



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES.

CAMPUS ARAGÓN

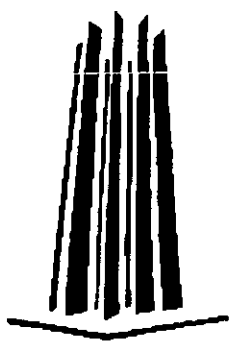
“PANEL SOLAR CONTROLADO POR COMPUTADORA”.

288873

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO  
ELECTRICISTA

P R E S E N T A N :  
JOSÉ MANUEL RAMÍREZ MORA  
JORGE ALEJANDRO WONG LOYA

ASESOR DE TESIS :  
ING. ELEAZAR M. PINEDA DIAZ





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ARAGÓN - UNAM

JEFATURA DE CARRERA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OFICIO: ENAR/JAME/0968/00.

ASUNTO: **Sínodo.**

**LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS**  
**SECRETARIO ACADÉMICO**  
**PRESENTE.**

Por este conducto me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Sínodo del Examen Profesional del alumno, **JORGE ALEJANDRO WONG LOYA**, con Número de Cuenta: 9006145-5, con el tema de tesis: "PANEL SOLAR CONTROLADO POR COMPUTADORA".

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>ING. ELEAZAR M. PINEDA DÍAZ</b>	<b>OCTUBRE</b>	<b>80</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>ING. NARCISO ACEVEDO HERNÁNDEZ</b>	<b>ENERO</b>	<b>86</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>ING. ENRIQUE GARCÍA GUZMÁN</b>	<b>AGOSTO</b>	<b>95</b>
<b>SUPLENTE:</b>	<b>ING. PABLO LUNA ESCORZA</b>	<b>ENERO</b>	<b>96</b>
<b>SUPLENTE:</b>	<b>ING. IVÁN MUÑOZ SOLÍS</b>	<b>AGOSTO</b>	<b>97</b>

Quiero subrayar que el Director de Tesis es el Ing. Eleazar Margarito Pineda Díaz, el cual está incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
San Juan de Aragón, Edo. de México, noviembre 27 del 2000.

**EL JEFE DE CARRERA**

**ING. IVÁN MUÑOZ SOLÍS.**

c.c.p. Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez.- Jefa del Depto. de Servicios Escolares.  
Ing. Eleazar M. Pineda Díaz.- Asesor  
Alumno

IMS/mlev\*



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CAMPUS ARAGÓN

SECRETARÍA ACADÉMICA

Ing. IVÁN MUÑOZ SOLÍS  
Jefe de la Carrera de Mecánica Eléctrica,  
Presente.

En atención a la solicitud de fecha 28 de noviembre del año en curso, por la que se comunica que los alumnos JORGE ALEJANDRO WONG LOYA y JOSÉ MANUEL RAMÍREZ MORA, de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, han concluido su trabajo de investigación intitulado "PANEL SOLAR CONTROLADO POR COMPUTADORA", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del Examen Profesional.

Sin otro particular, reitero a usted las seguridades de mi atenta consideración.

**A t e n t a m e n t e**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
San Juan de Aragón, México, 29 de noviembre del 2000  
**EL SECRETARIO**

Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS

C p Asesor de Tesis.

C p Interesado.

AIR/RCC/vr

5-11-00



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ARAGÓN - UNAM

JEFATURA DE CARRERA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OFICIO: ENAR/JAME/0967/00.

ASUNTO: **Sínodo.**

**LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS**  
**SECRETARIO ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Sínodo del Examen Profesional del alumno, **JOSÉ MANUEL RAMÍREZ MORA**, con Número de Cuenta: **9365116-1**, con el tema de tesis: **"PANEL SOLAR CONTROLADO POR COMPUTADORA"**.

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>ING. ELEAZAR M. PINEDA DÍAZ</b>	<b>OCTUBRE</b>	<b>80</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>ING. NARCISO ACEVEDO HERNÁNDEZ</b>	<b>ENERO</b>	<b>86</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>ING. ENRIQUE GARCÍA GUZMÁN</b>	<b>AGOSTO</b>	<b>95</b>
<b>SUPLENTE:</b>	<b>ING. PABLO LUNA ESCORZA</b>	<b>ENERO</b>	<b>96</b>
<b>SUPLENTE:</b>	<b>ING. IVÁN MUÑOZ SOLÍS</b>	<b>AGOSTO</b>	<b>97</b>

Quiero subrayar que el Director de Tesis es el Ing. Eleazar Margarito Pineda Díaz, el cual está incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
San Juan de Aragón, Edo. de México, noviembre 27 del 2000.

**EL JEFE DE CARRERA**

**ING. IVÁN MUÑOZ SOLÍS.**

c.c.p. Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez.- Jefa del Depto. de Servicios Escolares.  
Ing. Eleazar M. Pineda Díaz.- Asesor  
Alumno

IMS/mlev\*



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CAMPUS ARAGÓN

SECRETARÍA ACADÉMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Ing. IVÁN MUÑOZ SOLÍS  
Jefe de la Carrera de Mecánica Eléctrica,  
Presente.

En atención a la solicitud de fecha 28 de noviembre del año en curso, por la que se comunica que los alumnos JOSÉ MANUEL RAMÍREZ MORA y JORGE ALEJANDRO WONG LOYA, de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, han concluido su trabajo de investigación intitulado "PANEL SOLAR CONTROLADO POR COMPUTADORA", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del Examen Profesional.

Sin otro particular, reitero a usted las seguridades de mi atenta consideración.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

San Juan de Aragón, México, 29 de noviembre del 2000

EL SECRETARIO

Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS

C p Asesor de Tesis.

C p Interesado.

AIR/BEC/vr

2 Dic 20

**Agradezco a:**

**A mi familia**

**En especial a mis padres y hermanos  
por haberme brindado todo su amor y  
apoyo durante toda mi vida y haberme  
ayudado a llegar hasta aquí**

**A mis compañeros**

**Por haber compartido tantos buenos  
y malos momentos durante toda la carrera**

**A mis amigos**

**Por su invaluable apoyo  
en especial a mis amigos  
del CCH - Vallejo**

**En especial gracias a José Manuel  
por haberme ayudado a realizar  
este trabajo y por su gran amistad**

**Jorge Alejandro Wong Loya**

**Agradezco a:**

**Primeramente a Dios y a mi familia con hincapié a mis padres que se esperaron tanto y no flaquearon en su confianza en el término de mi carrera y la realización de esta tesis, a mis hermanas y a mi novia Araceli que fueron parte de inspiración.**

**A los compañeros de Generación: Rubén, Julio, Abraham, Juan, y otros compañeros que por obvias razones de espacio omito.**

**A nuestro asesor Ing. Margarito Pineda Díaz  
Y a nuestros revisores Ing. Narciso Acevedo,  
Ing. Enrique García, Ing. Pablo Luna, Ing. Iván  
. Muñoz.**

**Gracias compadre por tu valiosa ayuda en este trabajo.**

**José Manuel Ramírez Mora**



INTRODUCCION	1
CAPITULO 1 - La célula solar	5
1.1 Introducción	5
1.2 La célula solar	7
1.2.1 Estructura de la célula solar	7
1.2.2 Principio de funcionamiento	9
1.3 Fotogeneración de corriente	10
1.3.1 Absorción de luz y generación de portadores	11
1.3.2 Colección de corriente	14
1.4 Corriente de oscuridad	15
1.5 Característica I-V de iluminación	17
1.5.1 Corriente de corto circuito y tensión de circuito abierto	18
1.5.2 Punto de máxima potencia	18
1.5.3 Factor de forma y rendimiento de conversión energética	19
1.6 Clasificación de las células solares	20
1.6.1 Célula de silicio convencional	20
1.6.2 Célula de sulfuro de cadmio	26
1.6.3 Célula de arseniuro de galio	28
Capitulo 2 El panel fotovoltaico	31
2.1 Definición de panel fotovoltaico	31
2.1.1 El módulo fotovoltaico	31
2.2 Interconexión de paneles fotovoltaico	33
2.2.1 Condiciones estándares y TONC	34
2.2.2 Pérdidas por dispersión	34
2.2.3 El problema del punto caliente	37
2.3 Clasificación de paneles fotovoltaicos	40
2.3.1 Panel plano	40
2.3.2 Panel concentrador	41
2.3.2.1 Apertura angular y concentración óptica	45
2.3.2.2 Concentradores estáticos	48
2.3.2.3 Concentradores con seguimiento	52
2.3.2.4 Pérdidas ópticas	53
CAPITULO 3 - Panel solar móvil	56
3.1 Introducción	56
3.2 Descripción del movimiento del panel solar	57
3.2.1 Cinemática del movimiento	57
3.3 El panel solar	59
3.3.1 Bases	61
3.3.2 Motores	61
3.3.3 Tren de engranes	62
3.3.4 Marcos	63
3.3.5 Ejes	64
3.3.6 Sensores de luz (Fotómetro)	64
3.3.7 Sensores de posición	66
3.3.8 Modulo fotovoltaico (fotoceldas)	67
CAPITULO 4 Propuesta para controlar el panel solar móvil a través de una computadora	69
4.1 Introducción	69

4.2 Sistema de control del panel	69
4.3 Descripción de una computadora	70
4.3.1 ORGANIZACION DE UN SISTEMA DE COMPUTADORA BASICO	71
4.3.1.1 Unidad aritmética - lógica	72
4.3.1.2 Unidad de memoria	72
4.3.1.3 Unidad de entrada	75
4.3.1.4 Unidad de salida	75
4.3.1.5 Interfaz	76
4.3.1.6 Unidad de control	76
4.3.1.7 Unidad central de procesamiento (CPU)	77
4.4 La interfaz programable con el CI 8255	79
4.4.1 Funcionamiento del C.I.8255	79
4.4.2 Descripción de la palabra de control	84
4.4.3 Funcionamiento del C.I. 74LS688	86
4.4.4 Slot de expansión (BUS)	87
4.4.4.1 Bus ISA	88
4.4.5 Descripción de la interfaz propuesta	91
4.5 Circuitos para el control	94
4.5.1 Circuito de protección	94
4.5.2 Circuito comparador de voltaje	95
4.5.3 Circuito inversor de transistores NPN y PNP	97
4.5.4 Circuito de control de los motores	98
4.6 Diseño de los circuitos para el control.	100
4.7 Programa de control para la PC	108
4.7.1 Algoritmo	108
4.7.2 Diagrama de flujo	110
4.7.3 Listado	113
Conclusiones	119
Bibliografía	122
NOMENCLATURA	I
SIMBOLOGIA	IX

## INTRODUCCION

El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la Historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades, si aprendemos cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente derrama sobre el planeta. Ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia, por lo que la energía solar es una energía garantizada para los próximos 6.000 millones de años.

Durante el presente año, el Sol arrojará sobre la Tierra cuatro mil veces más energía que la que vamos a consumir, por lo que no sería racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, no contaminante e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras o, simplemente, contaminantes, que además se obtienen de recursos no renovables

Es preciso, no obstante, señalar que existen algunos problemas que debemos afrontar y superar. Aparte de las dificultades que una política energética solar avanzada conllevaría por sí misma, hay que tener en cuenta que esta energía está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas. Así, por ejemplo, la radiación solar es menor en invierno y en época de lluvias, precisamente cuando más la necesitamos.

Es de vital importancia el desarrollo de la incipiente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, para conseguir las condiciones que la hagan definitivamente competitiva, a escala planetaria.

Básicamente, recogiendo de forma adecuada la radiación solar, podemos transformarla y obtener calor y electricidad.

El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí, ni en cuanto a su tecnología ni en su aplicación.

Las «células solares», dispuestas en paneles solares, ya producían electricidad en los primeros satélites espaciales. Actualmente se perfilan como la solución definitiva al problema de la electrificación rural, con clara ventaja sobre otras alternativas, pues, resultan totalmente inalterables al paso del tiempo, no contaminan ni producen contaminación por no consumir combustible alguno y su mantenimiento es mínimo. Además, y aunque con menos rendimiento, funcionan también en días nublados, puesto que captan la luz que se filtra a través de las nubes.

La electricidad que así se obtiene puede usarse de manera directa (por ejemplo para sacar agua de un pozo o para regar, mediante un motor eléctrico), o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. Incluso es posible inyectar la electricidad sobrante a la red general, obteniendo un importante beneficio.

La energía solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación. Así, una casa puede disponer de agua caliente y calefacción solares, con el apoyo de un sistema convencional a gas o eléctrico que únicamente funcionaría en los periodos sin sol.

En la presente tesis se pretende dar una solución al problema de la generación de energía eléctrica mediante un panel solar móvil controlado por una PC, con este panel se logra obtener una fuente de energía eléctrica eficiente y no contaminante, con la ventaja de que no se utilizan recursos naturales no renovables.

Un panel solar móvil se utiliza para captar energía solar y transformarla en energía eléctrica. Para obtener una visión más extensa del funcionamiento de un panel solar móvil controlado por computadora en la presente tesis empezaremos por explicar la célula solar desde su estructura, principio de funcionamiento, colección de corriente, características y clasificación.

Para hacer posible su manejo práctico, las células se agrupan y se conectan eléctricamente entre sí en diferentes combinaciones que permiten obtener los valores de corriente o voltaje necesarios y son encapsuladas en un único bloque con materiales que los protegen de la intemperie, al cual se le conoce como módulo fotovoltaico, y que constituye el elemento básico con el que se construyen los paneles fotovoltaicos.

Existen diferentes tipos de paneles (capítulo 2), aunque en los últimos años se ha visto que los paneles móviles presentan mejoras en cuanto al aprovechamiento de la energía solar. La parte importante que se debe tomar en cuenta para seleccionar un panel es el tipo de módulo que se utilizará para el panel, ya que el módulo fotovoltaico proporciona los niveles de voltaje y corrientes adecuados a cada aplicación, protege a las células frente a las agresiones de los agentes de la intemperie, las aísla eléctricamente del exterior y da rigidez mecánica al conjunto.

Para el funcionamiento del panel solar (capítulo 3) se necesitan componentes mecánicas como: la base del panel, trenes de engranes, marco en el cual se colocará el módulo, etc.; componentes eléctricas como: los motores que proporcionarán el movimiento y componentes electrónicas que censarán la posición del panel y que los rayos solares colisionen de manera perpendicular a éste, controlarán el sentido de giro de los motores y, serán junto con la interfaz y la computadora la parte del control de movimiento del panel solar, con el fin de captar la mayor cantidad de energía solar diaria posible.

Actualmente muchos sistemas son controlados por computadoras, PLC (Controlador lógico programable), microcontroladores y memorias. El uso de la computadora en procesos de control se ha desarrollado más en los últimos años debido a su velocidad de respuesta y versatilidad en el cambio de su programación, además de que el uso de la PC. en la actualidad es general para el común de la gente.

Para obtener datos de la computadora y a su vez proporcionarle datos, usaremos la interfaz con el circuito integrado 8255. Debido a que la computadora en su puerto paralelo tiene únicamente 8 bits, que se pueden utilizar como entradas y salidas, y en el caso de este trabajo de tesis se requieren de 4 salidas y 8 entradas; la interfaz utilizada 8255 tiene la particularidad de proporcionarnos tres puertos, es decir 24 bits, y dependiendo su configuración con la palabra de control poder tener 12 bits para datos de entrada y 12 para datos de salida.

Se proporciona también el algoritmo, el diagrama de flujo y el listado del programa, realizado en lenguaje C.

## CAPITULO 1 - La célula solar

### 1.1 Introducción

La conversión directa de luz solar en energía eléctrica se consigue por medio de paneles solares, compuestos de "células solares", por un proceso llamado usualmente efecto fotovoltaico. Este tipo de proceso de conversión no depende del calor: al contrario, el rendimiento de las células solares desciende a medida que aumenta la temperatura. Esta conducta responde al hecho de que los fotones de la luz solar transmiten su energía directamente a los electrones, sin un paso térmico intermedio. Consecuentemente, las células solares no solo son apropiadas en las regiones soleadas, sino que también parecen prometedoras para zonas donde otras clases de sistemas de energía solar no son adecuados especialmente en aquellas partes de la región ecuatorial y las zonas templadas que sufren de baja insolación.

Se puede conseguir un efecto de conversión fotovoltaica en todos los semiconductores. Los aislantes son inapropiados a causa de su baja conductividad y los metales son insensibles a la luz a causa de su alta concentración de electrones en la oscuridad.

Los semiconductores que más se acomodan a la conversión de la luz solar son los más sensibles, en otras palabras, aquellos que den el mayor producto de corriente - voltaje para la luz visible. De hecho, la mayor cantidad de energía transmitida por los rayos solares está en las partes visibles de luz del espectro, que va de  $4.6875 \times 10^{14}$  Hz hasta  $6.6667 \times 10^{14}$  Hz y en longitud de onda de 450 nm a los 640 nm. Por ejemplo, los semiconductores como el PbS, que son sensibles a la luz infrarroja, son, por lo tanto inapropiados para la conversión de energía, pero se utilizan en la detección de luz infrarroja. El ZnS, con una máxima sensibilidad en la parte ultravioleta del espectro de radiación solar, tampoco es apropiado.

Una buena célula solar debe satisfacer las siguientes condiciones:

- El rendimiento de conversión energética tiene que ser lo más elevado posible. Esto significa que es necesario que la célula pueda generar una corriente de corto circuito  $I_{SC}$  y un voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$  elevados y al mismo tiempo con un "Factor de forma" lo más próximo a la unidad
- Desde el punto de vista eléctrico la célula tiene que poder suministrar una potencia suficiente a una carga.
- Las resistencias en serie de las propias células deben tener un valor pequeño, para que la caída de potencial debida a estas resistencias, represente una pequeña parte del potencial de salida.
- La absorción óptica del semiconductor tiene que ser suficiente en la mayor parte del espectro solar. Así se considera que un buen coeficiente de absorción tiene que ser  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  en la región del espectro visible.
- Los electrodos de cada cara del semiconductor tienen que captar eficazmente los electrones y los huecos fotocreados. Es decir, la longitud de difusión de los portadores minoritarios tiene que ser del mismo orden que el espesor de la película

En la figura 1.1 se muestran unas células solares de silicio convencionales, y se observa que las células solares son más delgadas que una moneda y un poco mayor en cuanto a superficie.

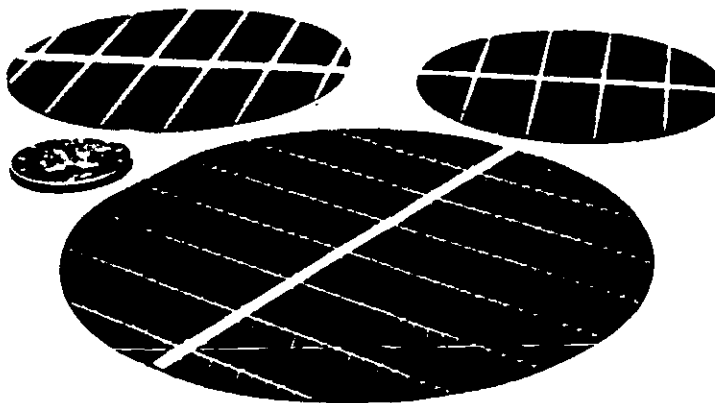


Figura 1.1. Células solares convencionales



## **1.2 La célula solar**

Cuando la luz del sol incide sobre ciertos materiales llamados semiconductores, los fotones que la constituyen son capaces de transmitir su energía a los electrones de valencia del semiconductor para que rompan el enlace que les mantiene ligados a los átomos respectivos. Para cada enlace roto queda un electrón libre para circular dentro del sólido. La falta de electrón en el enlace roto, que se llama hueco, también puede desplazarse libremente por el interior del sólido, transfiriéndose de un átomo a otro debido al desplazamiento del resto de los electrones de los enlaces. Los huecos se comportan como partículas con carga igual a la del electrón, pero positiva.

