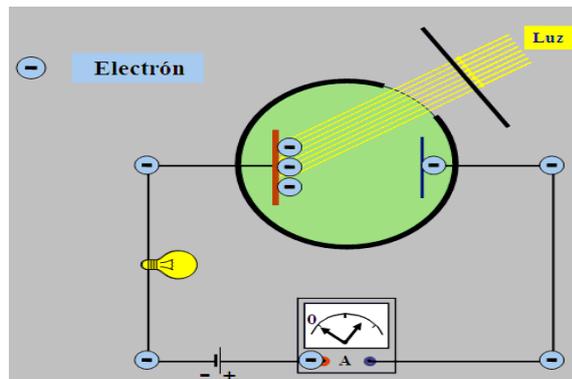


Figura 1.2. Célula Fotovoltaica con incidencia de luz. Fuente: Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile, [www.fisica.usach.cl/~didactic/cuantica2\\_joel.pdf](http://www.fisica.usach.cl/~didactic/cuantica2_joel.pdf)

### 1.2.2. Teoría básica de los semiconductores

Las células fotovoltaicas modernas están fabricadas de unos materiales con propiedades electrónicas específicas denominadas semiconductores, esas células funcionan gracias a algunas de esas propiedades que son necesarias para adquirir una buena comprensión del funcionamiento de una célula solar.

Aunque la teoría atómica es complicada, sabemos que los electrones que se encuentran orbitando alrededor del núcleo atómico no pueden tener cualquier energía sino solamente unos valores discretos, que denominaremos niveles energéticos, a los que se le pone nombre: 1s, 2s, 2p, 3s, etc. En el caso del Silicio, la última capa, la número 3, posee cuatro electrones y faltan también cuatro electrones para completarla, cuando los átomos de Silicio se unen unos a otros comparten los electrones de las últimas capas con los átomos vecinos formando lo que se denomina

enlaces covalentes, muy estables y fuertes, estas agrupaciones se llevan a cabo de forma ordenada dando lugar a un sólido de estructura cristalina.

De la misma forma que los electrones en un átomo no pueden tener cualquier energía, los electrones en un cristal tampoco pueden tomar cualquier energía, sin embargo lo que antes, en el átomo, era un único nivel, ahora son agrupaciones de niveles llamadas bandas de energía. Los últimos niveles energéticos en un átomo definen las propiedades químicas del mismo, de la misma forma las últimas bandas de energía definen las propiedades electrónicas de un cristal, las dos últimas bandas ocupadas (total o parcialmente por electrones) reciben el nombre de banda de conducción (para la más energética) y banda de valencia.

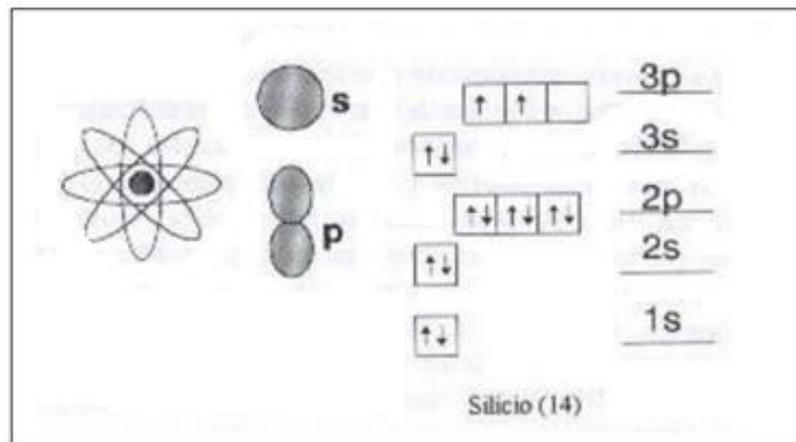


Figura 1.3. El átomo de Silicio y sus niveles de energía. Fuente: Sobrino Eloy, UPC, [www.upcommons.upc.edu/.../...](http://www.upcommons.upc.edu/.../)

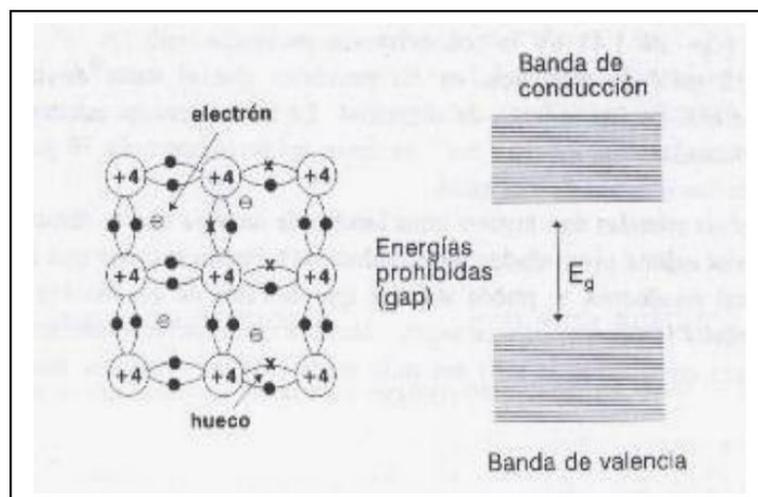


Figura 1.4. Representación esquemática de la estructura cristalina del Silicio y de la agrupación de los niveles energéticos en bandas. Sobrino Eloy, UPC, [www.upcommons.upc.edu/.../...](http://www.upcommons.upc.edu/.../)

Estas bandas están separadas por una energía  $E_g$  denominada energía del gap, que desempeña un papel principal en la teoría de los semiconductores, en general, a una temperatura dada, algunos electrones tendrán energía suficiente para desligarse de los átomos, a esos electrones libres se les denomina electrones propiamente, mientras que a los enlaces que han dejado vacíos se les denomina huecos, reciben este nombre especial debido a que se comportan como si se tratase de partículas con cargas positivas; a los electrones que todavía permanecen ligados a los átomos se les asocia con los niveles energéticos correspondientes a la banda de valencia, en un semiconductor como el que estamos explicando, el número de electrones es igual al de huecos.

### **1.2.2.1. Semiconductores tipo p y tipo n**

Mediante tecnología algunos átomos de los que constituyen la red cristalina del semiconductor se pueden cambiar por otros, llamados impurezas, que pueden ser de dos tipos:

- Donadoras, si en su última capa tienen un electrón más que los átomos que constituyen la red.
- Receptoras, si tienen un electrón menos.

Cuando en un semiconductor introducimos impurezas donadoras, éstas pueden perder el electrón fácilmente. Si introducimos un número de impurezas adecuado es posible conseguir que el número de electrones en el semiconductor (tipo n) venga determinado por el número de impurezas.

De forma análoga, cuando en el semiconductor introducimos impurezas receptoras, éstas capturan un electrón fácilmente lo que origina la aparición de un hueco en la red, introduciendo el número de impurezas adecuado puede conseguirse que el número de huecos en el semiconductor (tipo p) venga determinado por el número de impurezas. En ambos casos se dice que el semiconductor tiene carácter extrínseco, debido a que ahora la conductividad del semiconductor no está determinada por una propiedad característica del mismo (ó intrínseca) sino por algo ajeno (ó extrínseco) que se ha introducido (impurezas).

### **1.2.2.2. Mecanismos de generación y recombinación**

Al describir el concepto de electrón y hueco en los apartados anteriores ligamos su existencia al hecho por el cual un electrón gana energía suficiente para liberarse del átomo al que estaba ligado, precisando un poco más se dice que un electrón gana energía suficiente para promocionarse de la banda de valencia a la banda de conducción, y de forma más breve aún, se ha generado un par electrón-hueco (par eh); el proceso inverso también existe y un electrón libre puede ser capturado por un hueco (enlace vacío) de la red, se dice entonces que se ha producido una recombinación de un par eh.

Esos procesos ocurren continuamente de forma dinámica en un semiconductor, pero los procesos de generación por unidad de tiempo tienen que ser igual al número de procesos de recombinación, o sea, que la población de electrones y huecos permanece constante.

Existen varios procesos de recombinación/generación (procesos en los que un electrón puede ganar o perder energía para intercambiarse entre la banda de valencia y conducción), ahora se analiza el proceso de generación llamado radiativo en el cual, el electrón gana su energía gracias a un fotón; en una célula solar es necesario absorber fotones, por lo cual ahora se entiende por qué la conductividad de un semiconductor aumenta cuando se ilumina con fotones de energía mayor que la energía del gap, ya que sólo fotones con esa energía son capaces de aumentar la población de las partículas capaces de conducir.

### **1.2.2.3. Estructura básica de una célula fotovoltaica**

Con la teoría ya descrita en los párrafos anteriores sabemos que un fotón puede ser absorbido para crear un par eh, como ilustra la figura 1.5 no basta con poner dos cables a un semiconductor y ponerlo al sol para que circule una corriente eléctrica, si lo hiciésemos lo único que conseguiríamos es que el semiconductor se calentase, ya que los pares eh que generasen la luz desaparecerían en un punto dentro del semiconductor; para conseguir la extracción de corriente es necesario fabricar una unión pn que consiste en fabricar un semiconductor en el que una zona sea de

semiconductor tipo n y la otra zona de tipo p, esta fabricación no consiste en pegar un semiconductor p a uno n sino que debe hacerse de manera que la red cristalina del semiconductor no se interrumpa al pasar de una región a otra, por consiguiente es necesario el empleo de tecnologías especiales.

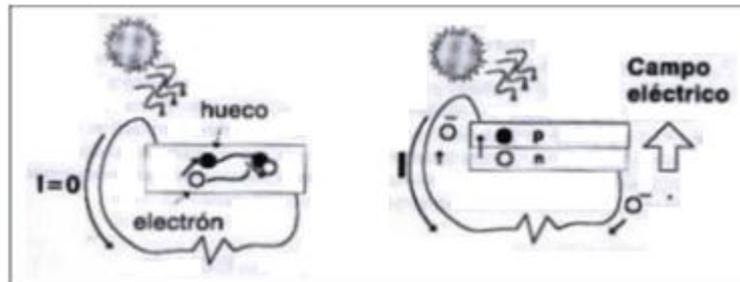


Figura 1.5. Un semiconductor sin estructura pn (izquierda), con unión pn (derecha). Sobrino Eloy, UPC, [www.upcommons.upc.edu/.../...](http://www.upcommons.upc.edu/.../)

La existencia de la unión pn hace posible la aparición de un campo eléctrico en la célula (con la dirección del lado n al lado p) que separa los pares eh: los huecos, cargas positivas, los dirige hacia el contacto del lado p lo que provoca la extracción de un electrón desde el metal que constituye el contacto; los electrones, cargas negativas, los dirige hacia el contacto del lado n inyectándolos en el metal, esto hace posible el mantenimiento de una corriente eléctrica por el circuito exterior y en definitiva el funcionamiento de la célula como generador fotovoltaico.

Otro concepto importante en la estructura de una célula solar es el que hace referencia a lo que llamamos malla de metalización frontal, los contactos metálicos superficiales son necesarios para extraer la corriente eléctrica de la célula, el metal es un material opaco a la luz, en consecuencia, al menos el contacto frontal (el del lado de la célula expuesta directamente al sol) no puede recubrir completamente la superficie de la célula. Puede pensarse entonces que el contacto frontal debe ser lo más pequeño (en superficie) posible, pero si se hace excesivamente pequeño uno de los parámetros de los que hablaremos posteriormente, la resistencia serie aumenta y esto significa una pérdida de eficiencia de la célula, así pues ha de llegarse a una solución de compromiso para que la superficie del contacto frontal sea lo suficientemente baja para permitir el paso de la luz del sol y lo suficientemente alta para que la resistencia serie de la célula sea tolerable. (Ver Figura 1.6.)

#### 1.2.2.4. Principio de funcionamiento de la célula fotovoltaica

Cuando una célula solar se expone al sol la luz genera (g) pares eh, cada uno de estos pares constituye un potencial electrón circulando por el circuito exterior, asociado a este proceso tenemos los procesos de recombinación (r); cada proceso de recombinación aniquilará uno de los pares eh generados; y por lo tanto, tendremos un electrón menos disponible para circular por el circuito exterior, de ahí que se hable del mecanismo de recombinación como uno de pérdidas para la célula.

Para simplificar hemos representado en la Figura 1.6 el circuito exterior por una resistencia R que representa la carga de la célula, si admitimos que hemos hecho circular una corriente I por el circuito exterior, esta corriente provocará una caída de tensión en la resistencia, que se traslada a los bornes de la resistencia, lo que significa que la célula debe operar a una tensión  $V = R \cdot I$ . Esta tensión afecta a la recombinación debido a que ésta depende de V de manera exponencial, entonces si la carga es muy elevada, también lo será la tensión y en consecuencia la recombinación aniquilará todos los procesos de generación, impedirá la circulación de la corriente.

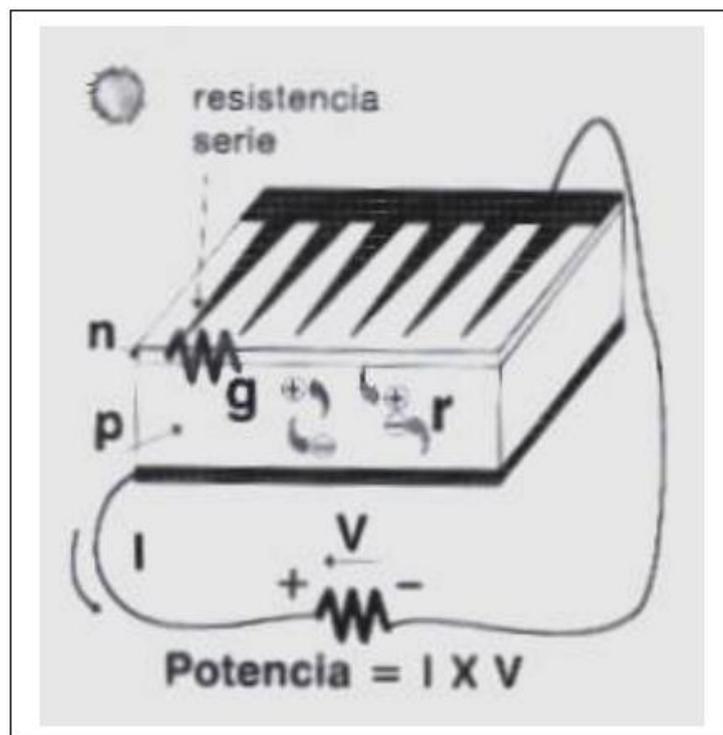


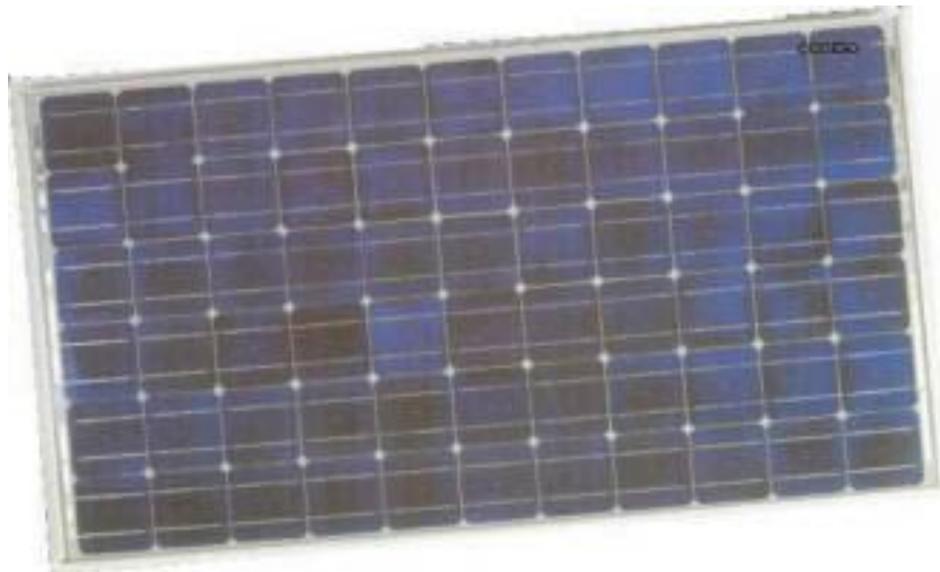
Figura 1.6. Esquema de funcionamiento de una célula solar. Sobrino Eloy, UPC,

### 1.3. PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

El **panel** o **módulo fotovoltaico** (llamados comúnmente paneles solares, aunque esta denominación abarca otros dispositivos) están formados por un conjunto de células fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos (electricidad solar). Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células solares conectadas como circuito en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor deseado (usualmente se utilizan 12V ó 24V) a la vez que se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo.

El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

- radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>
- temperatura de célula de 25 °C (no temperatura ambiente).



1.7. Panel Solar

### 1.4. TÉCNICA DE FABRICACIÓN

El silicio es actualmente el material más comúnmente usado para la fabricación de células fotovoltaica, se obtiene por reducción de la sílice, compuesto más abundante

en la corteza de la Tierra, en particular en la arena o el cuarzo. El primer paso es la producción de silicio metalúrgico, puro al 98%, obtenido de pedazos de piedras de cuarzo provenientes de un filón mineral (la técnica de producción industrial no parte de la arena), el silicio de calidad fotovoltaica debe ser purificado hasta alcanzar más del 99%, que se obtiene mediante la conversión del silicio en un compuesto químico que se destila y luego vuelve a transformarse en silicio.

El silicio se produce en barras llamadas «lingotes» de sección redonda o cuadrada. Estos lingotes son luego cortados en láminas delgadas cuadradas (si es necesario) de 200 micrómetros de espesor, que se llaman «obleas». Después del tratamiento para la inyección del enriquecido con dopante (P As SB o B) y obtener así los semiconductores de silicio tipo P o N, las obleas son «metalizadas»: unas cintas de metal se incrustan en la superficie y se conectan a contactos eléctricos, una vez que las obleas se metalizan se han convertido en células solares.

La producción de células fotovoltaicas requiere energía, y se estima que un módulo fotovoltaico debe trabajar alrededor de 2 a 3 años según su tecnología para producir la energía que fue necesaria para su producción (módulo de retorno de energía).

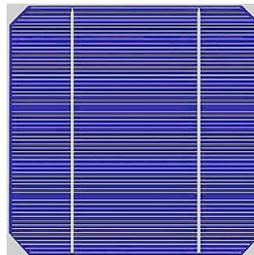
Los materiales y procesos de fabricación son objeto de programas de investigación ambiciosos para reducir el costo y el reciclado de las células fotovoltaicas, las tecnologías de película delgada sobre sustratos sin marcar recibió la aceptación de la industria más moderna. En el 2006 y 2007, el crecimiento de la producción mundial de paneles solares se ha visto obstaculizado por la falta de células de silicio y los precios no han caído tanto como se esperaba, la industria busca reducir la cantidad de silicio utilizado, las células monocristalinas han pasado de 300 micras de espesor a 200 y se piensa que llegarán rápidamente a las 180 y 150 micras, reduciendo la cantidad de silicio y la energía requerida, así como también el precio. Las técnicas de fabricación y características de los principales tipos de células se describen a continuación.

### 1.4.1. Células de silicio amorfo

El silicio durante su transformación, produce un gas que se proyecta sobre una lámina de vidrio, la celda es gris muy oscura, es la célula de las calculadoras y relojes llamada de «solares», estas células fueron las primeras en ser manufacturadas, ya que se podían emplear los mismos métodos de fabricación de diodos.

- Ventajas:
  - Funciona con una luz difusa baja (incluso en días nublados),
  - Un poco menos costosa que otras tecnologías,
  - Integración sobre soporte flexible o rígido.
- Inconvenientes:
  - Rendimiento a pleno sol bajo, del 5% al 7%,
  - Rendimiento decreciente con el tiempo (~7%).

### 1.4.2. Célula de silicio monocristalino



**Figura 1.9.** Celda solar fotovoltaica monocristalina 125 x 125 mm. Fuente: Direct Industry, [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)

Al enfriarse, el silicio fundido se solidifica formando solo un único cristal de grandes dimensiones, luego se corta el cristal en delgadas capas que dan lugar a las células, mismas que generalmente son de color azul uniforme.

- Ventajas:
  - Buen rendimiento de 14% al 16%<sup>[5]</sup>,
  - Buena relación  $W_p \text{ m}^2$  (~150 WC/m<sup>2</sup>, lo que ahorra espacio en caso necesario)
  - Número de fabricantes elevado.
- Inconvenientes:
  - Coste elevado

### 1.4.3. Células de silicio policristalino

Durante el enfriamiento de silicio en un molde se forman varios cristales, la fotocélula es de aspecto azulado pero no es uniforme, se distinguen diferentes colores creados por los diferentes cristales.

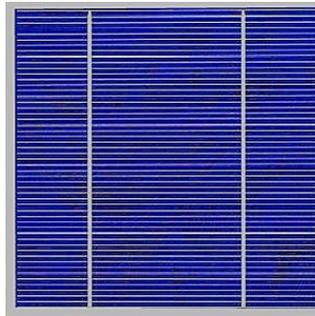


Figura 1.10. Una célula fotovoltaica basada en silicio policristalino, Fuente: Direct Industry, [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)

- Ventajas:
  - Células cuadradas (con bordes redondeados en el caso de Si monocristalino) que permite un mejor funcionamiento en un módulo.
  - Eficiencia de conversión óptima, alrededor de 100 Wp/m<sup>2</sup>, pero un poco menor que en el monocristalino.
  - Lingote más barato de producir que el monocristalino.
- Inconveniente
  - Bajo rendimiento en condiciones de iluminación baja.

¿Policristalino o multicristalino? Hablamos aquí de silicio multicristalino. El término Policristalino se utiliza para las capas depositadas sobre un sustrato (granos pequeños).

### 1.4.4. Célula tándem

Apilamiento monolítico de dos células individuales, mediante la combinación de dos células (capa delgada de silicio amorfo sobre silicio cristalino, por ejemplo) que absorben en el espectro al mismo tiempo se solapan, mejorando el rendimiento en comparación con las células individuales separadas, sean amorfas, cristalinas o microcristalinas.

- Ventajas
  - Alta sensibilidad en un amplio rango de longitudes de onda. Excelente rendimiento.
- Desventaja
  - El costo es alto debido a la superposición de dos células.

#### **1.4.5. Célula multiunión**

Estas células tienen una alta eficiencia y han sido desarrolladas para aplicaciones espaciales, las células multiunión están compuestas de varias capas delgadas usando la epitaxia por haz molecular.

Una célula de triple unión, por ejemplo, se compone de semiconductores GaAs, Ge y GaInP<sub>2</sub>, cada tipo de semiconductores se caracteriza por un máximo de longitud de onda más allá del cual no es capaz de convertir los fotones en energía eléctrica (ver banda prohibida); por otro lado, por debajo de esta longitud de onda, el exceso de energía transportada por el fotón se pierde, de ahí el valor de la selección de materiales con longitudes de onda tan cerca el uno al otro como sea posible, de forma que absorban la mayoría del espectro solar, generando un máximo de electricidad a partir del flujo solar. El uso de materiales compuestos de cajas cuánticas permitirá llegar al 65% en el futuro (con un máximo teórico de 87%), los dispositivos de células de uniones múltiples GaAs son más eficaces. Spectrolab ha logrado el 40,7% de eficiencia (diciembre de 2006) y un consorcio (liderado por investigadores de la Universidad de Delaware) ha obtenido un rendimiento de 42,8%<sup>[6]</sup> (septiembre de 2007). El coste de estas células es de aproximadamente USD 40 \$/cm<sup>2</sup>.

#### **1.4.6. El semiconductor fbi**

La técnica consiste en depositar un material semiconductor que contiene cobre, galio, indio y selenio sobre un soporte.

Una preocupación, sin embargo consiste en los recursos de materias primas, estas nuevas técnicas utilizan metales raros, como indio, cuya producción mundial es de 25 toneladas por año y el precio a fecha de abril del 2009 es de 1.000 dólares por kg; el telurio, cuya producción mundial es de 250 toneladas al año; el galio con una producción de 55 toneladas al año y el germanio con una producción de 90 toneladas

al año. Aunque las cantidades de estas materias primas necesarias para la fabricación de células solares son infinitesimales, un desarrollo masivo de paneles fotovoltaicos solares debería tener en cuenta esta disponibilidad limitada.

## 1.5. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO



Figura 1.11. Paneles Solares Fotovoltaicos. Fuente: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11931>

La técnica no ha alcanzado la madurez y muchas vías de investigación están siendo exploradas, primero se debe reducir el costo de la electricidad producida, y también avanzar en la resistencia de los materiales, flexibilidad de uso, facilidad de integración en los objetos, en la vida, etc. Todas las etapas de los procesos de fabricación se pueden mejorar, por ejemplo:

- La empresa «Evergreen Solar» ha conseguido realizar el depósito de silicio todavía líquido en una película donde se cristaliza directamente con el espesor preciso de la lámina.
- La empresa "Nanosolar" ha industrializado la producción de células CGIS mediante una técnica de impresión en continuo, esperando un costo de 1 \$/W en el año 2010.
- Todas las compañías han anunciado sucesivos aumentos de la eficiencia de sus células.
- El tamaño de las obleas está creciendo de manera constante, reduciendo el número de manipulaciones

- Se trata de utilizar mejor todas las longitudes de onda del espectro solar (incluyendo el infrarrojo, lo que abre perspectivas interesantes: la conversión directa de la luz de una llama en electricidad, refrigeración).
- Concentradores (ya utilizados en los satélites) se están probando en la tierra, a través de espejos y lentes incrustados en el panel, focalizan la radiación en la célula fotovoltaica. A finales de 2007, Sharp ha anunciado la disponibilidad de un sistema de enfoque hasta 1100 veces la radiación solar (contra 700 veces para la marca previa de 2005); a principios de 2008, Sunrgi ha alcanzado 1600 veces. La concentración permite disminuir la proporción de los grupos de paneles dedicados a la producción de electricidad y por lo tanto su coste; por otra parte, estos nuevos materiales soportan muy bien la elevada temperatura debida a la concentración del flujo solar.
- Se está estudiando también la posibilidad de unir el silicio amorfo y el cristalino por heterounión en una célula solar más simple de más del 20% de eficiencia. Proyecto de 2 años anunciado a principios de 2008, con la participación del Laboratorio de Innovación para Nuevas Tecnologías Energéticas y Nanomaterials del CEA-Liten y la empresa coreana JUSUNG (proveedor de equipamiento para los fabricantes de semiconductores), con el INES (Savoy) donde la CEA-Liten ha concentrado sus actividades en la energía solar.
- Otros semiconductores (selenio; asociación cobre-indio-selenio (CIS) de película fina) se están estudiando por ejemplo en Francia por el instituto de investigación y desarrollo en energía fotovoltaica (IRDEP<sup>[8]</sup>). El CIS parece ofrecer un modesto rendimiento del 12%, pero con bajo costo de fabricación.
- Los compuestos orgánicos de (materias plásticas) también pueden ser usadas para hacer células fotovoltaicas de polímeros, podría llegar a hacerse paneles flexibles y ligeros, azulejos, tejidos o velas solares, es de esperar que de fabricación a bajo coste. En la actualidad los rendimientos son bajos (5% como máximo), así como su vida, y aún quedan muchos problemas técnicos por resolver. A principios de 2008, el grupo japonés Fujikura anunciaba<sup>[9]</sup> haber puesto a prueba (1000 horas a 85° C y con una humedad del 85%) unas células fotovoltaicas orgánicas de tipo Grätzel no sólo más resistente, sino que su rendimiento mejoró del 50 al 70% con una superficie rugosa que distribuye al azar la luz reflejada dentro de la célula donde se liberan de

nuevo las cargas eléctricas mediante la activación de otros pigmentos fotosensibles.

- Un equipo de EE.UU. de Boston College en Chestnut Hill (Massachusetts) ha desarrollado paneles solares capaces de recuperar el espectro infrarrojo y convertirlo en electricidad. Esto permitiría la producción de electricidad a partir de cualquier fuente de calor, incluso por la noche. Hasta ahora, sólo una parte de la radiación de la luz visible, predominantemente verde y azul, se transformaba en electricidad y la radiación infrarroja se utilizaba en los paneles térmicos para calentar el agua.
- Asimismo, se pretende fabricar células transparentes; modelos impulsados por el Instituto alemán Fraunhofer para la Mecánica de Materiales (IWM; proyecto "METCO" sugieren que las células transparentes bicapa podrían algún día ser producidas industrialmente. los semiconductores de tipo P transparentes parecen más difíciles de producir (el fósforo podría ser un dopante-P del óxido de zinc, pero el nitrógeno parece ser más prometedor.)
- Por último, la escasez de silicio o de productos dopantes (el precio de indio se ha multiplicado por diez desde 2002 hasta 2009 tras su rarefacción) aumenta aún más los incentivos para la innovación de un mercado en fuerte crecimiento que parece enorme, sobre todo si se puede reducir el costo de la electricidad y acercarlo al de los combustibles fósiles.

## **1.6. LAS TRES GENERACIONES DE CÉLULAS FOTOELÉCTRICAS**

Las células fotoeléctricas se clasifican en tres generaciones que indican el orden de importancia y relevancia que han tenido históricamente. En el presente hay investigación en las tres generaciones mientras que las tecnologías de la primera generación son las que más están representadas en la producción comercial con el 89.6% de producción en 2007.

### **1.6.1. Primera generación**

Las células de la primera generación tienen gran superficie, alta calidad y se pueden unir fácilmente, las tecnologías de la primera generación no permiten ya avances significativos en la reducción de los costes de producción, los dispositivos formados

por la unión de células de silicio se están acercando al límite de eficacia teórica que es del 31% y tienen un período de amortización de 5-7 años.

### **1.6.2. Segunda generación**

Los materiales de la segunda generación han sido desarrollados para satisfacer las necesidades de suministro de energía y el mantenimiento de los costes de producción de las células solares. Las técnicas de fabricación alternativas, como la deposición química de vapor, y la galvanoplastia tienen más ventajas, ya que reducen la temperatura del proceso de forma significativa.

Uno de los materiales con más éxito en la segunda generación han sido las películas finas de telurio de cadmio (CdTe), CIGS, de silicio amorfo y de silicio microamorfo; estos materiales se aplican en una película fina en un sustrato de apoyo tal como el vidrio o la cerámica, la reducción de material y por lo tanto de los costos es significativa. Estas tecnologías prometen hacer mayores las eficiencias de conversión, en particular, el CIGS-CIS, el DSC y el CdTe que son los que ofrecen los costes de producción significativamente más baratos, estas tecnologías pueden tener eficiencias de conversión más altas combinadas con costos de producción más baratos.

Entre los fabricantes, existe una tendencia hacia las tecnologías de la segunda generación, pero la comercialización de estas tecnologías ha sido difícil. En 2007, First Solar produjo 200 MW de células fotoeléctricas de CdTe, el quinto fabricante más grande de células en 2007. Würth Solar comercializó su tecnología de CIGS en 2007 produciendo 15 MW. Nanosolar comercializó su tecnología de CIGS en 2007 y con una capacidad de producción de 430 MW para 2008 en los EEUU y Alemania. Honda, también comenzó a comercializar su base de paneles solares CIGS en 2008. En 2007, la producción de CdTe representó 4.7% del mercado, el silicio de película fina el 5.2%, y el CIGS 0.5%.