El movimiento de los electrones y huecos en direcciones opuestas genera una corriente eléctrica en el semiconductor. capaz de circular por un circuito externo, y liberar en él energía de la cedida por los fotones al crear los pares de electrón-hueco. Para separar los electrones de los huecos e impedir que restablezcan enlace, se utiliza un campo eléctrico, que hace que ambos circulen en direcciones opuestas, dando lugar a una corriente en el sentido del campo eléctrico.

### **1.2.1 Estructura de la célula solar**

En las células solares convencionales el campo eléctrico se consigue en la unión de dos regiones de un cristal semiconductor, de conductividades de distinto tipo, como se muestra en la figura 1.2. En el caso de que el material semiconductor sea el silicio, una de las regiones, llamada de tipo n, se impurifica con fósforo, que tiene cinco electrones de valencia, uno más que el silicio, y es una región con una concentración de electrones mucho mayor que la de huecos. La otra región, llamada de tipo p, se impurifica con boro, que tiene tres electrones de valencia, uno menos que el silicio, y es una región con una concentración de huecos mayor que la de electrones. Las grandes diferencias de concentraciones

de electrones y huecos entre ambas regiones crean, para mantenerse, un campo eléctrico dirigido de la región n a la región p, que es el responsable, también, de separar los electrones y huecos extras que se producen cuando la célula está iluminada.

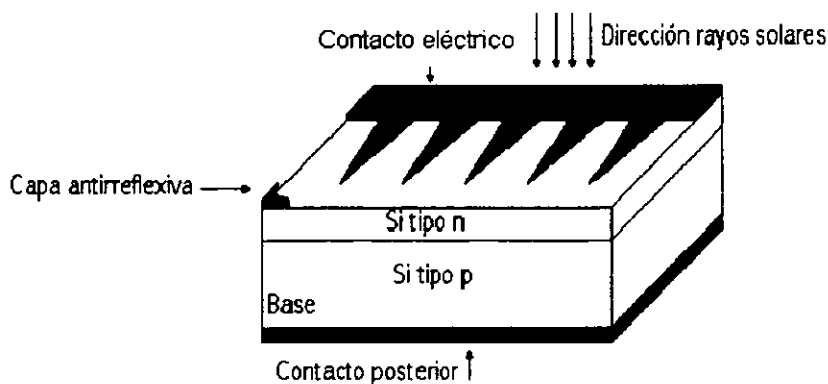


Figura 1.2. Estructura de una célula de silicio convencional

Prácticamente todas las células solares disponibles en la actualidad están constituidas por una unión p-n. En las células de silicio, que son las más empleadas en la práctica, la unión se consigue difundiendo una capa de fósforo en una oblea de silicio que originalmente está toda impurificada con boro. La unión es muy superficial, con valores típicos de anchura de la capa difundida (región n) de 0.2 a 0.5  $\mu\text{m}$ . Es común denominar emisor a esta capa. Es un proceso semejante al de el diodo de unión.

El contacto eléctrico sobre la cara iluminada, que es la cara difundida, ha de hacerse de tal forma que deje al descubierto la mayor parte de su superficie, a fin de que penetre la luz en el semiconductor, pero proporcione, a la vez, una baja resistencia eléctrica. La solución que suele adoptarse consiste en utilizar contactos en forma de peine (figura 1.2). Por el contrario, el contacto eléctrico sobre la cara no iluminada cubre toda el área. Habitualmente la cara iluminada se cubre con una capa de material antirreflejante para aumentar el porcentaje de la energía solar absorbida.

1.2.2 Principio de funcionamiento

Si se ilumina una célula solar que se encuentra conectada a una carga como se muestra en la figura 1.3, se producirá una diferencia de potencial en dicha carga y una circulación de corriente que sale al circuito exterior por la terminal positiva y vuelve a la célula por la terminal negativa. En estas condiciones de funcionamiento la célula se comporta como un generador de energía. Los fenómenos que tienen lugar en el interior del dispositivo pueden describirse de la siguiente forma:

- Los fotones que inciden sobre la célula con energía igual o mayor que el ancho de banda prohibida se absorben en el volumen del semiconductor y generan pares electrón-hueco que pueden actuar como portadores de corriente.
- El campo eléctrico, o la diferencia de potencial, producida por la unión p-n es la causa de la separación de los portadores antes de que puedan recombinarse de nuevo y, por tanto, la causa de la circulación de la corriente por la diferencia de potencial externa, suministrando así energía a la carga.
- La presencia del voltaje en las terminales del dispositivo produce, como en cualquier dispositivo de unión p-n, fenómenos de inyección y recombinación de pares electrón-hueco, que en la célula solar actúan como pérdidas de recombinación y que son dependientes del voltaje.

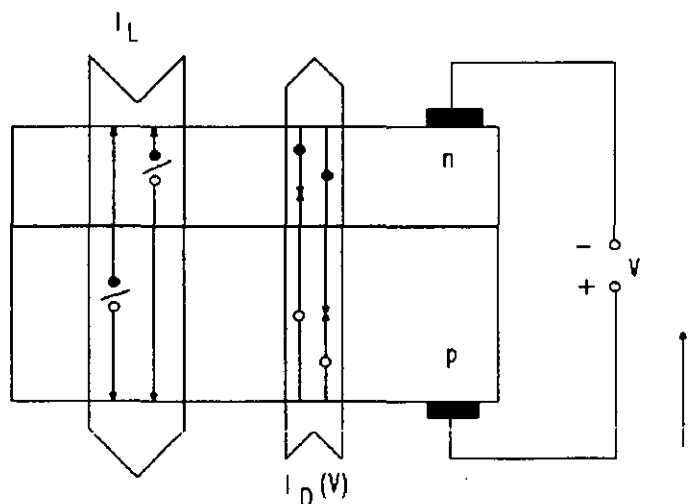


Figura 1.3 Componentes internas de corriente en una célula solar. Los círculos vacíos representan huecos y los círculos rellenos representan electrones.

La corriente entregada a una carga por un diodo semiconductor iluminado es el resultado neto de dos componentes internas de corriente que son opuestas:

- La corriente fotogenerada o fotocorriente  $I_L$  debida a la generación de portadores que produce la iluminación.
- La corriente de diodo o corriente de oscuridad  $I_D$  debida a la recombinación de portadores que produce el voltaje externo necesario para poder entregar energía a la carga.

Admitiendo que la célula responde linealmente a estas excitaciones de iluminación y voltaje, la corriente neta que circula por el exterior vendrá dada por la suma algebraica de las dos componentes de corriente  $I_L$  e  $I_D$ . Tomando en como positivas las corrientes de generación, se tiene la siguiente expresión:

$$I = I_L - I_D(V) \quad (1.1)$$

que es la ecuación característica de la célula solar, válida en todos sus rangos de funcionamiento, incluido cuando el dispositivo actúa como un diodo receptor de energía porque la recombinación excede a la generación.

### **1.3 Fotogeneración de corriente**

La radiación solar contiene fotones de todas las energías de acuerdo con una distribución espectral como se observa en la figura 1.4. Fuera de la atmósfera, el espectro solar (espectro AM0) se aproxima al de un cuerpo negro a  $6000^0\text{K}$  y tiene un valor de irradiancia de  $136.7\text{mW}/\text{cm}^2$ . Al nivel del mar este espectro se modifica por la absorción atmosférica (espectro AM1.5) y la irradiancia desciende hasta un valor de  $100\text{ mW}/\text{cm}^2$  aproximadamente.

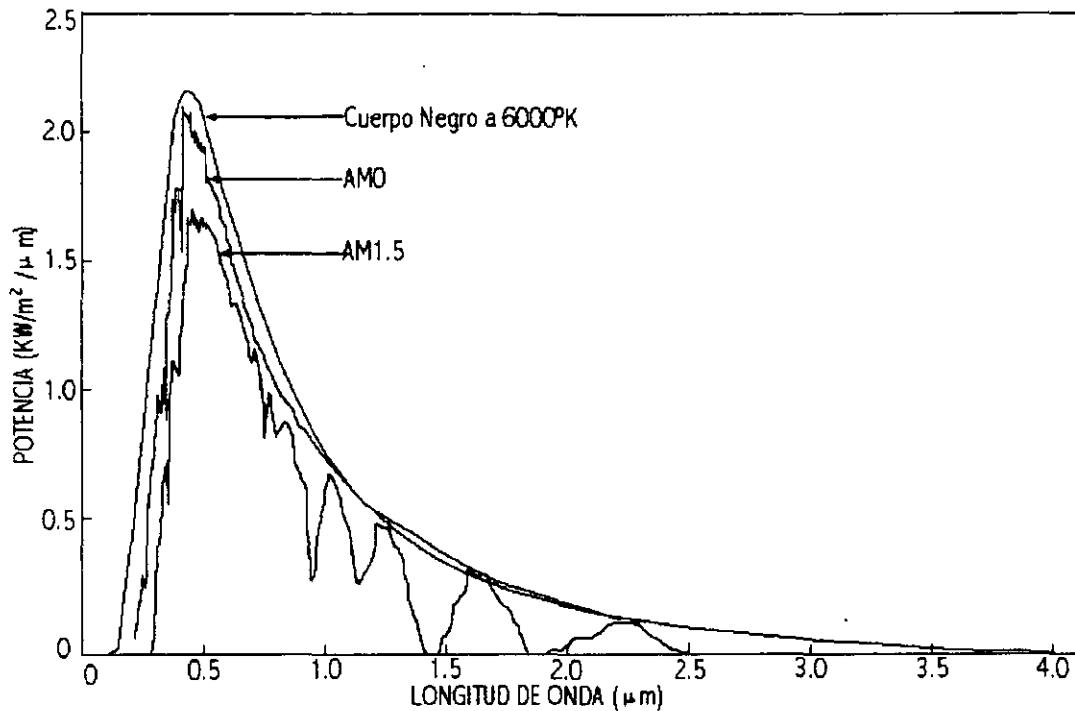


Figura 1.4. Distribución espectral de la radiación solar

### 1.3.1 Absorción de luz y generación de portadores

La célula solar está constituida básicamente por un material semiconductor, con un ancho de banda prohibida,  $E_G$  y un espesor total,  $W$  (figura 1.5). La energía de los fotones irradiados sobre este semiconductor puede ser absorbida por los electrones de la banda de valencia que se promocionaran a la banda de conducción, produciéndose de esta manera una generación de portadores de corriente como resultado del proceso de absorción de fotones. Pero no todos los fotones incidentes son absorbidos y contribuyen a la generación de portadores, debido a las siguientes causas:

- Los fotones con energía inferior a  $E_G$  atraviesan el semiconductor sin ser absorbidos, como se observa en la figura 1.6 para algunos semiconductores. Las pérdidas debidas a este proceso se les llama pérdidas de no-absorción.

- Debido al valor finito del coeficiente de absorción  $\alpha(E)$  y de la anchura del semiconductor  $W$ , una parte de los fotones de energía mayor que  $E_G$  pueden atravesar el dispositivo sin ser absorbidas. Es decir, la transmitancia  $\tau(E, W)$  es siempre mayor que cero dando origen a las pérdidas de transmisión.
- Una parte de los fotones de todas las energías se refleja en la superficie de incidencia de la radiación debido a la diferencia de índices de refracción, que producen una reflectancia  $\rho(E,W)$  mayor que cero y originando las pérdidas de reflexión.

En la práctica, solamente se crea un par electrón-hueco por cada fotón absorbido, independientemente del valor de su energía

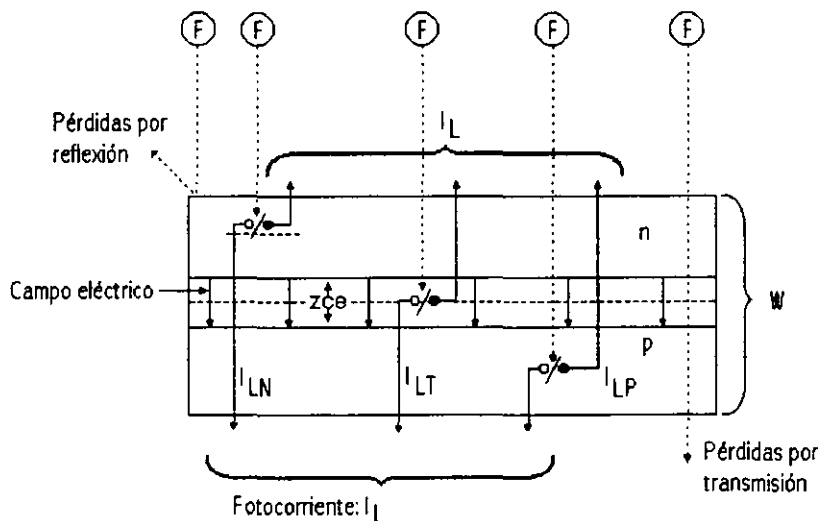


Figura 1.5. Ilustración de la generación de fotocorriente en una célula solar. Los círculos que contienen la letra F representan fotones

Las pérdidas de no-absorción son inevitables y dependen únicamente de las propiedades del semiconductor. Las pérdidas de reflexión y transmisión, pueden reducirse, utilizando capas antirreflectantes y diseños de dispositivo adecuados.

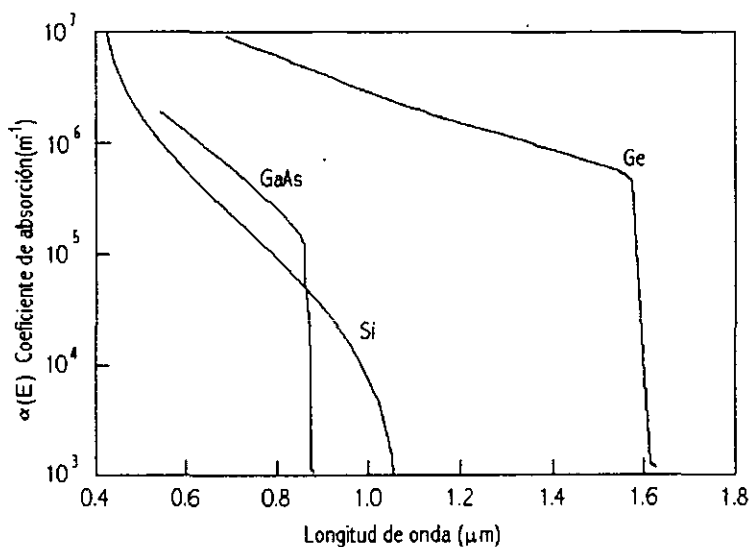


Figura 1.6 Coeficiente de absorción óptica de diferentes semiconductores

Por lo tanto, la máxima fotocorriente que podrá esperarse de una célula solar depende únicamente del ancho de banda prohibida del semiconductor y del espectro solar, como se muestra en la figura 1.7.

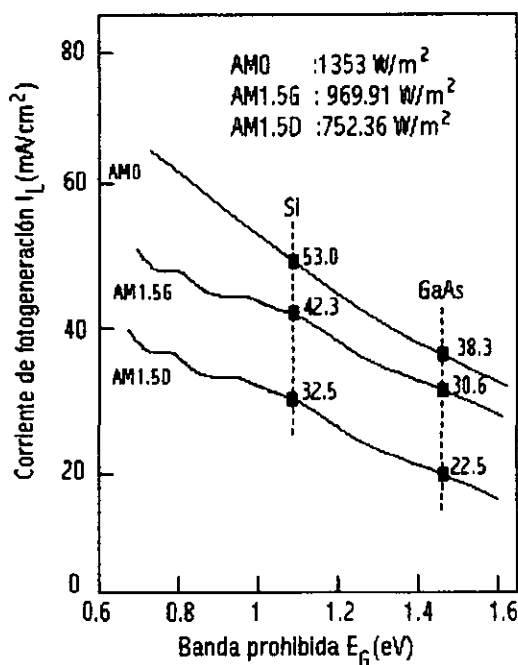


Figura 1.7 Máxima corriente que puede fotogenerarse en una célula solar, en función del ancho de la banda prohibida del semiconductor y para diferentes espectros de iluminación

Como puede verse en la figura 1.7, la corriente disminuye al aumentar EG y para dos de los semiconductores más importantes, silicio y arseniuro de galio, los valores correspondientes a diferentes espectros de iluminación están indicados en la misma figura.

### 1.3.2 Colección de corriente

No todos los portadores fotogenerados pueden incorporarse a la corriente externa y ser utilizados en la generación de energía. Esto es así, porque, incluso sin que se aplique ningún voltaje externo al dispositivo (operación en condiciones de corto circuito), una pequeña parte de los portadores fotogenerados se recombinan porque la mayoría de estos portadores se generan lejos de la zona de alto campo y deben circular hacia ellas antes de ser separados y colectados por la unión. La fracción de los portadores que es recogida recibe el nombre de rendimiento o eficiencia de colección  $\eta_{col}$  (E) y depende de las propiedades eléctricas y ópticas del material y de la estructura del dispositivo.

La eficiencia de colección depende de la región del dispositivo que se considere. Los electrones y los huecos generados en la zona de carga de espacio (zce), o zona de transición, son separados y arrastrados por el alto campo eléctrico de esta zona, como se muestra esquemáticamente en la figura 1.5, para ser inyectados en las zonas casi neutras de tipo p y n, respectivamente. Se trata de una inyección de mayoritarios que se redistribuirán en dichas zonas y avanzarán hacia los contactos por arrastre fundamentalmente. La componente de la corriente fotogenerada originada en esta región de transición es la designada por  $I_{LT}$  en la figura 1.5.

En las zonas casi-neutras los campos eléctricos son muy pequeños, y el transporte de portadores minoritarios se rige por fenómenos de difusión, principalmente. Los portadores generados en estas zonas se difunden hacia la zce



y hacia los contactos y superficies. En la zona n los electrones son repelidos por el campo eléctrico de la zce (o, lo que es lo mismo, por la barrera de potencial) y no pueden atravesar dicha zona, pero sí pueden circular, como mayoritarios que son, hacia el contacto y superficies. Por el contrario, la mayor parte de los huecos se difunden hacia el borde de la zce y son colectados y arrastrados por el campo eléctrico (o, lo que es lo mismo, descienden por la barrera de potencial) e inyectados en la zona p en la que ya son mayoritarios y en la que se distribuirán y avanzarán por arrastre. El campo (la barrera de potencial) de la unión actúa como separador de ambos tipos de portadores, originándose otra componente de fotocorriente,  $I_{LN}$  la cual se muestra en la figura 1.5. Los electrones y huecos generados en la zona neutra de tipo p, dan lugar a la componente de fotocorriente  $I_{LP}$  que se muestra en la figura 1.5.

Los fenómenos de transporte y extracción de corriente están determinados por parámetros (movilidades, coeficientes de difusión) finitos, por lo cual, no todos los portadores fotogenerados son separados por el campo de la unión y colectados para incorporarse a la fotocorriente. Una parte de ellos vuelve a recombinarse en el propio volumen y en las superficies del dispositivo, generando calor y resultando inútiles para la generación de corrientes y de energía. Se tiene que la eficiencia de colección en las zonas neutras es inferior a la unidad.

#### **1.4 Corriente de oscuridad**

El voltaje externo necesario para poder entregar energía a la carga produce una polarización de la célula solar que da lugar a las corrientes habituales de un diodo de unión p-n, aun en ausencia de cualquier tipo de iluminación (célula en oscuridad).

Una tensión  $V$  de polarización directa (lado p positivo respecto al n), produce una inyección de portadores minoritarios a ambos lados de la zona zce, como

consecuencia de la disminución de la barrera de potencial de la unión. Los electrones del lado n se inyectan en el lado p, donde son minoritarios y donde avanzan por difusión, fundamentalmente, y desaparecen por recombinación con los huecos, en el volumen o en la superficie de la región p. Esta circulación de portadores se ilustra en la figura 1.8 (a) y constituye una de las componentes de corriente de diodo, que se denomina  $I_{DP}$ . De forma análoga se originan las componentes de corriente  $I_{DN}$ , debida a la recombinación de los huecos inyectados en el emisor, e  $I_{DT}$ , debida a la recombinación de los electrones y los huecos inyectados en la zona zce, como se observa en la figura 1.8 (a).

Si la tensión es de polarización inversa ( $V < 0$ ) se produce una disminución de la concentración de portadores minoritarios a ambos lados de la zce, como consecuencia del aumento de la barrera de potencial en la unión, dando lugar a una generación térmica de pares electrón-hueco, que son extraídos por el campo de la unión, de forma análoga a los portadores generados por la luz en el caso de la fotocorriente. Las corrientes de polarización inversa, que se denominan  $I_{ON}$ ,  $I_{OP}$  e  $I_{OT}$  circularán por el circuito externo de p a n, como se observa en la figura 1.8(b). Estas corrientes se sumaran a la fotocorriente cuando exista, pero sus valores son muy pequeños, en comparación, y generalmente pueden despreciarse.

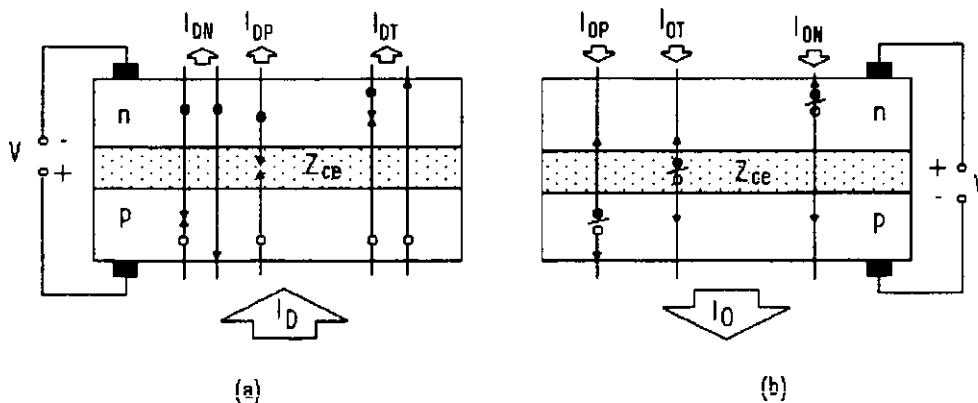


Figura 1.8. Componentes internas de las corrientes de polarización

### 1.5 Característica I-V de iluminación

De acuerdo con la ecuación (1.1), la corriente eléctrica suministrada por una célula solar a una carga viene dada por la diferencia entre la fotocorriente  $I_L$  y la corriente de recombinación o de diodo  $I_D(V)$ , debida a la polarización producida por el voltaje generado. Considerando que la corriente de diodo puede expresarse mediante el modelo de una sola exponencial, la ecuación característica del dispositivo es:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right] \tag{1.2}$$

donde  $k$  es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura absoluta,  $m$  es el factor de idealidad ( $1 \leq m \leq 2$ ),  $V$  es la tensión de polarización directa y  $e$  es la carga del electrón

La característica I-V representada por la ecuación (1.2) tiene la forma estándar que se muestra en la figura 1.9. Esta forma de representación adopta el convenio de signos de considerar positivas las corrientes de generación (que es el contrario al habitualmente utilizado en los circuitos electrónicos que utilizan diodos). Con este convenio el primer cuadrante del plano I-V corresponde al funcionamiento de la célula entregando corriente a una carga bajo tensión positiva; es decir, corresponde al funcionamiento del dispositivo como generador de energía.

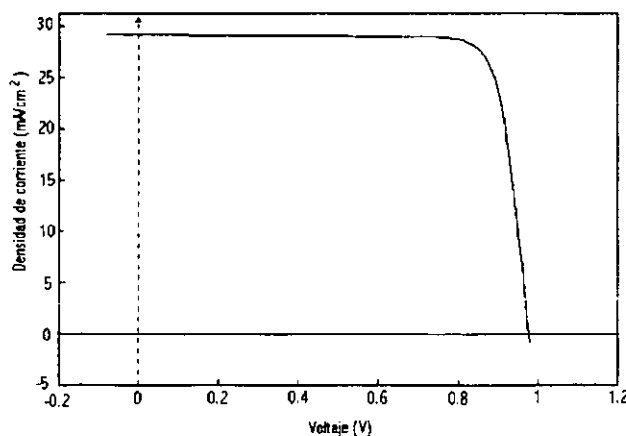


Figura 1.9 Característica I-V de iluminación

1.5.1 Corriente de corto circuito y tensión de circuito abierto

Como se puede ver en la figura 1.9, el mayor valor de corriente en la región de generación se obtiene para condiciones de corto circuito,  $V = 0$ . Según la ecuación 1.2 la corriente de corto circuito  $I_{SC}$  viene dada por:

$$I_{SC} \equiv I(V = 0) = I_L \tag{1.3}$$

Si el dispositivo se mantiene en circuito abierto ( $I = 0$ ), este se auto polarizará con una cierta tensión, que es la mayor que puede soportar en la región de generación. Se trata de la tensión de circuito abierto  $V_{OC}$  y su valor es tal que la fotocorriente queda completamente compensada por la corriente de polarización. Es decir,  $I_L = I_D(V_{OC})$ , en condiciones de circuito abierto y, tomando en cuenta la ecuación (1.2), se tiene:

$$V_{OC} = m \frac{kT}{e} \ln \left[ \frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \tag{1.4}$$

1.5.2 Punto de máxima potencia

Como ya se ha visto, la región de la curva característica comprendida entre  $I_{SC}$  y  $V_{OC}$  corresponde al funcionamiento de la célula como generador.

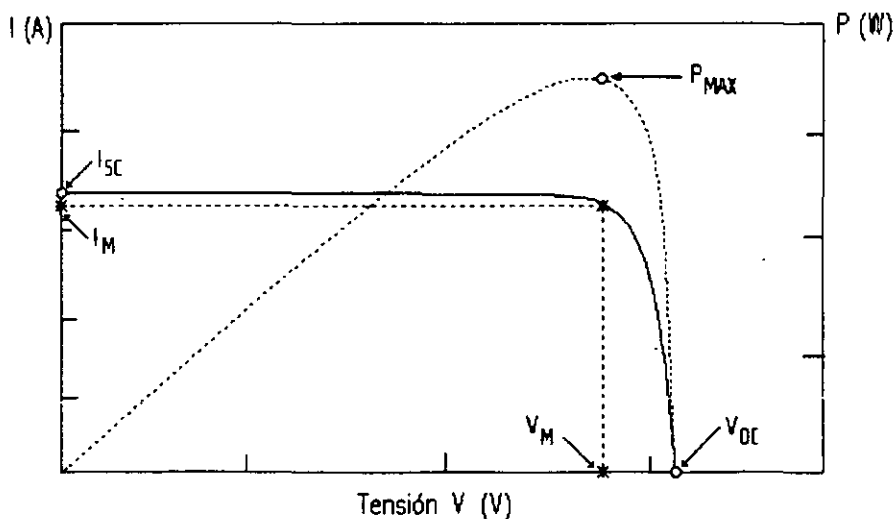


Figura 1.10. Punto de máxima potencia y otros parámetros de funcionamiento

Si la energía es suministrada a una carga resistiva, como se muestra en la figura 1.10, la potencia entregada a la resistencia viene dada por el producto  $P=VI$ , y existirá un punto de funcionamiento  $(I_M, V_M)$  para el que la potencia entregada sea máxima: es el punto de máxima potencia.

### 1.5.3 Factor de forma y rendimiento de conversión energética

El producto  $I_M V_M$  que da la potencia máxima entregada a la carga, viene representado en la figura 1.10 por el área del rectángulo formado de línea punteada, que es obviamente menor que la de él rectángulo que representa el producto  $I_{SC} V_{OC}$  de la mayor corriente que puede extraerse de la célula  $I_{SC}$  para la mayor tensión  $V_{OC}$ . Ambos productos se aproximan más cuanto más pronunciado sea el codo de la curva característica. Pero en todos los casos reales el parámetro definido por el cociente

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{SC} V_{OC}} \quad (1.5)$$

es siempre menor que la unidad. Este cociente (FF), llamado factor de forma o factor de llenado, suele utilizarse como cuantificación de la forma de la curva característica. El factor de forma es un parámetro de gran utilidad práctica, que varía poco de unos dispositivos a otros y que toma valores que se sitúan alrededor de 0.7 a 0.8, para muchas células de semiconductores cristalinos (Si, GaAs, InP, etc.), como se muestra en la figura 1.11.

Haciendo uso de la definición del factor de forma, la potencia máxima entregada por la célula puede escribirse como:

$$P_M = FF I_{SC} V_{OC} \quad (1.6)$$

La eficiencia de conversión energética de una célula solar se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga y la potencia de radiación incidente  $P_L$  incidente sobre el dispositivo:

$$n \equiv \frac{I_M V_M}{P_L} \equiv \frac{FF I_{SC} V_{OC}}{P_L} \quad (1.7)$$

Naturalmente, esta eficiencia y la potencia máxima se obtiene únicamente si la resistencia de carga es adecuada, dada por  $V_M/I_M$ .

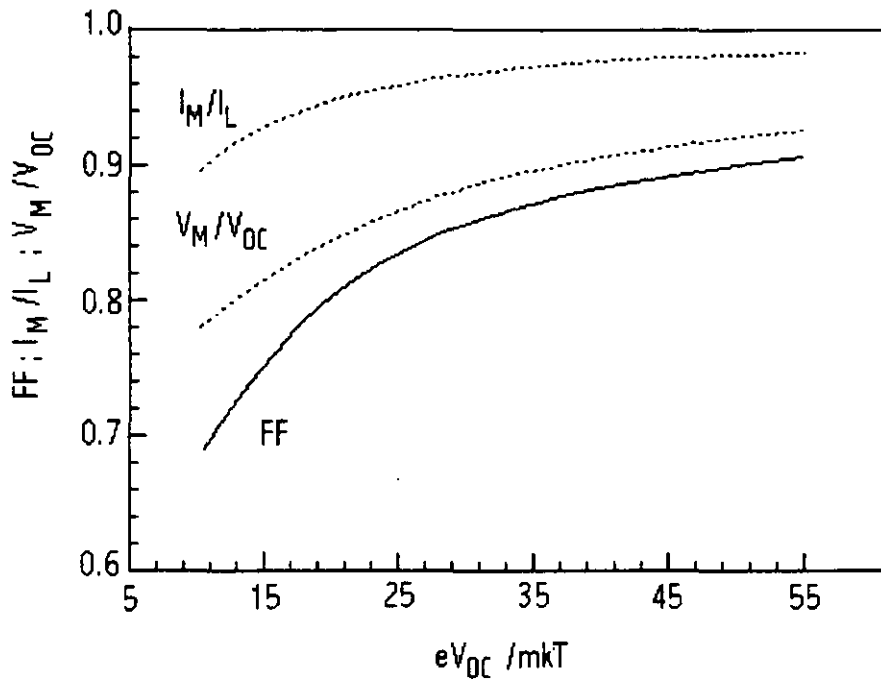


Figura 1.11. Ilustración de la variación del punto de máxima potencia y del factor de forma en el rango de valores de las células prácticas

### 1.6 Clasificación de las células solares

#### 1.6.1 Célula de silicio convencional

Hasta el momento, el silicio es el más importante material semiconductor para la conversión fotovoltaica de energía solar, y es también el material base para toda la industria electrónica. Hoy en día todas las células se fabrican de material monocristalino. La estructura de una célula solar de silicio típica se muestra en la figura 1.12

La estructura es de amplio uso, pero las modificaciones son posibles. Por ejemplo, es posible reducir el espesor a 50 micrones, el revestimiento antirreflectante se puede suprimir por razones de costo, la polaridad del voltaje podríamos invertirla usando una estructura P-N en lugar de una N-P. Se pueden

emplear también otros materiales de dopado (material que se utiliza como impureza para cambiar las características eléctricas de otros materiales).

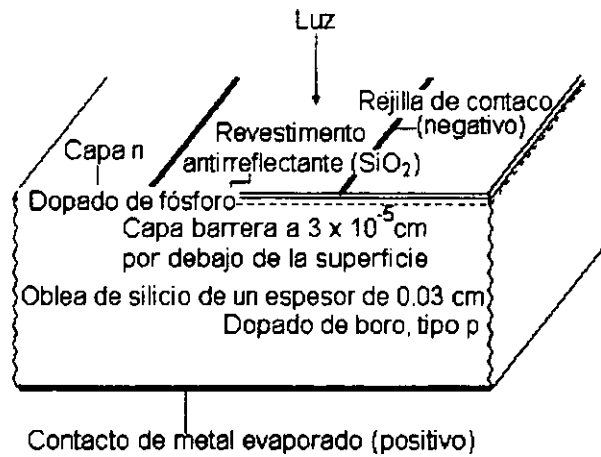


Figura 1.12 Sección esquemática de una célula solar de silicio convencional

A causa de la capa de barrera, que es esencial para el efecto fotovoltaico, las células solares tienen características de diodo en la oscuridad. Las características corriente voltaje (I-V) de una célula típica de 2x2 cm se muestra en la figura 1.13.

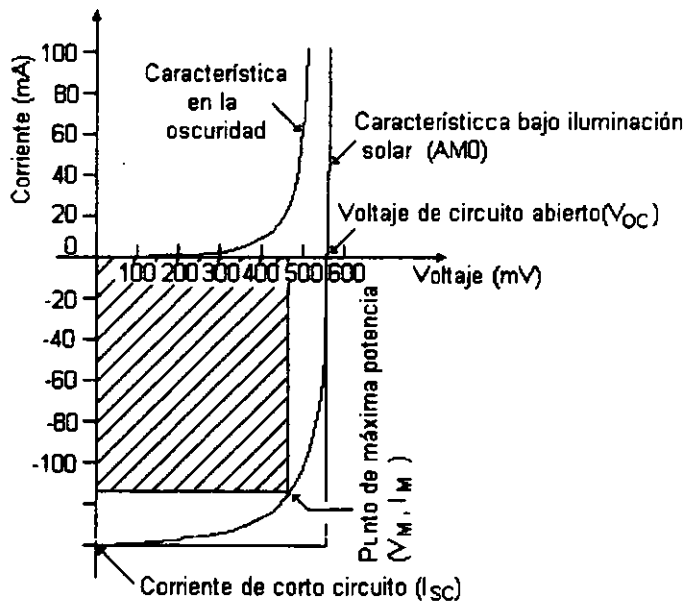


Figura 1.13 Característica I-V de una típica célula solar de silicio de 2 x 2 cm. Plena iluminación solar fuera de la atmósfera (AM0)

---

Bajo iluminación la curva I-V mantiene la misma forma pero desplazada a lo largo del eje de corrientes negativas. Como resultado aparece un voltaje de circuito abierto en el eje de voltaje positivo y una corriente de corto circuito en el eje de corriente negativa. La curva I-V se desplaza linealmente a lo largo del eje de corriente en función de la intensidad de la luz. De aquí que la dependencia de la intensidad de la corriente de corto circuito sea lineal y el voltaje de circuito abierto se incrementa como una función logarítmica de la intensidad de la luz.

A partir de la tabla I, podemos interpretar la característica I-V de un dispositivo de célula solar.

Dentro de la capa de barrera, existe un campo eléctrico y una diferencia de potencial que están enteramente coaccionados por la diferencia del dopado entre ambos lados del cristal. En la oscuridad, este campo interno se opone al paso de una corriente eléctrica; si se aplica un voltaje externo en la dirección inversa, el campo se fortalece y con él la barrera al flujo de electrones, de tal manera que la corriente es incapaz de incrementar con el voltaje. Si aplicamos un voltaje externo en sentido directo, el voltaje interno se ve progresivamente compensado por el voltaje externo, que actúa en dirección opuesta. De esta forma la corriente directa se incrementa hasta que el voltaje interno está totalmente vencido. En este punto, la corriente ya no está más limitada por la capa de barrera.

Cuando un diodo está iluminado, los electrones se liberan, moviéndose por el campo interno que los conduce en su dirección; como resultado, se genera una "fotocorriente" que fluye en la dirección opuesta a la corriente directa de la oscuridad. Incluso si no se aplica voltaje externo esta fotocorriente continua fluyendo y se mide como la "corriente de corto circuito". Esta depende linealmente de la intensidad de la luz, ya que cuando se absorbe más luz, se exponen electrones adicionales a la fuerza de un campo interno.



Caso	Luz	Voltaje aplicado (polarización directa)	Campo	Corriente	Observaciones
A	Sin luz	Sin voltaje	Campo inherente	0	Sin corriente, ya que la corriente del campo está exactamente compensada por la corriente de difusión en la dirección opuesta. *
B	Sin luz	Voltaje aplicado	Campo inherente Campo aplicado	Corriente directa	Corriente directa; la corriente de difusión no está ya compensada por la menor corriente de campo.
C	Luz	Sin voltaje	Campo inherente	Fotocorriente	Puesto que la generación de portadores por la luz es homogénea en la barrera, la corriente de difusión en la barrera no se modifica, pero la corriente de campo aumenta a causa del incremento de la concentración de portadores: la fotocorriente en la barrera es una corriente de campo.
D	Luz	Voltaje aplicado	Campo inherente Campo aplicado	Fotocorriente Corriente directa	Se añade una corriente directa a la fotocorriente
E	Luz	Voltaje aplicado	Campo inherente Campo aplicado	Corriente neta Fotocorriente Corriente directa Corriente neta=0	Condición de <<voltaje de circuito abierto>>

\*La dirección del campo eléctrico es convencional, de mayor a menor; la dirección de las corrientes es para los portadores positivos.

Tabla I - Corrientes a través de un diodo bajo los efectos de la luz y/o un voltaje aplicado

La fotocorriente no está influenciada por el voltaje aplicado. La condición de voltaje del circuito abierto se consigue cuando la fotocorriente se compensa con una corriente directa en la oscuridad asociada al fotovoltaje, el cual genera una corriente directa exactamente igual al voltaje aplicado externamente.

En la figura 1.14 se muestra el circuito equivalente de una célula solar, el cual está formado por un diodo ideal de unión p-n y por un generador de corriente ( $I_{sc}$ ), variando la resistencia de carga entre cero e infinito podemos obtener la característica I-V de la célula. Como se ha dicho antes la producción de potencia utilizable de una célula solar desciende cuando sube la temperatura como se muestra en la figura 1.15.

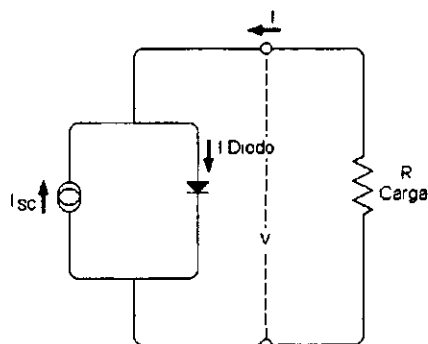


Figura 1.14 Circuito equivalente de una célula solar

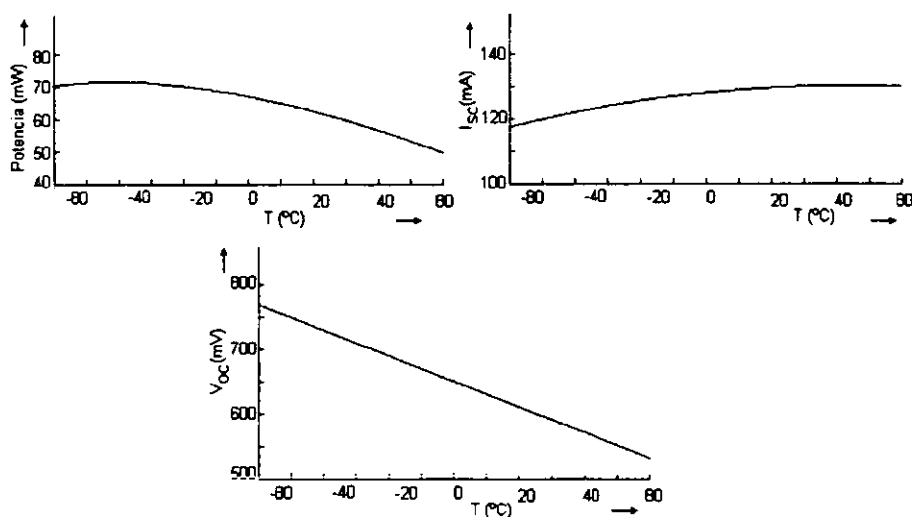


Figura 1.15. Potencia, tensión en circuito abierto y corriente de corto circuito en función de la temperatura. Célula de silicio de 4 cm<sup>2</sup>.