### 1.6.3. Tercera generación

Se denominan células solares de tercera generación a aquellas que permiten eficiencias de conversión eléctrica teóricas muchos mayores que las actuales y a un precio de producción mucho menor. La investigación actual se dirige a la eficiencia de conversión del 30-60%, manteniendo los materiales y técnicas de fabricación a un bajo costo; se puede sobrepasar el límite teórico de eficiencia de conversión de energía solar para un solo material, que fue calculado en 1961 por Shockley y Queisser en el 31%.

Existen diversos métodos para lograr esta alta eficiencia incluido el uso de célula fotovoltaica con multiunión, la concentración del espectro incidente, el uso de la generación térmica por luz ultravioleta para aumentar la tensión, o el uso del espectro infrarrojo para la actividad nocturna.

## 1.7. EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Estos son algunos de los objetivos que la industria japonesa se ha propuesto:

Tema	Objetivo para el 2010	Objetivo para 2020	Objetivo para 2030
Coste de producción	100 yen/watt	75 yen/watt	<50 yen/watt
Duración de vida	-	+30 años	-
Consumo de materia prima	-	-	1 g/watt
Costo del convertidor	-	-	15 000 yen/kW
Costo de la batería	-	10 yen/Wh	-
Eficiencia de la célula cristalina	20 %	25 %	25 %
Eficiencia de la célula de capa delgada	15 %	18 %	20 %
Eficiencia de la célula CIS	19 %	25 %	25 %
Eficiencia de la célula III-V	40 %	45 %	50 %
Eficiencia de la célula "Dye Sensitized"	10 %	15 %	18 %

Fuente: Nedo (Japón), 134.62 yen = 1 €, agosto de 2009.

Desde hace unos años Estados Unidos ha perdido el liderato en producción de células fotoeléctricas y a dejado el primer puesto a Japón que ya produce más del 50% de la “materia prima” necesaria para la construcción de centrales solares. A finales de los años 90 el líder era Estados Unidos, gracias en gran parte a los incentivos del gobierno de Clinton, desde que entró a gobernar Bush esos incentivos dejaron de tener prioridad. En cambio en Japón el gobierno está poniendo en marcha muchos

planes para incentivar la instalación, el desarrollo y la producción de todo tipo de tecnologías que permitan generar energía sin utilizar combustibles fósiles.

En el gráfico 1.12 se muestra el crecimiento de la producción mundial de células fotoeléctricas, más del 50% de la producción de los últimos años sale de Japón: Sharp es el productor del 36% de las células fotoeléctricas que se producen cada año en el mundo, los directivos de Sharp dicen que están aumentando la producción a un ritmo cercano al 80% anual para poder abastecer la **gran demanda del mercado europeo** y están a punto de abrir la mayor planta de producción de células fotoeléctricas del mundo en Nara. Con las células que produzca la factoría de Sharp en Nara se podría construir una central solar de 160MW cada año. Sanyo y Kyocera también son dos grandes productoras de células fotoeléctricas.

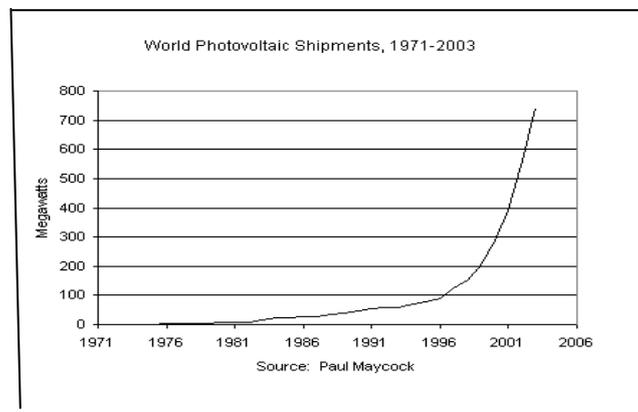


Figura 1.12. Crecimiento de la Producción Mundial de Células Fotovoltaicas.

Japón, además de apostar por la creación de tecnología para la producción de energías alternativas también es líder mundial en la producción de coches híbridos y eléctricos, realmente parece que quieren dejar de depender el petróleo, algo para lo que aún queda mucho, pero que es posible. La estrategia de Japón y sus grandes corporaciones parece lo mejor viendo lo que está pasando AHORA y “viendo” lo que va a pasar de aquí a unos años; siendo un país sin grandes recursos naturales, como lo es Japón, lo mejor es convertirse en productores de las próximas “materias primas”. Alguna vez el mundo dependerá **más de la producción de células fotoeléctricas que de la extracción de petróleo en ciertos países**, no solo será Japón, sino muchos países los que producirán sus propias células y construirán sus propias centrales solares.

## 1.8. PARÁMETROS DE LA CÉLULA SOLAR Y DEL PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

### 1.8.1. Celda en circuito abierto

Si la celda está en circuito abierto, la acumulación de cargas de signos diferentes en los 2 costados de la unión genera una tensión de circuito abierto  $V_{oc}$ .

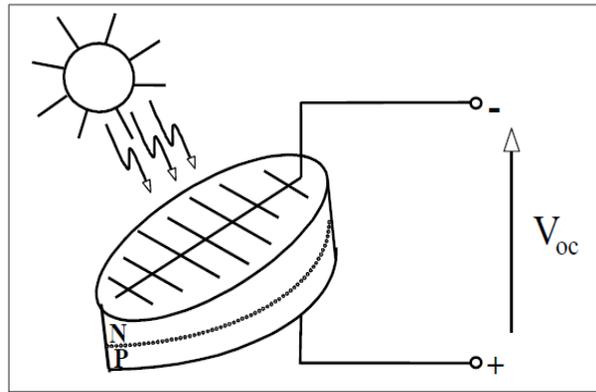


Figura 1.13. Celda en circuito abierto. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.2. Celda en cortocircuito

Si la celda está cortocircuitada se genera una corriente de corto circuito  $I_{sc}$ . Observar que el sentido de la corriente es el mismo que el de la corriente inversa de saturación.

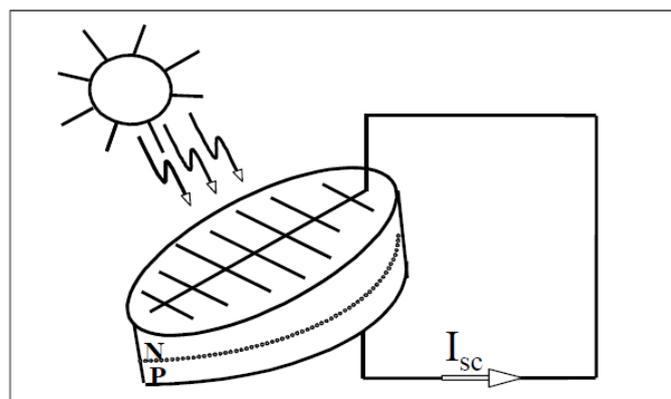


Figura 1.14. Celda en cortocircuito. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.3. Intensidad de corriente de la celda

Por tanto, si mediante una carga exterior (R) se cierra el circuito, la corriente fotovoltaica generada (I) sale de la célula hacia el circuito exterior por la región “P”, atraviesa la carga y entra de nuevo a la célula por la región “N”.

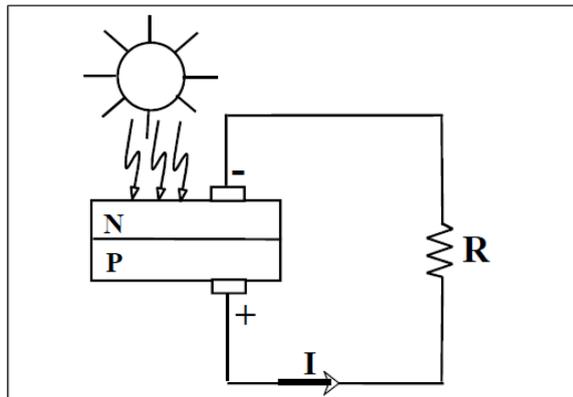


Figura 1.15. Intensidad de corriente de la celda. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.4. Ley del diodo ideal

Si se aplica una tensión directa a la unión p-n, el campo eléctrico se reduce y no se puede parar el flujo de electrones y huecos, es entonces cuando se produce una corriente; el flujo de ésta aumenta con la tensión externa aplicada, este fenómeno es conocido como la ley del diodo ideal, que se puede expresar por:

$$I = I_s \left[ e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right]$$

$I_s$ : corriente de saturación de oscuridad

$V$ : tensión aplicada.

$q$ : carga de electrón ( $1,6 \times 10^{-19}$  C)

$K$ : constante de Boltzmann:  $K = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K

$T$ : temperatura absoluta.

$kT/q$ : potencial térmico  $V_T$  (para el silicio a  $25^\circ\text{C}$  es igual a  $25,7$  mV)

### 1.8.5. Curva característica del diodo

Si graficamos la expresión del diodo se obtiene la curva característica I vs V que sigue:

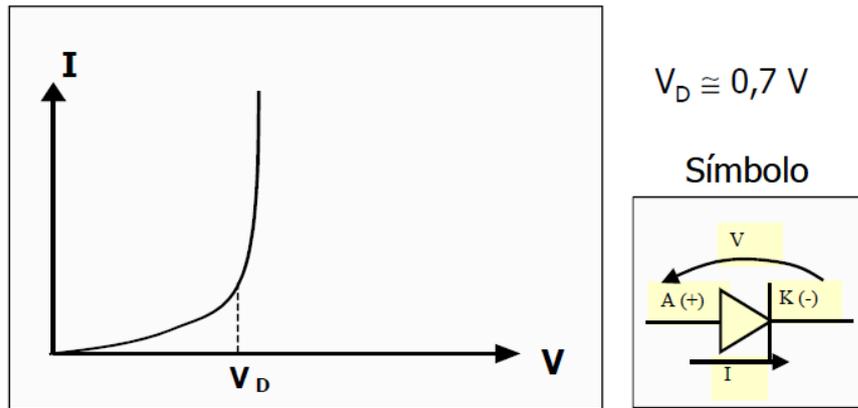


Figura 1.16. Curva característica del diodo. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.6. La célula fotovoltaica (F.V.) y su símbolo

La célula solar se puede ver como un diodo, en general de silicio, diseñada para maximizar la absorción de fotones y minimizar la reflexión. Cuando se conecta una célula solar a una resistencia de carga y se ilumina, circula una corriente  $I$ , en este caso, se puede observar que en la célula la corriente circula de cátodo a ánodo, es decir, internamente circula del semiconductor tipo N al tipo P (contrario al sentido de un diodo).

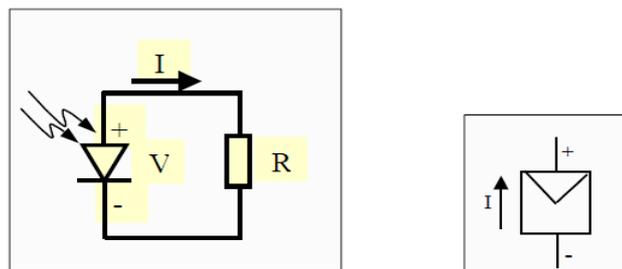


Figura 1.17. Representación mediante circuito y símbolo de una célula fotovoltaica. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.7. Ecuación característica de la célula F.V.

La iluminación de una célula añade una corriente (fotogenerada) a la curva característica I vs V de modo que su ecuación característica se puede expresar por:

$$I = I_S \left[ e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right] - I_L$$

Dónde  $I_L$  es la corriente fotogenerada (generada por el efecto fotovoltaico)

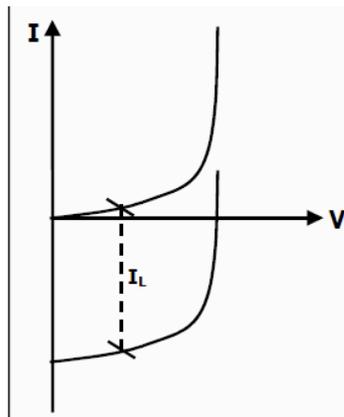


Figura 1.18. La incidencia de la luz tiene el efecto de mover la curva I-V hacia abajo, en el 4º cuadrante. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.8. Modelo ideal de la célula F.V.

El modelo o circuito equivalente ideal de una célula fotovoltaica se representa por una fuente de corriente en paralelo con un diodo. La siguiente figura muestra el modelo ideal de una célula fotovoltaica cuando se conecta a una resistencia de carga:

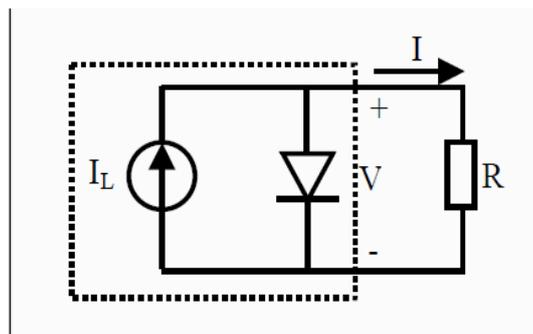


Figura 1.19. Modelo ideal de la célula fotovoltaica F.V. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.9. Curva característica I-V de la célula F.V.

Por tanto, la curva I-V característica quedaría:

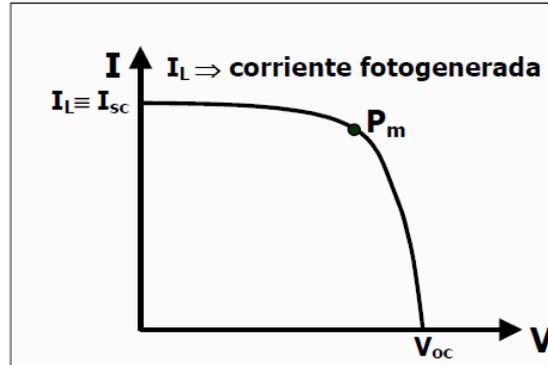


Figura 1.20. Curva característica I-V de la célula F.V. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

Para tener una idea del orden de magnitud, se puede decir que una célula fotovoltaica de silicio monocristalino genera un voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) entorno a los 0,7 V y una corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) que depende del área de la célula (aproximadamente 3 A para un área de 100 cm<sup>2</sup>).

### 1.8.10. Eficiencia y limitaciones de la célula F.V.

Se define el rendimiento o eficiencia ( $\eta$ ) de una célula solar como el cociente entre la potencia máxima que puede dar a la carga y la potencia luminosa recibida por la célula.

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_L}$$

PL: potencia luminosa recibida por la celda.

### 1.8.11. Factor de forma de la célula F.V.

Otra relación importante es el factor de forma o de relleno, FF, este factor se define como el cociente entre la potencia máxima que la célula solar puede dar a la carga y

la potencia teórica máxima definida por el punto ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ); es una medida de la calidad de la unión y de la resistencia serie de la célula, cuanto mayor es este factor, cuanto más próximo a 1, la característica I-V con iluminación se aproxima más al rectángulo de máxima potencia teórica, por tanto, la célula es de mayor calidad.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}}$$

### 1.8.12. Respuesta espectral de la célula solar

Se refiere a cuanta energía es capaz de suministrar cada longitud de onda ( $\lambda$ ) o color de la luz incidente. Se puede calcular como:

$$SR(\lambda) = \frac{q \cdot \text{flujo}_{\text{electrónico}}}{\frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot \text{flujo}_{\text{fotones}}} = \frac{q \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot \text{eficiencia}_{\text{cuántica}}$$

Donde  $q$  es la carga del electrón,  $h$  es la constante de Planck ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ) y  $c$  es la velocidad de la onda.

**Eficiencia cuántica:** se define como el número de electrones que se mueven de la banda de valencia a la de conducción por fotón incidente.

La fuerte dependencia de la respuesta espectral con la longitud de onda hace que el rendimiento de la célula dependa fuertemente del contenido espectral de la radiación incidente. Las células fotovoltaicas “ven” la luz solar de diferentes modos, dependiendo de los materiales de los que estén formadas, la respuesta espectral de una célula F.V. es una medida de la respuesta (medida en forma de corriente generada) de un dispositivo fotovoltaico expuesto a la luz solar.

Un dispositivo F.V. es tanto mejor, cuanto mayor respuesta espectral posee, esto es, el que mejor adapte de su curva de respuesta espectral al espectro de la radiación solar.

### 1.8.13. Factores que afectan el rendimiento de una célula fotovoltaica

El rendimiento de una célula viene limitado por distintos factores intrínsecos y de diseño. Estos son:

Energía de los fotones incidentes: para generar los pares  $e^-h^+$  es necesario que los fotones que llegan a la célula tengan una determinada energía. En la radiación solar, una parte de los fotones incidentes no tienen energía, por lo que se pierden, y otros tienen una energía mayor, por lo que se pierde ese exceso. Un 50% de la energía incidente se pierde por éste motivo. Está relacionado con la SR de la celda.

Pérdidas por recombinación: el proceso de recombinación depende de los defectos de la estructura cristalina del semiconductor, cuanto más puro sea (silicio monocristalino), estas pérdidas serán menores (+ o - un 15%).

Pérdidas por reflexión parcial: Parte de la luz que incide sobre la célula es reflejada por la superficie de ésta, por lo que se pierde (se perdería un 30%), para evitar esta pérdida en la fabricación de las células se emplean capas antirreflectantes y superficies rugosas (con estas capas las pérdidas quedan en aproximadamente 10%).

Pérdidas por los contactos eléctricos: El hecho de dotar a la célula solar de unos contactos que canalicen los electrones liberados hacia el circuito exterior, hace que parte de su superficie de captación se vea tapada por esa rejilla de contactos eléctricos, que no son transparentes, en definitiva restan iluminación; las pérdidas por este concepto pueden evaluarse, como media en un 8%, ya que dependen del diseño.

Pérdidas por resistencia serie: Son debidas al efecto Joule que se produce al circular la corriente eléctrica a través del silicio, produciendo un calentamiento; representan sobre el conjunto un 2%- 3%.

La suma de todas estas pérdidas disminuye el rendimiento de la célula, lo que explica las diferencias que existen entre los rendimientos obtenidos en laboratorios y los de las células comerciales que resultan de los procesos industriales de fabricación

### 1.8.14. Circuito equivalente de la célula F.V. (real)

La célula con iluminación se comporta como un generador de corriente (corriente fotovoltaica), con un diodo en paralelo para detraer la corriente de oscuridad y dos resistencias que representan las pérdidas intrínsecas al diseño y al comportamiento de los materiales de la célula, la resistencia paralelo ( $R_p$ ) es debida a la no idealidad de la unión PN y a las impurezas cerca de la unión.

$$I = I_L - I_S \left[ e^{\frac{V + I r_s}{mV_T}} - 1 \right] - \frac{V + I r_s}{r_p}$$

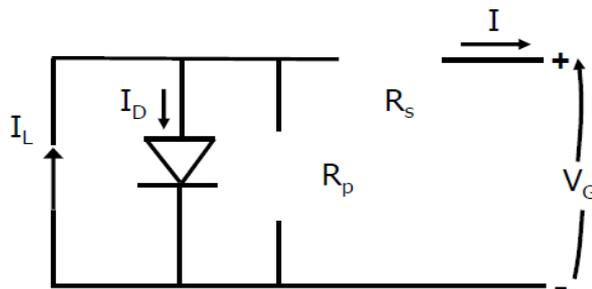


Figura 1.21. Circuito equivalente de la célula fotovoltaica, Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.15. El panel (módulo) solar

Generalmente un panel solar está constituido por la asociación eléctrica de células solares en serie (entre 30 y 36 células).

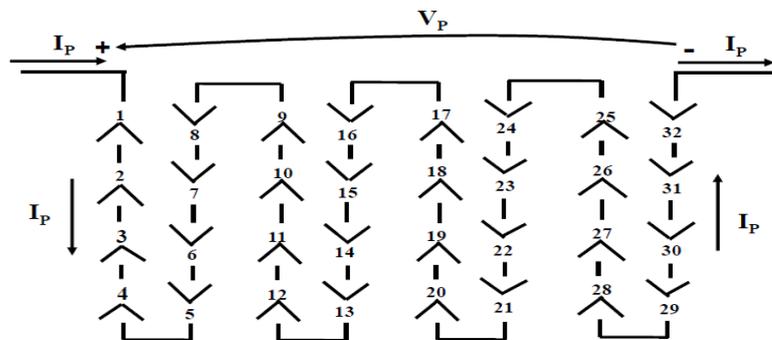


Figura 1.22. Constitución del Panel Solar, Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.16. Características constructivas del panel solar

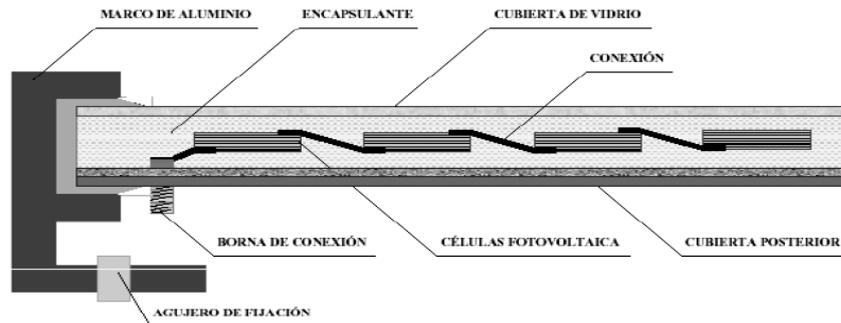


Figura 1.23. Partes del panel solar. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.17. Curva característica del panel solar

#### Ecuación característica

$$I = I_L - I_S \left[ e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right]$$

I: corriente del panel.

V: tensión del panel.

$I_L$ : corriente fotogenerada.

$I_S$ : corriente inversa de saturación.

q: carga del electrón.

k: constante de Boltzman.

T: temperatura del semiconductor.

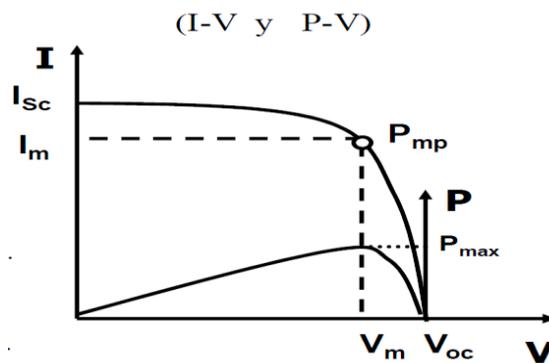


Figura 1.24. Curva característica del panel solar. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC.

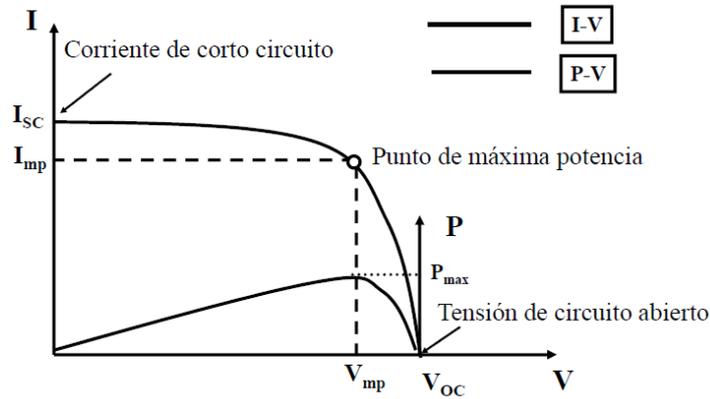


Figura 1.25. Curva característica del panel solar. Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

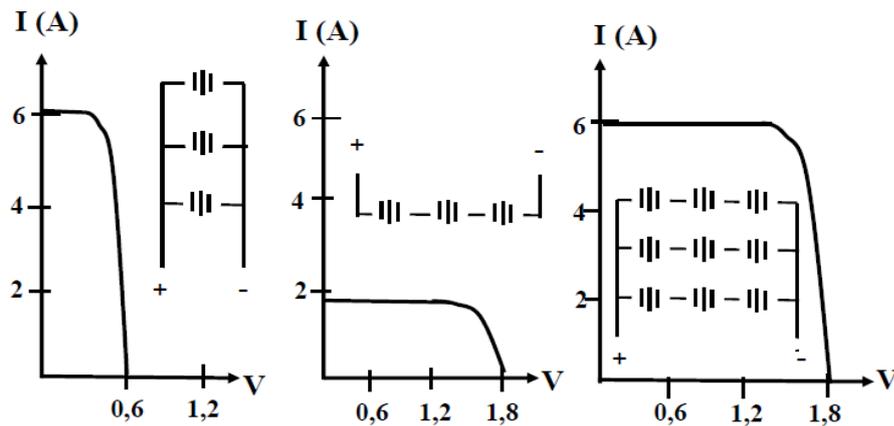


Figura 1.26. Influencia de la conexión de las células solares en serie o en paralelo sobre la curva I - V, Fuente: Lamaison Urioste Rafael Martín, Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC

### 1.8.18. Parámetros característicos del panel solar

- Corriente de cortocircuito  $\Rightarrow I_{SC} = I(V = 0) = I_L$
- Tensión de circuito abierto  $\Rightarrow V_{OC} = V(I = 0) = \frac{kT}{q} \ln \left[ 1 + \frac{I_L}{I_0} \right]$
- Punto de máxima potencia  $\Rightarrow P_m = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad \frac{dP_m}{dV_{mp}} = 0$
- Factor de forma  $\Rightarrow FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} < 1$
- Rendimiento de la conversión  $\Rightarrow \eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_L} = \frac{FF \cdot I_{CC} \cdot V_{OC}}{P_L}$

## 1.9. POTENCIA Y COSTOS

En un día soleado, el Sol irradia alrededor de  $1 \text{ kW/m}^2$  a la superficie de la Tierra. Considerando que los paneles fotovoltaicos actuales tienen una eficiencia típica entre el 12%-25%, esto supondría una producción aproximada de entre  $120\text{-}250 \text{ W/m}^2$  en función de la eficiencia del panel fotovoltaico, por otra parte, están produciéndose grandes avances en la tecnología fotovoltaica y ya existen paneles experimentales con rendimientos superiores al 40%.

A latitudes medias y septentrionales, teniendo en cuenta el ciclo diurno y las condiciones atmosféricas, llegan a la superficie terrestre  $100 \text{ W/m}^2$  de media en invierno y  $250 \text{ W/m}^2$  en verano, con una eficiencia de conversión de aproximadamente 12%, se puede esperar obtener 12 y 30 vatios por metro cuadrado de celda fotovoltaica en invierno y verano, respectivamente.

Con los costes actuales de energía eléctrica,  $0.08 \text{ \$/kWh}$  (USD), un metro cuadrado generará hasta  $0.06 \text{ \$/día}$ , y un  $\text{km}^2$  generará hasta 30 MW, o  $50,000 \text{ \$/(\text{km}^2.\text{día})}$ , para comparar, el Sahara despoblado se extiende por 9 millones de  $\text{km}^2$ , con menos nubes y un mejor ángulo solar, pudiendo generar hasta  $50 \text{ MW/km}^2$ , o 450 TW (teravatio) en total. El consumo de energía actual de la población terrestre está cercano a 12-13 TW en cualquier momento dado (incluyendo derivados del petróleo, carbón, energía nuclear e hidroeléctrica).

El verdadero problema con los paneles fotovoltaicos es el coste de la inversión, como se puede ver en el artículo sobre la ganancia neta de energía, requiriendo hasta más de 10 años (de una vida útil de 40 años o más) para recuperar el coste inicial y generar ganancias. El precio actual de los módulos fotovoltaicos, oscila entre los 3.5 y los 5.0  $\text{\$/W}$  (USD), de capacidad de producción, en función de la cantidad que se compre y la procedencia, los más baratos vienen de China y se debe ser muy prudente con la calidad y garantías de los mismos. El precio de 8  $\text{\$/W}$ , aunque algo barato, es el precio completo de una instalación fija: módulos, estructuras de soporte, onduladores, protecciones, sistemas de medición, costes del proyecto, instalación y permisos administrativos, su precio normal está entre 8.6 y 9.0  $\text{\$/W}$ . Si la instalación

es con seguidores de sol de dos ejes, el coste puede rondar los 10.60 \$/W, aunque la producción eléctrica obtenida es del orden de un 30% superior que en una fija.

### **1.10. TEORÍA Y CONSTRUCCIÓN**

Silicio cristalino y Arseniuro de galio son la elección típica de materiales para celdas solares, los cristales de Arseniuro de galio son creados especialmente para uso fotovoltaico, mientras que los cristales de Silicio están disponibles en lingotes estándar más baratos producidos principalmente para el consumo de la industria microelectrónica. El Silicio Policristalino tiene una menor eficacia de conversión pero también menor coste.

Cuando es expuesto a luz solar directa, una celda de Silicio de 6cm de diámetro puede producir una corriente de alrededor 0,5 amperios a 0,5 voltios (equivalente a un promedio de 90 W/m<sup>2</sup>, en un rango de usualmente 50-150 W/m<sup>2</sup>, dependiendo del brillo solar y la eficacia de la celda). El Arseniuro de Galio es más eficaz que el Silicio, pero también más costoso.

Los lingotes cristalinos son cortados en discos finos como una oblea, pulidos para eliminar posibles daños causados por el corte, se introducen dopantes (impurezas añadidas para modificar las propiedades conductoras) dentro de las obleas, y se depositan conductores metálicos en cada superficie: una fina rejilla en el lado donde da la luz solar y usualmente una hoja plana en el otro. Los paneles solares son contruidos con estas celdas cortadas en forma apropiada, para protegerlos de daños en la superficie frontal causados por radiación o por el mismo manejo de éstos se los enlaza en una cubierta de vidrio y se cementan sobre un sustrato (el cual puede ser un panel rígido o una manta blanda), se realizan conexiones eléctricas en serie-paralelo para determinar el voltaje de salida total, la cimentación y el sustrato deben ser conductores térmicos, ya que las celdas se calientan al absorber la energía infrarroja que no es convertida en electricidad, debido a que el calentamiento de las celdas reduce la eficacia de operación es deseable minimizarlo, los ensamblajes resultantes son llamados paneles solares o grupos solares.

Un panel solar es una colección de celdas solares. Aunque cada celda solar provee una cantidad relativamente pequeña de energía, muchas de estas repartidas en un área grande pueden proveer suficiente energía como para ser útiles, para obtener la mayor cantidad de energía las celdas solares deben apuntar directamente al sol, se dice que si un cuarto de los pavimentos y edificios de las ciudades estadounidenses fueran convertidos en paneles solares incorporados, estos proveerían suficiente energía para esa nación.

## 1.11. SUBSISTEMA DE ACUMULACIÓN (BATERIAS)

### 1.11.1. Introducción

El acumulador o batería es un dispositivo electroquímico que almacena energía eléctrica en forma de enlaces químicos.

### 1.11.2. Estructura Básica

Un acumulador está constituido por uno o varios vasos interconectados, cada vaso se conforma por una lámina de plomo y otra de dióxido de plomo, sumergidos en un electrolito resultante de la mezcla de ácido sulfúrico.