En las células típicas, las pérdidas suponen un 0.35 - 0.45 % por grado Celsius de incremento de temperatura, en otras palabras, una célula solar de silicio libera un 20% más de potencia a 20 °C que a 70 °C. En la figura 1.16 vemos que la causa de esta pérdida es principalmente el descenso del voltaje de circuito abierto; es típico en las células solares que la corriente este poco afectada por la temperatura. El rendimiento de una célula solar se define como la relación entre la energía eléctrica que se puede extraer al máximo punto de potencia de la curva I-V y la luz incidente. Para la luz visible monocromática, o sea, un rayo de luz amarillo o verde, el máximo rendimiento teórico de una célula solar de silicio es del orden del 50 %.

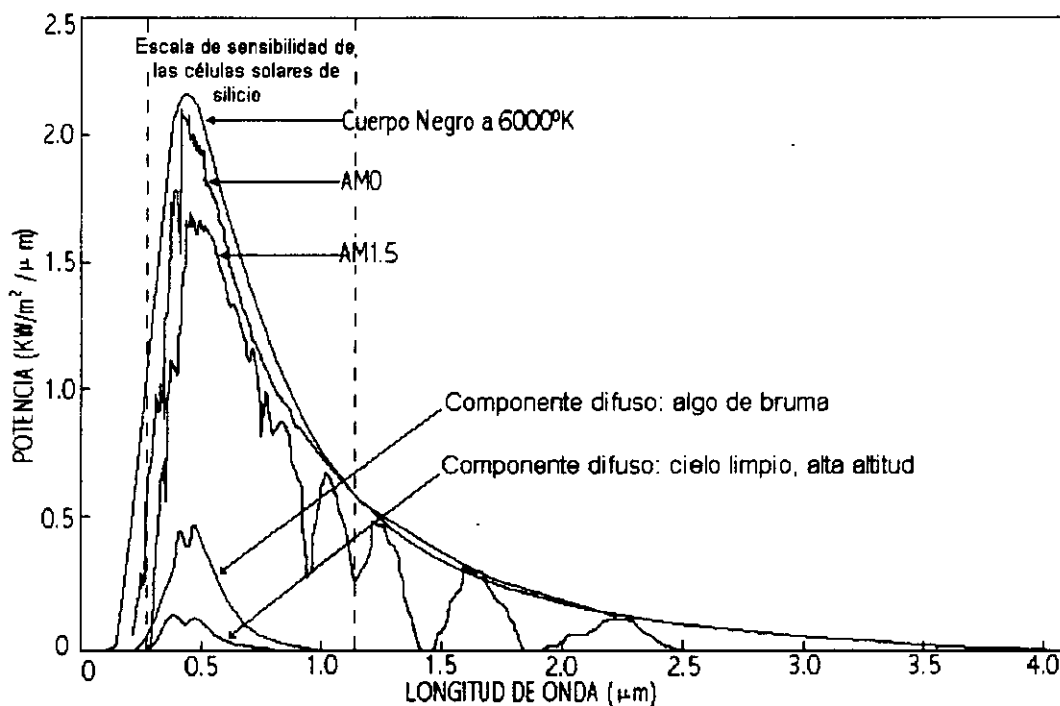


Figura 1.16. Escala de sensibilidad de las células de silicio, comparadas con el espectro de sol (AM0 y AM1.5)

Sin embargo, los rendimientos obtenibles para la luz solar son más bajos, esto ocurre porque el espectro de la luz solar se extiende desde el ultravioleta, a través de la escala visible, hasta el infrarrojo lejano, mientras que las células solares de silicio son insensibles a la luz no visible y muy cerca de la parte

infrarroja del espectro: Para la luz solar de fuera de la atmósfera, llamada "masa de aire 0" (AM0), con una intensidad de luz de  $1.38 \text{ Kw m}^2$ , el máximo rendimiento teórico de conversión para las células solares de silicio es del 19 %. Adviértase que este espectro es relevante solo para aplicaciones de satélite. Al nivel del mar el espectro es diferente, se puede notar, en la siguiente figura, que el espectro infrarrojo es mucho más pobre ahí que en el espacio.

La máxima luz sobre el suelo a nivel del mar se llama "masa de aire 1" (AM1), su intensidad es de  $1 \text{ Kw m}^2$ . En las altas montañas la intensidad aumenta hasta  $1.1 \text{ Kw m}^2$ . Aunque la intensidad de la luz sobre la tierra sea más baja que en el espacio, la distinta composición del espectro al nivel de mar tiene el efecto de concentrar más la energía que viene en la parte del espectro donde las células solares son más sensibles. Partiendo de las experiencias se ha encontrado que el rendimiento de las células de silicio es como norma general un 20 % más alto en tierra que fuera de la atmósfera. El máximo rendimiento teórico de conversión para las células solares de silicio, bajo máxima iluminación con luz solar en el suelo, puede ser de 23%.

Los rendimientos conseguidos hasta hoy con células solares de silicio comerciales están entre el 10 y el 15 % (terrestre). Desde 1971 se ha venido realizando un considerable esfuerzo a escala de laboratorio para incrementar el rendimiento de las células de silicio. Esto a conducido a un desarrollo de las células con un rendimiento máximo entre el 17 y 19 %, un nivel que está próximo al máximo teórico, es razonable esperar que las células comerciales se beneficien de este trabajo y que en un futuro próximo estén en el mercado células con rendimientos del 15 al 16 %.

### 1.6.2 Célula de sulfuro de cadmio

Después del silicio, el material que más ha ocupado el esfuerzo internacional de investigación es el sulfuro de cadmio (CdS), que ofrece unos

buenos rendimientos de conversión cuando se emplea asociado con sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), como heterouniones  $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$ . En 1974 se proyectó la producción comercial de células solares de  $\text{CdS}$  por primera vez. La tecnología a emplear es una célula de pared frontal. Consiste en un sustrato sobre el cual se evapora una capa de  $\text{CdS}$  de  $20\ \mu\text{m}$  de espesor con una fina película de  $\text{Cu}_2\text{S}$  en su parte superior. El conjunto es herméticamente recintado en una cápsula de vidrio. Se está efectuando un trabajo de desarrollo en una estructura modificada de  $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$ , cuya sección esquemática puede verse en la figura 1.17.

Se emplea un vidrio normal de ventana como sustrato. Por medio de una pulverización química, se colocan en capas sucesivas, una lamina de óxido de estaño conductora transparente, una capa de  $\text{CdS}$  y, finalmente una capa de  $\text{Cu}_2\text{S}$ . El espesor de las tres capas juntas no excede los  $3\ \mu\text{m}$ . La célula está diseñada para la iluminación desde atrás, o sea, la luz debe primero cruzar el sustrato de vidrio y el grosor de la capa del semiconductor antes de alcanzar la capa de barrera o la unión. Este tipo de estructura se llama "célula de pared trasera" y se muestra en la figura 1.17.

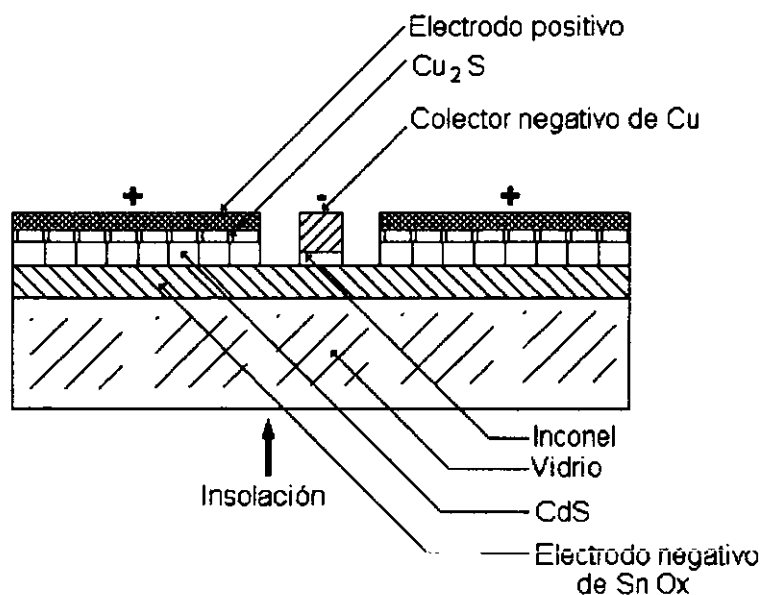


Figura 1.17. Sección esquemática de una célula de sulfuro de cadmio de bajo costo

Se considera que las células de CdS son particularmente prometedoras para conseguir células solares de bajo costo, tales como las necesarias para la conversión fotovoltaica a gran escala en centrales de energía solar. Ante todo implican un consumo muy bajo de material ya que son extremadamente delgadas: una célula solar de CdS es el ejemplo típico de una "célula solar de capa fina". En segundo lugar, están hechas de material policristalino que presenta un coste bajo respecto al silicio monocristalino.

Los voltajes de circuito abierto de las células solares de CdS están en la escala de 400 a 500 mV, la cual es inferior a la de las células de silicio. Se han notado corrientes de corto circuito comparables a las observadas en las células de silicio convencionales. El rendimiento máximo obtenido está entre el 8 y el 8.5%, pero es más normal un rendimiento del 5% en las unidades de pequeña producción. Se estima que el rendimiento máximo teórico de las células solares de CdS de película muy fina está entre el 11 y 14%.

El desarrollo de la célula de CdS ha sido perjudicado por la pobre estabilidad en su tiempo de vida. Sin embargo, en los últimos años, se ha demostrado la factibilidad de las células solares de CdS estables hasta los 90 °C, y las prospecciones futuras para el CdS en el campo de la producción de electricidad a gran escala son prometedoras. Las células solares de CdS aún son inapropiadas para el funcionamiento bajo luz altamente concentrada, que implica altas temperaturas de funcionamiento a pesar de la refrigeración externa. Por encima de los 90 °C o 100 °C, las células pueden sufrir deterioros que afecten la vida del sistema.

### 1.6.3 Célula de arseniuro de galio

Otra célula solar existente es la célula de arseniuro de galio (GaAs). En la forma de células de capa delgada procrystalina, la GaAs rinde poco, pero cuando se usa en la forma monocristalina como en las células de silicio, se pueden

obtener altos rendimientos de conversión. Se han demostrado rendimientos del 13 al 19%. A iluminación del suelo (AM1), el rendimiento máximo teórico es del 27%, más alto que para las células de silicio. A causa de sus propiedades físicas, el GaAs está cerca de los materiales óptimos para las células solares. En la figura 1.18, se muestra la estructura de la célula solar de GaAs.

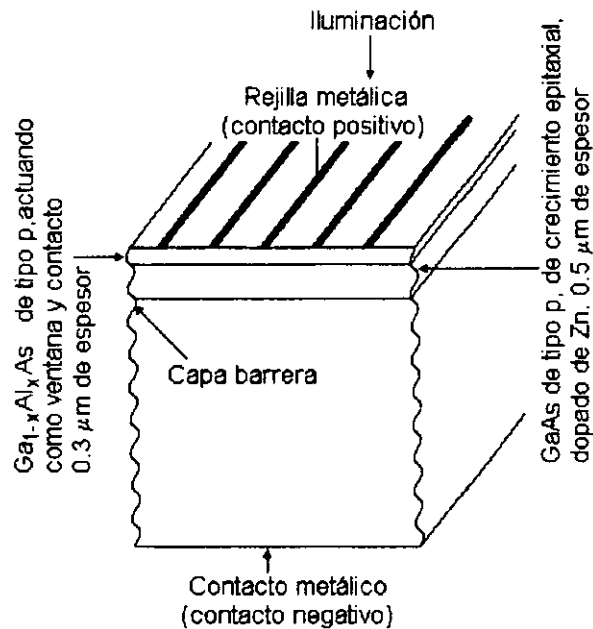


Figura 1.18. Sección esquemática de una célula de GaAs.

Debido a su alto coeficiente de absorción para la luz visible, toda la luz se absorbe en una capa superficial no superior a 1  $\mu m$  de espesor. No obstante, el consumo de material por unidad es considerablemente mayor que para las células de CdS, ya que se necesita un sustrato de GaAs monocristalino.

Por encima de los 100 °C el rendimiento de las células de GaAs es mejor que el de las células de silicio convencionales. Primero, su disminución de voltaje con la temperatura es de unos 2.6 mV por °C de incremento de temperatura, menos que para el silicio. Como resultado, la potencia de las células de GaAs desciende de un 0.2 a un 0.3% por °C y la de las células de silicio de un 0.35 a un 0.45%. Segundo, el voltaje de circuito abierto a temperatura ambiente es solo ligeramente menor a 1 volt, que es apreciablemente mayor que el de las células solares de silicio. Consecuentemente, la disminución de voltaje como porcentaje del voltaje original es comparativamente baja para las células de GaAs.



---

## **CAPITULO 2 El panel fotovoltaico**

### **2.1 Definición de panel fotovoltaico**

La mayoría de las células solares de silicio empleadas en aplicaciones en la superficie terrestre son obleas redondas de 5 cm de diámetro y con un espesor de 0.3 a 0.5 mm. Una célula de 5cm de diámetro con una superficie de aproximadamente 20 cm<sup>2</sup>, a pleno sol, con un rendimiento del 15% a temperatura ambiental, da una potencia de 0.3 w y menos de 0.5V. Una célula de 10 cm de diámetro (80 cm<sup>2</sup> aproximadamente) libera cerca de 1.2 w bajo las mismas condiciones.

Para su empleo practico las células solares se asocian eléctricamente en diferentes combinaciones que permiten obtener los valores de corriente o voltaje necesarios para una aplicación determinada y se encapsulan entre materiales que las protegen de los efectos de la intemperie. El conjunto de células, conexiones y protecciones constituye lo que se conoce como panel fotovoltaico.

Existen varios tipos de paneles fotovoltaicos, los cuales se describirán más adelante.

#### **2.1.1 El módulo fotovoltaico**

Para hacer posible su manejo práctico, las células se agrupan y se conectan eléctricamente entre sí y se encapsuladas en un único bloque, al cual se le conoce como módulo fotovoltaico, y que constituye el elemento básico con el que se construyen los paneles fotovoltaicos.

El módulo fotovoltaico proporciona los niveles de voltaje y corrientes adecuados a cada aplicación, protege a las células frente a las agresiones de los

agentes de la intemperie, las aísla eléctricamente del exterior y da rigidez mecánica al conjunto.

El tiempo de vida de los módulos, en condiciones normales de operación, debe ser superior a 20 años y viene determinado por la duración del encapsulado que debe ser impermeable al agua y resistir los cambios de temperatura y la abrasión. Otras características de interés son la facilidad de instalación y limpieza, la disipación de calor de las células y el bajo costo.

Existen diferentes tipos de módulos. El más característico está constituido por 30 o 36 células solares de silicio cristalino, todas de igual tamaño, conectadas en serie y encapsuladas en una lamina de vidrio o de tedlar que cubre la cara posterior como se muestra en la figura 2.1. En función del tamaño de las células, la superficie del módulo varía entre  $0.1$  y  $0.5\text{m}^2$ . Presenta dos bornes de salida, uno positivo y otro negativo y, a veces, algún borne intermedio para la instalación de diodos de protección (se analizarán más adelante).

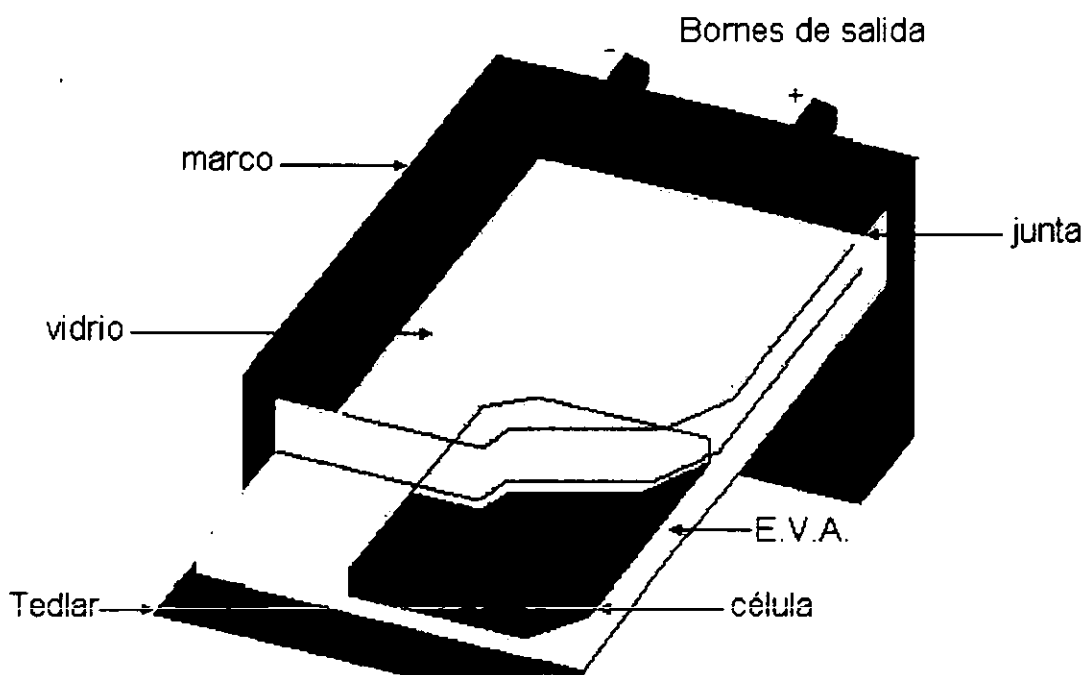


Figura 2.1 Constitución de un módulo fotovoltaico

### 2.2 Interconexión de paneles fotovoltaico

Para duplicar el voltaje se conectan dos células en serie, con la conexión del contacto superior negativo de la célula 1 al contacto posterior positivo de la célula 2 mediante un alambre o cable, como se muestra en la figura 2.2 a. Para duplicar la potencia manteniendo constante el voltaje, las células se conectan en paralelo, conectando los dos contactos frontales por el polo negativo y los dos posteriores por el polo positivo, como se muestra en la figura 2.2 b. Si se desea bajar la potencia y aumentar el voltaje, se pueden seccionar las células en piezas de igual superficie y conectarlas en serie.

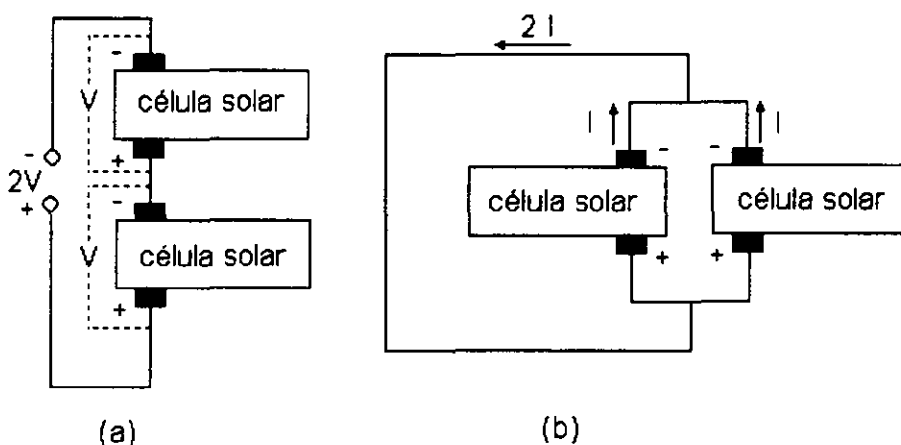


Figura 2.2 Esquema de conexión de células solares para aumentar voltaje o corriente

Como norma general, todas las células que van a ser conectadas en paralelo deben tener el mismo voltaje de circuito abierto y, más importante aun, el mismo punto de máxima potencia por voltaje. Las células para ser conectadas en serie deben tener la misma corriente de corto circuito y la misma corriente para potencia máxima.

Si existen diferencias entre las características de las células solares se producen malos paneles porque las células de mayor fotocorriente y mayor fotovoltaje disipan su exceso de potencia en las células de menores características fotoeléctricas.

### 2.2.1 Condiciones estándares y TONC

El comportamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico, es decir su característica I-V, bajo determinadas condiciones de iluminación y temperatura, puede obtenerse a partir de la información característica que debe suministrar el fabricante y que está constituida por varios parámetros obtenidos en unas condiciones estándares de medida, de uso universal y definidas como sigue:

Irradiancia	100 mW/cm <sup>2</sup> (o 1 kW/m <sup>2</sup> )
Distribución espectral	AM 1.5
Incidencia	Normal
Temperatura de la célula	25 °C

En estas condiciones se miden, la potencia máxima que entrega el módulo,  $P_{MAX}$ , la corriente de corto circuito,  $I_{SCM}$  y el voltaje de circuito abierto,  $V_{OCM}$ .

La caracterización del módulo se completa con la medida de la Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC), definida como la temperatura que alcanzan las células solares cuando se somete al módulo a las siguientes condiciones de operación:

Irradiancia	80 mW/cm <sup>2</sup> (o 800 W/m <sup>2</sup> )
Distribución espectral	AM 1.5
Incidencia	Normal
Temperatura de la célula	20 °C
Velocidad	1 m/s

### 2.2.2 Pérdidas por dispersión

El cálculo de las características I-V de una asociación serie de células solares puede obtenerse sumando, para cada valor de la corriente, los valores de voltaje correspondientes a cada célula individual. Los valores de voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito y factor de forma varían para cada célula, estos mismos valores varían en los módulos. Los parámetros relacionados con la tensión ( $V_{OC}$ ,  $V_M$ , FF) se ajustan a una distribución normal, mientras que los

parámetros relacionados con la corriente (ISC e  $I_M$ ) presenta un fuerte sesgo negativo, como se muestra en la figura 2.3.

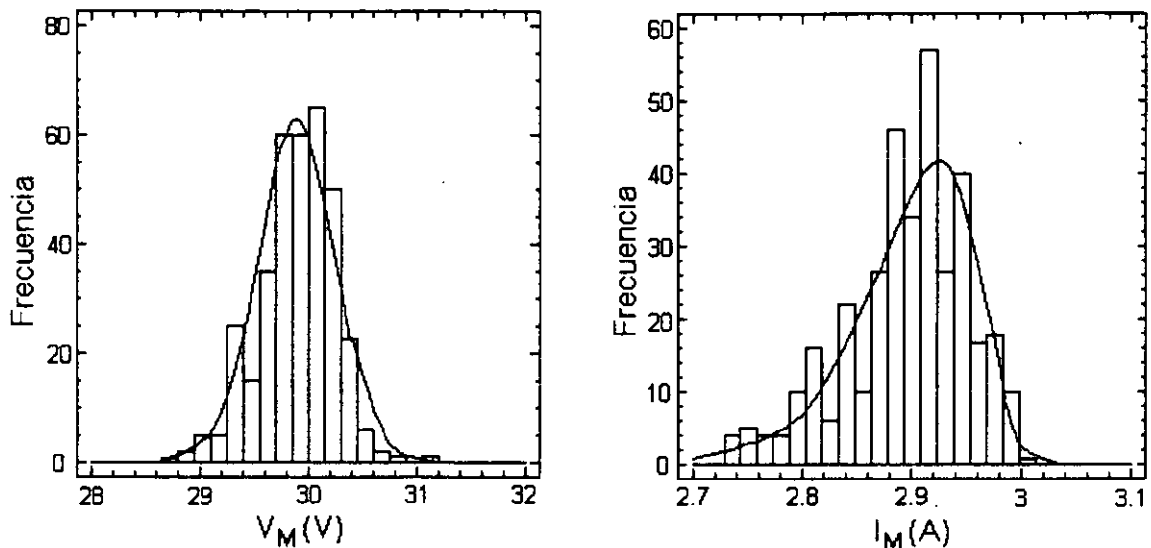


Figura 2.3 Histogramas de frecuencia de  $V_M$  e  $I_M$  de una colección de módulos fotovoltaicos.

Casi la totalidad de los paneles actuales se construyen asociando primero módulos en serie, hasta conseguir el nivel de tensión deseado y después asociando en paralelo varias asociaciones, o ramas, en serie para alcanzar el nivel de corriente buscado. Una forma de reducir las pérdidas de dispersión, consiste en clasificar, primero todos los módulos destinados a un panel en diferentes categorías establecidas en función del valor de  $I_M$  y construir después, cada rama en serie con módulos pertenecientes a una sola categoría. En el mercado actual los módulos tienen una variación de  $\pm 10\%$  con respecto a los valores nominales. En la figura 2.4 se muestra el valor de las pérdidas por dispersión en generadores contruidos con agrupaciones de células de distintas categorías. Se puede observar que la agrupación de células en categorías reduce las pérdidas de dispersión en aproximadamente 4%.

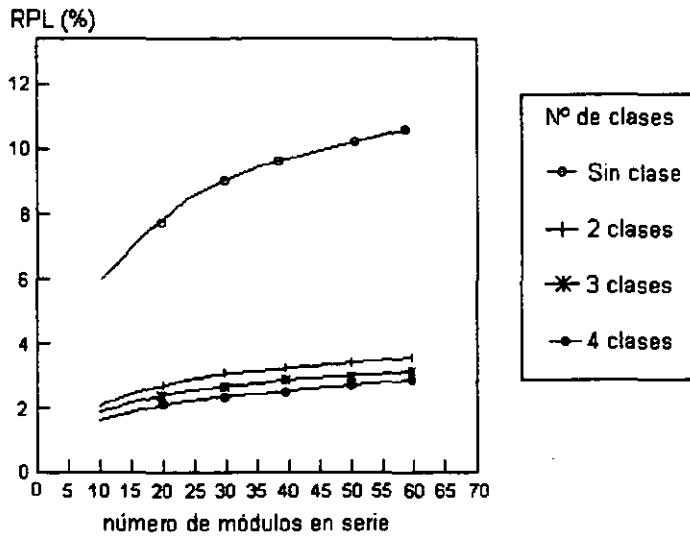


Figura 2.4 Pérdidas de dispersión en paneles fotovoltaicos con módulos cuyas características están en el rango de  $\pm 10\%$  de los valores nominales

Otra forma de minimizar las pérdidas por dispersión es la adición de un cableado intermedio, como el que se muestra en la figura 2.5.

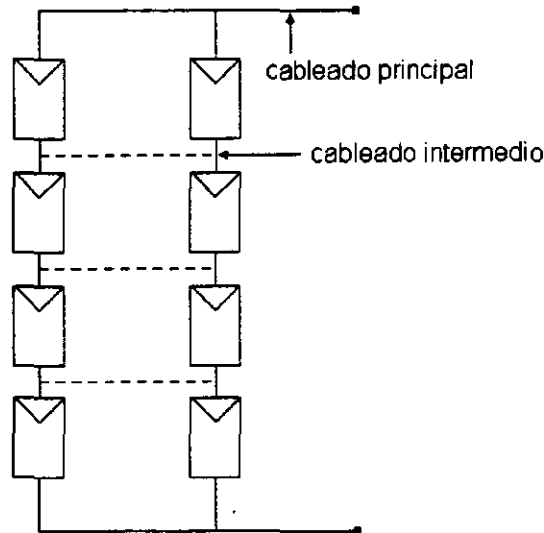


Figura 2.5 Disposición de cableado que reduce las pérdidas por dispersión

El cableado intermedio es una práctica poco común debido a lo engorroso que resulta su implementación. Sin embargo, un procedimiento alternativo para lograr el mismo efecto, consiste en utilizar módulos configurados a base de

conexiones serie y paralelo entre sus células. La figura 2.6 presenta un esquema convencional y uno alternativo para un módulo de 33 células. La utilización de uno u otro no supone cambios significativos en el proceso de fabricación de los módulos. En el esquema A se presenta una conexión en serie y en el esquema B se presenta una combinación de conexión serie paralelo

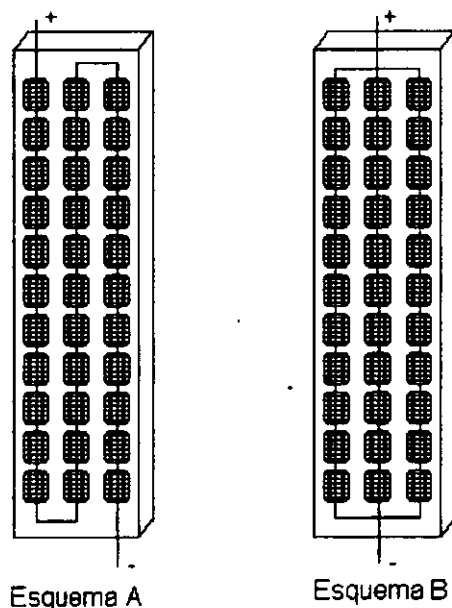


Figura 2.6 Módulo con 33 células con esquema convencional (A) y alternativo (B)

### 2.2.3 El problema del punto caliente

Para explicar este fenómeno, se analizará una de las muchas situaciones en las que puede producirse:

Supongamos un módulo con 36 células asociadas en serie de las cuales una célula tiene un valor  $I_{SC}$  significativamente menor a las demás células. Este hecho puede producirse porque la célula está defectuosa o porque esta parcialmente sombreada.

La figura 2.7 muestra, separadamente, las características I-V de la célula "defectuosa" y del conjunto de las otras 35 células (supuestamente iguales).

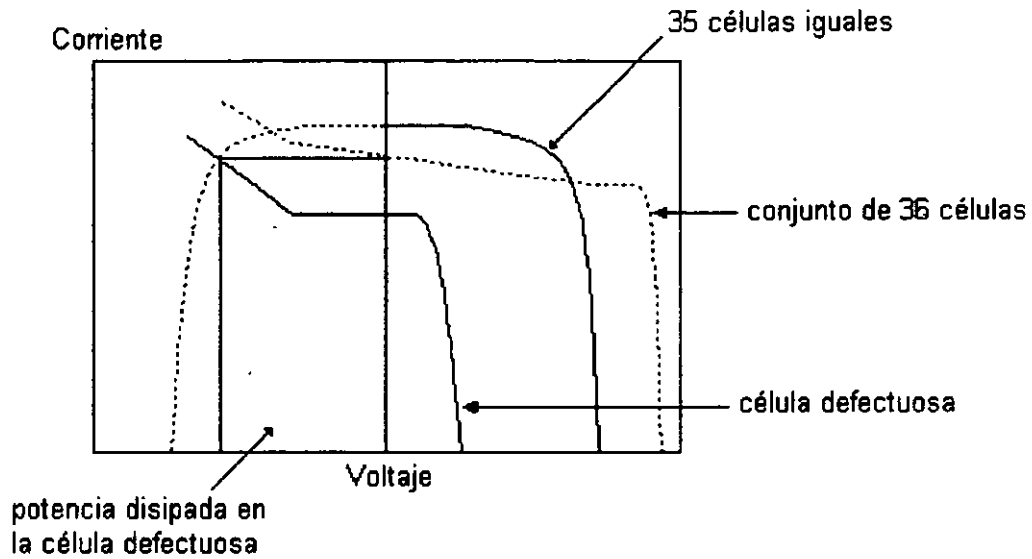


Figura 2.7 Característica I-V de un módulo con una célula defectuosa

Con el módulo en corto circuito, el voltaje en cada una de estas dos curvas debe ser igual en módulo y opuesto en signo. El valor de la corriente puede calcularse reflejando una de las curvas en el eje de las ordenadas e intersectándola con la otra, tal y como se ve en la figura 2.7.

Puede observarse que en esta condición, la célula defectuosa está inversamente polarizada y se ve obligada a disipar una potencia igual al área sombreada de la figura 2.7 y que resulta ser igual a la potencia generada por las otras 35 células. Es decir, la célula defectuosa se comporta como carga para las demás células. Para ello debe alcanzar una temperatura,  $T_{cp}$ , dada por la expresión:

$$T_{cp} = T_a + \xi_m P_{DIS} \tag{2.1}$$

donde  $P_{DIS}$  representa la potencia que disipa la célula defectuosa y  $\xi_m$  es una constante que puede calcularse mediante la siguiente expresión:



$$\xi_m \left( ^\circ C \text{ mW cm}^2 \right) \cong \frac{TONC(^\circ C) - 20}{S \times 80(\text{mW/cm}^2)} \tag{2.2}$$

Si el valor de  $T_{cp}$  supera los 85 °C se corre el riesgo de dañar irreversiblemente el módulo. Para células cuadradas de 10 cm de lado y  $TONC = 45 \text{ }^\circ C$ , tal temperatura se alcanza con un valor de  $P_{DIS} = 16 \text{ W}$  que típicamente corresponde a una irradiancia de  $40 \text{ mW/cm}^2$ .

La técnica más utilizada para evitar este fenómeno de sobrecalentamiento indeseado, denominado punto caliente, consiste en conectar diodos de paso en paralelo con grupos de células asociadas en serie, como se muestra en la figura 2.8. Si la polaridad del diodo es opuesta a la de las células, cuando éstas se polarizan inversamente el diodo se polariza positivamente. Esto proporciona un camino fácil de paso a la corriente debida a otro grupo de células del panel y limita la máxima potencia a disipar por una célula a la generada únicamente por las que componen su propio grupo.

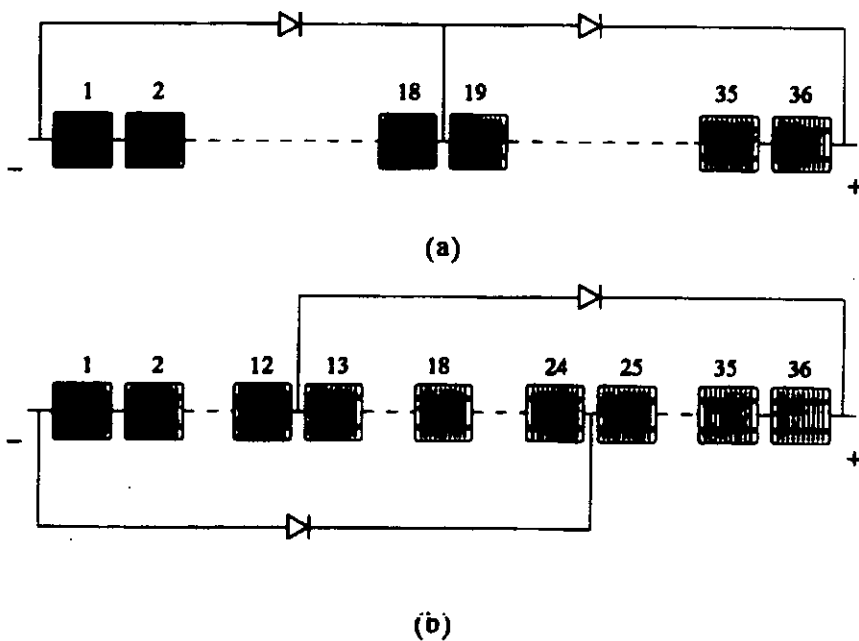


Figura 2.8 Diodos de paso para evitar puntos calientes

### **2.3 Clasificación de paneles fotovoltaicos**

Los paneles fotovoltaicos pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios. Por ejemplo, de acuerdo al elemento concentrador pueden dividirse en sistemas reflectores o refractores. A su vez puede hacerse una clasificación entre sistemas formadores de imágenes o focalizantes y no focalizantes.

Con respecto a su capacidad para orientarse hacia el sol se suelen clasificar en fijos, semifijos y móviles. Los sistemas de seguimiento pueden ser sofisticados y encarecer dichos sistemas. Generalmente los fijos suelen orientarse al sur o bien presentan una inclinación fija según la latitud del lugar, serán pues en general sistemas no focalizantes y de baja concentración. Los semiestáticos pueden presentar ya unas conexiones periódicas, suelen ser también en general sistemas no focalizantes de concentración baja o media.

Finalmente los sistemas de alta concentración son focalizantes, lo cual obliga a tener un seguimiento sofisticado (mecánico, programable, etc.).

#### **2.3.1 Panel plano**

Los colectores planos tienen múltiples aplicaciones en distintos procesos de conversión de energía solar, ya sea de conversión a calor o conversión de energía solar a eléctrica. Con respecto a la conversión de energía solar a energía calorífica están limitados a temperaturas inferiores a 100° C aproximadamente, los colectores planos ofrecen múltiples ventajas con respecto a los colectores de enfoque o concentradores, los cuales concentran radiación solar ya que este tipo de colector utiliza únicamente la radiación solar directa y el colector plano acepta las componentes de radiación directa y difusa, otras de las grandes ventajas de este colector es la de que no requiere seguimiento continuo del sol, su

mantenimiento es prácticamente nulo y se pueden instalar en lugares pequeños, como por ejemplo, en los techos de casas o edificios.

Las partes más importantes de un colector plano típico que se utiliza para la transformación de energía solar fotovoltaica se muestra en la figura 2.9. Como se mencionó, el colector plano es una estructura sencilla que consta de una base en la cual descansa o se apoya la superficie plana que a su vez alojará el conjunto de células solares. La orientación del panel dependerá de la latitud de el lugar.

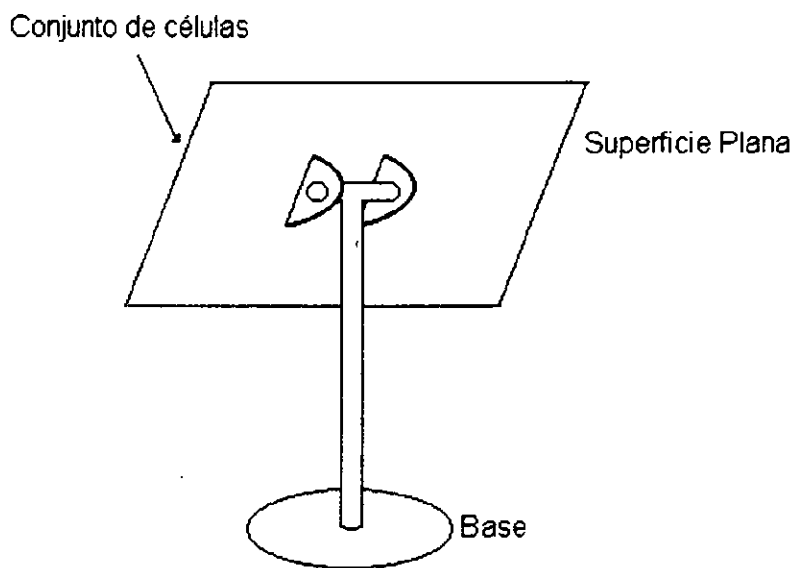


Figura 2.9. Panel plano

Para obtener un mejor aprovechamiento de la radiación solar a el panel plano se la puede adaptar un sistema de seguimiento de sol.