En el cual se produce la siguiente reacción química:

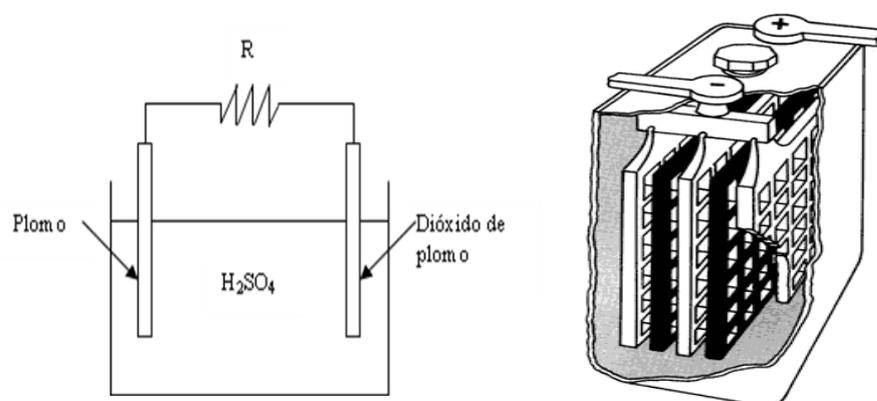
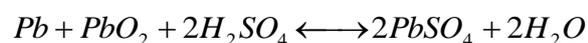


Figura 1.27. Configuración Básica de un Acumulador, Fuente: Vásquez Calero Francisco, Subsistema de Acumulación, UDA

### 1.11.3. Parámetros eléctricos

#### 1.11.3.1. Capacidad de almacenamiento de energía

- Cantidad de electricidad que puede obtenerse durante una descarga completa del acumulador plenamente cargado
- Se mide en Ah para un determinado *tiempo* de descarga.

Ejemplo: Capacidad a 100horas = 200Ah

$$C_{100} = 200Ah$$

#### 1.11.3.2. Régimen de carga/descarga

- Corriente aplicada a la batería para restablecer/extraer la capacidad disponible. Normalizado respecto a la capacidad.
- Ejemplo: régimen de descarga de 10 h. en una batería de 200Ah es:

$$\frac{(200Ah)}{10h} = 20A(\text{régimen } C_{10})$$

#### 1.11.3.3. Máxima corriente de descarga

La industria ha estandarizado la prueba que determina el valor de la máxima corriente de descarga, lo que permite comparar distintos modelos de baterías.

El valor de la corriente máxima es aquel que permite una descarga *continua* de 20 horas de duración, al cabo de la cual la energía en reserva representa el 20% de la máxima con la que comenzó.

Corrientes *en exceso de C/20*, sino son debidas a transitorios en la carga de corta duración, generan una disipación de calor ( $I^2 \times r_i$ , siendo  $r_i$  la resistencia interna de la batería) que daña a la batería en forma permanente. En particular, la batería de nuestro ejemplo no puede entregar 200A, durante una hora, en forma continua, ya que, para preservar la vida útil del equipo, el proceso químico no puede ser acelerado por sobre un máximo.

#### 1.11.3.4. Profundidad de descarga (PDD)

- Amperios-hora extraídos de una batería plenamente cargada
- Se da en tanto por ciento
- Ejemplo: en una batería de 200Ah, extraemos 120Ah, la profundidad de descarga es:

$$\frac{120Ah}{200Ah} 100 = 60\%$$

Cuando se efectúa la prueba para determinar el valor en Ah de una batería solar la **PdD** debe alcanzar un mínimo de 80%.

#### 1.11.3.5. Capacidad de acumulación

La cantidad de energía que puede ser acumulada por una batería está dada por el producto del voltaje nominal por el número de Ah, este producto se mide en Wh o KWh, dependiendo de su valor. Por lo tanto:

$$Wh = \text{Voltaje nominal} \times Ah$$

En nuestro ejemplo, la capacidad de acumulación, a un voltaje de 12 Vcc, sería:

$$Wh = 12 \times 200 = 2400 Wh$$

#### 1.11.3.6. Voltaje de corte

Voltaje para el que se finaliza la descarga de la batería, es función del régimen de descarga y del tipo y modelo de batería, en el gráfico se muestra el voltaje de corte (máximo y mínimo) de un vaso, durante un tiempo dado (12 horas).

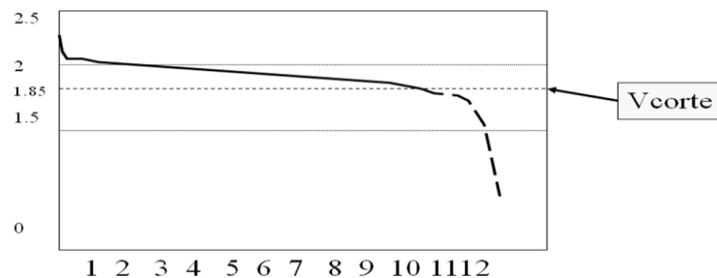


Figura 1.28. Voltaje de corte máximo y mínimo de una batería

### **1.11.3.7. Estado de carga de la batería**

El estado de carga de una batería es la cantidad residual de carga que puede restituir la batería en relación a la cantidad nominal que puede almacenar. El estado de carga se expresa en porcentaje y es 100% cuando la batería está cargada al máximo.

### **1.11.3.8. Ciclo**

Secuencia de carga/descarga para una profundidad y régimen de descarga determinados.

### **1.11.3.9. Ciclos de vida**

Número de ciclos que una batería puede soportar funcionando de manera correcta, sin daño permanente ni afección a su vida útil.

### **1.11.3.10. Vida útil**

Periodo durante el cual es capaz de operar para determinadas condiciones manteniendo la capacidad y el rendimiento, en la práctica, la vida útil de una batería solar suele verse acortada debido a un uso indebido (por ejemplo, sulfatación prematura en sus bornes).

### **1.11.3.11. Rendimiento**

El rendimiento de una batería puede expresarse de dos formas:

- FARÁDICO (Ah): Relación entre carga extraída (en Ah) y carga total (Ah) requerida para establecer el estado inicial de carga.
- ENERGÉTICO (Wh): Igual que el anterior, pero en Wh.
- 

## **1.11.4. Tipos de baterías para aplicaciones fotovoltaicas**

A partir de su aparición en 1859, las baterías han ido evolucionando se han desarrollado diferentes tecnologías, que comprenden uso de nuevos materiales,

modelos, disposición de los elementos, etc., que buscan mejorar rendimientos energéticos, vida útil, disminuir el mantenimiento, mejorar la seguridad, bajar costos, etc.

En algunos de los nuevos modelos es posible encontrar una nueva terminología que introducen los fabricantes de estos nuevos modelos, es así que parece la llamada **unidad de energía de vida, LEU** en inglés (**Life Energy Unit**). El número de LEUs dado para una determinada unidad, representa el número de **KWh** que ésta será capaz de entregar **durante su vida útil**.

No todas las baterías pueden instalarse en un Sistema Fotovoltaico Doméstico (SFD), debido a las condiciones especiales de trabajo de dichos sistemas; sin embargo, actualmente existen varias opciones a ser consideradas durante el diseño e instalación de un SFD, dependiendo de factores como la calidad y costo.

Aunque inicialmente los SFD eran instalados con baterías de plomo (Pb) -ácido convencionales, hoy en día se tienen los siguientes nuevos tipos de baterías:

#### **1.11.4.1. Baterías Pb-ácido convencionales**

Su funcionamiento se explicó anteriormente, son las más económicas y difundidas, requieren mantenimiento permanente, se debe vigilar el nivel de electrolito el mismo que debe ser nivelado periódicamente con agua destilada, su vida útil es limitada.

#### **1.11.4.2. Baterías Pb-ácido libres de mantenimiento (SLI)**

Las siglas SLI significan Start, Light, Ignition o Arranque, Luz, Encendido; son similares a las baterías convencionales Pb-ácido, que disponen de una malla de condensación para el vapor de agua que se produce en los procesos de carga y descarga, por lo tanto no requieren que se le adjunte agua destilada para corregir el nivel de electrolito.

Las baterías SLI de “bajo mantenimiento”, a veces comercializadas bajo el nombre de “baterías libres de mantenimiento”, a menudo utilizan aleaciones de plomo y calcio en las rejillas. El calcio aumenta el voltaje al que comienza a producirse el

gaseo, pero reduce la cohesión del material activo de las placas, en consecuencia, el calcio reduce el consumo de agua, pero también reduce la resistencia al ciclado de la batería, estas baterías son particularmente vulnerables a los daños por descargas profundas.

Su funcionamiento es similar a las baterías convencionales Pb-ácido, algunas disponen de una malla de condensación para el vapor de agua que se produce en los procesos de carga y descarga, por lo tanto no requieren que se le adjunte agua destilada para corregir el nivel de electrolito.

Además están sujetas a deterioro por grandes variaciones de temperatura; por esta razón, muchos diseñadores de sistemas fotovoltaicos recomiendan fuertemente no utilizarlas en aplicaciones fotovoltaicas en países cálidos; sin embargo, la característica “libre de mantenimiento” resulta muy atractiva para algunos, y estas baterías se han utilizado extensamente en algunos países, como por ejemplo Brasil.

#### **1.11.4.3. Baterías tubulares**

Su principio de funcionamiento es similar al de las baterías convencionales Pb-ácido, pero en estas baterías los electrodos se reducen a hojas metálicas, las que son enrolladas, formando un cilindro; el separador de muy poco espesor tiene depresiones, donde se coloca el electrolito, el que tiene una estructura pastosa, los cilindros así formados constituyen las celdas en esta nueva batería.

El diseño del separador y el alto grado de compactación entre electrodos ayudan a crear una estructura mecánica monolítica, la que se ve reforzada por el diseño de la caja, la que sigue las curvaturas de los cilindros internos, el uso de un electrolito pastoso, un empaquetado ceñido y una caja hermética.

El costo de estas baterías es mayor que el de una batería de Pb-ácido con electrolito líquido de muy buena calidad (30 al 50% mayor).

Las baterías de mejor calidad para uso fotovoltaico están hechas con placas tubulares y rejillas con bajo contenido de Sb-Se, con estas baterías se pueden alcanzar vidas

útiles superiores a 8 años, con frecuencias de mantenimiento entre 1 y 2 veces al año. Una desventaja particular de las baterías tubulares en sistemas fotovoltaicos domésticos es que no aceptan fácilmente regímenes de carga muy bajos, además, son caras y están poco disponibles en los mercados actuales de los países en desarrollo.

#### **1.11.4.4. Baterías con electrolito tipo GEL**

Si los gases generados en la batería de Pb-ácido pueden ser parcialmente o totalmente recombinados, la caja de la batería puede ser hermética, esta solución es la usada en las baterías con **electrolito gelatinoso o tipo gel** (*gel cell batteries*, en inglés), el grado de recombinación depende de la actividad química en el electrolito (valor de la corriente).

#### **1.11.4.5. Baterías GEL-VRLA**

Para situaciones de emergencia, como un cortocircuito externo, estas baterías poseen una válvula de seguridad, y de allí que también se las conozcan por la abreviatura inglesa **VRLA** (**V**alve **R**egulated **L**ead **A**cid) o Pb-ácido regulada por válvula.

#### **1.11.4.6. Baterías AGM**

Los vendedores de baterías herméticas ofrecen, hoy día, un sólo tipo de construcción, el que se conoce por las sigla inglesa **AGM** (*Aggregated Glass Mat*), la mejor traducción sería electrolito contenido en un **conglomerado** con paño absorbente (*mat*) cristalizado. El paño es el separador de placas, que está hecho de una estructura *fibrosa fina* de silicio y boro, la que tiene una apariencia cristalizada o de fibra de vidrio (**fiberglass**), el electrolito, que ha sido reducido a una densa estructura gelatinosa, pasa a formar parte del conglomerado, las baterías de este tipo usan también un electrolito de ácido y agua, pero la solución tiene un grado de saturación menor que la del electrolito líquido.

#### **1.11.4.6.1. Ventajas de las baterías AGM**

- Toleran más abuso que otras baterías del tipo hermética, ya que el grado de recombinación de los gases de carga es algo superior al 99 %.
- Tienen una auto-descarga que no excede el 3% por mes (a 25°C).
- Pueden ser recargadas al 100%, aún si han perdido completamente su carga.
- Nunca desparanarán el electrolito (aún si se rompiere la caja), convirtiéndose en la solución ideal para instalaciones en donde el movimiento constituye un problema (boyas, embarcaciones o aviones).
- Resultan muy seguras cuando son instaladas dentro del hogar.
- No dejan escapar grandes cantidades de gases al ser cargadas (menos del 4% del total), siendo ideales en aviones o en instalaciones fotovoltaicas donde el banco de baterías debe ubicarse en un lugar habitable.
- Como no requieren mantenimiento (agregado de agua), se las usa en instalaciones donde la supervisión no es frecuente o nula, como repetidores telefónicos en la montaña. Esta característica puede ser útil cuando el usuario de un sistema FV no quiere o puede mantener el banco de batería, muchos sistemas FVs integrales (sistemas listos para ser usados) incluyen este tipo de batería.
- Resisten mejor las bajas temperaturas ambientales.
- No necesitan ecualización.

#### **1.11.4.6.2. Desventajas de las baterías AGM**

- El costo es dos a tres veces superior al de una batería Pb-ácido con electrolito líquido.
- La corriente y el voltaje de carga son más bajos que para la de electrolito líquido (mayor tiempo de carga)
- No pueden ser almacenadas sin mantenimiento por periodos largos de tiempo, debido a su autodescarga, pueden producirse descargas profundas que repercuten en su vida útil

#### 1.11.4.7. Baterías Níquel-Cadmio (Ni-Cd)

Las baterías de Ni-Cd se caracterizan por ser de ciclo profundo. A pesar de su gran calidad no han podido suplantar a las baterías Pb-ácido, debido a su alto **costo inicial** (6 a 8 veces), a pesar que el costo operacional (costo a largo plazo) es mucho menor (5 veces) al de una batería del tipo Pb-ácido de igual capacidad.

Las baterías solares de Ni-Cd se fabrican con un procedimiento completamente diferente del usado para las versiones pequeñas, evitando el efecto “memoria” de dichas baterías (baterías para computadoras portátiles y celulares).

Las baterías solares de Ni-Cd usan un diseño llamado “placas con bolsillos” (*pocket plate*, en inglés). Las placas son de acero inoxidable, con depresiones (bolsillos) donde se coloca el material activo. El electrolito de estas baterías es una solución de agua e hidróxido de potasio, el que requiere una fina capa de aceite en la superficie superior para evitar su oxidación por el oxígeno del ambiente.

##### 1.11.4.7.1. Ventajas de las baterías de Ni-Cd

- Toleran más abuso que su equivalente de Pb-ácido, ya que soportan, sin dañarse, cargas y descargas excesivas, y pueden trabajar con bajo estado de carga sin deteriorarse.
- Toleran una mayor PdD (cerca del 100%).
- Tienen una mayor eficiencia con bajas y altas temperaturas y soportan, sin problemas, una alta combinación de temperatura y humedad ambiente. Esta última característica las convierte en la solución ideal para climas tropicales.
- No tienen problemas de sulfatación de las placas o congelación del electrolito.
- La autodescarga, inicialmente elevada, disminuye con el tiempo, permitiendo largos períodos de almacenamiento con una retención considerable de la carga inicial.
- La vida útil es de más de dos veces la de una batería solar de Pb-ácido de igual capacidad, los fabricantes de más experiencia con este tipo de baterías, las garantizan por 20 años.

#### 1.11.4.7.2. Desventajas de las baterías de Ni-Cd

- La característica de descarga es la mayor desventaja, ya que el voltaje de salida permanece prácticamente constante (extremadamente baja resistencia interna) hasta que, súbitamente, su capacidad de almacenaje se ve agotada, en ese momento el voltaje de salida cae en forma vertiginosa, no permitiendo al usuario tener un “aviso previo”.
- La evaluación del Estado de Carga requiere medir el voltaje de salida con un voltímetro que tenga la suficiente resolución y precisión para que la lectura contenga dos decimales significativos, ya que la diferencia en voltaje entre una celda cargada o otra descargada es muy pequeña (1,4V cargada; 1,1V descargada).
- El electrolito de una batería de Ni-Cd tiene un rol pasivo, sólo actúa como transportador de cargas, y por lo tanto, no hay variación alguna en su densidad entre una celda cargada o descargada, no es posible usar un densímetro para determinar el Estado de Carga.
- El bajo voltaje por celda obliga a la incorporación de un mayor número de celdas/batería para obtener voltajes cercanos a los 12V.
- 

#### 1.11.5. Diferencias entre Baterías para Aplicaciones Solares y las Baterías para Vehículos

Existen varios casos reportados respecto a que una vez que una batería de un SFD se avería o ha concluido su vida, es reemplazada por baterías convencionales usadas en vehículos. Esta solución puede resultar ventajosa al inicio, particularmente por costo y disponibilidad de la alternativa, pero se convierte en un verdadero problema para el buen funcionamiento del SFD, por las siguientes razones:

- Las baterías de un sistema FV doméstico para uso nocturno deben entregar una corriente cercana o igual a su máximo, *durante varias horas, sin poder ser recargadas.*
- La batería en un automotor debe entregar, en *menos de 30 segundos*, una corriente transitoria cuyo valor pico alcanza 1.000 A (por unos 3 segundos),

pero tiene asegurada una recarga inmediata, que continúa mientras el motor funcione.

Vemos entonces que el régimen de las cargas son completamente distintos, por lo tanto, los parámetros eléctricos que son importantes en una batería solar, como la capacidad (Ah) y la PdD, no tienen importancia en una batería automotriz.

La calidad de una batería solar está determinada por la capacidad de acumulación (Ah x V) y entrega (PdD) de energía durante largos períodos de actividad.

La calidad de una batería automotriz está relacionada con los valores de corriente que puede entregar durante el arranque, a temperaturas bajas.

Baterías solares de 250 Ah son frecuentemente usadas en sistemas FVs de bajo consumo para uso doméstico, mientras que la batería automotriz de mejor calidad sólo alcanza los 60 Ah.

Distintos requerimientos se traducen en distintas técnicas de construcción para las placas que forman las celdas. Las de una batería solar tienen una mayor cantidad de material activo por unidad de volumen, para alargar la vida útil de las mismas.

En las baterías para automotor lo que importa es obtener una baja densidad de corriente (A/cm<sup>2</sup>) para minimizar la caída de voltaje por celda cuando circula la corriente de arranque. Por ello usan placas de plomo esponjoso, el que ofrece la mayor superficie de conducción para un volumen de carga dado.

Esta diferencia de diseño hace que una batería solar de 6V (3 celdas), con volumen muy similar a la de 12 V para un automotor (6 celdas), pese más de 28 Kgs (62 lbs). El incremento del material activo explica, asimismo, el mayor costo asociado con las baterías solares.

Es evidente que una batería solar y otra de automotor son versiones totalmente diferentes. Si se usa para el banco de reserva baterías de automotores, su duración será extremadamente corta, viéndose obligado a cambiarlas frecuentemente, y comprometiendo el grado de confiabilidad del sistema.

### **1.11.6. Requisitos ambientales**

Los SFD, por su naturaleza, generan impactos ambientales no relevantes tanto en su etapa de instalación como en su operación; sin embargo, se deberá tener presente que, una vez cumplida su vida útil, varios de los dispositivos que conforman un SFD deben tener un manejo especial.

Las baterías utilizadas en los SFD contienen ácido sulfúrico y agua destilada que actúan como electrolito, el manejo o instalación inadecuados de la batería podría producir el derrame o evaporación de dicho electrolito así como la sulfatación (sulfato de calcio) a nivel de los bornes de la batería, existe el riesgo de quemaduras de la piel y ropa al contacto con dichos elementos, por lo que la instalación y operación de la batería debe hacérsela por personal capacitado. Así mismo, la disposición final de la batería, una vez cumplida su vida útil, debe hacérsela en sitios especiales debido a que en su interior contiene plomo, que es un metal pesado y tóxico.

Por otro lado, las luminarias o lámparas recomendadas en los SFD son fluorescentes (tubulares o compactas), con una rendimiento lumínico muy superior a sus contrapartes incandescentes; sin embargo, las luminarias fluorescentes contienen en su interior trazas de mercurio, que es un metal pesado de alta toxicidad, por lo que la sustitución de las luminarias se la debe hacer con cuidado, evitando al máximo romper las mismas, cambiándolas por otras nuevas y/o disponiendo las defectuosas en sitios específicamente destinados para ello.

## **1.12. FUNCIONAMIENTO DE LOS INVERSORES Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN**

Los inversores estáticos son circuitos que producen tensión o intensidad alterna a partir de una fuente de corriente continua, la forma de la señal de salida alterna deberá ser sinusoidal. Para cargas de naturaleza resistiva, la forma de la tensión de alimentación es indistinta – continua ó alterna – ambas son válidas. En el caso de cargas de naturaleza inductivas (máquinas eléctricas: motores) la forma de la onda de tensión suministrada deberá ser lo más sinusoidal posible, ya que la máxima

eficiencia en la rotación (energía mecánica) se produce mediante una onda sinusoidal con el armónico fundamental de frecuencia igual a 50 Hz. Si la señal alterna está compuesta por señales sinusoidales de frecuencias mayores (armónicos de mayor orden), estas señales no producen rotación, pero causan pérdidas por calentamiento de los bobinados de cobre y en el núcleo del motor, siendo a menudo responsables de la degradación y destrucción del aislamiento de las bobinas. En inversores conectados a la red eléctrica, la señal de tensión de salida será la propia señal de red (inversores conmutados por red) o deberá estar sincronizada con la señal de tensión de red (inversores autoconmutados). En este tipo de sistemas la señal de la corriente inyectada deberá ser lo más sinusoidal posible.

Los inversores estáticos utilizan para efectuar la conmutación, dispositivos semiconductores de potencia, los cuales funcionan únicamente de dos modos: modo corte (**off**) y modo saturación (**on**), por ello, la señal alterna de salida que se obtiene es cuadrada. Una señal cuadrada puede convertirse en sinusoidal mediante filtros de potencia, el proceso de filtrado de los armónicos más cercanos al fundamental requiere voluminosos condensadores y bobinas que reducirán el rendimiento del sistema, así como dispositivos de conexión / desconexión de los mismos. Por esto, un objetivo a tener en cuenta al diseñar inversores es obtener señales de salida, en las cuales los armónicos que aparezcan sean de pequeño valor y estén lo más lejos posible del fundamental. Esto se conseguirá aumentando la frecuencia de conmutación de los semiconductores y filtrando adecuadamente la señal obtenida.

Una de las funciones que debe cumplir cualquier inversor es la de regular el valor de la tensión de salida, esto se consigue básicamente de tres distintas formas: regulando la tensión antes del inversor (convertidores DC/DC), regulando la tensión en el propio inversor mediante su sistema de control (variando el ángulo de fase, mediante modulación de ancho de pulso (PWM), o regulando a la salida del inversor (mediante un autotransformador).

El estudio de los inversores con semiconductores puede hacerse desde varios puntos de vista:

- Configuración del circuito de potencia.

- Funcionamiento como fuente de tensión o de intensidad.
- Método de síntesis de la onda de salida.

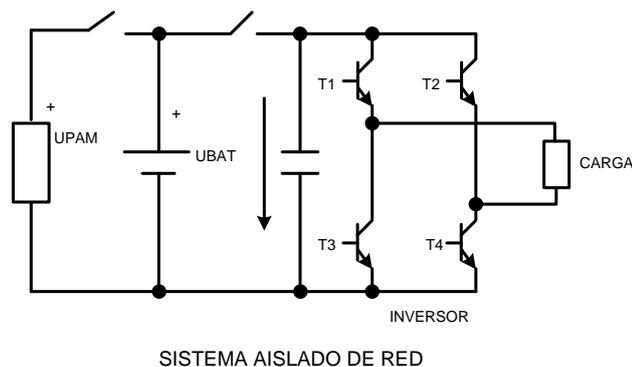
En este primer punto se analizan los inversores sin atender al elemento utilizado en la conmutación, se consideran a los dispositivos semiconductores como interruptores ideales que se abren y se cierran instantáneamente en los momentos requeridos para el correcto funcionamiento del circuito.

### 1.12.1. Configuración del circuito de potencia

La configuración del circuito de potencia o disposición de los semiconductores utilizados, junto con la fuente de corriente continua (modulo fotovoltaico) o tensión continua (baterías) conectada a su entrada y la conexión en alterna a la salida, ya sea una carga determinada (sistemas aislados) o la red eléctrica (sistemas conectados a red), puede realizarse mediante múltiples tipos de configuraciones siendo la denominada configuración den puente, ya sea monofásico (para pequeñas potencias) o trifásico (para medias y grandes potencias) las más utilizadas.

### 1.12.2. Configuración en puente monofásico

Consiste en dos ramas de semiconductores conectadas a los dos polos del campo fotovoltaico o la batería, en el caso de que el sistema disponga de ellas, entre los puntos medios de las ramas de semiconductores se conecta la carga en el caso de instalaciones aisladas o se conecta directamente a la línea eléctrica en las instalaciones conectadas a red.



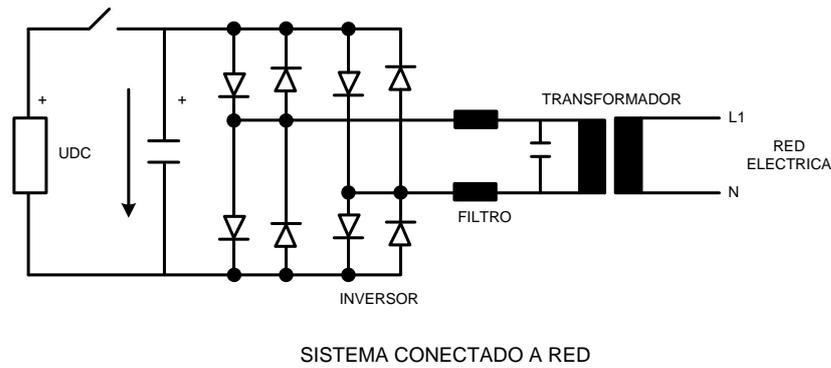


Figura 1.29 Inversores con Configuración en Puente Monofásico

Si se observa la figura 1.29 excitando los semiconductores T1 y T4 uno de los extremos de la carga queda conectado al polo positivo del campo fotovoltaico y el otro lado queda conectado al polo negativo, que se anulan las tensiones ánodo – cátodo de los dispositivos semiconductores. La tensión que aparece en la carga será la de salida del campo del campo fotovoltaico. Bloqueando T1 y T4 y excitando T2 y T3, la tensión de la carga se invierte; haciendo esto de forma alternativa, la carga queda sometida a una tensión alterna cuadrada cuya amplitud es igual a la tensión continua que aparece en la entrada del inversor, ya sea la del campo fotovoltaico ó la tensión de batería. La tensión que deben soportar los semiconductores será igual a la tensión de la entrada más sobre oscilaciones propias del sistema de generación, por ejemplo, la variación de la tensión del campo fotovoltaico debido a la variación de temperatura o la apertura del circuito en algún punto que haga que aparezca la tensión de circuito abierto en el campo fotovoltaico.

### 1.12.3. Configuración en puente trifásico

En la figura 1.30 se describen dos tipos de puente trifásico mediante un único puente con tres ramas, el primer puente representa un inversor basado en transistores del tipo autoconmutado, ya que la aplicación es aislada de red, este inversor está generando el mismo, la señal de tensión o intensidad que alimenta a la carga, normalmente en aplicaciones fotovoltaicas aisladas, el inversor se comporta como la red eléctrica o sea como una fuente de tensión, en teoría aunque varíe la carga no varía la tensión de salida del inversor.

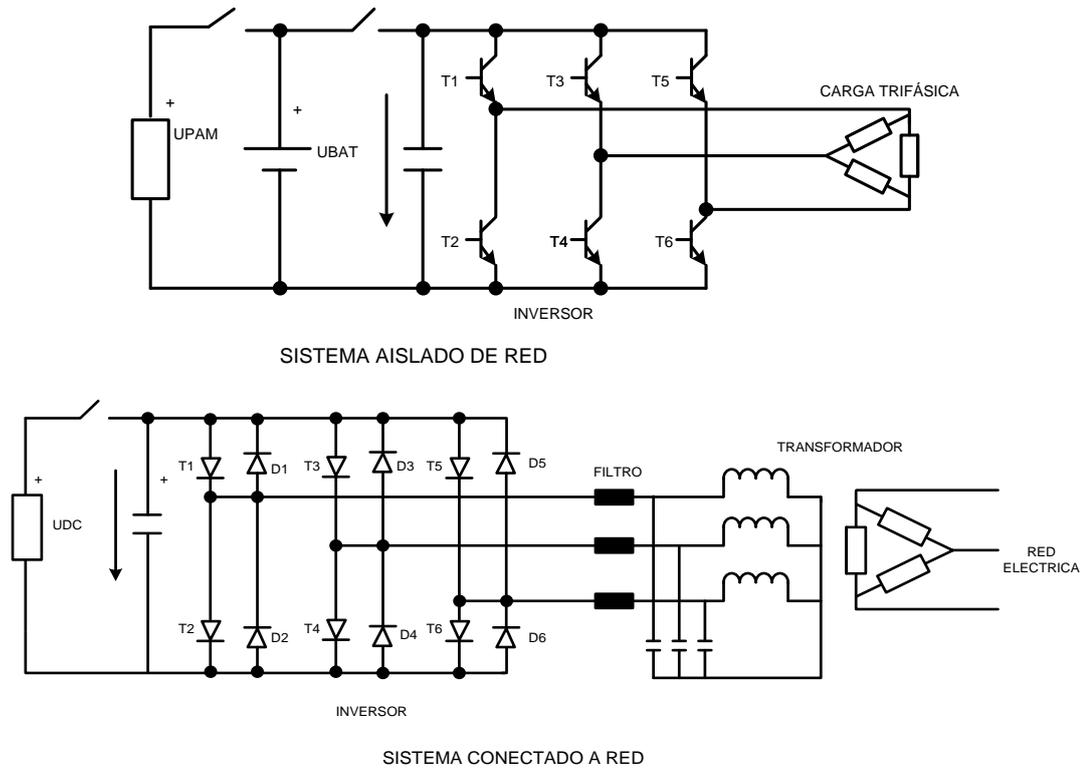


Figura 1.30 Inversores con configuración en puente trifásico.

En el segundo dibujo de la figura 1.30 vemos un inversor trifásico basado en un único puente, en éste caso conectando directamente el campo fotovoltaico a la red eléctrica a través de un transformador. Este inversor es del tipo conmutado por red, basado en un tipo de dispositivos denominados tiristores, pero la misma configuración se puede realizar mediante transistores.

En los puentes trifásicos la excitación de los dispositivos de conmutación se realiza de forma parecida al inversor monofásico pero desfasando cada rama  $120^\circ$  respecto de las demás, de esta manera mediante los tiristores se obtiene tres ondas cuadradas desfasadas  $120^\circ$  entre sí, estas configuraciones de inversores trifásicos se utilizan para cargas trifásicas equilibradas, o sea que las corrientes demandadas por cada fase tienen valores muy parecidos, en el caso de tener que alimentar cargas trifásicas desequilibradas, se utilizan otro tipo de configuraciones trifásicas desequilibradas, se utilizan otro tipo de configuraciones trifásicas que se ven a continuación.

#### **1.12.4. Configuración trifásica mediante múltiples puentes**

En la figura 1.31 se pueden observar dos configuraciones de inversores trifásicos realizadas mediante la conexión de tres puentes monofásicos, uno por fase, en el primer gráfico se representan tres puentes realizados mediante transistores, en éste caso la tensión de salida se puede regular mediante modulación de ancho de pulso y obtener dependiendo de la frecuencia de conmutación una señal totalmente sinusoidal a la salida. También se puede utilizar como dispositivos de conmutación tiristores, en éste caso la tensión de salida de cada puente es una onda con ancho de pulso controlado mediante el ángulo de disparo de los dispositivos semiconductores, las tres ondas están desfasadas entre sí  $120^\circ$  y se combinan en un transformador con secundario en estrella para dar las tensiones de línea, en éste caso se puede obtener una señal de 6 escalones con una distorsión armónica del 28%.