### 2.3.2 Panel concentrador

El objetivo de la concentración para conversión fotovoltaica es, como el de casi todas las investigaciones sobre conversión fotovoltaica, el abaratamiento de energía. El problema principal que se tiene con este abaratamiento es que la célula solar, produce relativamente poca energía teniendo en cuenta su costo y

nuestras necesidades de electricidad. Este problema se puede plantear de tres formas: (1) la célula solar es cara, (2) la densidad de energía solar que llega a la tierra es baja y (3) nuestras necesidades de energía son demasiado altas.

Para conseguir el abaratamiento de la energía solar basándose en los problemas de costo de la célula solar y la baja densidad de energía solar se han seguido dos líneas: La primera, pretende abaratar el núcleo de la conversión fotovoltaica, es decir, la célula solar, de forma que se puedan obtener áreas grandes para captar la energía solar a bajo costo. Dentro de esta línea están las investigaciones de silicio cristalino barato. La segunda línea, la concentración, persigue el abaratamiento de la energía aumentando la densidad de energía que recibe la célula. De esta forma, se resuelve el problema del alto costo de la célula. Para ello la concentración separa el problema de la captación de la energía solar y el de conversión a electricidad. La captación se realiza mediante un sistema concentrador que envía hacia la célula la energía solar concentrada. El costo de la célula, ahora, es relativamente pequeño cuando se compara con el costo del conjunto, sin embargo, la eficiencia de la célula es clave para el conjunto, razón por la cual son deseables células muy eficientes aunque sean caras.

Debido a la importancia de la eficiencia de las células en la solución de la concentración, gran parte de las investigaciones han buscado mejorar la eficiencia de las células independientemente de su costo. En los últimos años se han alcanzado niveles con los que nunca se había soñado antes. La administración estadounidense había fijado el 20% como objetivo deseable para las células de silicio a mediados de la década de los 80; en 1986 se alcanzó el 28%. En 1989 se alcanzó el 35% con la combinación de células de arseniuro de galio y antimoniuro de galio. En los próximos años se espera conseguir eficiencias del 40% o más. Para hacerse una idea de lo que tecnológicamente representa esto, basta decir, por ejemplo, que la eficiencia de un motor de automóvil es de 23% y la de una central nuclear de agua ligera es del 32% (obviamente estos datos no son para una comparación directa ya que son procesos muy diferentes).

La figura 2.10 resume la evolución de la eficiencia en las células de concentración y la de los módulos de concentración con el tiempo. Como se puede apreciar la evolución es muy prometedora. Sin embargo, la repercusión comercial de la concentración es actualmente menor que la del plano convencional. Existen varias razones para ello. En primer lugar, los costos fijos de la concentración son mayores que los del panel plano; lo que exige que la potencia mínima instalada en concentración sea superior. Esto ha permitido al panel plano entrar en el mercado de las instalaciones remotas y en el de las instalaciones en el tercer mundo (son siempre instalaciones pequeñas).

Donde la concentración parece tener más posibilidades de éxito es en el mercado de las grandes centrales de energía eléctrica. De hecho la concentración óptica ya ha penetrado en este mercado, aunque el procedimiento para generar energía eléctrica no es el fotovoltaico sino mediante un ciclo térmico.

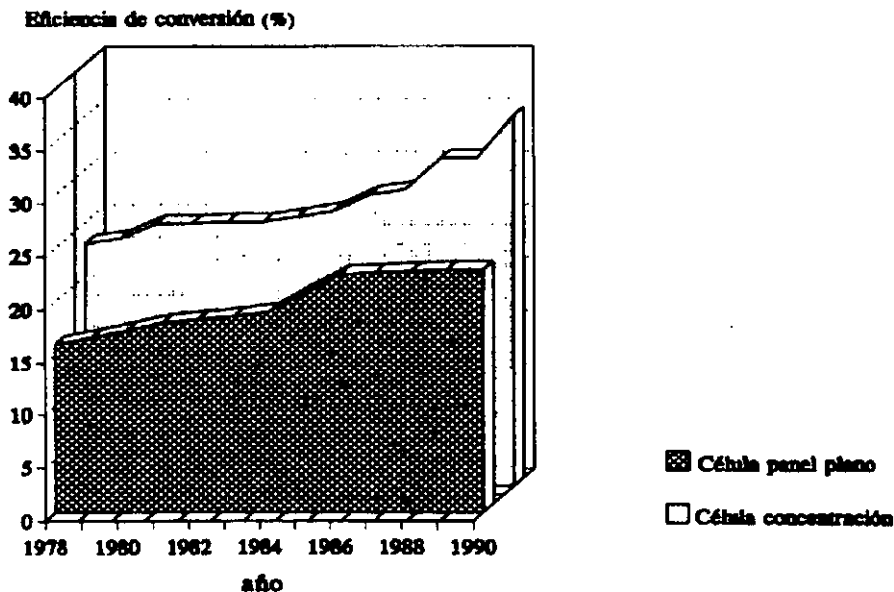


Figura 2.10. Evolución de la máxima eficiencia conseguida con células fotovoltaicas a AM1 y en concentración.

Los sistemas de media y alta concentración necesitan sistemas para seguir al sol. Esta necesidad es una de las principales diferencias con el panel plano y es probablemente la causa más importante del desarrollo comercial de ambas

---

tecnologías. La concentración no dispone de un mercado de aplicaciones de pequeño tamaño que le permita una salida gradual y sostenida en el mercado, además encuentra una competencia por parte de los sistemas de concentración térmicos en el mercado de la generación de electricidad para la red y en particular en el mercado de la electricidad en las horas pico que debería ser, por sus características, el mercado más natural de desarrollo de la concentración fotovoltaica. Tampoco hay que olvidar la posible competencia de otra solución termosolar: la basada en los motores Stirling ya que con esta tecnología se han medido las eficiencias de conversión más altas de energía solar a energía eléctrica en torno al 40% y hay interés en otros sectores de la industria en desarrollar dichos motores, lo que repercute en un esfuerzo mayor en investigaciones sobre dicho motor. Sin embargo, la concentración fotovoltaica se puede beneficiar más del desarrollo de esta tecnología que de la asociada a la solución termosolar clásica. La razón de ello es que los sistemas ópticos para concentración fotovoltaica y para motores Stirling son similares, y en ambos, la parte óptica y la estructura son los elementos más caros por lo que la selección entre ambas tecnologías va a estar muy marcada por la fiabilidad del conversor, que es en lo que la conversión fotovoltaica tiene más asentado su prestigio.

La concentración fotovoltaica está actualmente a un nivel de resultados en investigación suficientemente bueno como para afirmar que lo único que le falta es un esfuerzo adicional en desarrollo y si ese desarrollo resulta fructífero, la concentración fotovoltaica tiene todas las posibilidades para alcanzar los objetivos de costo de energía eléctrica necesarios para entrar en el mercado de generación en masa de energía eléctrica.

### 2.3.2.1 Apertura angular y concentración óptica

Si se dispone de una lente ideal en el sentido de que cualquier haz de rayos paralelos que incidan sobre ella sean enfocados perfectamente en algún punto del plano focal, independiente de la dirección de los rayos incidentes como se observa en la figura 2.11, se lograría aprovechar toda la energía de los rayos que incidan en la lente debido a la mejor concentración óptica.

Esta lente no existe pero se puede aproximar por una lente tipo ojo de pez además, la lente se enfrenta al sol y la imagen que se obtiene en el plano imagen en un día claro es similar a la que se obtiene con una lupa como se observa en la figura 2.12

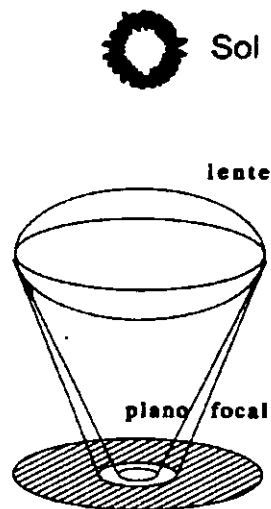


Figura 2.11. Lente enfocada al sol. En el plano focal se forma la imagen del Sol, de la región circunsolar y de la región difusa producidas por la lente.

En la figura 2.11 se muestra que si la célula es pequeña, ésta quedará desenfocada al cabo de un rato debido al movimiento del sol (o bien se puede decir que el sol se sale de la apertura angular del concentrador). Para que esto no ocurra el conjunto que forma lente y célula deben permanecer estáticos respecto al sol. Esto se puede conseguir con un mecanismo de seguimiento (usualmente

llamado heliostato). Esta necesidad de seguimiento es también general y se deriva de la dependencia entre la concentración y apertura angular.

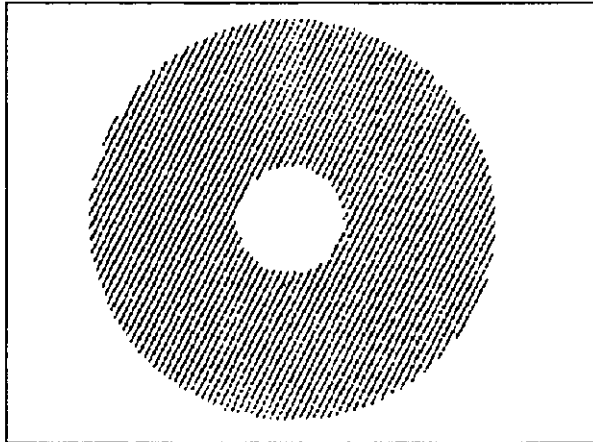


Figura 2.12. Plano focal. El círculo interior corresponde a la radiación directa, el círculo intermedio corresponde a la radiación circunsolar, y el externo corresponde a la radiación difusa

En la figura 2.12 se tiene una imagen del plano focal, en la cual aparece un círculo iluminado intensamente y rodeado por una corona circular de menor intensidad. El resto de los puntos tiene baja intensidad. La intensidad que recibe cada punto se mide con el parámetro irradiancia (expresada en unidades de  $W/m^2$ ). El círculo central corresponde a los puntos donde se enfocan los rayos procedentes del sol, la corona circular corresponde a la imagen de la llamada radiación circunsolar, y el resto de los puntos es donde se enfocan los rayos de la región difusa.

Si se coloca una célula circular en el plano imagen, el radio de ésta es pequeño, la irradiancia media sobre ella será muy alta y se podrá obtener una cantidad apreciable de electricidad con muy poca área de célula.

Sin embargo, se perderá parte de la radiación procedente del cielo y si la célula es muy pequeña se pierde la radiación circunsolar y la radiación difusa. Se define como factor de concentración óptica  $X$  a la relación entre la irradiancia media que recibe la célula en el concentrador (en este caso la irradiancia que



recibe la célula situada en el plano focal) y la irradiancia que recibe sin el concentrador. Para capturar un porcentaje mayor de la radiación que llega del cielo es preciso que la célula sea más grande. Pero si la célula es más grande disminuya la irradiancia media sobre la célula. Es decir, para capturar la totalidad de la energía procedente del sol es preciso que la concentración no sea mayor a  $X=1$ , esto es, no hay concentración. La figura 2.13 muestra la variación del porcentaje de energía capturada (también llamado factor de intercepción  $F_i$ ) y la concentración óptica con el área de la célula (el área de la lente es 1).

Esta dependencia entre el porcentaje de energía capturada por la célula y su nivel medio de irradiancia es una propiedad de los sistemas ópticos (en los que no exista desplazamiento de frecuencia), es decir, es inevitable perder parte de la energía procedente del cielo si se quiere concentrar. Cuando hay desplazamiento de frecuencia entre la radiación entrante al sistema óptico (la radiación solar) y la radiación saliente, entonces los límites son diferentes. Este es el caso de los concentradores luminiscentes y los que utilizan un absorbedor para cambiar la temperatura de color de la radiación.

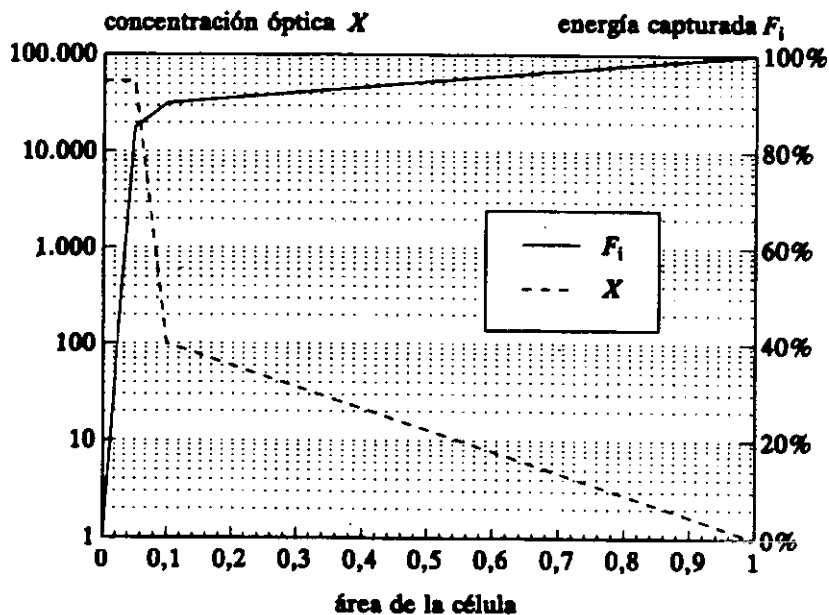


Figura 2.13. Concentración óptica y factor de intercepción que pueden observarse variando el radio de una célula situada en el plano focal representado en la figura 2.12.

Esta limitación se suele plantear en óptica como la dependencia de la concentración con la apertura angular del concentrador. La apertura angular es el conjunto de direcciones de los rayos incidentes sobre el concentrador que logran llegar al receptor (en este caso el receptor es la célula solar). Por ejemplo, si los rayos que llegan al receptor de un concentrador con simetría rotacional son todos los rayos que inciden en su apertura formando un ángulo menor que  $\vartheta$  con el eje de simetría, se dice que el concentrador tiene una apertura angular  $\vartheta$ . Si esto ocurre, la óptica demuestra que la relación entre el área de apertura y el área de la célula, llamada concentración geométrica  $X_g$  no puede ser mayor que  $X_g \leq 1/\sin^2 \vartheta$ . La concentración óptica  $X$ , la concentración geométrica  $X_g$  y el factor de intercepción  $F_i$  cumplen:  $X = X_g F_i$

### 2.3.2.2 Concentradores estáticos

A pesar del movimiento relativo del sol respecto de la tierra, la lente permanece estática respecto a la tierra. La imagen del sol ira moviéndose en el plano focal y habrá una variación con el tiempo de la irradiancia recibida por cada punto de dicho plano. Si la lente está frente al meridiano focal e inclinada un ángulo igual al de la latitud, entonces, la irradiancia media que reciben los puntos del plano focal a lo largo del año tendrá una distribución similar a la que aparece en la figura 2.14. En ella se aprecia una banda que ha recibido alta irradiancia, otras dos zonas con un nivel muy inferior de irradiancia y finalmente una zona oscura. La primera zona (de alta irradiancia) corresponde a la imagen de la zona del cielo por donde el sol pasa alguna vez a lo largo del año. Dentro de esta zona hay puntos de menor y mayor irradiancia, correspondiendo a la climatología media que ocurre cuando el sol se enfoca en esos puntos y también a la velocidad con la que la imagen del sol se mueve en el plano focal (esa velocidad no es constante). La imagen del sol pasa dos veces por año por cada punto del plano focal (una durante el periodo del solsticio de invierno, equinoccio de primavera, solsticio de verano, y otra durante el periodo de solsticio de verano, equinoccio de otoño,

solsticio de invierno). La segunda zona del plano focal, la de nivel medio de irradiancia, corresponde a la imagen de los puntos del cielo por los que en ningún momento del año pasa el sol y que por lo tanto emiten radiación difusa. Por ultimo, la zona oscura corresponde a rayos que no proceden del cielo sino del suelo. La existencia de estos es debida a la inclinación de la lente respecto del horizonte local.

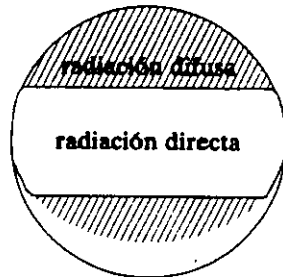


Figura 2.14. Distribución de intensidad media anual en el plano focal cuando la lente no sigue el movimiento aparente del Sol (concentradores estáticos).

Si suponemos que la irradiancia recibida por las tres zonas del plano focal es constante (dentro de cada una de las zonas). Si se coloca en dicho plano una célula cuya forma coincida con la forma de la zona de máxima irradiancia, entonces el conjunto lente (ideal) célula captura 80% de la energía que se recibe durante todo el año con una concentración óptica  $X \cong 1.6$ . Para capturar el 100% de la energía incidente sobre la lente, la concentración óptica debe disminuir hasta un  $X=1.13$ . Si se pretende capturar toda la energía que procede del sol durante el año, entonces la lente debe colocarse paralela al plano del horizonte local y la máxima  $X$  es 1 (la necesidad de colocarse paralela al horizonte se debe a que un plano que no está paralelo al plano del horizonte local recibe radiación por su cara anterior y posterior, y por lo tanto no podrá nunca recibir el 100% de la radiación por una sola cara). La figura 2.15 muestra la evolución del factor de intercepción y de la concentración óptica con el área de la célula.

Se tiene que el resultado obtenido para un caso concreto es absolutamente general y que por lo tanto, si se quiere capturar un porcentaje apreciable de energía con un concentrador sin seguimiento es preciso resignarse a una baja concentración.

Existen dos métodos para incrementar estos límites. El primero de ellos utiliza materiales de alto índice de refracción en los que la célula este sumergida. Esto eleva el límite teórico en  $n^2$  siendo  $n$  el índice de refracción del material que rodea al semiconductor. Materiales que para esta función pueden ser usados en la practica no superan el valor de  $n \cong 1.5$  por lo que tendríamos, por ejemplo, que capturando el 80% de la radiación incidente durante todo el año, la concentración óptica máxima es de  $X \cong 3.6$ .

El segundo método consiste en el uso de células bifaciales. Estas células son activas por las dos caras, de forma que ópticamente se dispone del doble de área utilizando la misma oblea. Supongamos que mediante un arreglo óptico se consigue irradiar la cara posterior con la misma irradiancia media que en la cara frontal, entonces se habría conseguido irradiar la célula con el doble de potencia, o lo que es lo mismo la concentración óptica se multiplica por dos. Las células bifaciales pueden ser usadas con o sin medio de alto índice de refracción y por tanto la máxima concentración óptica que se puede conseguir con, por ejemplo, un factor de intercepción  $F_i = 0.8$  usando medios refractivos con  $n = 1.5$  es de  $X \cong 7.2$ .

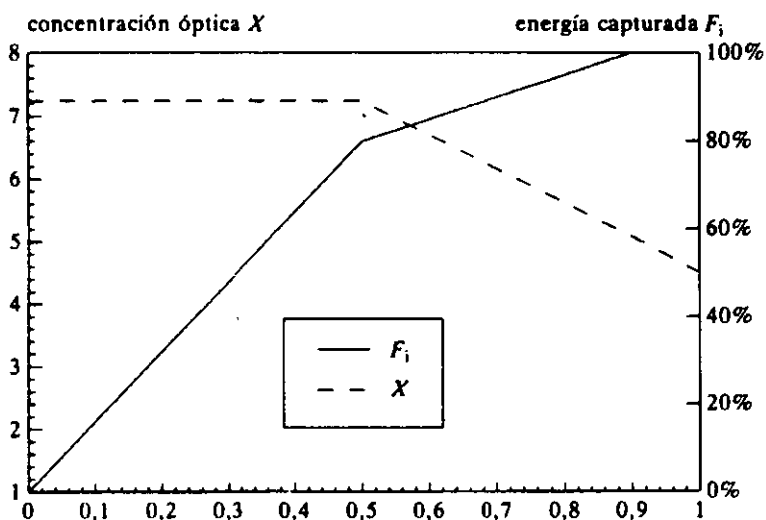


Figura 2.15. (Superior) Concentración óptica y factor de intercepción que se obtiene variando el área de la célula situada en el plano focal de la figura 2.14. Estos valores de  $X$  y  $F_i$  son máximos independientemente del tipo de concentrador que se escoja. Si se usa un medio refractivo,  $X$  puede aumentar hasta un factor de  $n^2$  (típicamente  $n=1.5$  y el factor por el que se aumenta es 2.25); si se usan células bifaciales  $X$  puede aumentar el doble (factor 2). Es posible utilizar células bifaciales y medios refractivos con lo que el factor es  $2n^2$ . Este último caso se representa en la figura inferior.

El uso de células bifaciales, parece tener una mayor aceptación. Su principal inconveniente es la diferencia que existe entre la eficiencia media de las células bifaciales con la eficiencia de las células monofaciales, diferencia que penaliza de alguna forma el uso de células bifaciales en concentradores estáticos frente a las células monofaciales del panel plano. Para cuantificar de alguna forma esta diferencia, se puede decir que el factor por 2 debido a la bifacialidad se reduce actualmente a un 1.6 a causa de las diferentes eficiencias y la falta de simetría de las actuales células.

Los concentradores estáticos no se construyen mediante la lente que se menciona al principio (lente ideal) es más, los sistemas ópticos que se utilizan en general no forman imagen y por lo tanto no se puede hablar de plano imagen. Por otra parte, aunque la lente ideal existiera no sería deseable debido a que el proceso de formación de imagen en el plano de la célula provocaría fuertes

desuniformidades de iluminación en la célula, lo que empeoraría su rendimiento. Las técnicas de diseño de concentradores estáticos más aconsejables, por los resultados obtenidos en la práctica, son las derivadas de la óptica anidólica. Entre los concentradores diseñados con estas técnicas destaca el concentrador parabólico compuesto (CPC). Este concentrador está formado por un reflector cuya sección transversal son dos ramas parabólicas correspondientes a dos parábolas diferentes. La figura 2.16 muestra la sección transversal para un CPC de célula monofacial y dos CPC de célula bifacial.

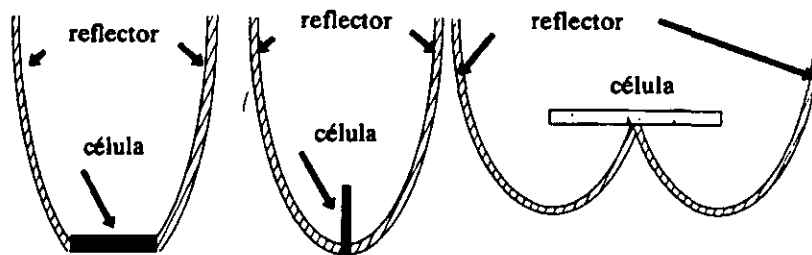


Figura 2.16. Sección transversal de varios tipos de CPC

### 2.3.2.3 Concentradores con seguimiento

Para explicar un concentrador con seguimiento se utilizara también la lente ideal. La posición estática de la lente respecto al sol permite que en el plano focal la distribución de irradiancia media (en un periodo largo) sea parecida a la mostrada en la figura 2.12, aunque no exactamente igual. Durante los periodos nublados la distribución de irradiancia en el plano focal puede considerarse prácticamente constante, con lo que la distribución media tiene un nivel de irradiancia en la corona exterior (la zona que corresponde a la radiación difusa) superior al mostrado en la figura 2.12. Además, debido al necesario ángulo de error, el círculo interior de alta irradiancia se amplía y su irradiancia media descende. Esto hace variar las curvas  $X$  contra área de la célula y  $F_i$  contra la misma variable que se muestra en la figura 2.13. La figura 2.17 muestra aproximadamente como son las nuevas distribuciones de valores máximos de  $X$  y  $F_i$ .

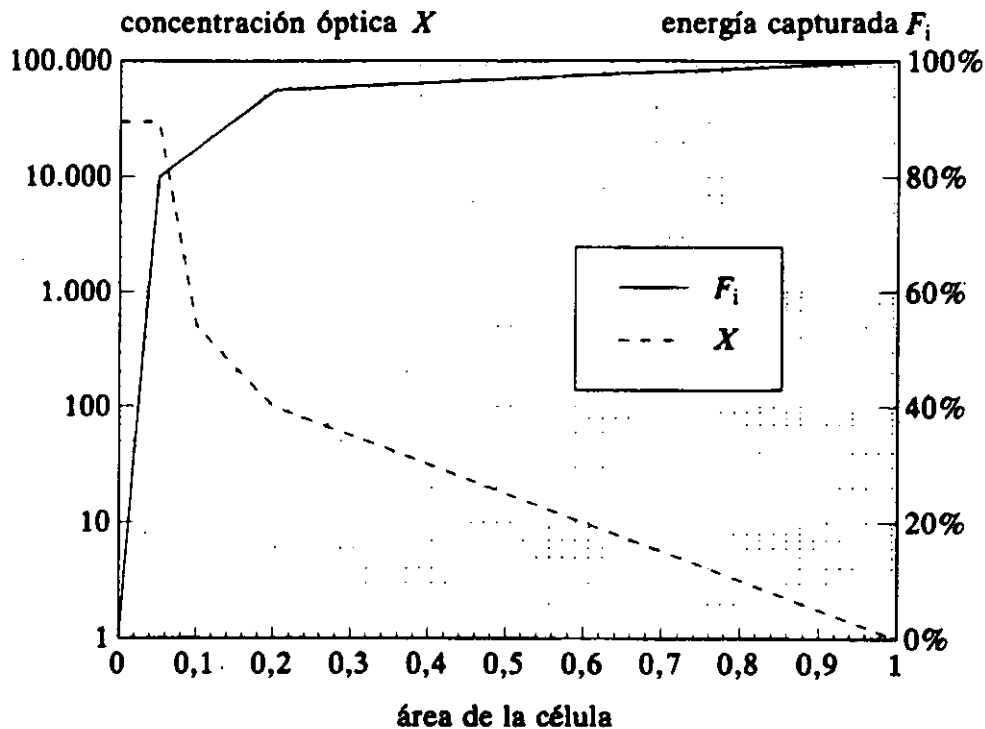


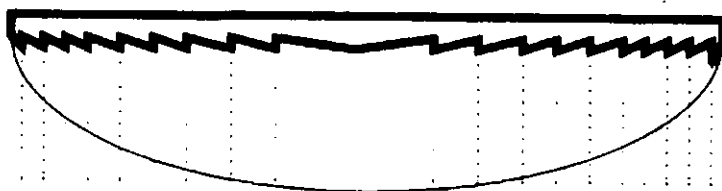
Figura 2.17. Concentración óptica y factor de interceptación que pueden obtenerse variando el radio de una célula situada en el plano focal cuando la lente tiene un sistema de seguimiento del Sol con un cierto error.

Es interesante destacar la dependencia que existe entre la concentración óptica y el costo del sistema óptico. Esta dependencia se manifiesta por ejemplo en el problema del error del seguimiento. Un sistema de seguimiento más perfecto permitiría reducir el tamaño del círculo central del plano focal (el de alta irradiancia) y con ello permitiría aumentar la concentración óptica sin disminuir  $F_i$ . Esto redundaría en definitiva en un sistema más caro.

### 2.3.2.4 Pérdidas ópticas

Las eficiencias ópticas son importantes y su aumento debe conjugarse con los costos de los materiales. De acuerdo con el origen de las pérdidas se clasifican de la siguiente manera:

### Lente de Fresnel



### Lente continua

Figura 2.18. Procedimiento aproximado de generación de una lente de Fresnel.

**Pérdidas por reflexión.-** Son las debidas a las reflexiones en metales por no ser estos conductores perfectos. Oscilan entre 18% del aluminio pulido y con una capa fina de anodizado hasta el 3% de las películas acrílicas con plata evaporada. Las relectividades también pueden aumentarse mediante deposición de capas delgadas, pero su costo es elevado. Estas pérdidas pueden ser muy importantes en los concentradores estáticos donde los rayos tienen un número medio de reflexiones alto, con lo que las pérdidas pueden oscilar entre el 6% y el 40%.



---

## CAPITULO 3 - Panel solar móvil

### 3.1 Introducción

La necesidad del desarrollo de nuevas fuentes de energía ha renovado el interés por el aprovechamiento de la energía solar. La energía solar puede aprovecharse de forma directa para la obtención de agua caliente y el acondicionamiento de edificios, en general, o bien puede convertirse en energía eléctrica. Las centrales solares, pueden ser de tipo térmico, que utilizan el calor del sol para producir el vapor necesario para mover una turbina, o basarse en el efecto fotovoltaico, mediante la utilización de células solares montadas en paneles.

En cualquier caso, la primera condición que debe reunir un sistema de aprovechamiento de energía solar es la de recoger la mayor cantidad posible de energía recibida en un determinado lugar. Esto es obviamente, tanto para los colectores térmicos, como para los helióstatos (espejos móviles) de una central solar térmica, al igual que para los paneles de una central fotovoltaica. Esta condición exige que la superficie colectora sea, en todo momento, perpendicular a los rayos solares y, por tanto, una colección óptima solo puede conseguirse si dicha superficie está dotada de un movimiento de seguimiento de sol.

En los sistemas prácticos una solución estática puede resultar suficiente para determinadas aplicaciones. Naturalmente, en este caso, la energía colectada no es la máxima posible, pero puede resultar un valor aceptable si se da al colector una determinada inclinación que depende de la latitud del lugar. Con ajustes estacionales de esta inclinación se consiguen algunas mejoras.

Utilizando un colector con seguimiento, la energía total recibida en un día claro puede ser del orden de un 35% mayor que para el colector estático. Un incremento de esta cuantía compensaría sobradamente la energía requerida para

el seguimiento. Sin embargo, en la práctica este aumento puede reducirse considerablemente para el caso de nublados frecuentes y en todas aquellas condiciones climatológicas en las que la relación entre la energía recibida por radiación directa y la recibida por radiación difusa tienda a disminuir. Esto hace que el seguimiento no sea una solución definitiva para pequeños sistemas de colector plano.

Pero el seguimiento es imprescindible, en mayor o menor grado, cuando se trata de grandes colectores y es completamente necesario en el caso de aquellos sistemas que se basan en la concentración óptica de la radiación solar. También es imprescindible en los casos de los campos de helióstatos de una central térmica solar que ha de enfocar, todos ellos, luz solar sobre un único colector. Todos los sistemas de concentración utilizan únicamente la radiación directa; pero aun así, puede obtenerse una ganancia de la energía captada respecto al colector estático que recoge la radiación total, siempre que se trate de climas poco nubosos.

### ***3.2 Descripción del movimiento del panel solar***

El panel solar que se utilizara es un panel concentrador con seguimiento de dos ejes y controlado por una PC (Computadora personal) en este caso trataremos las partes que componen al panel solar y el funcionamiento de cada una de ellas.

#### **3.2.1 Cinemática del movimiento**

En la práctica existen dos configuraciones de sistemas de seguimiento de dos ejes, la primera llamada montaje polar, que se muestra en la figura 3.1a, que posee un eje de giro paralelo al de la tierra y otro, horizontal, perpendicular a este. Este montaje es muy apropiado para pequeños colectores por su sencillez de

movimientos: el giro alrededor del eje polar es de velocidad prácticamente uniforme e igual a la del reloj y el giro alrededor del eje horizontal solo se necesita para corregir las variaciones de la declinación solar, dependiendo de la época del año, por lo que puede hacerse una vez al día, o incluso solo algunas veces al año.

Sin embargo, el montaje polar, que requiere un eje inclinado móvil no es apropiado para sistemas pesados. Como el caso de los grandes espejos de una central térmica solar o de los paneles de una fotovoltaica. Para ello se requiere del montaje más utilizado que es el llamado de acimut - elevación, que se muestra en la figura 3.1b, que tiene un eje vertical y otro horizontal perpendicular a él. Esta configuración permite gran robustez mecánica sin grande complicaciones de la estructura y de los mecanismos de giro. Por el contrario, la cinemática del movimiento del seguimiento del sol resulta ahora más complicada.

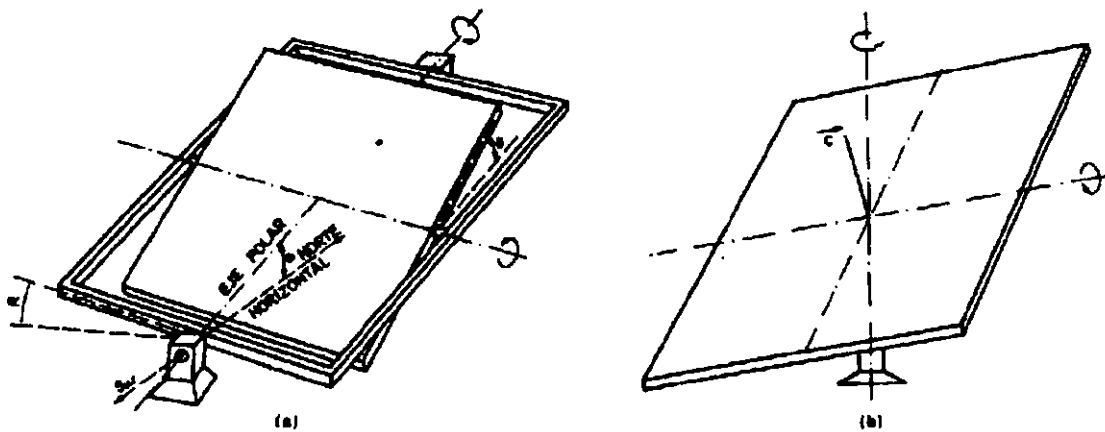


Figura 3.1 Configuraciones de ejes más utilizadas en la practica (a) Montaje polar (b) Montaje acimut - elevación

Con ayuda de una esfera celeste como la que se muestra en la figura 3.2, se obtiene un triángulo esférico del cual se observa que:

$$\begin{aligned} \text{sen } E = \cos Z &= \text{sen } \Phi \text{sen } \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos H \\ \text{sen } A &= \cos \delta \text{sen } H / \text{sen } Z \end{aligned} \tag{3.1}$$

Estas formulas permiten calcular el ángulo de elevación del sol sobre el horizonte,  $E$ , y el acimut (ángulo entre el meridiano celeste local y la línea entre el cenit y el sol),  $A$ , en función de la declinación solar,  $\delta$ , la latitud del lugar,  $\Phi$ , y el ángulo horario,  $H$ . La declinación varía a lo largo del año debido a la inclinación de la eclíptica respecto al ecuador celeste, pero puede suponerse constante, aproximadamente, a lo largo de un día.

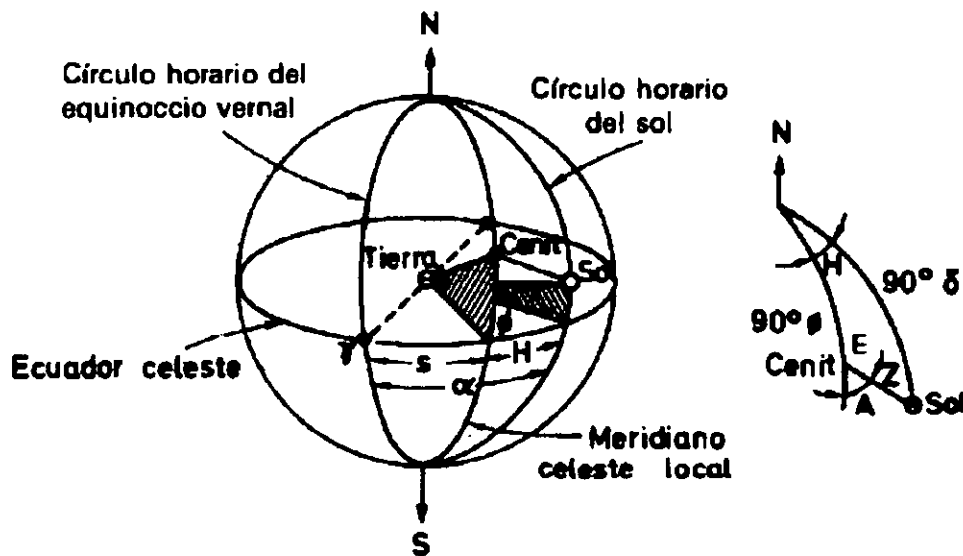


Figura 3.2 (a) Esfera celeste para ilustrar las definiciones de  $\delta$ ,  $H$ . (b) Triángulo esférico sobre la esfera celeste en el que puede verse las definiciones de la distancia cenital  $Z$ , y del ángulo de acimut,  $A$ ,  $\Phi$  es la latitud del lugar

### 3.3 El panel solar

El panel solar que se utilizara es un panel concentrador con seguimiento de dos ejes, el cual se ilustra en la figura 3.3, donde se observa el panel con todas sus componentes: motores, tren de engranes, sensores, células solares y marcos.

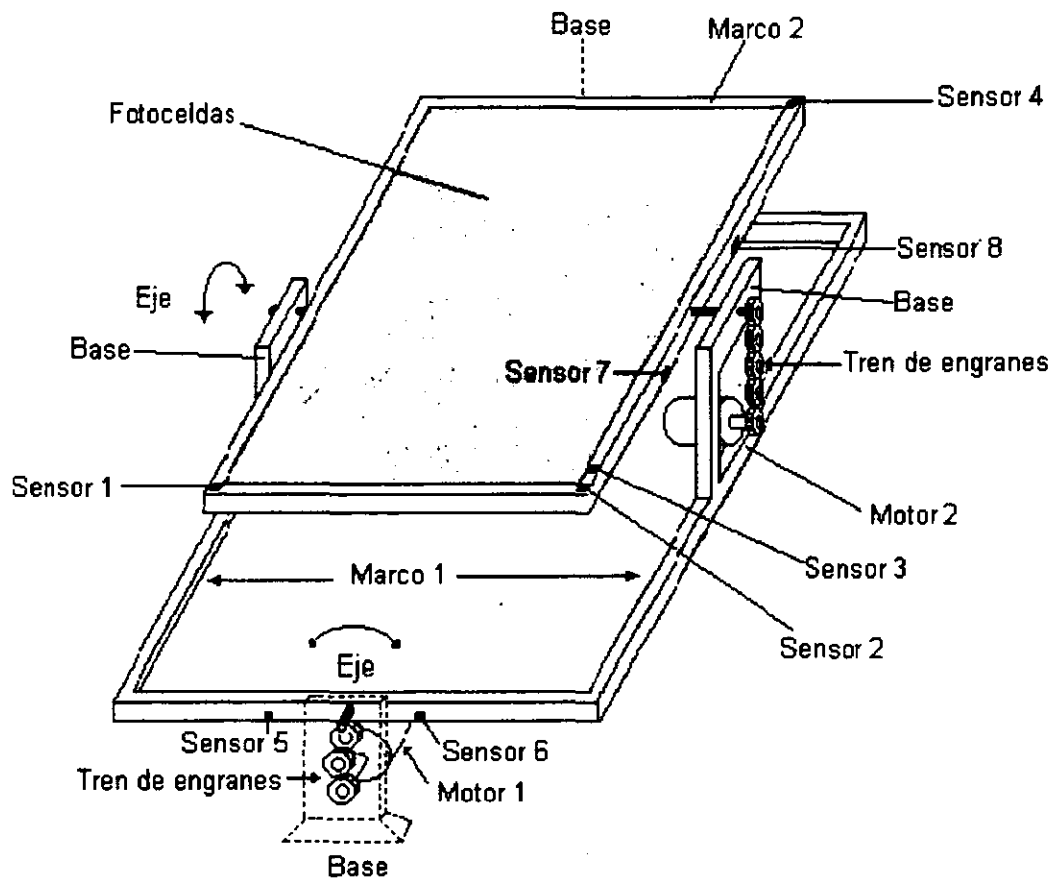


Figura 3.3. Panel solar concentrador con seguimiento de dos ejes, con sus elementos

Los elementos que conforman al panel solar son:

- 4 Bases
- 2 Motores
- 2 Trenes de engranes
- 4 Sensores de luz (1, 2, 3 y 4)
- 4 Sensores de posición (5, 6, 7 y 8)
- 2 Marcos
- 2 Ejes
- 2 Módulos fotovoltaicos (36 fotoceldas cada módulo)

### 3.3.1 Bases

Son la parte del panel donde se apoyan los marcos, además de ser lo que mantiene fijo el panel a la superficie donde se coloca.