Una forma de disminuir la distorsión armónica obtenida es emplear la configuración que se observa en el segundo gráfico de la figura 1-31, mediante esta configuración se consigue que a partir de dos señales de seis escalones y mediante un transformador estrella/ triangulo- zigzag obtener a la salida del transformador una señal del doble de escalones (12 escalones), con lo cual se disminuye la distorsión armónica total desde el 28% al 15%.

En conexiones a red, esta distorsión es todavía alta por lo que añadiendo otra configuración igual y conectándola adecuadamente de modo que estén desfasadas se puede llegar a obtener una señal de 24 escalones, con una distorsión mínima.

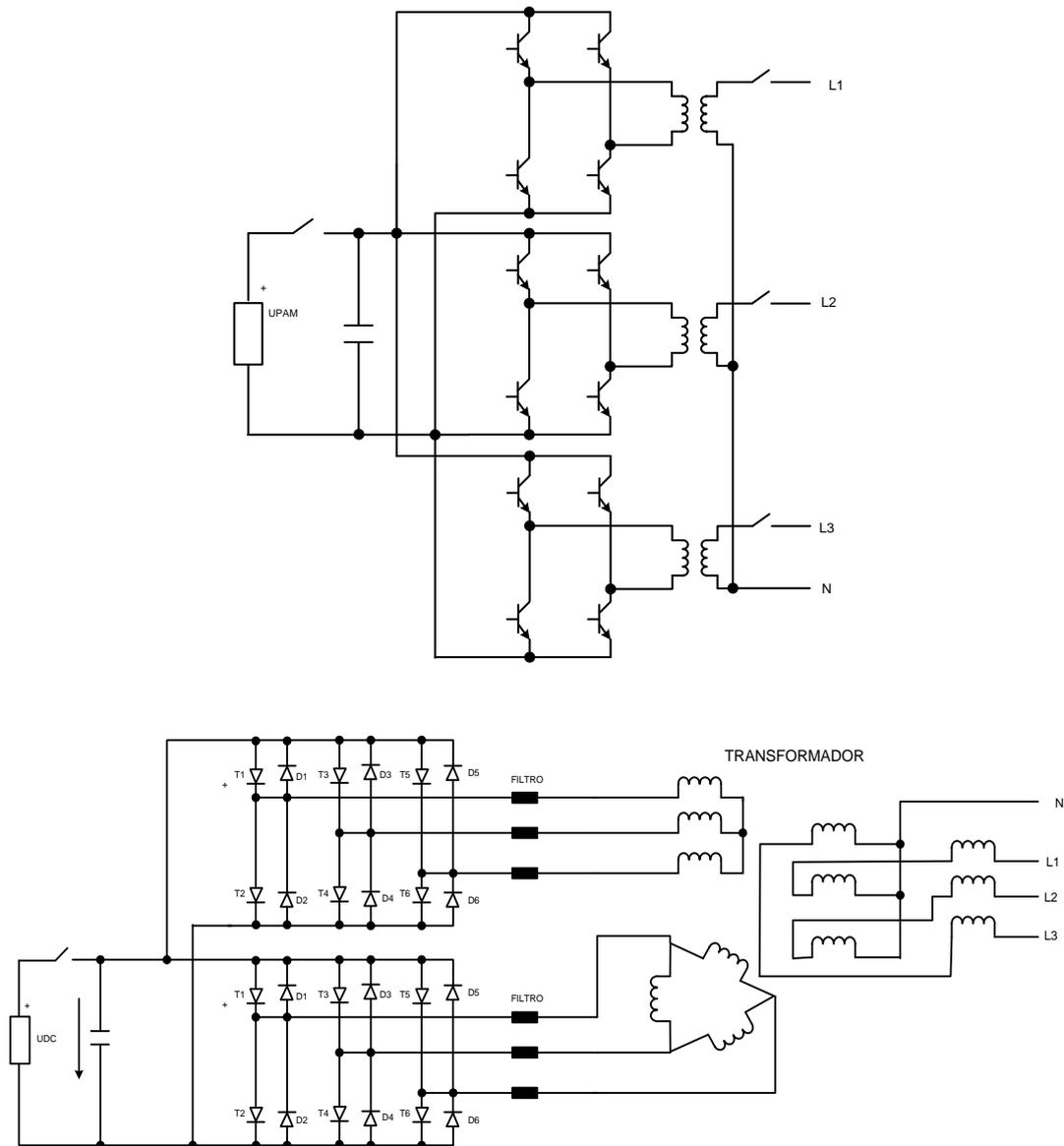


Figura 1.31 Inversores Trifásicos mediante tres inversores monofásicos

### 1.12.5. Amplificador en contrafase de simetría complementaria

Los amplificadores de salida, también denominados de potencia, tienen como misión entregar a la carga una señal de potencia grande con la mínima distorsión y el máximo rendimiento. La impedancia de salida ha de ser pequeña puesto que la carga suele ser un altavoz o un transformador (4 u 8 ohms); así pues, estos amplificadores suelen ser en colector común ya que su ganancia de Corriente es muy elevada y esto hace que la intensidad de la salida sea grande, lo suficiente como para alimentar una bobina de baja impedancia.

Los amplificadores de potencia proporcionan alta corriente a una carga de salida, que corresponde a un parlante o transformador, se denomina amplificador de Potencia a aquellos circuitos capaces de entregar más de 1 Watts, el concepto simétrico corresponde a una distribución simétrica de voltajes en los transistores Q1 y Q2, el concepto complementario se usa por el uso de transistores NPN y PNP.

Como las bobinas de los equipos tienen impedancias de 2, 4, 6 y 8 ohm, los amplificadores de potencia deben compensar esta baja impedancia entregando una alta corriente de salida, por esta razón, los circuitos en configuraciones Clase A, emisor, colector o base común, no son utilizados, ya que en las salidas deben tener altas resistencias, que impediría la circulación de alta corriente sobre un altavoz.

Estos amplificadores se denominan complementarios, pues utilizan pares de transistores similares, pero de tipos opuestos, NPN y PNP, a su vez son denominados simétricos, pues cada transistor amplifica la mitad de la señal de entrada, y posee una polarización DC que también se reparte en forma simétrica.

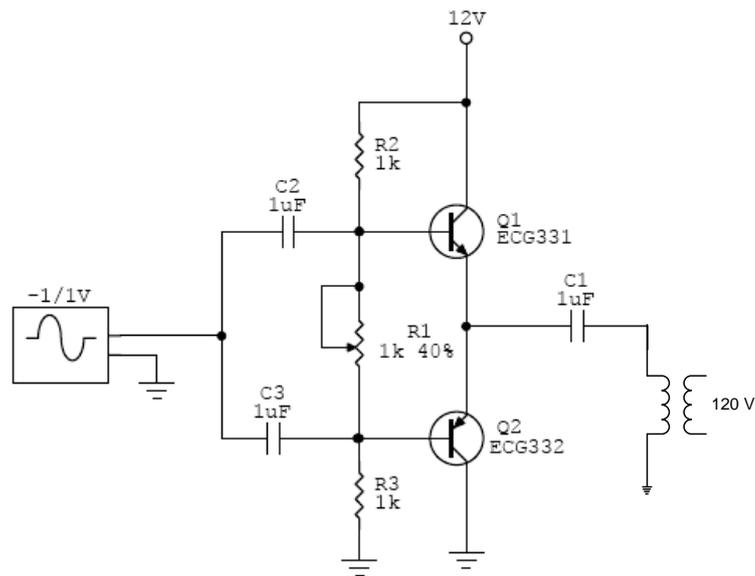


Figura 1.32. Amplificador en contrafase de simetría complementaria ideal. Fuente: <http://josecardenas.media.officelive.com>

La eficiencia de potencia de un amplificador clase AB es alta, razón por la cual se utiliza masivamente en los diseños profesionales, la eficiencia está definida como la

relación de la potencia alterna que se obtiene a la salida (en valor RMS) con respecto a la potencia continua suministrada por las fuentes de alimentación, esto es:

$$\eta\% = \frac{V_{o[RMS]} \times I_{o[RMS]}}{V_{cc} \times I_{cc}} \times 100$$

Donde  $V_o$  e  $I_o$  corresponden a los parámetros en el transformador, y  $V_{cc}$  e  $I_{cc}$  la energía consumida por la fuente de poder, la diferencia con el circuito clase B, es que proporciona una señal de salida que varía a lo largo de la mitad del ciclo de la señal de entrada, es decir  $180^\circ$  de la señal, el punto de polarización Q para la clase B está, por tanto, a 0 V, variando entonces la salida desde este punto de polarización durante medio ciclo.

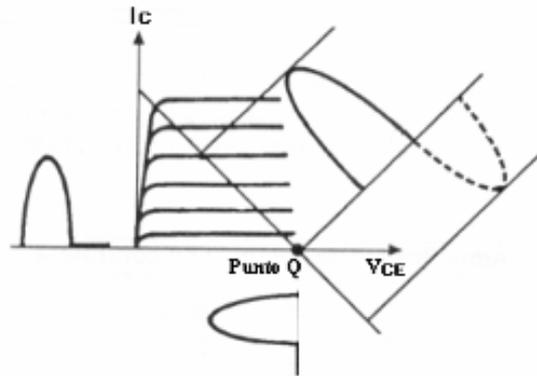


Figura 1.33. Punto Q de amplificador clase B. Fuente: <http://josecardenas.media.officelive.com>

### 1.12.5.1. Distorsión de cruce por cero

Uno de los grandes problemas que se suceden con respecto a los amplificadores en simetría complementaria, corresponde a la distorsión que se da cuando la señal alterna de entrada tiene un valor muy cercano a cero volts, que ocurre en la Clase B. En efecto, para que un transistor entre en conducción se necesita que el voltaje entre base y emisor sea de un valor aproximado a  $\pm 0,6$  volts dependiendo si el transistor es NPN o PNP respectivamente.

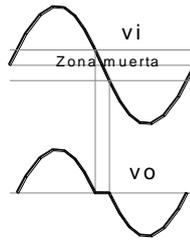


Figura 1.34. Distorsión en el cruce por cero. Fuente: <http://josecardenas.media.officelive.com>

Como este voltaje depende de la señal de entrada  $V_i$ , quiere decir que durante todo el tiempo en que la señal  $V_i$  tiene un valor menor a 0,6 volt los transistores Q1 y Q2 estarán en la zona de corte, generando en la salida un voltaje de cero volts, y produciendo una distorsión en el cruce por cero. Para evitar esta situación, se genera una tensión continua en la base de cada transistor, con diodos, transistores y potenciómetros, de manera tal, que cada transistor esté en conducción, pero muy cerca del corte, se dice entonces, que los transistores se encuentran en clase AB, esto significa que cada transistor conduce un ángulo mayor que  $180^\circ$  pero menor que  $360^\circ$ . Disponiendo dos diodos en serie tal como podemos apreciar en el circuito de la figura 1,35; así se produce una caída de tensión igual al umbral de las uniones base emisor de los transistores, por lo que la distorsión de cruce desaparece (ver señal en el osciloscopio).

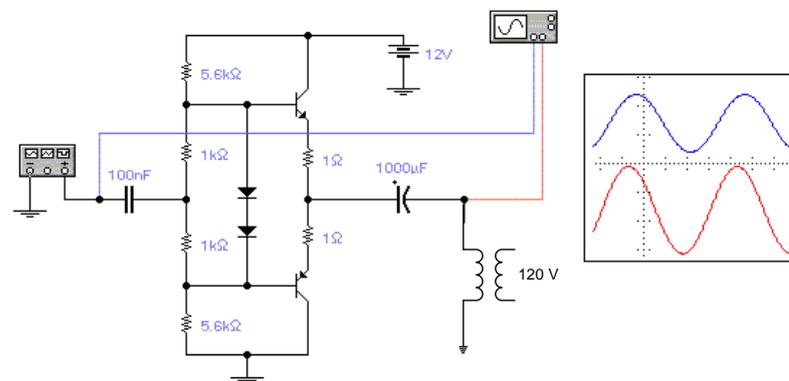


Figura 1.35 Amplificador en contrafase de simetría complementaria con diodos en serie para evitar la distorsión en el cruce por cero. Fuente: <http://josecardenas.media.officelive.com>

### 1.12.5.2. Cálculo de la potencia y rendimiento en un amplificador

La potencia de consumo de la fuente continua  $P_s(\text{DC})$  se puede calcular como  $P_s(\text{DC}) = V_{CC} \times I_{DC}$ , donde  $I_{DC}$  corresponde a la corriente continua o promedio

que se consume de la fuente de alimentación, y  $V_{cc}$  al voltaje de alimentación del circuito, un amplificador entrega una señal equivalente a  $180^\circ$ , por tanto, para generar una señal completa se necesitan dos, por tal razón la corriente promedio será:

$$I_{DC} = \frac{I_p}{\pi}$$

Donde  $I_p$  corresponde a la corriente Peak o máxima de salida. A su vez, la potencia peak corresponde a la misma que llega al transformador.

$$I_{peak} = \frac{V_p}{R_L} = V_{cc} / 2R_L$$

Luego, la potencia continua de consumo entregada por la fuente será:

$$P_{S(DC)} = V_{CC} \times \left(\frac{I_p}{\pi}\right) =$$

La potencia alterna de salida (en la carga) se puede calcular como:

$$P_{0(ac)} = \frac{V_{L(RMS)}^2}{R_L} = \frac{V_{Lp}^2}{2R_L} = \frac{V_{cc}^2}{8R_L}$$

Donde  $V_L$  designa el voltaje peak en la carga  $R_L$ , o transformador. De manera tal que la eficiencia será:

$$\% \eta = \frac{P_{0(ac)}}{P_{S(dc)}} \times 100 \Rightarrow \frac{[V_{cc}]^2 / 8R_L}{V_{CC} \left[ \frac{I_p}{\pi} \right]} \times 100 \rightarrow \% \eta = \frac{[V_{cc}]^2 / 8R_L}{V_{CC} \left[ \frac{1}{\pi} \frac{V_{cc}}{2R_L} \right]} \times 100$$

Esto quiere decir, la eficiencia máxima se dará cuando el voltaje máximo sobre la carga  $V_L(p)$  sea igual a  $V_{cc}$ , siempre que el circuito posea alimentación única. Simplificando la expresión, se concluye que la eficiencia ideal será:

$$\eta\% = (\pi/4)100$$

$$\eta\% = 78,5\%.$$

Los valores reales de eficiencia para un power, van de 50 % a 65 %.

### 1.12.5.3. Transistores Darlington

En la figura 1.36 se ilustra el par Darlington, dicho par es una configuración compuesta de dos transistores en cascada, esta combinación de transistores posee algunas características deseables que la hacen más útil que un solo transistor en ciertas aplicaciones. Por ejemplo, el circuito tiene alta impedancia de entrada, baja impedancia de salida y alta ganancia de corriente, una desventaja del par Darlington es que la corriente de fuga del primer transistor es amplificada por el segundo.

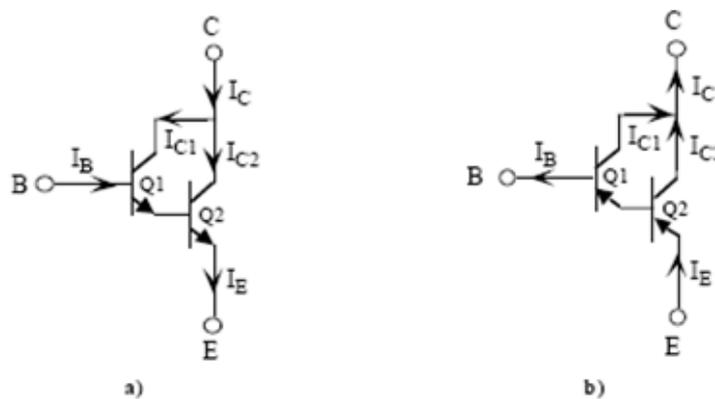


Figura 1.36. Par Darlington configurado con transistores NPN y PNP. Fuente:  
<http://josecardenas.media.officelive.com>

Si los dos transistores se conectan de la manera mostrada en la figura 1.36, los betas de los dos transistores se multiplican, formando una combinación que parece un solo transistor de  $\beta$  alta. La impedancia de entrada de ambos transistores no es la misma, ya que el punto de operación del primer transistor es diferente del segundo, esto se debe a que la carga equivalente en el primer transistor es  $\beta_2(R_E \parallel R_L)$ , mientras que la carga en el segundo transistor es sólo  $R_E \parallel R_L$ , en la práctica, el primer transistor puede tener un manejo de potencia menor que el segundo, la resistencia de entrada del segundo transistor constituye la carga del emisor del primer transistor.

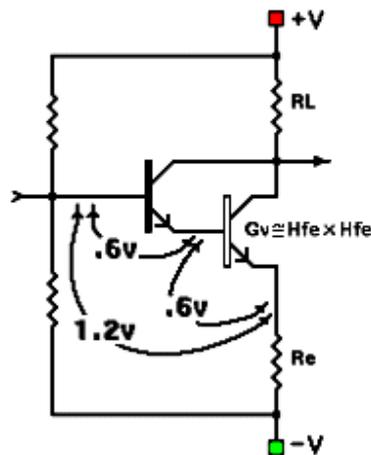


Figura 1.37. Darlington en Emisor Común (EC). Fuente: <http://josecardenas.media.officelive.com>

Aunque normalmente se considera que éste es un amplificador de ganancia de tensión, dicho amplificador puede proporcionar altas ganancias de corriente debido a su resistencia de entrada extremadamente grande, varias configuraciones de amplificadores con la resistencia de emisor en cortocircuito tienen excelentes ganancias de tensión, pero baja resistencia de entrada, lo que redundaría en una baja ganancia de corriente, sin embargo, este amplificador proporciona no sólo buena ganancia de tensión, sino también excelente ganancia de corriente. Algunos fabricantes empaquetan el par Darlington en un solo paquete con tres terminales externas únicamente, los pares Darlington empaquetados en un circuito integrado están disponibles con betas de hasta 30.000.

El análisis en continua de un par Darlington se puede realizar resolviendo el reparto de las corrientes y tensiones entre ambos transistores, desde el punto de vista externo, un transistor Darlington tiene unas corrientes de entrada  $I_B$ ,  $I_C$  e  $I_E$  ( $I_E = I_B + I_C$ ) y la tensión entre la base y el emisor es de  $2V_{BE}$ , si  $Q_1$  y  $Q_2$  se encuentran en la región lineal, la relación entre ambas corrientes, es decir, la  $h_{FE}$  del transistor, se puede expresar en función de  $h_{FE1}$  y  $h_{FE2}$ , para ello, hay que resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} I_C = I_{C1} + I_{C2} = h_{FE1}I_{B1} + h_{FE2}I_{B2} \\ I_B = I_{B1} \\ I_{E1} = I_{B2} = \frac{I_{C2}}{h_{FE2}} = \frac{I_{E2}}{1 + h_{FE2}} = \frac{I_E}{1 + h_{FE2}} \end{cases}$$

Resolviendo , se demuestra que

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} = h_{FE1} + (1 + h_{FE1})h_{FE2}$$

#### 1.12.5.4. Modelo a pequeña señal Darlington

El análisis de pequeña señal de un par Darlington se puede realizar a partir de los modelos de pequeña señal de los transistores Q1 y Q2, en la figura 1.38 se indica el circuito en parámetros h obtenido al sustituir cada uno de los transistores por su modelo de pequeña señal; para simplificar el análisis y los cálculos se han despreciado los efectos de los parámetros h<sub>re</sub> y el h<sub>oe1</sub>, este modelo completo resulta demasiado complicado incluso con las aproximaciones realizadas, para usarlo en el análisis de amplificadores, por ello, se obtiene un modelo equivalente simplificado en parámetros {H} obtenido a partir del modelo completo.

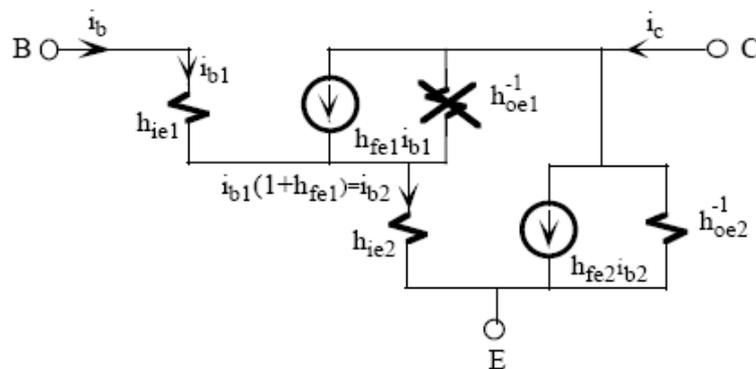


Figura 1.38. Modelo de una pequeña señal de un par Darlington. Fuente:

<http://josecardenas.media.officelive.com>

### 1.12.5.5. Configuración simetría complementaria con par Darlington

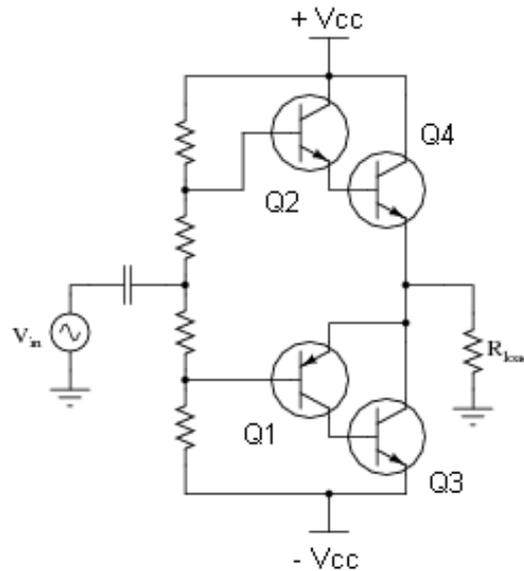


Figura 1.39. Configuración Simétrica con un par Darlington. Fuente:  
<http://josecardenas.media.officelive.com>

Se puede diseñar un amplificador de alta ganancia de corriente utilizando la conexión de un par Darlington y transistores. Esta configuración se conoce como amplificador clase AB cuasi complementario con par Darlington, e incorpora un par Darlington con transistores NPN y un par retroalimentado consistente en un transistor NPN y uno PNP.

Los transistores Q2 y Q4 son transistores NPN similares capaces de manejar alta potencia. Los transistores Q1 y Q3 son complementarios y no necesitan manejar alta potencia. La carga efectiva para Q1 y Q3 es  $\beta R_L$  (donde  $\beta$  es la ganancia de corriente del transistor de salida), que es grande comparada con  $R_L$ .

Por tanto, el punto de operación para estos transistores es mucho menor en la línea de carga que el de los transistores Q2 y Q4.

La señal de entrada positiva provoca que Q1 conduzca, pero Q3 permanece en corte ya que se trata de un transistor PNP, conforme la señal de entrada se hace negativa, Q1 se corta y Q3 conduce, así, el circuito de entrada opera como el amplificador de potencia de simetría complementaria analizado antes, el resistor se puede ajustar para

minimizar la distorsión de cruce por cero permitiendo que conduzcan tanto Q1 como Q2 cuando la señal de entrada está cercana a cero.

### **1.13. MODO DE CONMUTACIÓN DE INVERSORES**

Los inversores utilizados actualmente en aplicaciones fotovoltaicas se pueden dividir en dos categorías: autos conmutados y conmutados por red. Los inversores auto conmutados pueden funcionar como fuente de tensión y fuente de corriente, mientras que los conmutados por la red solo como fuente de corriente, por ello los auto conmutados por la red solo como fuente de corriente, por ello los auto conmutados se pueden utilizar en aplicaciones aisladas de red y conectadas a red y los conmutados por red, como su nombre indica solo pueden utilizarse conectados a ella.

Los inversores auto conmutados pueden operar independientemente, siendo activados únicamente por una fuente de potencia a la entrada (Fotovoltaica, batería, rectificador etc). Pueden alimentar cargas en fuente de tensión, o sea que aunque varíe la carga la tensión no varía, u en fuente de corriente, fijando la corriente aunque se varíe la carga.

Este tipo de inversores se pueden conectar a la red ya que pueden sincronizar su tensión alterna de salida con la tensión de la red eléctrica, de manera que inyectan cualquier nivel de corriente a la red, siempre que no supere su potencia nominal. Son inversores muy seguros ya que hasta un cortocircuito en la salida, puede ser un punto de trabajo normal, al funcionar conectados a red como fuente de corriente, esta no se ve superada ni en caso de exigir un cortocircuito en la red, la regulación de tensión la suelen realizar normalmente mediante modulación de ancho de pulso (PWM), aumentando el ancho de los pulsos que disparan a los transistores en el caso de que la tensión a la salida disminuya y viceversa, este tipo de inversores normalmente conmuta a alta frecuencia, por lo que la señal de salida suele ser perfectamente sinusoidal, no conteniendo distorsión armónica evitando la necesidad de voluminosos y pesados filtros, los posibles armónicos que aparecen son los debidos a la frecuencia de conmutación (De 1Khz a 20Hz, dependiendo del dispositivo utilizado), los cuales están muy lejos del fundamental (50Hz), este tipo de inversores

no demandan potencia reactiva para su funcionamiento, ya que pueden generar la señal de corriente totalmente en fase con la señal de tensión de red, no obstante el control puede hacer que la señal de corriente totalmente en fase con la señal de tensión de red, no obstante el control puede hacer que la señal de corriente se adelante o se desfase con respecto a la tensión de red, adelantando o retrasando el factor de potencia y pudiendo por ejemplo compensar potencia reactiva. Los únicos inconvenientes de este tipo de inversores son el precio, ya que son bastante más caros que los inversores basados en tiristores, la potencia máxima ya que salvo que se conecten en paralelo están bastante limitados y el rendimiento, ya que al funcionar a alta frecuencia de conmutación, las pérdidas debido a la conmutación se disparan.

Los inversores conmutados por red pueden funcionar solo cuando la tensión alterna de la red está presente. En realidad son puentes rectificadores (convertidores CA/CC) basados en tiristores, en los cuales disparando con ángulos entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$  se consigue que el flujo de potencia vaya desde la fuente en continua a la red eléctrica, y funcionen por lo tanto como inversores.

Este tipo de inversores operan normalmente con un bajo y retrasado factor de potencia, tiene un alto nivel de distorsión armónica en su señal de salida, y presenta fallos en su conmutación en el momento en que aparece un fallo de red, pero, por el contrario es bastante más barato que los inversores autoconmutados de alta frecuencia, dos de sus principales desventajas, el factor de potencia y la inyección de armónicos se pueden reducir normalmente mediante una corrección apropiada con condensadores y filtros LC. Este tipo de inversor conmutado por red, necesita que la potencia de cortocircuito de la red eléctrica en el punto sea lo más alta posible, ya que de no ser así se pierde eficacia en los filtros, pudiéndose presentar problemas de resonancias y perturbaciones en la red. Respecto a los condensadores o baterías de compensación de reactiva, estas trabajan conectándose y desconectándose en paralelo con la red por escalones, con lo que no es posible mantener factores de potencia próximos a la unidad, también, la inyección de corriente de rizado hacia la entrada en continua puede ser evitada mediante filtros adecuados.

Actualmente mediante la conexión de varios puentes inversores a través de un transformador especial se pueden conseguir mediante inversores conmutados por red señales de 6, 12 y 24 escalones con señales de distorsiones armónicas bajas.

#### **1.14. REQUERIMIENTOS DE LOS INVERSORES AUTÓNOMOS**

Ya se ha visto anteriormente que en plantas fotovoltaicas aisladas de la red eléctrica, el sistema debe de poder funcionar autónomamente. Para ello deberá disponer de un medio de almacenamiento que normalmente es una batería y el inversor deberá poder conseguir una tensión de salida adecuada a las cargas existentes en la planta. Evidentemente, el inversor será monofásico o trifásico dependiendo de las cargas que se prevean conectar a él. Además deberá ser del tipo auto conmutado ya que la señal que ordene las conmutaciones deberá ser propia. Normalmente serán inversores basados en transistores. Existen múltiples tipos de inversores basados en transistores desde inversores de tipo ferro resonante, muy interesantes porque utilizan un número reducido de componentes, se auto limitan por sobrecarga, se auto filtran y se auto estabilizan la tensión de salida. Por el contrario como inconvenientes, tienen un rendimiento bajo debido a las grandes pérdidas, exigen un diseño muy específico del transformador y son bastante pesados.

El tipo de inversor más utilizado es el basado en puente de alta frecuencia, ya que obtiene una señal casi senoidal, regula perfectamente la tensión de salida, es totalmente fiable, tiene alto rendimiento, no es muy pesado y encima cada día son más baratos. Existen inversores comerciales de éste tipo desde unos pocos cientos de vatios a varios cientos de kilowatios, con tensiones de entrada desde pocas decenas de voltios hasta 500 voltios en continua. Los dispositivos de conmutación utilizados, en contraste con los inversores conmutados por red, que utilizan principalmente tiristores, pueden ser transistores MOSFET de potencia o tiristores especiales como los GTO (Gate Turn-off Devices). Los inversores realizados con estos transistores han sido limitados en unos pocos kW, a tensiones continuas no mayores de 400 voltios. Hoy en día, la capacidad de conmutar altas frecuencias está creciendo muy rápido, así los dispositivos denominados IGBT suelen usar para inversores de 200 KVA, y las perspectivas son que seguirán creciendo en capacidades.

### **1.14.1. Formas de onda**

Las formas de onda de los inversores autónomos normalmente son de tres tipos: onda cuadrada, cuasi-cuadrada y sinusoidal.

Para cargas poco exigentes de pequeña potencia existen inversores monofásicos muy baratos de onda cuadrada o semicuadrada. Pero los inversores monofásicos, con señal de salida cuadrada o cuasi-cuadrada, el coste del filtro de salida necesario es casi el mismo que el del inversor, mientras que en un inversor trifásico, con onda cuadrada o cuasi-cuadrada el coste del filtro es considerablemente menor que el inversor.

Pero actualmente, debido al abaratamiento de la electrónica de potencia se pueden obtener inversores de alta frecuencia de conmutación para potencias de varios kW a precios muy asequibles. Recordemos que un inversor de alta frecuencia de conmutación presenta una señal de salida muy parecida a la sinusoidal pura, con muy poco filtrado a la salida, eliminándose por lo tanto la necesidad de voluminosos y caros filtros que además bajen el rendimiento del sistema. Respecto al ruido emitido por un inversor de alta frecuencia, es inaudible porque este está por encima del rango de frecuencia audible por un humano.

### **1.14.2. Requerimientos**

La eficiencia de todos los inversores se ve afectado no solo por las pérdidas producidas en la conmutación, sino también por las pérdidas debidas a elementos pasivos, como son los transformadores, filtros, bancos de condensadores etc. Así, la eficiencia de la conversión del sistema completo, el cual incluye filtros de entrada, dispositivos de conmutación, filtros de salida y transformador es más apropiada que únicamente la eficiencia del inversor. Si se está comparando la eficiencia de inversores basados en tiristores e IGBT se deberá evaluar la calidad de la señal de salida (armónicos y factor de potencia) para una eficiencia dada.

Los inversores fuente de tensión generalmente tiene una eficiencia a plena carga de entre el 90 y 94% para sistemas de baja tensión de entrada (<220V) y de 90 a 95%

para sistemas con alta tensión continua de entrada ( $>400V$ ). El inversor en fuente de tensión tiene unas eficiencias de entre el 90 y 95% a plena carga, la mayor eficiencia para unidades de mayor potencia, especialmente porque la tensión de entrada suele ser mayor. Así sus pérdidas fijas son normalmente mayores que sus pérdidas resistivas, su carga se reduce, su eficiencia se ve disminuida radicalmente.

En general la eficiencia de un inversor es mayor en los inversores con bajas pérdidas en vacío, y la eficiencia crece si la tensión continúa de entrada crece.

La eficiencia de un inversor típico varía con su potencia de salida. Debido a esto, la eficiencia total del sistema para un día determinado puede ser muy baja si el inversor opera a media potencia durante ese día. Existen dos maneras de hacer funcionar al sistema con alta eficiencia, como son: diseñar para hacer operar al sistema solo cuando el inversor pueda funcionar por encima del 90% de su potencia nominal o diseñar el sistema de acondicionamiento de potencia con varios inversores cuya suma de potencias nominales sea la potencia total del sistema pero permitiendo conectar uno o más inversores solo funcionen cuando lo hagan en la zona de alta eficiencia.

### **1.14.3. Sobrecarga**

En los casos de sobrecarga debido a una sobretensión en el campo, la mayoría de los inversores se adaptan limitando la corriente absorbida.

Respecto sobrecargas puntuales, por ejemplo en inversores autoconmutados con IGBT, pueden soportar sobrecargas del orden del 120% durante algunos minutos (sobre 5 minutos), y del 150% durante algunos segundos (sobre 10).

Si por el contrario la sobrecarga es debida a un incremento superior al 150%, en la demanda de la carga o a un cortocircuito, el inversor deberá protegerse rápidamente mediante fusibles.

#### **1.14.4. Regulación de la tensión de salida**

En el momento en que en un sistema fotovoltaico, la tensión continua de la entrada varía, la corriente de carga a la salida, y consecuentemente la caída de tensión en conducción en el semiconductor de potencia también va a variar. Esto significa que la amplitud de la señal de salida no va a ser constante. Por esta causa y de cara a mantener la tensión de salida en un valor constante, se deberá cambiar la señal de modulación del ancho de los pulsos (PWM) haciendo que los pulsos sean más anchos y viceversa.

#### **1.15. REQUERIMIENTOS DE LOS INVERSORES CONECTADOS A RED**

Para la compañía eléctrica la seguridad y la calidad de la potencia son los puntos más importantes,. El flujo de energía eléctrica normalmente siempre va en el sentido de las cargas, cuando un consumidor deja de consumir, no suele ser normal que comience a inyectar energía a red.

Existen diferencias entre la operación de autoprodutores con generadores dinámicos y con generadores estáticos (inversores). A continuación se detallan los requerimientos normalmente exigidos a estos últimos:

- El sistema FV parte como un componente de la red eléctrica.
- El inversor debe cumplir las especificaciones de la red eléctrica.
- La seguridad de los operadores debe tenerse siempre en cuenta (pueden existir partes activas desconocidas).
- Los sistemas fotovoltaicos no deberán entregar energía a una línea sin protecciones.
- La desconexión del inversor debe ser automática en cuanto aparezca fallo.
- Deberá existir un punto de fácil desconexión (contactos) que sea accesible a los empleados de la compañía eléctrica.
- Los inversores deberán operar con factor de potencia unidad.
- Se deberá efectuar aislamiento eléctrico entre los sistemas fotovoltaicos y la red.

En la mayoría de los casos el inversor deberá estar desconectado en segundos a partir de la detección de alguna falta. La mayoría de los inversores no están preparados para operar sin tensión de red (modo isla), por ello la mayoría de las compañías solo permiten conectar un sistema FV a la red si se instala un relé de tensión trifásico. El inversor deberá desconectarse de la red a través del relé si la tensión crece o disminuye por encima de unos límites predefinidos. El rango recomendado es del 80 – 110% de la tensión nominal.

Las tres fases deberán ser monitorizadas de cerca de detectar pérdidas de la tensión de red. Así si un inversor monofásico puede mantener la tensión estable en una fase (modo isla) el relé de tensión deberá detectar el fallo en las otras dos fases y desconectar el inversor.

También si la señal de salida del inversor excede de las condiciones predefinidas para la operación (sobre/subtensión, sobre/subfrecuencia) el inversor debe desconectarse automáticamente de la red. Se posibilitará la nueva conexión después de un cierto tiempo (3 minutos normalmente), tiempo que el sistema de control y protección de red espera para intentar una nueva conexión.

### **1.15.1. Compatibilidad con la red**

En la conexión en alterna de un inversor conmutado por red, no hace falta un control directo. El control de la demanda de energía reactiva y quizá inyección armónica viene dado, debido esencialmente a la independencia del inversor y su control. En el caso de un inversor autoconmutado, la tensión de alterna del inversor puede ser controlada independientemente de las condiciones de la entrada en continua si la demanda de reactiva (o entrega) está controlada, y el control del flujo de potencia activa es perfecto mediante el ajuste de las fases de voltaje respecto de la red. Así el parámetro más importante del lado de continua, la potencia del campo fotovoltaico, se puede controlar en la conexión alterna del convertidor de potencia autoconmutado.

### 1.15.2. Calidad de la señal

Las dos principales cuestiones técnicas a tener en cuenta en un inversor desde el punto de vista de calidad de la señal son el factor de potencia y la distorsión armónica. Normalmente, los inversores conmutados por red, operan con factores de potencia significativamente menores de la unidad, cosa que en las conexiones a red se debe evitar. La cuestión es que con factores de potencia bajos el inversor demandará a la red energía reactiva (VAR), afectando a la tensión del sistema, lo cual puede degradar la calidad del servicio eléctrico de los demás consumidores conectados a ella. Además, esto es poco deseable para la compañía eléctrica ya que no puede ser razonable que se espere que ésta cargue con los costes de suministrar potencia reactiva mientras no se le compra potencia activa, o quizá incluso tener que comprar potencia activa si es un autogenerador.

La demanda de energía reactiva ya sea debido a cargas o inversores, puede ser aceptada si la compañía eléctrica cobre dinero al propietario de la instalación autogeneradora por el consumo de la potencia reactiva. Las leyes que regulan los contratos entre la compañía eléctrica y el consumidor no permiten hacer esto. Por ello, un factor de potencia unidad en el punto de conexión y en la salida del convertidor es lo que las compañías eléctricas desean.

El contenido armónico en la señal de salida de un inversor para uso fotovoltaico es difícil de fijar debido a que no hay mucha información disponible, los efectos de la distorsión armónica en la propia red eléctrica y en las cargas conectadas a ella no están suficientemente estudiados en la propia red eléctrica y en las cargas conectadas a ella no están suficientemente estudiados y por último, existen múltiples dificultades para medir la distorsión obtenida. Las regulaciones europeas no achacan todavía posibles pérdidas de rendimiento y sobrecostes debidos a los inversores porque creen que con las especificaciones armónicas actuales la probabilidad de no crear problemas a los demás equipos conectados a la red eléctrica es alta. Dentro de todas las especificaciones, las de la corriente se deben tener más en cuenta que las de voltaje, ya que los armónicos de corriente son los que más problemas causan y porque es más fácil para el fabricante de equipos demostrar el total cumplimiento de

la especificación de inyección de corriente. Esta especificación normalmente se da en términos de distorsión armónica total (THD). La magnitud que representa a cualquiera de los armónicos por separado se denomina distorsión armónica simple (SHD) y es igualmente interesante para las compañías eléctricas. En Europa, los valores normalmente utilizados para ambas distorsiones son el 5% y el 3% respectivamente.

## **1.16. SEGURIDAD**

### **1.16.1. Aislamiento eléctrico**

Otra necesidad de considerable importancia en la conexión con la red eléctrica es la obtención de un adecuado aislamiento. Este se puede obtener mediante un transformador situado entre la red y el inversor. El aislamiento galvánico es obligado por motivos de seguridad. En principio, varios reglamentos de países de la UE indican que no se puede conectar inversores a la red a menos que se prevea alguna forma de aislamiento. Segundo, el autogenerador y la compañía eléctrica deberán utilizar protecciones que logren interrumpir corrientes de fallo en continua. En tercer lugar, una falla en el inversor con niveles de continua puede saturar el transformador de distribución y causar mal funcionamiento del servicio a otros abonados, así que tanto en el mismo transformador como en la misma línea, los dispositivos de protección se deben disparar inmediatamente. Todas estas áreas conciernen sobre todo a la compañía eléctrica.

La detección y señalización de fallos en la conexión campo fotovoltaico al inversor es difícil ya que normalmente se producen pequeñas corrientes de cortocircuito y los dispositivos de interrupción ante faltas en continua como contactores son caros y tienen una vida útil corta. Así como el campo fotovoltaico no daña al inversor, es éste mismo el que se ocupa a menudo de detectar y señalar la mayoría de los fallos en el lado de continua. Esto último no quiere terminales del campo a través de los dispositivos de conmutación por ejemplo. Existen plantas piloto han convertido esta posible situación en una operación de desconexión normal.

### 1.16.2. Protecciones

Los inversores de potencia actuales suelen incluir el control de todo el sistema. Esto incluye detectar que el campo fotovoltaico tiene suficiente potencia como para poder conectarse a la red, cerrando en ese momento un contactor y comenzando a operar tan pronto como haya luz.

Por la noche el inversor deberá estar totalmente desconectado. La lógica de control del inversor incluirá un sistema de protección que detecte situaciones de funcionamiento anormales como son:

- Falta a tierra en continua.
- Condiciones anormales en red (tensión de línea, frecuencia).
- Pérdidas en una fase.
- Parada del inversor cuando la etapa de potencia se sobrecaliente.

El inversor igualmente deberá ser protegido entre transistores de tensión mediante varistores en el lado de continua alterna.

Debido al hecho de que cada vez son mas los inversores que operan con altas frecuencias de conmutación (/20 kHz o más utilizando PWM), se obtienen distorsiones armónicas bajas y factores de potencia cercanos a la unidad, por otro lado se causan interferencias en la región de RF. Esto es importante sobre todo en inversores operando en baja tensión (fotovoltaica en viviendas).

Los armónicos debidos a la frecuencia de conmutación del inversor pueden interferir con frecuencias utilizadas en equipos de telecomunicaciones (radio, televisión, teléfonos). Para evitar estas interferencias, los inversores suelen suprimir los armónicos mediante filtros y protecciones apropiadas.

## 1.17. INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

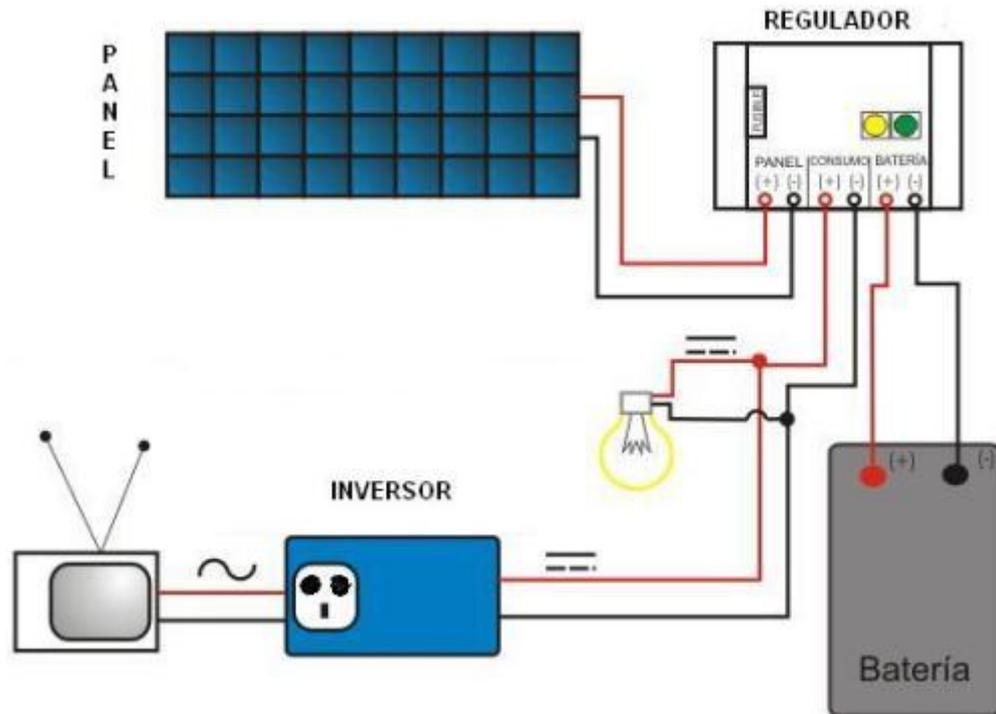


Figura 1.40 Diagrama de Conexión de los Módulos. Fuente:  
<http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=33>

## CAPITULO 2

### SISTEMA DEL SEGUIDOR SOLAR

#### 2.1.- La estructura Metalmecánica.

La estructura del seguidor solar está construida por material de hierro, posee un eje para su movimiento. Éste seguidor solar puede instalarse en cualquier lugar de la Tierra. Naturalmente, debe preverse suficiente espacio libre de sombras en el trayecto solar, de oeste a este.

Debe tenerse en cuenta que la simple sombra de una antena sobre un panel fotovoltaico puede hacer disminuir su producción de energía a menos de la mitad. Otra precaución que hay que tener en cuenta es el espacio libre necesario que debe tener a su alrededor para poder moverse libremente: el seguidor va de  $90^\circ$  a  $-90^\circ$ , la instalación puede hacerse directamente al suelo, sobre una terraza o sobre un tejado.

La estructura metalmecánica de seguidor solar como se indica en la figura 2.1, y las dos baterías de 6 voltios son unas de las partes que se utiliza para realizar el proyecto, las cuales forman parte de un préstamo otorgado por el laboratorio de energías renovables de la universidad del Azuay.

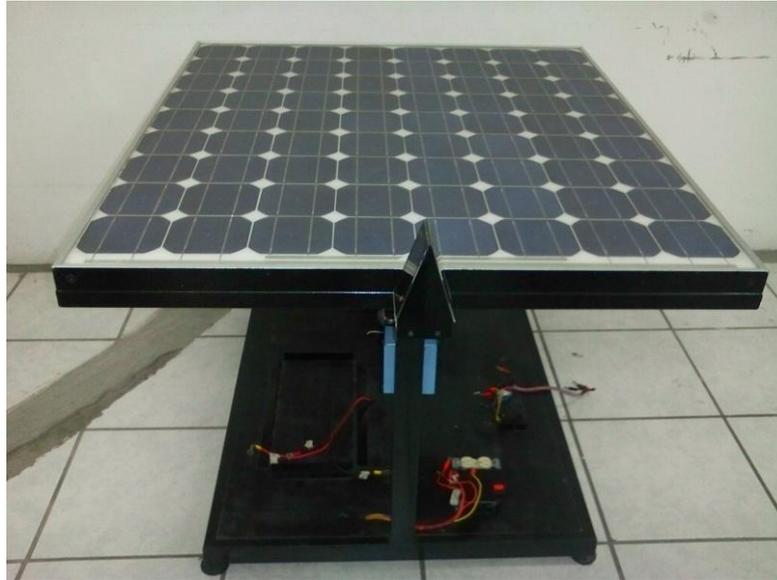


Figura 2.1. Estructura Metalmecánica de un Eje Estratégicamente

## 2.2.- Módulo Central de Procesamiento.

El módulo central de procesamiento tiene un programa seguidor solar escrito en Mplab para después ser grabado en un microprocesador PIC16f871 mediante el WinPic800. Este programa tiene como objetivo principal comparar los voltajes de los sensores LDR de entrada al microprocesador con una constante de software 4.5V, y que según la condición del programa manda una señal a los transistores que activan los relés para controlar la inversión de giro del motor y a su vez controlar la posición del panel solar. La codificación se indica posteriormente



Figura 2.2. Logotipo del Software Mplab

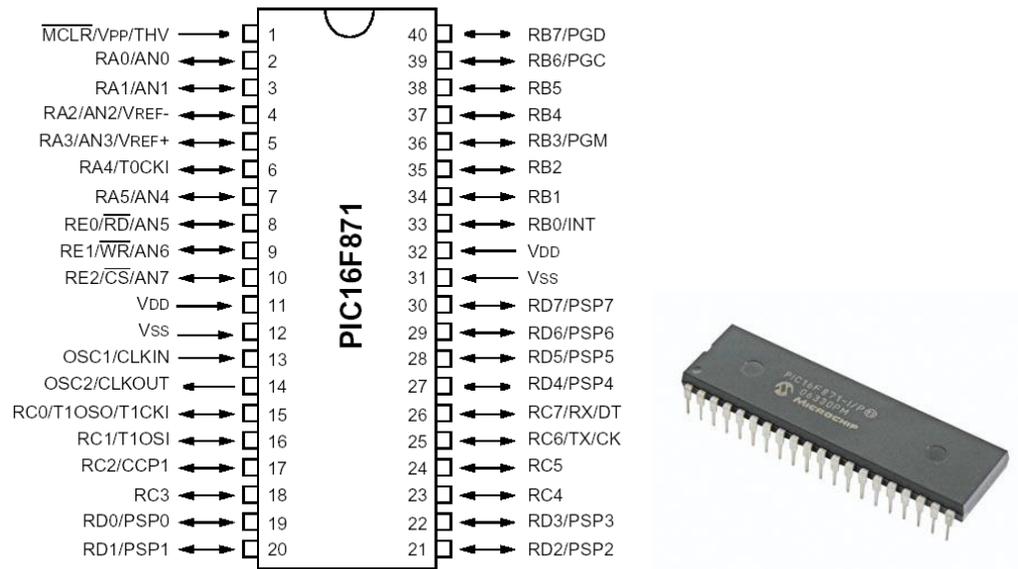


Figura 2.3. Microcontrolador PIC16F871

### 2.2.1. Circuito general del Módulo Central de Procesamiento

El programa de seguidor solar dentro del microcontrolador, para que funcione correctamente necesita los recursos de hardware básicos, conectados en un circuitos, y son: Sensores fotorresistores LDR, transistores BD135, relés de 12V, motor de corriente continua.

En la siguiente figura 2.4 Se observa el circuito del módulo central de procesamiento.

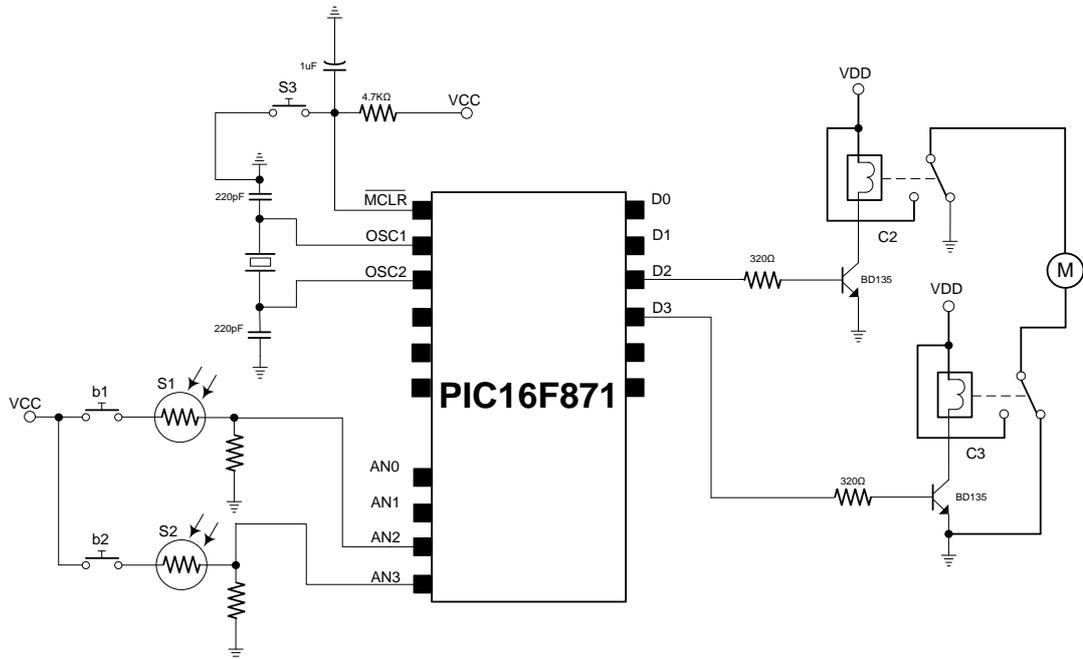


Figura 2.4. Circuito del Módulo Central de Procesamiento

### 2.2.2. Descripción del Programa y Diagrama del Flujo del Módulo Central de Procesamiento.

La descripción del programa seguidor solar se basa del diagrama de flujo de la figura 2.5. El principio de este programa es seguir la intensidad de la luz mediante los siguientes pasos:

- **Paso 1.** Inicia el programa.
- **Paso 2.** Actualiza y lee las señales de los sensores fotorresistores S1 y S2, para compararlos.
- **Paso 3.** Compara la señal del sensor S1 con la constante de software de 4.5V, y si es mayor activa el motor hacia la derecha. Panel va hacia los 90°. Caso contrario lo desactiva.
- **Paso 4.** Compara la señal del sensor S2 con la constante de software de 4.5V, y si es menor activa el motor hacia la izquierda. Panel va hacia los -90°. Caso contrario lo desactiva.
- **Paso 5.** Va a inicio de nuevo el programa

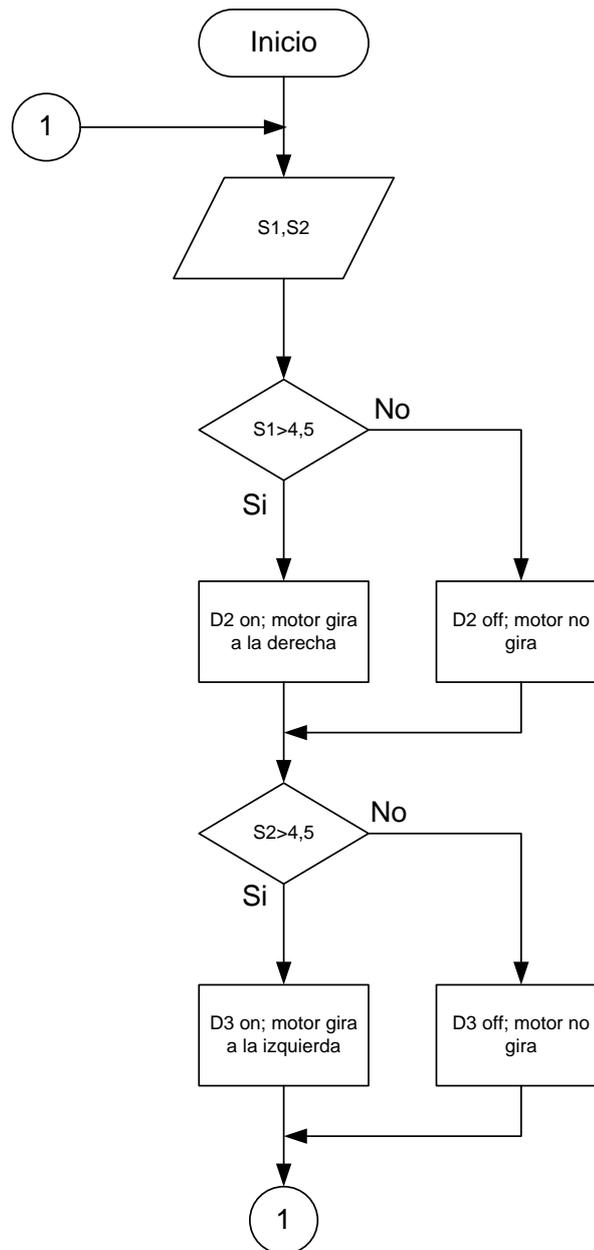


Figura 2.5. Diagrama de Flujo del Seguidor Solar

### 2.2.3. Codificación en Mplab del programa Seguidor Solar

El programa para el seguidor solar en codificación por medio de Mplab se encuentra en el Anexo 1.

### 2.3.- Módulo sensor de intensidad solar

El módulo sensor se basa en el circuito de la figura 2.6.

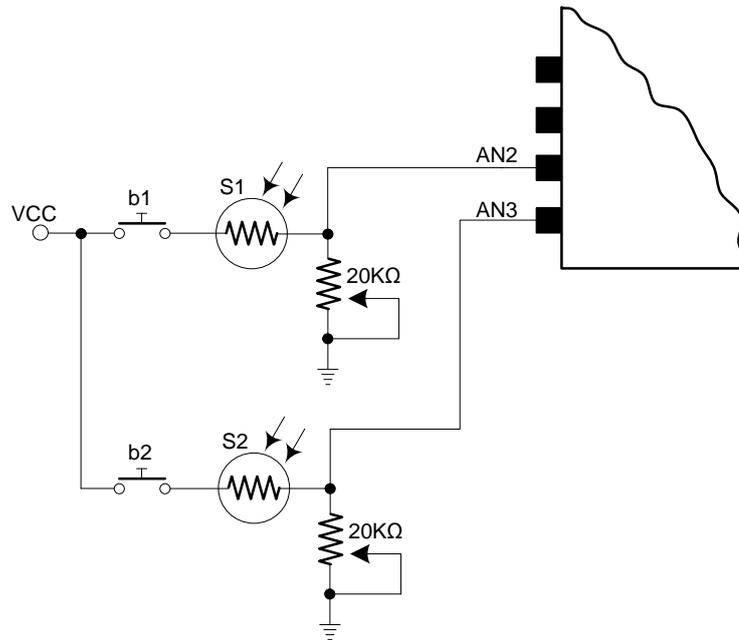


Figura 2.6. Circuito del Módulo Sensor de intensidad Solar

En el módulo de sensado de intensidad solar se utilizan los siguientes elementos: 2 fotoresistores LDR S1 y S2, 2 potenciómetros de  $20K\Omega$  y 2 interruptores de mercurio b1 y b2. Los fotoresistores están dentro de una caja estratégicamente colocados como se indica en la figura 2.7.

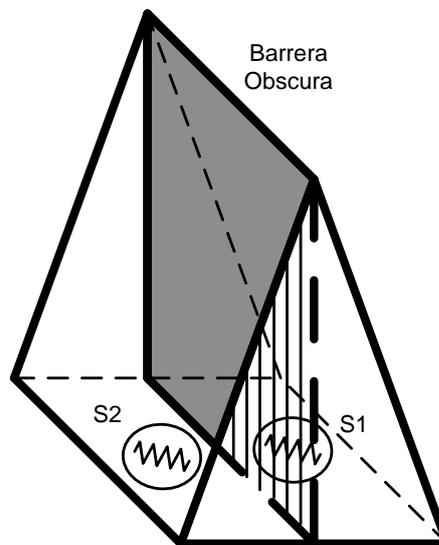


Figura 2.7. Caja de sensores LDR colocados estratégicamente

La caja de sensores LDR está diseñada, de tal manera que, al momento en que el sol salga por el este, los rayos del sol apunten al sensor S1 y no apunten al sensor S2 ya que la barrera obscura no los deja pasar, haciendo que panel solar se mueva hacia la derecha hasta que el interruptor de mercurio b1 se abra, quedando en una posición de  $90^{\circ}$ .

Cuando el sol sigue subiendo entonces los rayos del sol apunta el sensor S2 y no S1, en ese momento el panel solar se mueve hacia la izquierda hasta que los rayos del sol apuntan los sensores S1 y S2, en esta posición el panel no se mueve porque los dos sensores quedan alineados, el sol seguirá subiendo y el panel se irá moviendo a la izquierda hasta que el sol se oculta por el oeste o hasta que el interruptor de mercurio b2 se abra, quedando en una posición de  $-90^{\circ}$  hasta el siguiente día, y se repite el ciclo.

La función principal del diseño de la caja de sensores, es alinear los rayos solares en los sensores LDR, cuando están desalineados el panel solar se moverá en cualquier sentido que se encuentre el sol y cuando están alineados el panel solar no se moverá.

### 2.3.1. Fotorresistores LDR, S1 y S2

Un LDR es un resistor que varía su valor de resistencia eléctrica dependiendo de la cantidad de luz que incide sobre él. Se le llama, también, fotorresistor o fotorresistencia.

Son los elementos principales para el módulo ya que sensan la intensidad del sol. Cuando la intensidad del sol es alta la resistencia interna de los LDR baja, por lo que el voltaje en cada pin de entrada al microprocesador sube hasta un valor calibrado. Caso contrario si la intensidad del sol es baja la resistencia interna de los LDR sube, por lo que el voltaje en cada pin de entrada al microprocesador baja hasta un valor calibrado. Los sensores utilizados se basan al modelo de la figura 2.8.



Figura 2.8. Sensor Fotorresistor LDR. Fuente: <http://www.te1.com.br>

### 2.3.2. Potenciómetros de precisión 20K $\Omega$

Un potenciómetro es un resistor cuyo valor de resistencia es variable. De esta manera, indirectamente, se puede controlar la intensidad de corriente que fluye por un circuito si se conecta en paralelo, o la diferencia de potencial al conectarlo en serie. Los potenciómetros de precisión utilizados en este proyecto, sirven para calibrar la sensibilidad de los LDR a la intensidad del sol o de la luz. Los potenciómetros de precisión multivuelta, posee un cursor que va unido a un tornillo desmultiplicador, de modo que para completar el recorrido necesita varias vueltas del órgano de mando. Los potenciómetros de precisión utilizados en este proyecto se basan al modelo de la figura 2.9.



Figura 2.9. Potenciómetro de Precisión Multivuelta. Fuente: <http://www.electronicagimeno.com>

### 2.3.3. Interruptores de mercurio b1 y b2

Un interruptor de mercurio es un dispositivo cuyo propósito es permitir o interrumpir el flujo de corriente eléctrica en un circuito eléctrico, dependiendo de su alineamiento relativo con una posición horizontal.

Los interruptores de mercurio consisten en uno o más conjuntos de contactos eléctricos en una ampolla de cristal sellado que contiene cierta cantidad de mercurio. El cristal sellado puede contener aire o gas inerte. La gravedad está constantemente desplazando la gota de mercurio al punto más bajo del sellado. Cuando el interruptor está inclinado en la apropiada dirección, el mercurio toca parte de los contactos, así completando el circuito eléctrico a través de esos contactos. La inclinación del interruptor a la posición contraria causa que el mercurio se aparte de los contactos, de esta forma interrumpe el circuito. El interruptor puede contener múltiples contactos, cerrándolos en función de diferentes ángulos, ampliando así la complejidad del circuito. Estos interruptores de mercurio se utilizan en este proyecto para detectar la

posición del panel solar a un cierto ángulo, los interruptores se basan al modelo indicado en la figura 2.10.



Figura 2.10. Interruptor de Mercurio. Fuente:  
[http://entrecablesyelectrones.blogspot.com/2010\\_02\\_01\\_archive.html](http://entrecablesyelectrones.blogspot.com/2010_02_01_archive.html)

#### 2.4.- Módulo control de motores.

El módulo control de motores se basa en el circuito de la figura 2.11.

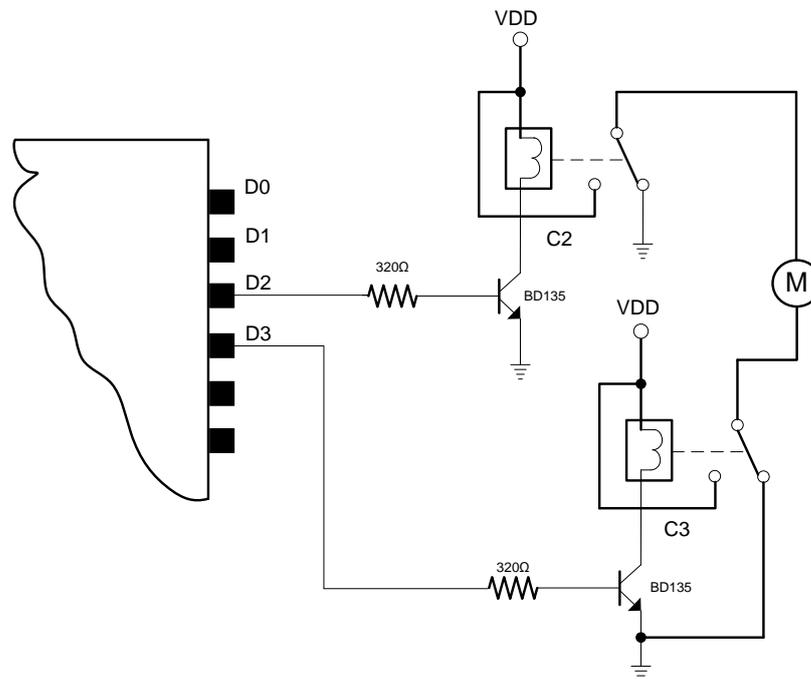


Figura 2.11. Circuito del Módulo de control de Motores

En el módulo control de motores se utilizan los siguientes elementos: 2 resistencias de  $320\Omega$ , 2 transistores BD135, 2 relés electromagnéticos de 12V, un motor de corriente continua 12V.

### 2.4.1. Transistor BD135 Parámetros y características.

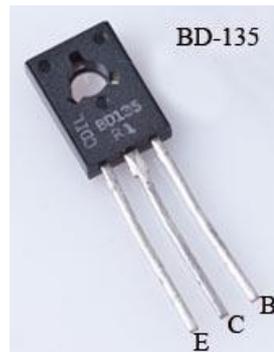


Figura 2.12. Transistor DB135. Fuente: <http://www.tecnoastro.es/tecnologia/transistores.html>

Las características del transistor son; Material de Si, la estructura de transistor NPN, la máxima disipación de potencia continua colector del transistor es de 12W, límite del colector DC-base es 45V, límite de colector-emisor del transistor de tensión es 45V, límite de tensión emisor-base es 5V, máxima corriente continua de colector del transistor es 1A, Temperatura límite de unión PN es 150<sup>0</sup>C, frecuencia de corte de la relación de transferencia corriente del transistor es 50MHz, la capacidad de la unión de colector es negativo, el coeficiente estático de transferencia de corriente en el circuito con emisor común (Hfe), min/max es de 40/250 y la carcasa del BD135 es el TO126. Este transistor se utiliza para activar los relés como alimentador de media potencia.

### 2.4.2. Relés Electromecánico.

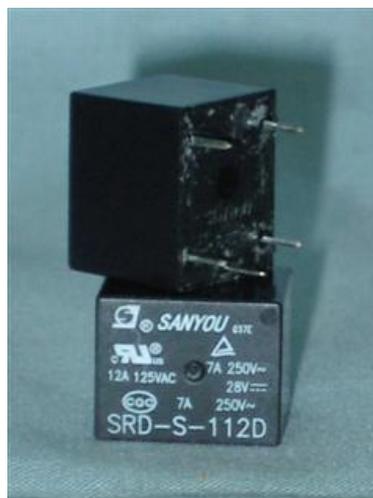


Figura 2.13. Relés electromagnéticos. Fuente: <http://www.directindustry.es>

Un relé es un conmutador eléctrico especializado que permite controlar un dispositivo de gran potencia mediante (por ejemplo un motor) un dispositivo de potencia mucho menor (el puerto del microcontrolador). Un relé está formado por un electroimán y unos contactos conmutadores mecánicos que son impulsados por el electroimán (bobina). Éste requiere una corriente de sólo unos cientos de miliamperios generada por una tensión de sólo unos voltios, mientras que los contactos pueden estar sometidos a una tensión de cientos de voltios y soportar el paso de decenas de amperios. El conmutador del relé permite que con una corriente y tensión de alimentación pequeñas, se pueda controlar una corriente y tensión bastante mayores. Muchos pequeños conmutadores y circuitos electrónicos no pueden soportar corrientes eléctricas elevadas (a menudo no más de 1 amperio).

Su aspecto físico es parecido a la figura 2.13, aunque hay de diversos colores y diferente número de patas.

### **2.4.3. Motor de Corriente Continua.**

El **motor de corriente continua** es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, principalmente mediante el movimiento rotatorio. Su principal inconveniente, el mantenimiento, muy caro y laborioso. Accionar un motor DC es muy simple y solo es necesario aplicar la tensión de alimentación entre sus bornes. Para invertir el sentido de giro basta con invertir la alimentación y el motor comenzará a girar en sentido opuesto. Los hay de distintos tamaños, formas y potencias, pero todos se basan en el mismo principio de funcionamiento.

#### **2.4.3.1. Partes del Motor de Corriente Continua**

Una máquina de corriente continua se compone principalmente de dos partes, un rotor y un estator.

### 2.4.3.1.1. Rotor

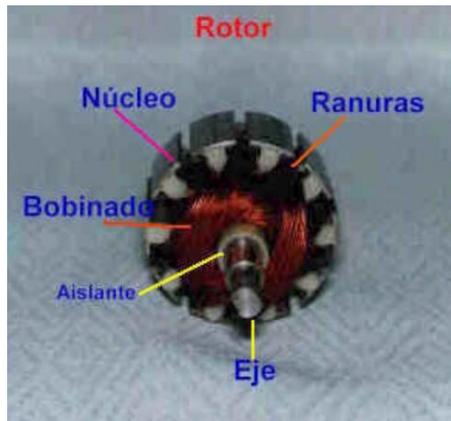


Figura 2.14. Rotor. Fuente: <http://usuarios.multimania.es/sparta/hobbies4.html>

Constituye la parte móvil del motor, proporciona el torque para mover a la carga, en nuestro caso el eje el seguidor solar.

Está formado por:

- **Eje:** Formado por una barra de acero fresada. Imparte la rotación al núcleo, devanado y al colector.

- **Núcleo:** Se localiza sobre el eje. Fabricado con capas laminadas de acero, su función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos para que el flujo magnético del devanado circule, las laminaciones tienen por objeto reducir las corrientes parásitas en el núcleo, el acero del núcleo debe ser capaz de mantener bajas las pérdidas por histéresis; este núcleo laminado contiene ranuras a lo largo de su superficie para albergar al devanado de la armadura (bobinado).

- **Devanado:** Consta de bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura, estas bobinas están alojadas en las ranuras, y están conectadas eléctricamente con el colector, el cual debido a su movimiento rotatorio, proporciona un camino de conducción conmutado.

- **Colector:** Denominado también conmutador, está constituido de láminas de material conductor (delgas), separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas, la función del colector es recoger la tensión producida por el devanado inducido, transmitiéndola al circuito por medio de las escobillas.

### 2.4.3.1.2. Estator



Figura 2.15. Estator. Fuente: <http://usuarios.multimania.es/sparta/hobbies4.html>

Constituye la parte fija de la máquina. Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio.

Está formado por:

- **Armazón:** Denominado también yugo, tiene dos funciones primordiales: servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético del rotor y del imán permanente, para completar el circuito magnético.

- **Imán permanente:** Compuesto de material ferromagnético altamente remanente, se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator, su función es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura, de modo que interactúe con el campo formado por el bobinado, y se origine el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos.

- **Escobillas:** Las escobillas están fabricadas de carbón, y poseen una dureza menor que la del colector, para evitar que éste se desgaste rápidamente. Se encuentran albergadas por los portaescobillas, ambas, escobillas y portaescobillas, se encuentran en una de las tapas del estator, la función de las escobillas es transmitir la tensión y corriente de la fuente de alimentación hacia el colector y, por consiguiente, al bobinado del rotor. La función del portaescobillas es mantener a las escobillas en su posición de contacto firme con los segmentos del colector. Esta función la realiza por medio de resortes, los cuales hacen una presión moderada sobre las escobillas contra el colector. Esta presión debe mantenerse en un nivel intermedio pues, de ser excesiva, la fricción desgastaría tanto a las escobillas como al colector; por otro lado, de ser mínima esta presión, se produciría lo que se denomina "chisporroteo", que es

cuando aparecen chispas entre las superficies del colector y las escobillas, debido a que no existe un buen contacto.

### 2.4.3.2. Principio de funcionamiento

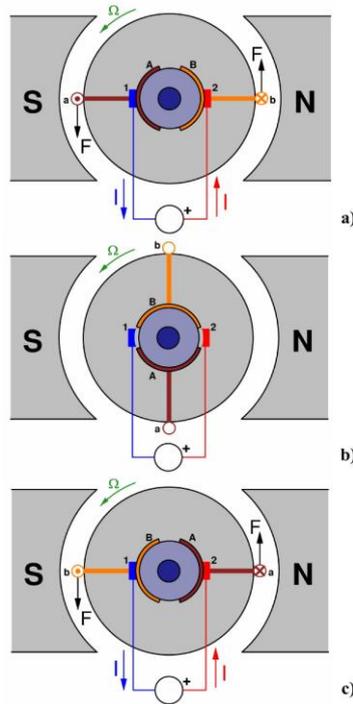


Figura 2.16. Esquema del funcionamiento de un motor de c.c.

Según la Ley de Lorentz, cuando un conductor por el que pasa una corriente eléctrica se sumerge en un campo magnético, el conductor sufre una fuerza perpendicular al plano formado por el campo magnético y la corriente, siguiendo la regla de la mano derecha, con módulo

$$F = B \cdot I \cdot l$$

- **F:** Fuerza en Newtons
- **I:** Intensidad que recorre el conductor en amperios
- **l:** Longitud del conductor en metros lineales
- **B:** Densidad de campo magnético o densidad de flujo teslas

El rotor no solo tiene un conductor, sino varios repartidos por la periferia. A medida que gira, la corriente se activa en el conductor apropiado. Normalmente se aplica una

corriente con sentido contrario en el extremo opuesto del rotor, para compensar la fuerza neta y aumentar el momento.

## 2.5.- Medición y Problemas de acoplamiento.

Las medidas y problemas de acoplamiento para los diferentes módulos se detallan a continuación:

### Módulo de central de Procesamiento

Los pasos realizados en este módulo son:

1. Diseñar el diagrama de flujo para el módulo central de procesamiento como se indica en la figura 2.5.
2. Desarrollar la codificación del módulo central de procesamiento en Mplab, como se indica en el punto 2.2.3.
3. Escoger el microcontrolador adecuado para nuestro trabajo práctico, por ejemplo el PIC16f871.
4. Cargar el programa seguidor solar al microcontrolador, utilizando el grabador y el programa WinPic800.



Figura 2.17. Grabador de PIC's

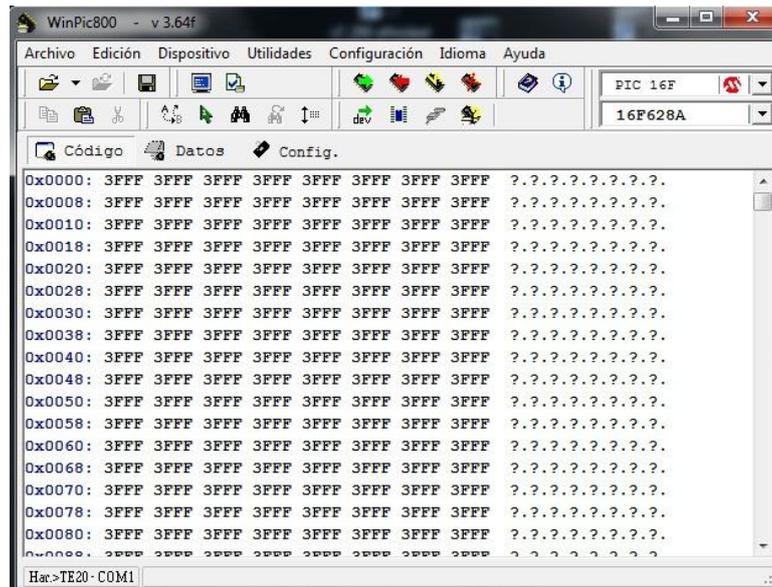


Figura 2.18. Software WinPic800. Fuente: <http://kaxarros.blogspot.com/2011/11/instalar-winpic800-en-windows-7-64-bits.html>

5. Armar la placa del seguidor solar siguiendo el circuito de la figura 2.4.
6. Colocar el microprocesador en la placa seguidor solar.

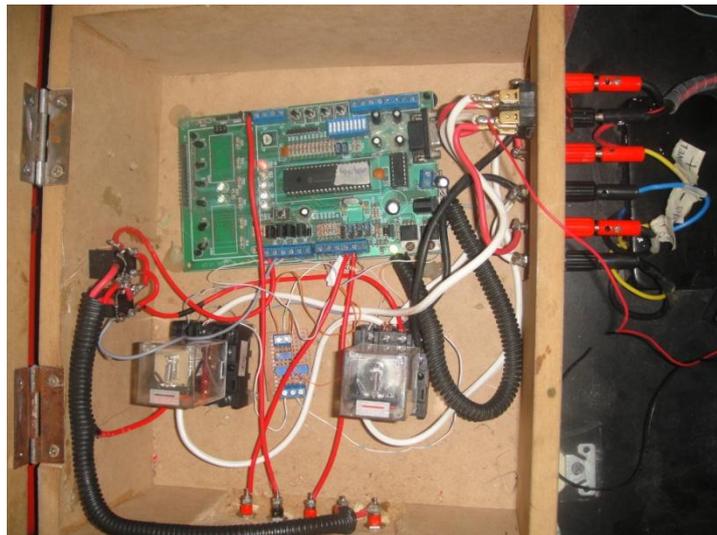


Figura 2.19. Placa Electrónica del Seguidor Solar

7. Comprobar el buen funcionamiento del programa cargado en el microcontrolador en forma directa, haciendo puentes con cables a la entrada del pic, y con unos leds a la salida del mismo.

Módulo sensor de intensidad luminosa

Los pasos realizados en este módulo son:

1. Cablear, colocar los sensores LDR's, los interruptores de mercurio y los potenciómetros de precisión en la maqueta del seguidor solar, siguiendo el circuito de la figura 2.6.
2. En un principio al realizar la medición de tensión de los sensores LDR's a intensidad solar alta e intensidad solar baja, que da un valor aproximado de 4,1V y 3,2V respectivamente.
3. Calibrar la sensibilidad de los sensores LDR's, mediante los potenciómetros de precisión, a una tensión de 4,5V, cuando la intensidad solar es alta. Se calibra con este valor de tensión ya que en el programa de seguidor solar en el microcontrolador tiene una constante de comparación de 4,5V.

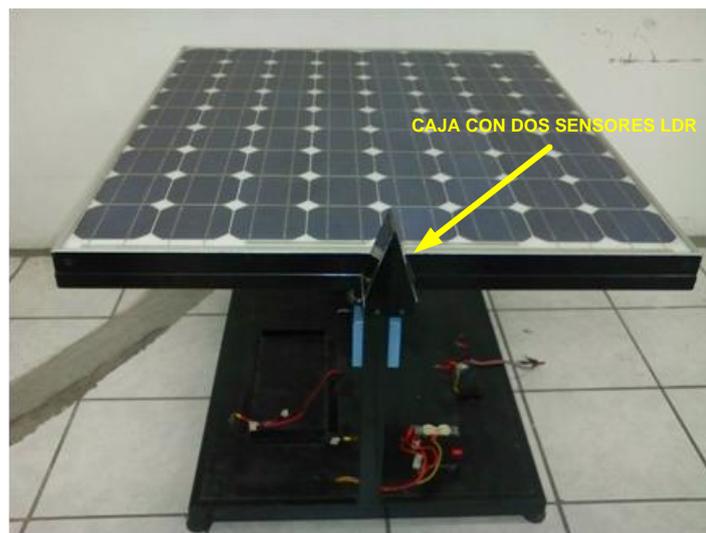


Figura 2.20. Sensores LDR colocados estratégicamente en la estructura metalmecánica

### Módulo control de motores:

Los pasos realizados en este módulo son:

1. Cablear, colocar los relés, y el motor de corriente continua de 12V en la maqueta siguiendo el circuito de la figura 2.10.



Figura 2.21. Motor de corriente continua colocado en la estructura metalmecánica

2. Comprobar todos los elementos instalados en la maqueta, como se indica en el circuito de la figura 2.4.
3. Cuando en el sensor S1 la intensidad solar es alta da una señal mayor de 4,5V, entonces el motor gira hacia a la derecha, haciendo que el panel solar se mueva hasta que el interruptor de mercurio b1 se abra, deteniendo el panel a cierto ángulo de 45 grados.
4. Cuando en el sensor S2 la intensidad solar es alta da una señal mayor de 4,5V, entonces el motor gira hacia a la izquierda, haciendo que el panel solar se mueva en el otro sentido hasta que el interruptor de mercurio b2 se abra, deteniendo el panel a cierto ángulo de 45 grados.



Figura 2.22. Posición del panel solar a 90°

5. Cuando en los sensores S1 y S2 llegan la misma intensidad alta del sol, manda dos señales mayores que 4,5V a la entrada del microprocesador, al suceder esto el motor se detiene, haciendo que el panel solar reciba suficiente energía del sol para cargar las baterías. El panel queda en estado de reposos hasta que el sol se mueva.

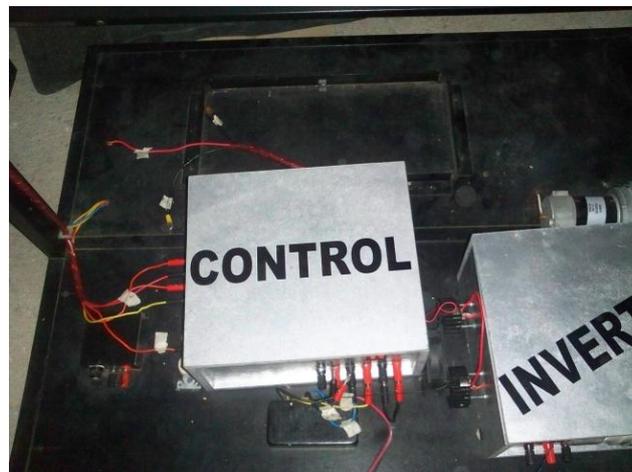


Figura 2.23. Caja de Control del Seguidor Solar.

6. Cuando en los sensores S1 y S2 llegan la misma intensidad baja del sol, manda dos señales menores que 4,5V a la entrada del microprocesador, al suceder esto el motor se detiene, haciendo que el panel solar no reciba

suficiente energía, esta energía no se utiliza para cargar las baterías. El panel queda en estado de reposo hasta que el sol vuelva a dar buena intensidad luminosa.

El Módulo Central de Procesamiento y el Módulo Control de Motores está dentro de una caja llamada Control, como se indica en la figura 2.23.

## CAPITULO 3

### REGULADOR O CONMUTADOR AUTOMÁTICO DE CARGA

#### 3.1. Principio de Funcionamiento

El principio de funcionamiento del regulador es de proteger a la batería frente a sobrecargas y sobredescargas profundas. El regulador de tensión controla constantemente el estado de carga de las baterías y regula la intensidad de carga de las mismas para alargar su vida útil. También genera alarmas en función del estado de dicha carga.

Los reguladores actuales introducen microcontroladores para la correcta gestión de un sistema fotovoltaico. Su programación elaborada permite un control capaz de adaptarse a las distintas situaciones de forma automática, permitiendo la modificación manual de sus parámetros de funcionamiento para instalaciones especiales. Incluso los hay que memorizan datos que permiten conocer cuál ha sido la evolución de la instalación durante un tiempo determinado. Para ello, consideran los valores de tensión, temperatura, intensidad de carga y descarga, y capacidad del acumulador.

#### 3.2.- Módulo conmutador automático de carga.

El módulo conmutador automático de carga está conformado por dos circuitos: el circuito de control y el circuito de potencia o regulador de energía:

##### 3.2.1.- Módulo Conmutador Circuito de Control.

Este circuito de control está conformado de:

- 1 microcontrolador PIC16F871
- 2 potenciómetros de 10K $\Omega$



### 3.2.1.3.- Resistencias de $320\Omega$ $\frac{1}{2}$ watio.

Las resistencias de  $320\Omega$  van conectadas a la base del transistor BD135 para polarizar el transistor.

### 3.2.1.4.- Transistores BD135

Los transistores BD135 son utilizados para la unión entre el circuito de control y el circuito de potencia, activando de esta manera los relés electromagnéticos

### 3.2.2.- Módulo Conmutador Circuito de Carga o Regulador de Voltaje.

Con este circuito se regula automáticamente el voltaje del panel solar y de la batería. Este circuito de carga está conformado de:

- Panel solar
- 2 Baterías
- 2 relés electromagnéticos de 12V/10A
- La Carga

En la siguiente figura 3.2. Se indica el circuito de control del módulo conmutador.

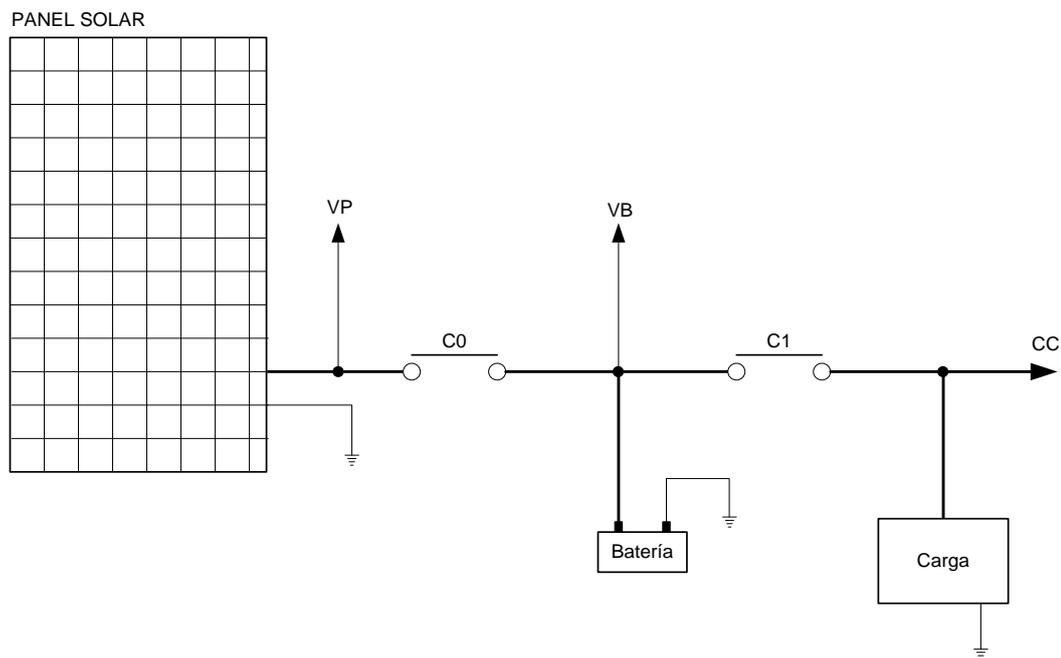


Figura 3.2. Circuito de Carga del Módulo Conmutador

### 3.2.2.1.- Panel Solar

El panel solar utilizado para este trabajo práctico tiene las siguientes características:

- Potencia Máxima: 150Wp  $\pm$ 5%
- Corriente de Máxima Potencia (Imáx): 8,7A
- Tensión de Potencia Máxima (Vmax): 17,3V
- Corriente de Cortocircuito (Isc): 9,3A
- Tensión de Circuito Abierto (Vdc): 21,6V
- Mínimo valor de fusible en serie: 10A

Estos paneles fotovoltaicos es donde se obtiene la luz del sol para convertirla en energía eléctrica, esta energía eléctrica se utiliza para cargar la batería y alimentar la carga, mediante un control electrónico.

### 3.2.2.2.- Batería o Acumulador

La batería utilizada en nuestro proyecto tiene las siguientes características:

- 6 voltios de tensión
- 132 Ah/C<sub>10</sub>/1.80V<sub>pc</sub>/20°C
- 133 Ah/C<sub>8</sub>/1.75V<sub>pc</sub>/77°F
- Float Voltage 2.27 V<sub>pc</sub> @ 77°F/2.29 V<sub>pc</sub> @ 20°C

Del mismo modo, ésta permite el ahorro de la energía eléctrica suministrada por el panel solar. En el caso de que en el panel solar no haya una intensidad suficiente, la batería proporciona su propia energía a la carga. Si la propia energía de la batería y del panel solar no es la suficiente, entonces no proporcionarán energía a la carga. Es conveniente tomar en cuenta que los procesos antes mencionados, se realizarían mediante un control electrónico, para que se de paso a estos resultados.

### 3.2.2.3.- Relés Electromagnéticos de 12V/10A

Estos son utilizados como interruptores para que la energía eléctrica pase del panel solar a la batería y de la batería a la carga, mediante un proceso electrónico.

### 3.3.- Diagrama de Flujo del regulador

Como podemos ver en la figura 3.3 se detalla el proceso del control automático de carga, que después será codificado mediante el programa MPLab, para luego ser grabado o cargado en el PIC 16F871 como se mencionó anteriormente.

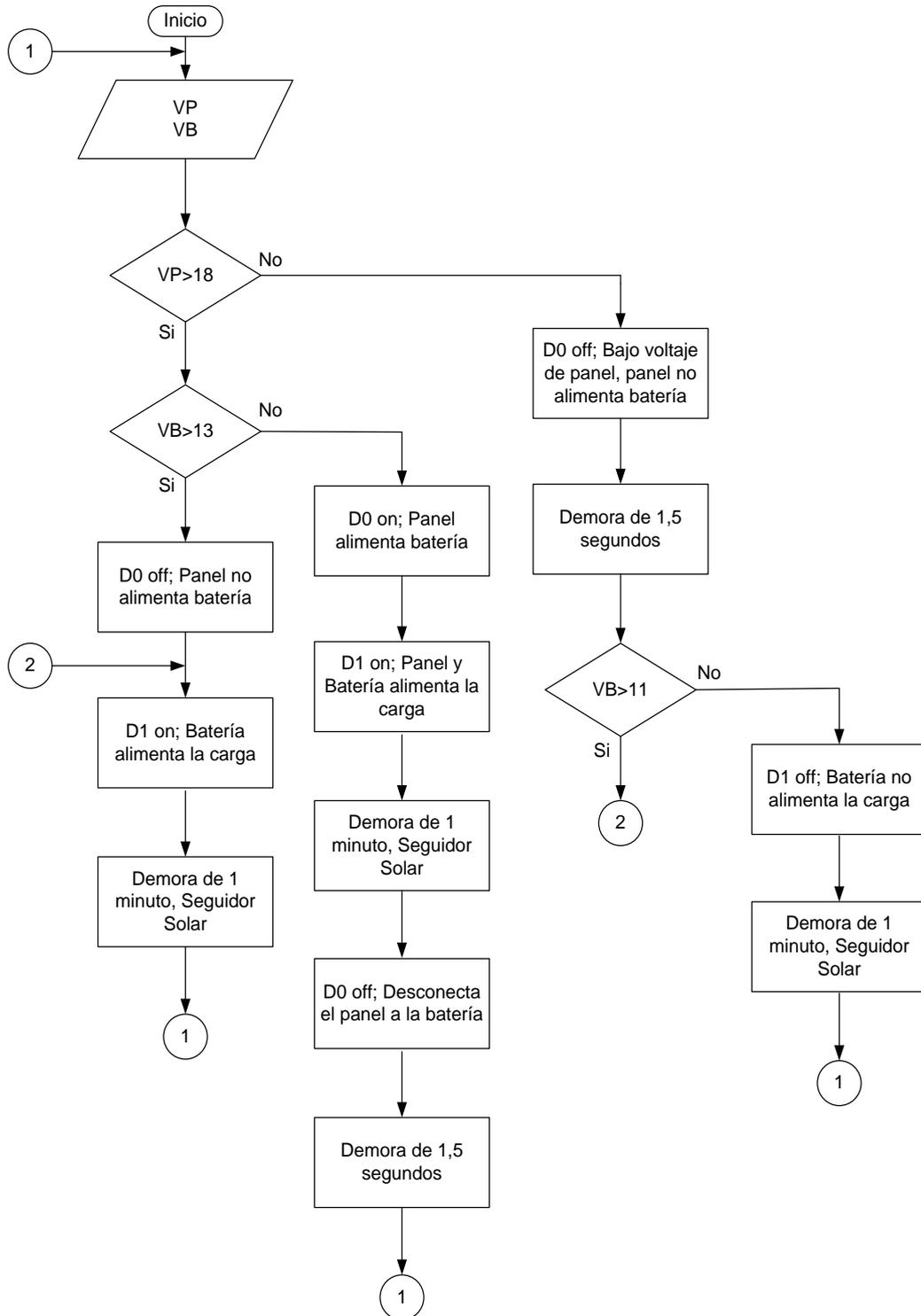


Figura 3.3. Diagrama de Flujo del Conmutador Automático de Carga.

### 3.4.- Programa del conmutador para el microprocesador

En el Anexo 2 se detalla la codificación del programa del conmutador automático de carga, grabado en el microcontrolador:

### 3.5.- Medidas y Problemas de acoplamiento del módulo conmutador automático de carga.

Los pasos realizados en este módulo son:

8. Diseñar el diagrama de flujo para el módulo conmutador automático de carga como se indica en la figura 3.3.
9. Desarrollar la codificación del módulo central de procesamiento en Mplab, como se indica en el punto 3.3.
10. Escoger el microcontrolador adecuado para nuestro trabajo práctico, por ejemplo el PIC16f871.
11. Cargar el programa conmutador automático de carga al microcontrolador, utilizando el grabador y el programa WinPic800.
12. Armar la placa del control automático de carga como se indica en el circuito de la figura 3.1.
13. Armar el regulador o circuito de potencia del módulo automático de Carga como se indica en la figura 3.2.

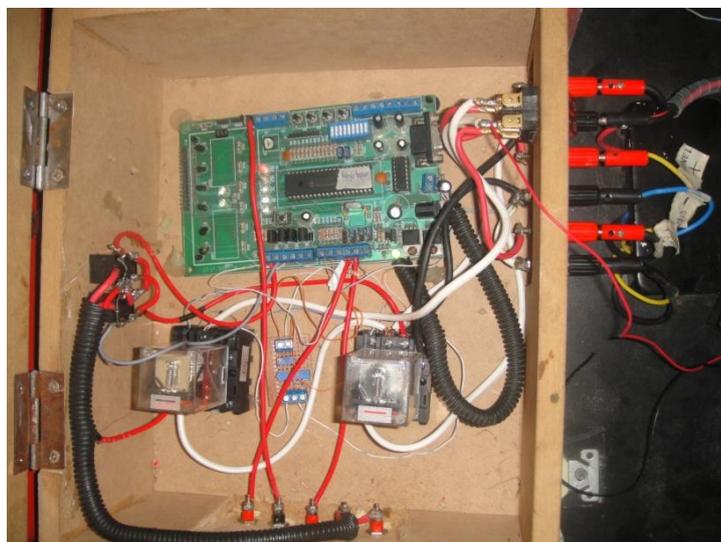


Figura 3.4. Placa Electrónica del Módulo automático de carga, circuito de control y potencia.

14. Colocar el microprocesador grabado en la placa de control del módulo automático de carga.
15. Comprobar el buen funcionamiento del programa cargado en el microcontrolador en forma directa, haciendo puentes con cables a la entrada del pic, y con unos leds a la salida del mismo.

## **3.6. MÓDULO INVERSOR**

### **3.6.1. Introducción**

Los inversores estáticos son circuitos que producen tensión o intensidad alterna a partir de una fuente de corriente continua. La forma de la señal de salida alterna deberá ser sinusoidal. Para cargas de naturaleza resistiva, la forma de la tensión de alimentación es distinta – continua ó alterna – son ambas válidas. En el caso de cargas de naturaleza inductivas (máquinas eléctricas: motores) la forma de la onda de tensión suministrada deberá ser lo más sinusoidal posible, ya que la máxima eficiencia en la rotación (energía mecánica) se produce mediante una onda sinusoidal con el armónico fundamental de frecuencia igual a 60 Hz. Si la señal alterna está compuesta por señales sinusoidales de frecuencias mayores (armónicos de mayor orden), estas señales no producen rotación, pero causan pérdidas por calentamiento de los bobinados de cobre y en el núcleo del motor, siendo a menudo responsables de la degradación y destrucción del aislamiento de las bobinas. En inversores conectados a la red eléctrica, la señal de tensión de salida será la propia señal de red (inversores conmutados por red) o deberá estar sincronizada con la señal de tensión de red (inversores autoconmutados). En este tipo de sistemas la señal de la corriente inyectada deberá ser lo más sinusoidal posible.

### **3.6.2.- Diagrama de funcionamiento del inversor.**

El inversor está formado por dos circuitos: el circuito de control y el circuito de potencia. Como se indica en la figura 3.5

## CIRCUITO DE CONTROL

## CIRCUITO DE FUERZA

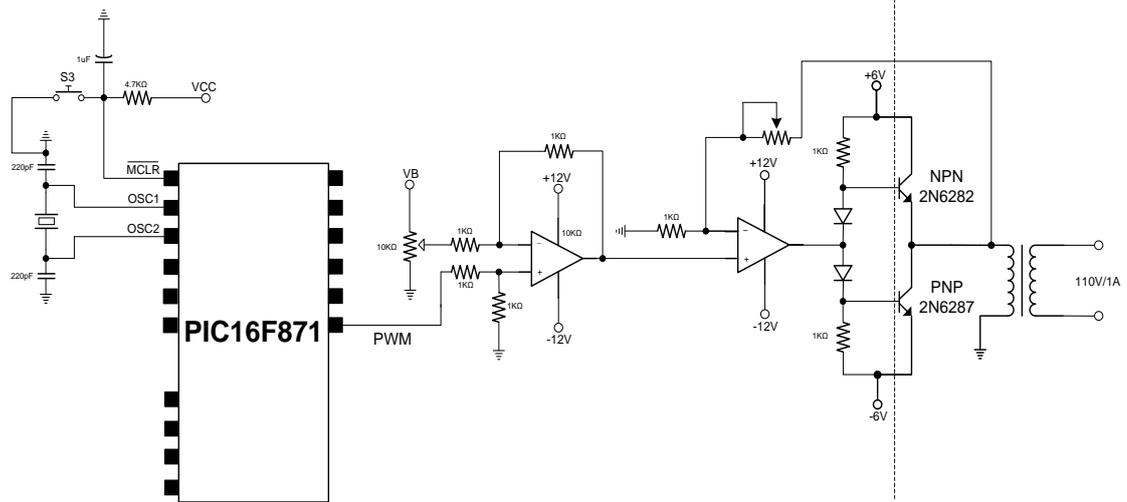


Figura 3.5. Diagrama de Control y Fuerza del Inversor

### 3.6.2.1.- Inversor circuito de control

El circuito de control del inversor conformado de:

- 1 microcontrolador PIC16F871
- 5 resistencias de  $1K\Omega$
- 2 potenciómetros de  $10K\Omega$
- 2 amplificadores operacionales

#### 3.6.2.1.1.- Microcontrolador PIC16F871

El microcontrolador PIC16F871 cargado con el programa “generación de onda senoidal”, es la parte principal del inverter circuito de control, el mismo fue elegido por poseer las condiciones básicas para generar ondas de PWM tipo senoidal.

#### 3.6.2.1.2. Resistencias de $1K\Omega$ , Potenciómetros de $10 K\Omega$ y Amplificadores

Las resistencias de  $1K\Omega$ , los potenciómetros de precisión de  $10K\Omega$  y un amplificador doble LM358N, se utilizan para regular el offset y amplificar las señales de PWM a la salida del microcontrolador.

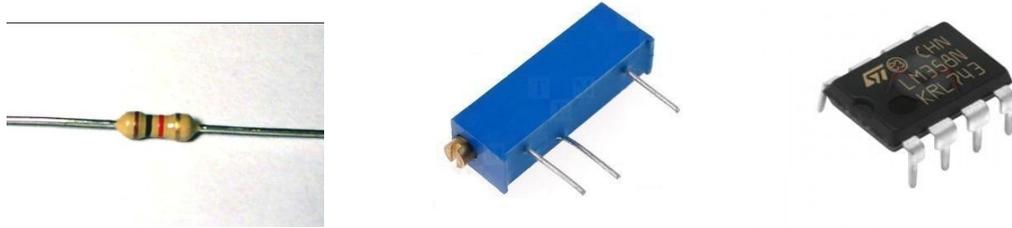


Figura 3.6. Resistencia de  $1k\Omega$ , Potenciómetro de precisión multivuelta y amplificador doble LM358N.

### 3.6.2.1.2.1. Regulador de Offset PWM

A la salida del microprocesador obtenemos la siguiente señal de PWM:

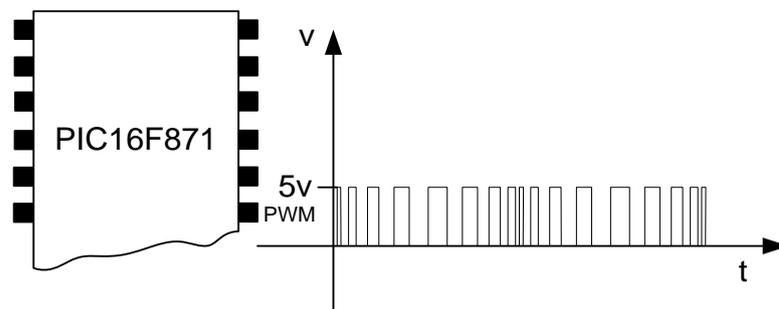


Figura 3.7. Señal de PWM a la salida del microprocesador

Con esta señal se obtiene una señal senoidal sobre el eje de referencia como se indica en la figura 3.8.

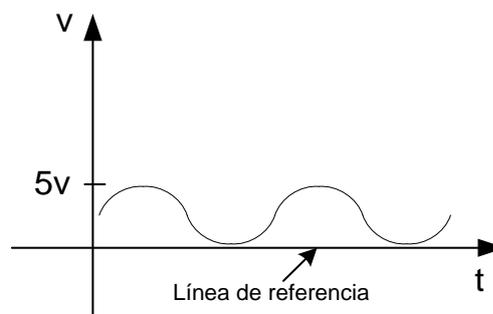


Figura 3.8. Señal senoidal sobre el eje de referencia

La señal senoidal hay que corregir o regular el offset, para obtener ciclos positivos y negativos de la línea de referencia. Por lo que se utiliza el siguiente circuito:

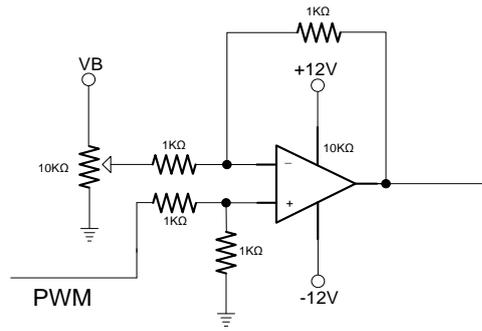


Figura 3.9. Circuito regulador de offset del PWM

Con este sumador se regula el offset de la señal de PWM como se indica en la figura 3.10.

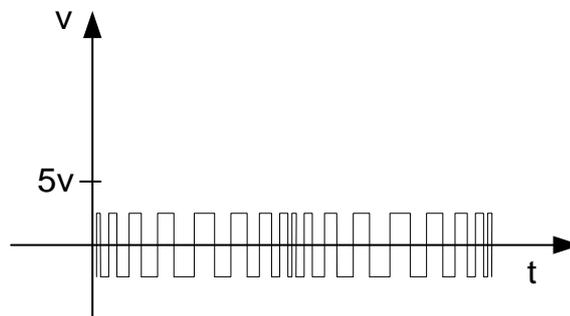


Figura 3.10. Señal de PWM regulada a salida de Sumador

Con esta señal se obtiene una señal senoidal con ciclos positivos y negativos a 60 Hz como se indica en la figura 3.11.

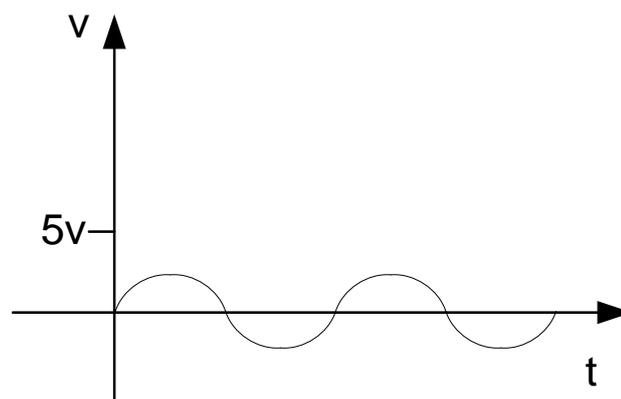


Figura 3.11. Señal senoidal con ciclos positivos y negativos

### 3.6.2.1.2.2. Amplificador de señal PWM

La señal senoidal obtenida en la figura anterior no es suficiente para acoplarse en el circuito inversor de potencia; por lo que se necesita amplificar con el siguiente circuito:

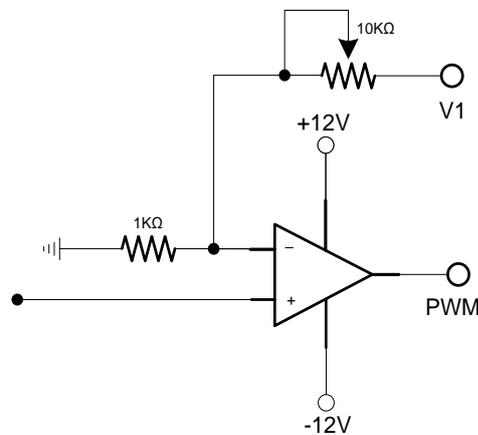


Figura 3.12. Amplificador regulador de señal

A la salida de este amplificador, se obtiene una señal de PWM de cinco voltios pico pico como se indica en esta figura 3.13. Con el potenciómetro de 10k se puede ir variando la amplitud según la necesidad de acoplamiento para el circuito inversor de potencia. En esta caso como ejemplo el voltaje 5Vpp.



Figura 3.13. Señal de PWM a la salida del amplificador

Con esta señal amplificada de PWM, se obtiene una señal senoidal de 5Vpp, que se acopla controlar el circuito inversor de potencia, tal como se indica en la siguiente

figura 3.14. Para obtener la señal senoidal de 5 Vpp es necesario filtrar la señal PWM de la figura 3.13. con el circuito de la figura 3.15.

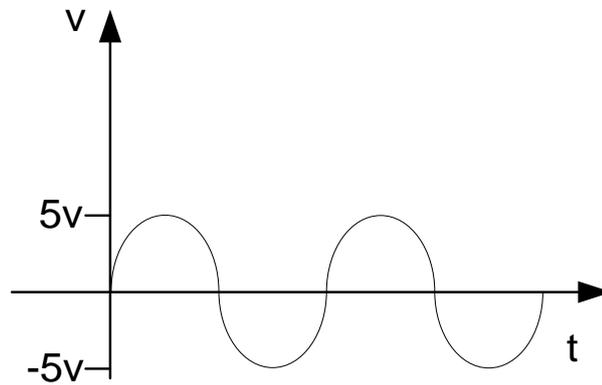


Figura 3.14. Señal senoidal de 5Vpp

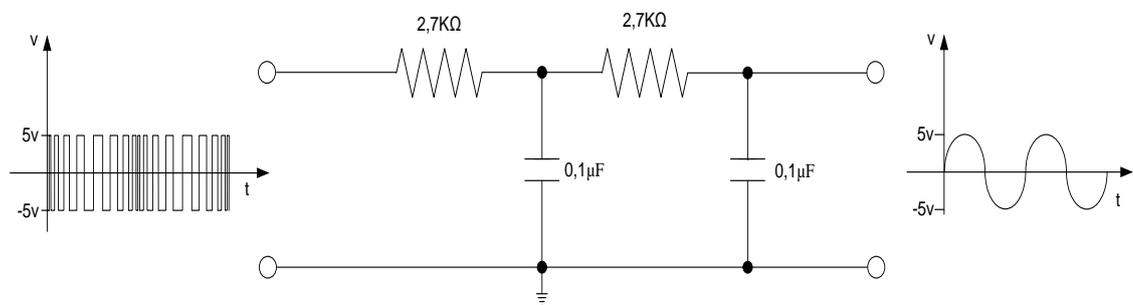


Figura 3.15. Filtro para señal PWM

### 3.6.3. Inversor circuito de fuerza o de potencia

El circuito de potencia o fuerza del inversor está conformado de:

- 2 resistencias de  $1K\Omega$
- 2 diodos rectificadores 1N4007
- 1 transistor Darlington NPN 2N6282
- 1 transistor Darlington PNP 2N6287 y
- 1 transformador de 4V/120V, 120W

En la figura 3.16. Se indica el circuito de fuerza o de potencia

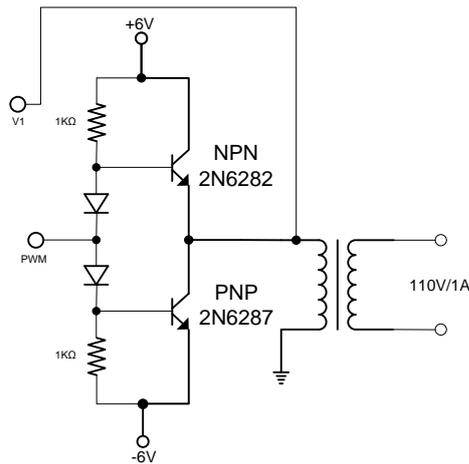


Figura 3.16. Circuito Inversor de Potencia

### 3.6.3.1. Resistencias de $1k\Omega$

Las resistencias de  $1k\Omega$  se utilizan para polarizar los transistores Darlington del circuito de potencia.

### 3.6.3.2. Diodos 1N4007

Los diodos rectificadores 1N4007 son usados para que la corriente circule en un solo sentido, hacia los transistores Darlington.



Figura 3.17. Diodo rectificador 1N4007

### 3.6.3.3. Transistor Darlington NPN 2N6282

Este transistor permite el paso de ciclos positivos de 5V del PWM al transformador. El mismo, fue elegido por poseer las características necesarias, como por ejemplo: permite un máximo de corriente de 20 amperios.



Figura 3.18. Transistor Darlington NPN 2N6282

#### 3.6.3.4. Transistor Darlington PNP 2N6287

Este transistor 2N6287 es el complemento del transistor 2N6282. Éste por el contrario, deja pasar los ciclos negativos del PWM al transformador. Del mismo modo, tiene las mismas características que el anterior.



Figura 3.19. Transistor Darlington PNP 2N6287

#### 3.6.3.5. Transformador de 4V/120V, 120W

Al fabricar este transformador se hizo los siguientes pasos:

1. Como en el secundario del transformador se requiere una potencia de 120W, al primario se calculó una potencia de 138W, ya que hay una pérdida del 15% por no ser una máquina original.
2. Con una potencia de 138W se calculó la sección del núcleo del transformador (Sh).

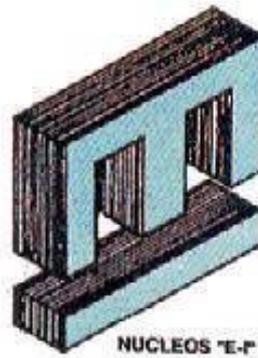


Figura 3.20. Sección del núcleo de hierro en forma de E

$$W = 138 \text{ vatios}$$

$$Sh = 1,1 \sqrt{W}$$

$$Sh = 1,1 \sqrt{138}$$

$$Sh = 13 \text{ cm}^2$$

3. A partir de placas E de hierro de 5 cm de largo se procedió a calcular el ancho.

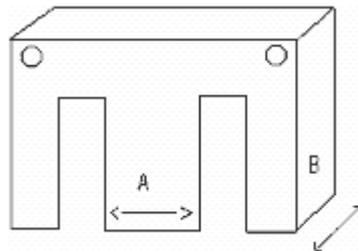


Figura 3.21. Largo y ancho del núcleo de hierro del transformador

$$A = 5 \text{ cm (largo)}$$

$$Sh = A \cdot B$$

$$B = Sh/A$$

$$B = 13 \text{ cm}^2 / 5 \text{ cm}$$

$$B = 2,6 \text{ cm (ancho)}$$

4. Cálculo de Número de espiras por voltio ( $N_{ev}$ ).

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$N_{ev} = \frac{225 * 10^5}{11000 * Sh * f}$$

$$N_{ev} = \frac{225 * 10^5}{11000 * 13 * 60}$$

$$N_{ev} = 2,62$$

Cálculo del Número de espiras en el primario (Np1).

En el primario del transformador se alimentará con un voltaje de 3,54V (Vp1) eficaz o 5V voltaje pico, entonces tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Primario} \quad N_{p1} &= N_{ev} * V_{p1} \\ N_{p1} &= 2,62 * 3,54 = 9,27 \end{aligned}$$

El alambre utilizado para la construcción tiene una pérdida del 6%, se procede al siguiente cálculo:

$$N_{p1} = 9,27 * 1,06 = 10 \text{ espiras}$$

##### 5. Cálculo del Número de espiras en el primario (Np1).

En el secundario del transformador se espera obtener un voltaje el 115V (Vp2) eficaz o de 163V voltaje pico, entonces tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Secundario} \quad N_{p2} &= N_{ev} * V_{p2} \\ N_{p2} &= 2,62 * 115 = 301,3 \end{aligned}$$

El alambre utilizado para la construcción tiene una pérdida del 6%, se procede al siguiente cálculo:

$$N_{p2} = 301,3 * 1,06 = 320 \text{ espiras.}$$

##### 6. Cálculo del número del conductor para el primario.

Procedemos a calcular la corriente del primario  $I_p$ . Potencia = 138 y Voltaje Pico = 5V.

En nuestro proyecto al primario lo hemos dividido en 4 partes, para acoplarte a la corriente de colector de los transistores Darlington, entonces:  $P_d = 138W/4 = 35W$

$$I_p = P_d / \text{Voltaje}$$

$$I_p = 35W/5V = 6,9A$$

Ahora ocupamos la fórmula para calcular la Sección del primario.

$$S_c = 6,9A/3 = 2,3mm^2$$

Se verifica en la tabla de conductores para buscar la sección más ajustable al dato calculado.

$$\text{Adaptable} = 2,40mm^2.$$

El número de conductor para esta sección es el 14.

#### 7. Cálculo del número del conductor para el secundario.

Procedemos a calcular la corriente del primario  $I_s$ . Potencia = 120 y Voltaje eficaz 120V.

En nuestro proyecto al secundario lo hemos dividido en 2 partes, entonces:  $P_s = 120W/2 = 60W$

$$I_s = P_s / \text{Voltaje}$$

$$I_s = 60/120V = 0,5A$$

Ahora ocupamos la fórmula para calcular la Sección del secundario.

$$S_c = 0,5/3 = 0,167mm^2$$

Se verifica en la tabla de conductores para buscar la sección más ajustable al dato calculado.

Adaptable =  $0,20\text{mm}^2$ .

El número de conductor para esta sección es el 24.

#### **3.6.4. Programa del inversor para el microprocesador.**

El programa para el inversor está en el anexo 3.

### **3.7. Módulo Secuencia para los transformadores**

#### **3.7.1.- Diagrama de funcionamiento de la secuencia para los transformadores.**

El diagrama de la secuencia para transformadores está formado por dos circuitos: el circuito de control y el circuito de potencia.

##### **3.7.1.1.- Secuencia para transformadores circuito de control**

El circuito de control de la secuencia para transformadores conformado de:

- 1 microcontrolador PIC16F871
- 8 resistencias de  $320\Omega$
- 8 transistores BD135
- 8 relés de 12v/10

Todo este circuito está conformado como si fuera un PLC inteligente

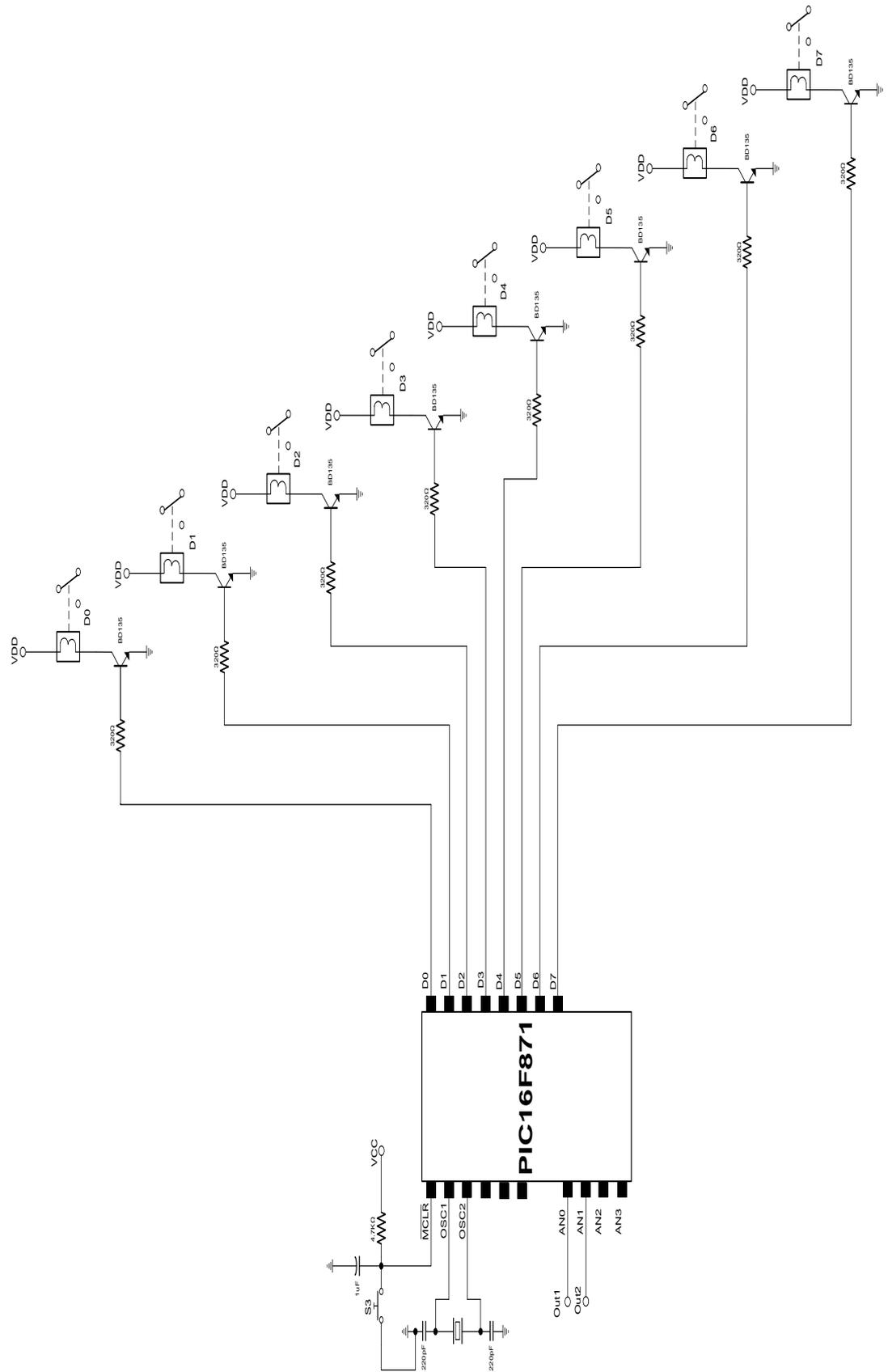


Figura 3.22. Diagrama de Control de la Secuencia para transformadores

### 3.7.1.1.1.- Microcontrolador PIC16F871

El microcontrolador PIC16F871 cargado con el programa “secuencia para transformadores”, es la parte cerebro del circuito de control, el mismo fue elegido por poseer las condiciones básicas de obtener señales analógicas a la entrada y entregar señales digitales a la salida.

### 3.7.1.1.2. Resistencias de 320Ω, Transistores BD135 y Relés de 12v/10A

Las resistencias de 320Ω y los transistores BD135 son utilizados para controlar o como interfaz entre los relés de 12V/10A



Figura 3.23. Resistencia de 320Ω, Transistor BD135, y Relé de 12V/10A.

### 3.7.1.2.- Secuencia para transformadores circuito de potencia

El circuito de potencia o fuerza de la secuencia de transformadores está conformado de:

- 2 transformadores de 4V/120V 40W
- 2 resistencia de 5,6Ω/5W

Dentro del mismo circuito de potencia, tenemos un circuito amplificador y un rectificador de onda media onda, que nos ayuda a mantener un voltaje continuo a la

entrada analógica del microcontrolador. Este circuito de está conformado de los siguientes elementos:

- 2 resistencias de  $100\Omega$
- 2 potenciómetros de  $10K\Omega$
- 2 amplificadores operacionales TL081CN
- 2 diodos rectificador 4007
- 2 condensadores de  $1000\mu F$
- 2 resistencias de  $1K\Omega$

En la figura 3.23. Se indica el circuito de fuerza o de potencia, incluido el circuito amplificador y rectificador.

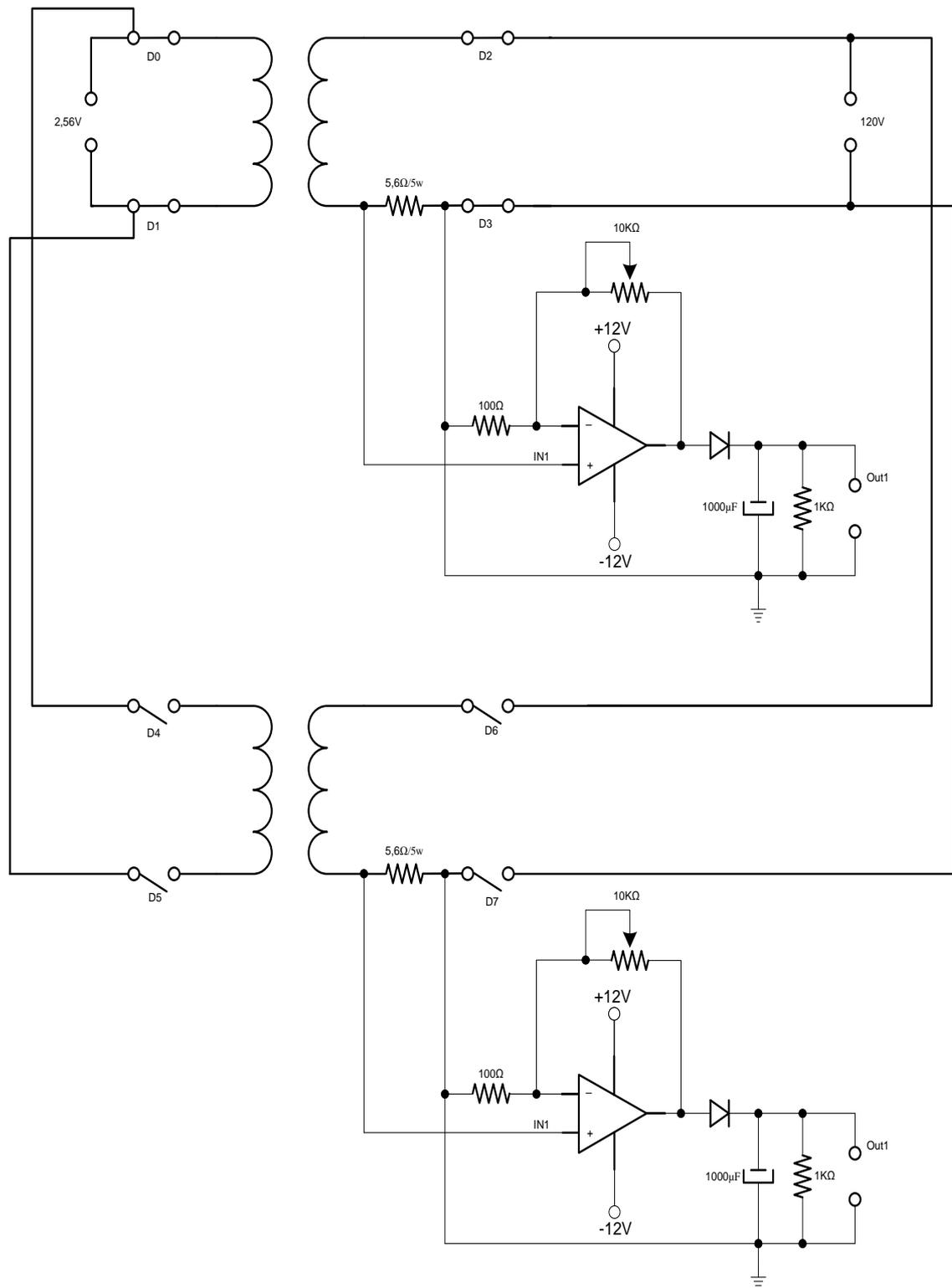


Figura 3.24. Circuito de Potencia de la secuencia de transformadores, incluido el circuito amplificador y rectificador.

### 3.7.2.- Diagrama de Flujo y Programa para la secuencia de transformadores.

#### 3.7.2.1. Diagrama de Flujo de la secuencia de transformadores

El diagrama de flujo de la secuencia de transformadores en el siguiente:

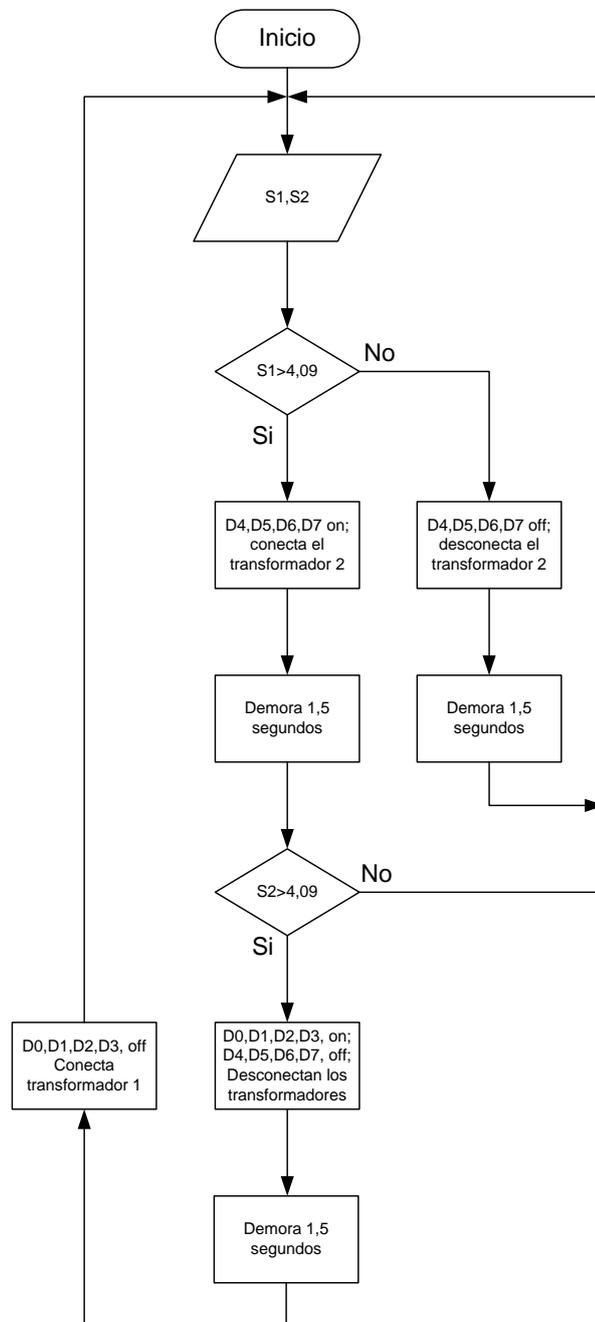


Figura 3.25. Diagrama de Flujo de la secuencia de transformadores

### **3.7.2.2. Programa de la Secuencia de transformadores**

El programa está codificado en MPlab y se encuentra en el Anexo 4.

## CONCLUSIONES

Al finalizar, el presente trabajo investigativo-práctico sobre “Diseño e Implementación de un Sistema Autónomo basado en Energía Solar”, aplicado para alimentar equipos o electrodomésticos sin la necesidad de la energía eléctrica de la empresa proveedora, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Todo el sistema del seguidor solar hace que el panel fotovoltaico gire de este a oeste. La ventaja de este método es que en días soleados funciona su seguimiento correctamente, pero la desventaja es que en días nublados, tal vez no lo haga de manera perfecta.
- El módulo regulador creado, evita que la batería entre en estado de sobrecarga o sobredescarga profunda, al mismo tiempo que controla la alimentación de la batería hacia el inversor.
- El inversor diseñado, convierte el voltaje continuo de la batería en voltaje alterno senoidal, el mismo que se obtiene al filtrar la señal PWM codificada del microcontrolador.
- La secuencia de transformadores construida, ayuda a que éstos no actúen al mismo tiempo, sino de acuerdo a las necesidades de consumo que se tenga, para evitar el desgaste innecesario de la energía ahorrada en la batería.

## RECOMENDACIONES

Teniendo como objetivo, el presente trabajo investigativo-práctico, titulado “Diseño e Implementación de un Sistema Autónomo basado en Energía Solar”, el de ofrecer una energía alternativa, sin la necesidad de la energía eléctrica de la empresa proveedora, se ha llegado a las siguientes recomendaciones:

- Para mejorar el seguimiento perpendicular del sol en día nublados, se ha colocado un potenciómetro a cada sensor LDR, que al maniobrarlo estabiliza la sensibilidad de los sensores hacia los rayos solares; también, se pueden reemplazar los sensores LDR por los sensores de radiación solar que son más sensibles, para perfeccionar el seguimiento.
- Para mejorar la señal o voltaje senoidal filtrada de PWM a la entrada de cada transformador, se recomienda estudiar qué tipo de transistores se acoplan mejor en el circuito de fuerza del inversor, para lograr una buena señal a la salida del transformador, y evitar los armónicos, ya que los que están propuestos tiene una variación.
- Como se poseían dos baterías grandes de 6 voltios 133Ah solamente, no se podían alimentar bien los amplificadores, entonces se tuvo que colocar dos baterías pequeñas de 12v 1,3Ah para alimentar los mismos, ya que estos amplificadores funcionan muy bien con voltajes superiores a 9 voltios, entonces, se colocó un potenciómetro para calibrar la amplitud hasta los 4 voltios eficaz (5,65 Vp) a la entrada de cada transformador de 40w. Para elevar la amplitud hasta los 12 Vp con el potenciómetro, por ejemplo, se recomienda reemplazar las baterías de 6 voltios 133 Ah por otras de 12 voltios 200 Ah y transformadores de 4/120 voltios 40 w por otras de 8/120 voltios 100w, con este cambio ya no se necesitan las baterías pequeñas para alimentar los amplificadores.

- No conectar equipos de potencia superior a la del inversor CD/CA, pues esta sobrecarga puede dañarlo.
- Este trabajo práctico se ha hecho con dos transformadores que soportan cargas de hasta 40w cada una, que conectadas en paralelo soportan hasta 80w, para aumentar la potencia para las cargas, solamente hay que aumentar más baterías y transformadores al diseño, por ejemplo, para llegar a 200w hay que aumentar dos baterías y tres transformadores. O también se puede cambiar las baterías y los transformadores por otras características, el mismo ejemplo, para llegar a 200w se necesitarían: 2 baterías de 12 voltios 200Ah y 2 transformadores de 8/120 voltios 100w.
- En la variación a dos baterías de 12 voltios se necesitan también dos paneles solares para que carguen las baterías.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CÁRDENAS José Luis. Electrónica 1. Chile. 2010.
- GIBBONS Roberto, VERNAVÁ Ángel. Implementación de pwm monofásicos. Universidad Nacional de Rosario, Departamento de Electrónica. Argentina. 2006.
- HERNÁNDEZ Valeriano Ruiz. El reto energético, Isofoton. Madrid. 2000.
- LAMAISON Urioste Rafael Martín. Energías Solar Fotovoltaica. Perú. Dept. d'Enginyeria Electrónica-UPC. 2004.
- MARIMÓN Campos Juan Pablo. Sistema Fotovoltaico con Rastreador Solar. Perú. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas UPC. 2004
- MORALES Noboa Daniel, ROMERO Sigcho Pablo. Construcción de un inversor trifásico transistorizado modulado por frecuencia. Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2004
- POLO J.R. Rosell, URRUTIA J.I. Rosell. Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. Madrid. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Ciemat. 2004. M.
- SOBRINO Eloy. Sistema fotovoltaico autónomo. [200-]
- VÁSQUEZ Francisco Eugenio. Módulo de Acumuladores. Ecuador. Universidad del Azuay. 2011.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- [http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/28/2884512\\_1.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/28/2884512_1.pdf). Datos y características del Microcontrolador PIC 16F871. Marzo 2011
- <http://ecologismosostenible.blogspot.com/2011/04/hablemos-de-energia-solar-fotovoltaica.html>. Energía Solar Fotovoltaica, Efecto Fotoeléctrico, Paneles Fotovoltaicos, Instalaciones Fotovoltaicas, Ventajas y Desventajas de la Energía Solar Fotovoltaica. Octubre 2011
- <http://upcommons.upc.edu>. Sistema de regulación fotovoltaico. Diciembre 2011
- <http://www.microchip.com>. Ejemplos de códigos de la onda PWM senoidal. Diciembre 2011
- <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2299.pdf>. Datos y características del amplificador TL081. Enero 2012
- <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2496/MOSPEC/2N6282.html> Datos y características de los transistores Darlington 2N6282 y del 2N6287. Enero 2012
- <http://www.electronica2000.com/colaboraciones/rolandorivas/instrucciones.pdf>. Cálculo simplificado de transformadores de pequeña potencia. Enero 2012

## ANEXOS

### Anexo 1. Programa Seguidor Solar

```

movlw .224           ;carga 224 al acumulador, 224 igual a 4.5V
movwf Ref_Sensor    ;4.5V se carga en el registro Ref_sensor, valor
constante
call act_cu         ;Lee las señales de entrada de los Sensores S1 y S2
movf adres_res3,w   ;la señal del Sensor 1 se coloca en el acumulador
subwf Ref_Sensor,w  ;resta el valor constante con el valor de la señal del
Sensor 1
movwf resultado1    ;resultado de la comparación
btfss 3,0           ;Compara voltaje de Sensor1 con el valor de 4.5V
goto mayor2        ;Voltaje de Sensor 1 mayor que la referencia, Sol en
alto nivel
                    ;va a mayor2
                    ;voltaje de Sensor1 menor que 4,5V. Sol en bajo nivel
bcf PORTD,2        ;motor no gira
goto salto2        ;va a salto2

mayor2             bsf PORTD,2      ;motor gira a la derecha
salto2             movf adres_res4,w ;señal de Sensor 2 se coloca en el acumulador
                    subwf Ref_Sensor,w ;resta el valor constante con el valor del Sensor
2
                    movwf resultado1 ;resultado de la comparación
                    btfss 3,0       ;Compara voltaje de Sensor2 con la referencia
de 4.5V
                    goto mayor4     ;Voltaje de Sensor2 mayor que 4.5V. Sol en alto
nivel
                    ;va a mayor4
                    ;voltaje de Sensor2 menor que 4,5V. Sol en bajo nivel

```

```

        bcf PORTD,3      ;motor no gira
        goto salto3     ;va salto3

        mayor4         bsf PORTD,3      ;motor gira a la izquierda
salto3    return

```

## Anexo 2. Regulador

```

;+++++
;REGULADOR+SEGUIDOR SOLAR 7 DE DICIEMBRE DEL 2010
;+++++
        list p=16f871
        #include <p16f871.inc>

;=====
;ZONA DE DECLARACION DE VARIABLES
;=====

N          = 0x25
M          = 0x26
cont1     = 0x27
cont2     = 0x28
cont3     = 0x29
num_ch    = 0x34
wtemp     = 0x35 ;Respaldo del wreg
stat_temp = 0x36 ;Variable para respaldar el STATUS
fsrtemp   = 0x37 ;Respaldo temporal del FSR
adres_res1 = 0x3A
adres_res2 = 0x3B
adres_res3 = 0x3C
adres_res4 = 0x3D
resultado1 = 0x40
contador  = 0x41
contador2 = 0x42
adres_res4 = 0x43

```

```

Ref_Vp      = 0x44
Ref_Vbc     = 0x45
Ref_Vbd     = 0x46
Ref_Sensor = 0x47

```

```

        org 0
        goto inicio          ;vector de reset
        org 4
        goto int             ;vector de interrupción
;-----
;adcon que actualiza los canales
;-----
tab_adcon    addwf PCL,1
             retlw 0x80      ;Canal 0
             retlw 0x88      ;Canal 1
             retlw 0x98      ;Canal 2
             retlw 0xA0      ;Canal 3

inicio
;-----
; DECLARACION DE LOS TRIS.....
;-----

             ;configuracion del micro
             ;configuracion de Entradas / Salidas
             bsf 3,5         ;banco 1
             clrf 8          ;Puerto d salida para los transistores
             bsf 5,0         ; Ra0 entrada
             bsf 5,1         ; Ra1 entrada
             bsf 5,2         ; Ra2 entrada
             bsf 5,3         ; Ra3 entrada

;-----PARAMETROS relativos al conversor-----
             movlw 0x00      ;Todo el Puerto A es Analógico
             movwf ADCON1    ;Resultado justificado a la Izquierda

             bcf 3,5         ; Banco 0

```

```

        movlw b'10000000'
        movwf ADCON0      ;reloj de conversión

;-----
; Configurar INT del timer0
;-----

        movlw b'11100000' ;habilita la interrupción del tmr0
        movwf INTCON

        bsf 3,5           ;banco 1
        movlw b'00000111' ;0x3 Hab de Pull Ups 1:1 tmr0 prescaler
        movwf OPTION_REG

        bcf 3,5

;-----
; Configuración de los valores constantes de referencia
;-----

        clrf TMR0
        movlw .209        ;4,09V (18V) ;RA=7.727K RB=2.272K Vpmax=22V
        movwf Ref_Vp
        movlw .192        ;3,82V (13V) ;RA=6.428K RB=3.572K Vmax=17V
        movwf Ref_Vbc
        movlw .165        ;3,24V (11V)
        movwf Ref_Vbd
        movlw .224        ;4,5V Sensor LDR conectado directo a 5V con una resistencia
                          de 1K
        movwf Ref_Sensor

;=====
; PROGRAMA PRINCIPAL
;=====

siguiente    clrf PORTD
again        call act_cu
              call accion

```

```

        goto again
;-----
; ZONA DE SUBROUTINAS.....

act_cu          movlw 0x20
                movwf FSR
                movf INDF,w
                movwf adres_res1 ;puerto A0 Voltaje de Panel
                incf FSR
                movf INDF,w
                movwf adres_res2 ;puerto A1 Voltaje de Batería
                incf FSR
                movf INDF,w
                movwf adres_res3 ;puerto A2 Voltaje de Sensor LDR1
                incf FSR
                movf INDF,w
                movwf adres_res4 ;puerto A3 Voltaje de Sensor LDR2
                return

accion          movf adres_res1,w
                subwf Ref_Vp,w
                movwf resultado1
                btfss 3,0      ;Compara voltaje de panel con la referencia de 18V
                goto mayor1   ;Voltaje de Panel mayor la referencia de 18v
                ;voltaje de Panel menor que la referencia de 18v
                bcf PORTD,0 ;panel desconecta no carga batería
                call dem_1.5s

                movf adres_res2,w
                subwf Ref_Vbd,w
                movwf resultado1
                btfss 3,0      ;Compara voltaje de batería con la referencia de 11V
                goto salto    ;fue negativo (MAYOR), Voltaje de batería mayor que 11V
                ;Voltaje de bateria menor que 11v

```

```

bcf PORTD,1 ;batería desconecta carga
call dem_1m
return

```

```

mayor1      movf adres_res2,w
            subwf Ref_Vbc,w
            movwf resultado1
            btfss 3,0      ;Compara voltaje de batería con la referencia de 13V
            goto mayor3   ;Voltaje de batería mayor que 13V
            ;Voltaje de batería menor que 13V
            bsf PORTD,0 ;panel carga batería
            bsf PORTD,1 ;alimenta carga
            call dem_1m

            bcf PORTD,0
            call dem_1.5s
            ;desconecta el panel para próxima comparación
            return

```

```

mayor3      bcf PORTD,0 ;panel no carga batería
salto       bsf PORTD,1 ;batería alimenta la carga
            call dem_1m
            return

```

```

convierte   bsf ADCON0,0      ;conversor encendido
            call dem_40us
            ;inicia la conversión
            bsf ADCON0,2      ;go
wait        btfsc ADCON0,2    ;done?
            goto wait
            ;apago conversor
            bcf ADCON0,0
            return

```

```

;-----

```

; INTERRUPCION Y ACTUALIZACION DE DATOS...

```

;-----
;-----
;respaldo de registros
;-----
int      movwf wtemp      ;respaldo acumulador
        swapf STATUS,0
        movwf stat_temp  ;respaldo del status
        movf FSR,w
        movwf fsrtemp    ;respaldo el FSR
;-----

        btfss INTCON,2   ;TOIF=0? desborde TMR0
        goto back        ;regresa a int del timer errada
        movlw 0x20
        movwf FSR
        clrf num_ch
nex_ch   movf num_ch,w
        call tab_adcon
        movwf ADCON0     ;configurar el canal a utilizar
        call convierte
        movf ADRESH,w
        movwf INDF
        incf num_ch
        movf num_ch,w
        sublw d'4'
        btfsc 3,2
        goto back
        incf FSR
        goto nex_ch

back     bcf INTCON,2     ;limpia la bandera del timer0
        movf fsrtemp,w   ;devuelve registros
        movwf FSR

```

```

        swapf stat_temp,0    ;restituye w sin afectar las banderas del
STATUS
        movwf STATUS        ;restituye STATUS
        swapf wtemp,1
        swapf wtemp,0      ;restituye W sin afectar las banderas del
STATUS
        retfie              ;retorno de la subrutina
;-----
; SUBRUTINAS DE DEMORAS
;-----
;-----
; demora de 40_uS
;-----

dem_40us    ;return
            movlw d'6'
            movwf N        ;parametro a cargar en contadores
            movlw d'1'
            movwf M        ;parametro a cargar en contadores
            call demora    ;demora de 47us
            return
;-----
;demora de 1.5s
;-----

dem_1.5s    ;return
            clrf contador
dem         movlw d'255'
            movwf N        ;parametro a cargar en contadores
            movlw d'255'
            movwf M        ;parametro a cargar en contadores
            call demora
            movf contador,w
            sublw d'90'
            btfsc 3,2

```

```

        return
        incf contador
        goto dem
;-----
; demora de 1m SEGUIDOR SOLAR
;-----
dem_1m    clrf contador2 ;return
dem3     clrf contador
dem2     call act_cu
         movf adres_res3,w
         subwf Ref_Sensor,w
         movwf resultado1
         btfss 3,0      ;Compara voltaje de Sensor1 con la referencia de 4,5
         goto mayor2  ;Voltaje de Sensor1 mayor que 4,5v. Sol alto
         ;voltaje de Sensor1 menor que 4,5V. Sol bajo
         bcf PORTD,2
         goto salto2
mayor2    bsf PORTD,2
salto2    movf adres_res4,w
         subwf Ref_Sensor,w
         movwf resultado1
         btfss 3,0      ;Compara voltaje de Sensor2 con la referencia de 4,5v
         goto mayor4  ;Voltaje de Sensor2 mayor que 4,5v. Sol alto
         ;voltaje de Sensor2 menor que 4,5V. Sol bajo
         bcf PORTD,3
         goto salto3
mayor4    bsf PORTD,3
salto3    movlw d'255'
         movwf N          ;parámetro a cargar en contadores
         movlw d'255'
         movwf M          ;parámetro a cargar en contadores
         call demora
         movf contador,w
         sublw d'255'

```

```

        btfsc 3,2
        goto repeat
        incf contador
        goto dem2
repeat   movf contador2,w
        sublw d'20'
        btfsc 3,2
        goto salto4
        incf contador2
        goto dem3
salto4   bcf PORTD,2
        bcf PORTD,3
        return
;-----
; Subrutina de DEMORA paramétrica general
;-----
demora   ;return
        movf  N,w
        movwf cont1
        movwf cont2
        movf  M,w
        movwf cont3
loop     decfsz cont1
        goto  loop
        movf  N,w
        movwf cont1
        decfsz cont2
        goto  loop
        movf  N,w
        movwf cont2
        decfsz cont3
        goto  loop
        return ;fin de subrutina retorna
; Al programa principal

```

End

### Anexo 3. Generación de Onda Senoidal

```

;*****
; GENERACION DE ONDA SENOIDAL
    LIST P=16F877A
    INCLUDE <P16F877A.INC>

;***** DEFINICIÓN DE CONSTANTES*****

FXTAL    EQU    .16000000
FINST    EQU    FXTAL/4
FSINE    EQU    .60
STEP#    EQU    .32
FSTEP    EQU    FSINE * STEP#

;*****DEFINICIÓN DE REGISTROS *****

TEMPW            EQU    0x20
DELAYCNT1        EQU    0x21
DELAYCNT2        EQU    0x22
STEPCOUNT       EQU    0x23
OUTLOW           EQU    0x24
OUTHIGH          EQU    0x25

;*****DEFINICIÓN DE BIT*****

PWM            EQU            0x02            ; RC2 usado como salida

;*****
;
;                               Reset Vector
;*****

```

```

org 0x000
goto inicio          ; Inicio del programa

org 0x004           ; Ubicación del vector de interrupción
IntVector
    movwf TEMPW      ; Temporalmente guardado W
    btfsc PORTC,PWM  ; se trata de un ciclo bajo?
    goto PWMLow     ; No ...

PWMHigh
    swapf OUTHIGH,W  ; Si... carga el tiempo alto sin afectar la bandera
del STATUS
    bsf PORTC,PWM    ; pin a estado alto
    nop              ; Demora para igualar los ciclos de carga
alta/baja del TMR0
    movwf TMR0       ; carga el siguiente borde del tiempo de
interrupción
    bcf INTCON,T0IF  ; Limpia la bandera de desbordamiento del
TMR0
    swapf TEMPW,F    ; Intercambia lo guardado en W
    swapf TEMPW,W    ; Restaura W

IntEndHi
    retfie           ; Retorna de la Interrupción

PWMLow
    Bcf PORTC,PWM
    swapf OUTLOW,W   ; Carga el tiempo bajo
    movwf TMR0       ; Carga la siguiente interrupción del borde
    bcf INTCON,T0IF  ; Limpia la bandera de desbordamiento del
TMR0
    swapf TEMPW,F    ; Intercambia lo guardado en W
    swapf TEMPW,W    ; Restaura W

IntEndLo
    retfie           ; Retorna de la Interrupción

```

```

;*****
;
;           RUTINA PRINCIPAL
;*****
inicio
clrf  STATUS          ; Inicializa el registro STATUS y selecciona el banco 0
bsf  STATUS,RP0      ; Selecciona el banco 1
movlw 0x88           ; Carga un 88 al acumulador
movwf OPTION_REG     ; Prescaler TMR0 1:1 TMR0 prescaler
movlw .7             ; Carga un 7 al acumulador
movwf ADCON1        ; Las entradas son analógicas y las salidas son digitales
clrf  TRISC          ; El puerto C es programado como salida
bcf  STATUS,RP0     ; Selecciona el banco 0
movlw 0xFF
movwf PORTC         ; Pines del puerto C en alto
clrf  TMR0          ; Inicializa el TMR0
movlw 0xA0
movwf INTCON        ; Habilita el TMR0 y las interrupciones globales

ResetStep
    Movlw  STEP#
    movwf STEPCOUNT    ; Carga el contador a 32 pasos

StepLoop
    call  Delay        ; Llama a demora
    movf  STEPCOUNT,W  ; Pasa a la tabla vía W
    call  SineTable    ; obtener los valores de la tabla de Seno
    call  SetPWM       ; Configuración de los valores de PWM de alta
y baja
    decfsz STEPCOUNT,F ; Siguiete paso
    goto StepLoop
    goto ResetStep

;*****
;
;           Set PWM Subroutine

```

```

;      En el siguiente se calcula el valor de tiempo alto y bajo de PWM
;      Los dos valores de tiempo,OUTLOW y OUTHIGH, se pasa a la rutina
;      de servicio de interrupción.
;*****
SetPWM
      bcf   INTCON,GIE      ; Deshabilitar las interrupciones para proteger
ISR de...
                                ;la corrupción de los valores de OUTLOW y
                                ;OUTHIGH
      movwf OUTLOW          ; Establecer el Duty Cycle
      comf  OUTLOW,W
                                ;
      addlw IntEndHi-IntVector ; Ajustar el tiempo de Interrupción de
Servicio
      movwf OUTHIGH
      movf  OUTLOW,W
      addlw IntEndHi-IntVector ; Ajustar el tiempo de Interrupción de
Servicio
      movwf OUTLOW
                                ;
      swapf OUTLOW,F        ; Intercambio de servicio...
      swapf OUTHIGH,F      ; para no corromper el STATUS
      bsf   INTCON,GIE     ; Reabilita las interrupciones
      return
;*****
;      Tabla de búsqueda de onda sinusoidal
;*****
SineTable
      addwf PCL,F          ; Incrementa dentro de la tabla
      retlw .0             ; Valor falso
      retlw .128           ; 0 grados, 2.5 volt
      retlw .148
      retlw .167

```

```

retlw .185
retlw .200
retlw .213
retlw .222
retlw .228
retlw .230           ; 90 grados, 4.5 volt
retlw .228
retlw .222
retlw .213
retlw .200
retlw .185
retlw .167
retlw .148
retlw .128           ; 180 grados, 2.5 volt
retlw .108
retlw .89
retlw .71
retlw .56
retlw .43
retlw .34
retlw .28
retlw .26           ; 270 grados, 0.5 volt
retlw .28
retlw .34
retlw .43
retlw .56
retlw .71
retlw .89
retlw .108

```

```

;*****
;
;           Demora de tiempo de Subrutina
;*****
;

```

```
TDELAY      EQU  FINST/FSTEP      ; # de ciclos de demora del
contador
ADJTDELAY   EQU  TDELAY/3 - 55     ; Ajusta para el ciclo principal de
rutina
TDELAYHI    EQU  high ADJTDELAY    ; Byte más significativo de
TDELAY
TDELAYLO    EQU  low ADJTDELAY     ; Byte menos significativo de
TDELAY
```

Delay

```
    movlw    TDELAYHI
    movwf    DELAYCNT2            ; Cargar el alto contador byte de demora
    clrf    DELAYCNT1
```

LoopD1

```
    decfsz  DELAYCNT1,F          ; Terminó con 256 bucles?
    goto    LoopD1              ; No ... seguir adelante
    decfsz  DELAYCNT2,F          ; Sí ... Está Hecho con bucles TDELAYHI?
    goto    LoopD1              ; No ...

    movlw   TDELAYLO            ; Sí ... Cargar el byte bajo de ajustar los ciclos
    movwf   DELAYCNT1           ; de la rutina principal
```

LoopD2

```
    decfsz  DELAYCNT1,F          ; Terminó con bucles TDELAYLO?
    goto    LoopD2              ; No ... seguir adelante
    return                                     ; Si... Terminado
```

```
END                                     ; Fin del programa!
```

**Anexo 4. Secuencia de Transformador.**

```
;+++++
;SECUENCIA DE TRANSFORMADOR
;+++++
```

list p=16f871

```

#include <p16f871.inc>

;=====
;ZONA DE DECLARACION DE VARIABLES
;=====

N          = 0x25
M          = 0x26
cont1     = 0x27
cont2     = 0x28
cont3     = 0x29
num_ch    = 0x34
wtemp     = 0x35      ;Respaldo del wreg
stat_temp = 0x36      ;Variable para respaldar el STATUS
fsrtemp   = 0x37      ;Respaldo temporal del FSR
adres_res1 = 0x3A
adres_res2 = 0x3B
adres_res3 = 0x3C
adres_res4 = 0x3D
resultado1 = 0x40
contador  = 0x41
contador2 = 0x42
Prueba1   = 0x44
Prueba2   = 0x45

          org 0
          goto inicio ;vector de reset
          org 4
          goto int    ;vector de interrupcion

;-----
;adcon que actualiza los canales
;-----

tab_adcon  addwf PCL,1
           retlw 0x80 ;Canal 0
           retlw 0x88 ;Canal 1

```

```

        retlw 0x98    ;Canal 2
        retlw 0xA0   ;Canal 3

inicio

;-----
;DECLARACION DE LOS TRIS.....
;-----

        ;configuracion del micro
        ;configuracion de Entradas / Salidas
        bsf 3,5      ;banco 1
        clrf 8       ;Puerto d salida para los transistores
        bsf 5,0      ; Ra0 entrada
        bsf 5,1      ; Ra1 entrada
        bsf 5,2      ; Ra2 entrada
        bsf 5,3      ; Ra3 entrada

;-----PARAMETROS relativos al conversor-----
        movlw 0x00    ;Todo el Puerto A es Analogico
        movwf ADCON1  ;Resultado justificado a la Izquierda

        bcf 3,5       ; Banco 0
        movlw b'10000000'
        movwf ADCON0  ;reloj de conversion

;-----
;Configurar INT del timer0
;-----

        movlw b'11100000' ;habilita la interrupcion del tmr0
        movwf INTCON

        bsf 3,5        ;banco 1
        movlw b'00000111' ;0x3 Hab de Pull Ups 1:1 tmr0 prescaler
        movwf OPTION_REG

        bcf 3,5

```

```

    clrf TMR0
    movlw .209          ;4,09V voltaje pico en la resistencia de 5,6ohm/5w
    movwf Prueba1
    movlw .235          ;4,6V voltaje pico en la resistencia de 5,6ohm/5w
    movwf Prueba2

;=====
;PROGRAMA PRINCIPAL
;=====

siguiente    clrf PORTD
again        call act_cu
             call accion
             goto again

;-----
;ZONA DE SUBROUTINAS.....
;-----

act_cu       movlw 0x20
             movwf FSR
             movf INDF,w
             movwf adres_res1 ;puerto A0 Voltaje de transformador 1
             incf FSR
             movf INDF,w
             movwf adres_res2 ;puerto A1 Voltaje de transformador 2
             return

accion       movf adres_res1,w
             subwf Prueba1,w
             movwf resultado1
             btfss 3,0        ;Compara con la referencia1 4,09 pico
             goto mayor1     ;voltaje mayor
             ;voltaje menor
             bcf PORTD,4
             bcf PORTD,5

```

```
        bcf PORTD,6
        bcf PORTD,7
        return

mayor1  bsf PORTD,4
        bsf PORTD,5
        bsf PORTD,6
        bsf PORTD,7
        movf adres_res2,w
        subwf Prueba1,w
        movwf resultado1
        btfss 3,0      ;Compara con la referencia de 4,09 pico
        goto mayor2  ;voltaje mayor
        ;voltaje menor
        return

mayor2  bcf PORTD,4
        bcf PORTD,5
        bcf PORTD,6
        bcf PORTD,7
        bsf PORTD,0
        bsf PORTD,1
        bsf PORTD,2
        bsf PORTD,3
        call dem_1.5s
        bcf PORTD,0
        bcf PORTD,1
        bcf PORTD,2
        bcf PORTD,3
        return

convierte bsf ADCON0,0      ;conversor encendido
        call dem_40us
        ;inicia la conversion
```

```

        bsf ADCON0,2      ;go
wait    btfsc ADCON0,2   ;done?
        goto wait
        ;apago conversor
        bcf ADCON0,0
        return

;-----
;INTERRUPCION Y ACTUALIZACION DE DATOS...
;-----

        ;-----
        ;respaldo de registros
        ;-----

int     movwf wtemp      ;respaldo ac
        swapf STATUS,0
        movwf stat_temp ;respaldo del status
        movf FSR,w
        movwf fsrtemp   ;respaldo el FSR
        ;-----

        btss INTCON,2   ;TOIF=0? desborde TMR0
        goto back      ;regresa a int del timer errada
        movlw 0x20
        movwf FSR
        clrf num_ch
nch     movf num_ch,w
        call tab_adcon
        movwf ADCON0   ;configura el canal a utilizar
        call convierte
        movf ADRESH,w
        movwf INDF
        incf num_ch
        movf num_ch,w
        sublw d'2'
        btfsc 3,2

```

```

        goto back
        incf FSR
        goto nex_ch

back      bcf INTCON,2      ;limpia la bandera del timer0
          movf fsrtemp,w    ;devuelve registros
          movwf FSR
          swapf stat_temp,0 ;restituye w sin afectar las banderas del
STATUS
          movwf STATUS    ;restituye STATUS
          swapf wtemp,1
          swapf wtemp,0   ;restituye W sin afectar las banderas del
STATUS
          retfie          ;retorno de la subrutina
;-----
;SUBRUTINAS DE DEMORAS
;-----
;-----
;demora de 40_uS
;-----
dem_40us  ;return
          movlw d'6'
          movwf N          ;parametro a cargar en contadores
          movlw d'1'
          movwf M          ;parametro a cargar en contadores
          call demora      ;demora de 47us
          return
;-----
;demora de 1.5s
;-----
dem_1.5s  ;return
          clrf contador
dem       movlw d'255'
          movwf N          ;parametro a cargar en contadores

```