Se recomienda que dichas bases estén constituidas por un material (de preferencia metal) de alta dureza, debido a que el panel tiene movimiento, por lo que las bases estarán sujetas a diferentes fuerzas y momentos angulares, también el material debe ser de gran resistencia a las diferentes condiciones climáticas, ya que éste se colocará a la intemperie y estará sujeto a los efectos de la erosión predominante del lugar.

Para el panel que se sugiere en esta tesis, la forma de las bases es como las que se muestran en la figura 3.4

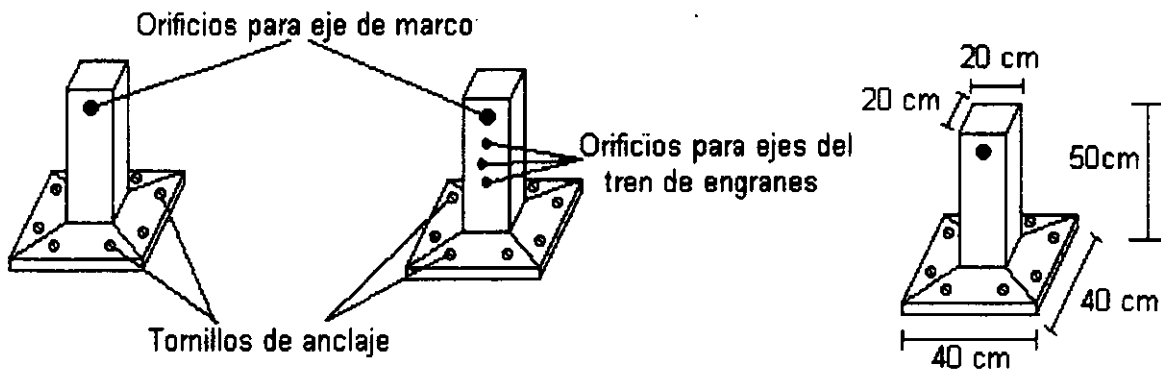


Figura 3.4 Bases para el panel solar propuesto

### 3.3.2 Motores

Los motores proporcionan el movimiento a los trenes de engranes para que estos a su vez muevan a los marcos en ambas direcciones, por lo que ambos motores tendrán las mismas características eléctricas.

Se propone que los motores sean de corriente directa ya que es más sencillo manejar el cambio de sentido de giro y tienen mayor par en el eje que un motor de corriente alterna con las mismas características eléctricas

El motor que proponemos es con las siguientes características eléctricas:

Voltaje = 12 Vcd

Corriente de arranque ( $I_a$ ) = 3.8 A

Corriente nominal ( $I_{nom}$ ) = 2 A

Velocidad = 750 rpm

### 3.3.3 Tren de engranes

Se propone un tren de engranes con la función de aumentar la potencia en el par y de reducir la velocidad de giro a 1/27 de la velocidad del motor. Debe ser un tren de engranes recto y exterior, compuesto de 4 engranes, como el que se muestra en la figura 3.5, donde se observa un engrane por separado y el conjunto de 4 engranes formando el tren, sujetos a la base, la flecha del motor y al eje del marco.

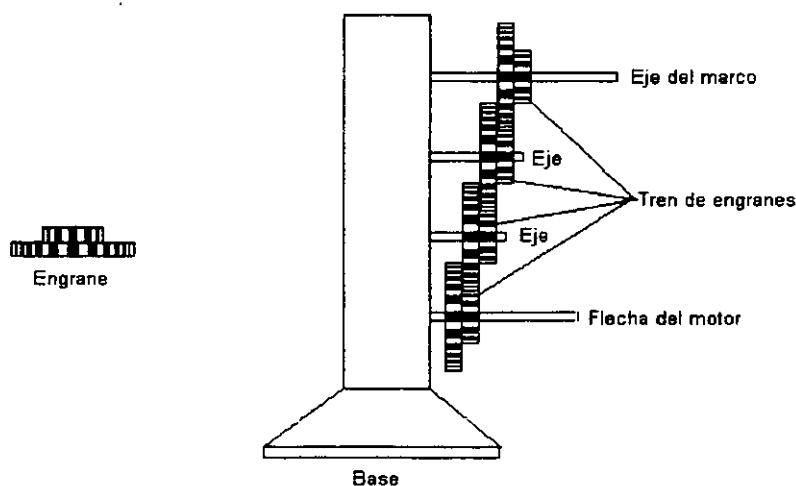


Figura 3.5. Engrane y conjunto de engranes formando el tren de engranes

Cada engrane está compuesto de dos engranes exteriores unidos por el eje, en donde el engrane pequeño tiene  $1/3$  del radio del engrane mayor, con esto logramos reducir la velocidad del motor a  $1/27$ , para tener una velocidad de 27.7778 rpm.

### 3.3.4 Marcos

El marco 1 se encarga de sostener al motor 2 y su tren de engranes, al marco 2 y proporcionar el movimiento norte - sur al panel mediante un eje móvil. En este marco también se encuentran dos sensores de posición (sensor 5 y 6).

El marco 2 se encarga de sostener las fotoceldas, así como de proporcionar el movimiento este - oeste al panel por medio de un eje móvil. En este marco se localizan dos sensores de posición (sensores 7 y 8) y los sensores de luz (sensores 1, 2, 3 y 4).

Se propone que estos marcos estén constituido de un material resistente debido a que tiene que soportar el peso de las fotoceldas (aproximadamente 15 Kg) y tiene que resistir los cambios climáticos, además tiene que ser de bajo peso para que sea menor el esfuerzo que realicen los motores y trenes de engranes al mover al panel; por lo que se propone que sean de aluminio de 1" con bisel.

El marco 1 y 2, sus componentes y movimientos se ilustran en la figura 3.6



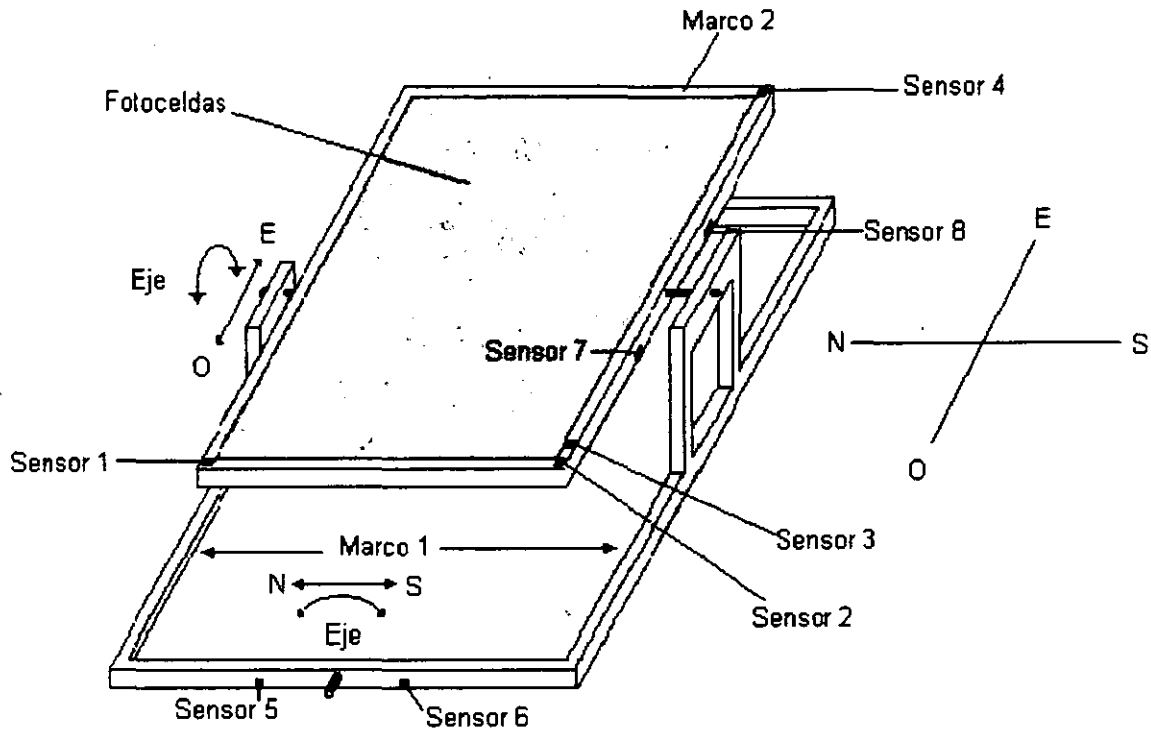


Figura 3.6 Marcos que conforman al panel solar

### 3.3.5 Ejes

Estos van fijos al marco y permiten el movimiento de los mismos, los ejes llevan un engrane en el extremo para poder ser movidos por los trenes de engranes (figura 3.5).

Se propone que los ejes sean de acero y 1/2" de diámetro

### 3.3.6 Sensores de luz (Fotómetro)

Estos medidores se utilizan principalmente para conocer la intensidad luminica en aplicaciones de iluminación, para probar las lámparas y otras fuentes luminosas, y en fotografía. También se utilizan en varias formas para analizar y adaptar colores, verificar la turbiedad de las soluciones, comprobar la densidad del humo o de la niebla, hacer pruebas de reflexión y deslumbramiento y muchas otras aplicaciones análogas.

El uso de una célula solar de silicio y una resistencia variable de  $5\text{ K}\Omega$  en serie como se muestra en la figura 3.7 constituyen un fotómetro sencillo. La resistencia variable tiene la función de regular la corriente y voltaje de salida del fotómetro, mientras que la célula solar nos proporciona el voltaje y corriente de operación.

El fotómetro que proponemos estará formado por una célula de silicio con las siguientes características (datos del fabricante<sup>7</sup>):

Voltaje de circuito abierto  $V_{OC}=0.45 - 0.55\text{ V}$

Corriente de corto circuito  $I_{SC}=60\text{ mA}$

Dimensiones  $2 \times 2\text{ cm}$

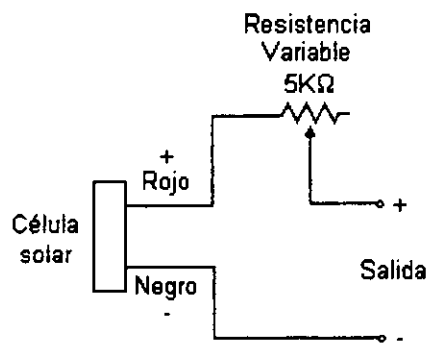


Figura 3.7 Fotómetro con célula de silicio

Este fotómetro será el sensor de luz que se utilizara en el panel para detectar que éste se encuentre en posición perpendicular a los rayos del sol. Como se ha descrito anteriormente se utilizan cuatro sensores para mantener la posición, los cuales funcionaran en pares, es decir sensor 1 con 2 y sensor 3 con 4.

<sup>7</sup> Datos obtenidos de Plastecs Company

La figura 3.8 muestra los sensores y la posición en que se localizan en el panel, donde se observa que para que los sensores detecten cuando los rayos del sol no inciden en forma perpendicular al panel se colocaran unas laminas en el extremo de los sensores, como se muestra en la figura 3.8, de tal forma que las laminas producen una sombra en el sensor de luz; dichas sombras serán iguales y se producirá una iluminación igual en los dos sensores cuando el sol este perpendicular al panel y cuando los rayos del sol no inciden perpendicularmente habrá diferencia en la iluminación debido a las sombras producidas, como estos estarán conectados a un comparador de voltaje, cuando exista una diferencia de iluminación será detectada por el comparador dándonos una señal de salida para que el panel sea movido y reciba los rayos del sol en forma perpendicular. La etapa de comparación y control se explicara en el siguiente capitulo.

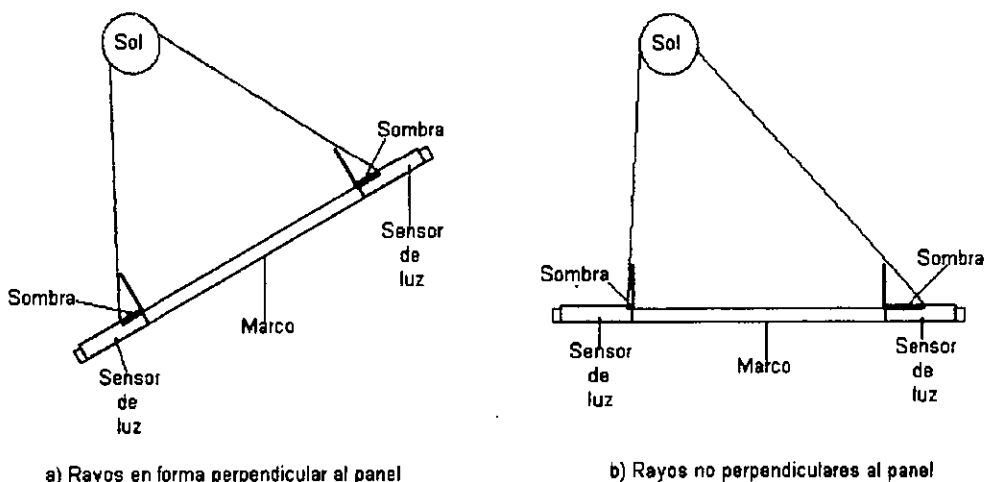


Figura 3.8 a) posición de los sensores y las sombras producidas cuando los rayos del sol inciden perpendicularmente. b) posición de los sensores y las sombras producidas cuando los rayos del sol no inciden perpendicularmente.

### 3.3.7 Sensores de posición

Estos sensores se encargan de detectar la posición máxima a la que se pueden mover los marcos, cada marco cuenta con dos sensores de posición para detectar sus dos posiciones extremas de movimiento. Estos sensores se

accionaran cuando el marco haya llegado al limite de posición y así evitar que los marcos se sigan moviendo.

Estos sensores son interruptores magnéticos normalmente cerrados y se accionan cuando el panel llega a una posición extrema, es decir llegan a un punto donde ya no debe seguir moviéndose en esa dirección.

Los interruptores magnéticos soportan un voltaje de 80 volts y una corriente de 1 ampere.

### 3.3.8 Modulo fotovoltaico (fotoceldas)

El panel estará formado por módulos fotovoltaicos con las siguientes características (datos del fabricante):

Característica	Valor
Potencia máxima	83 W
Voltaje máximo	18 V
Corriente Máxima	4.72 A
Voltaje de circuito abierto $V_{OC}$	22.10 V
Corriente de corto circuito $I_{SC}$	5 A
Voltaje nominal	12 V
Número de células	36
Largo	1.1 m
Ancho	0.66 m
Peso	7.5 Kg
Garantía	20 años

El panel se conforma de dos módulos conectados en serie para aumentar el voltaje (24 V). El panel se encarga de captar los rayos del sol y transformarlos a energía eléctrica. Así, las características eléctricas del panel son las siguientes:

Característica	Valor
Potencia máxima	160 W
Voltaje máximo	36 V
Corriente Máxima	4.72 A
Voltaje de circuito abierto $V_{OC}$	44.20 V
Corriente de corto circuito $I_{SC}$	5 A
Voltaje nominal	24 V
Número de células	72
Largo	1.1 m
Ancho	1.32 m
Peso	15 Kg
Garantía	20 años

---

## **CAPITULO 4 Propuesta para controlar el panel solar móvil a través de una computadora**

### ***4.1 Introducción***

No es una exageración afirmar que el microprocesador y la microcomputadora (PC) han revolucionado la industria electrónica y han tenido un impacto tremendo en muchos aspectos de nuestras vidas. La integración a gran escala (LSI) ha reducido tan significativamente el tamaño y el costo de las computadoras que los diseñadores consideran utilizar rutinariamente el poder y la versatilidad del microprocesador y la PC en una amplia variedad de aplicaciones.

En esta tesis se propone que el panel sea controlado por una PC, ya que en la actualidad la mayoría de las personas están familiarizados con su uso y ésta puede controlar el panel sin error alguno con un adecuado programa, además la capacidad de las PC actuales nos permite realizar varias tareas a la vez, con esto el programa de control del panel se puede ejecutar sin interferir con el trabajo cotidiano que se realiza en la PC.

### ***4.2 Sistema de control del panel***

En la figura 4.1 se observa el diagrama a bloques del sistema de control del panel.

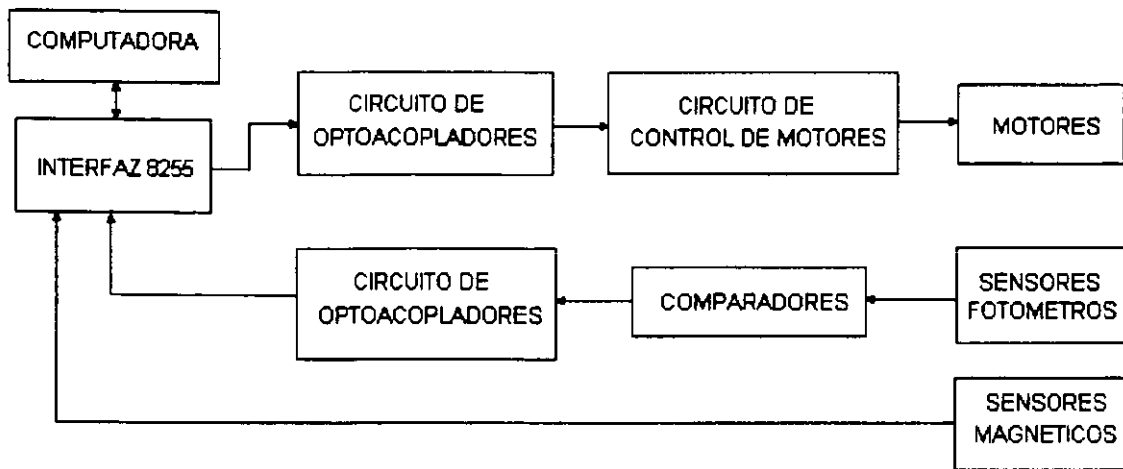


Figura 4.1 Diagrama a bloques del el panel con su sistema de control

A continuación se explica el funcionamiento de cada uno de los circuitos que conforman el diagrama a bloques.

### 4.3 Descripción de una computadora

Una computadora digital es una combinación de dispositivos y circuitos digitales que pueden realizar una secuencia *programada* de operaciones con un mínimo de intervención humana. A la secuencia de operaciones se le denomina programa. El programa es un conjunto de instrucciones codificadas que se almacena en la memoria interna de la computadora con todos los datos que el programa requiere. Cuando a la computadora se le ordena ejecutar el programa, esta lleva a cabo las instrucciones en el orden en que están almacenadas en la memoria hasta que el programa se completa. Esto lo hace a velocidades extremadamente altas sin cometer ningún error.

El *programador* ofrece un *programa* de instrucciones y datos que especifica todos los detalles de lo que debe hacerse, para qué hacerlo y cuándo hacerlo. La computadora es simplemente una maquina de alta velocidad que puede manipular datos, resolver problemas y tomar decisiones, todo bajo el control del programa. Si

el programador comete un error en el programa o introduce los datos equivocados, la computadora producirá resultados erróneos.

### 4.3.1 ORGANIZACION DE UN SISTEMA DE COMPUTADORA BASICO

Toda computadora contiene cinco elementos o unidades esenciales. La *unidad aritmética - lógica* (ALU por sus siglas en ingles) la *unidad de memoria*, la *unidad de control* la *unidad de entrada* y la *unidad de salida*. La interconexión básica de estas unidades se muestra en la figura 4.2.

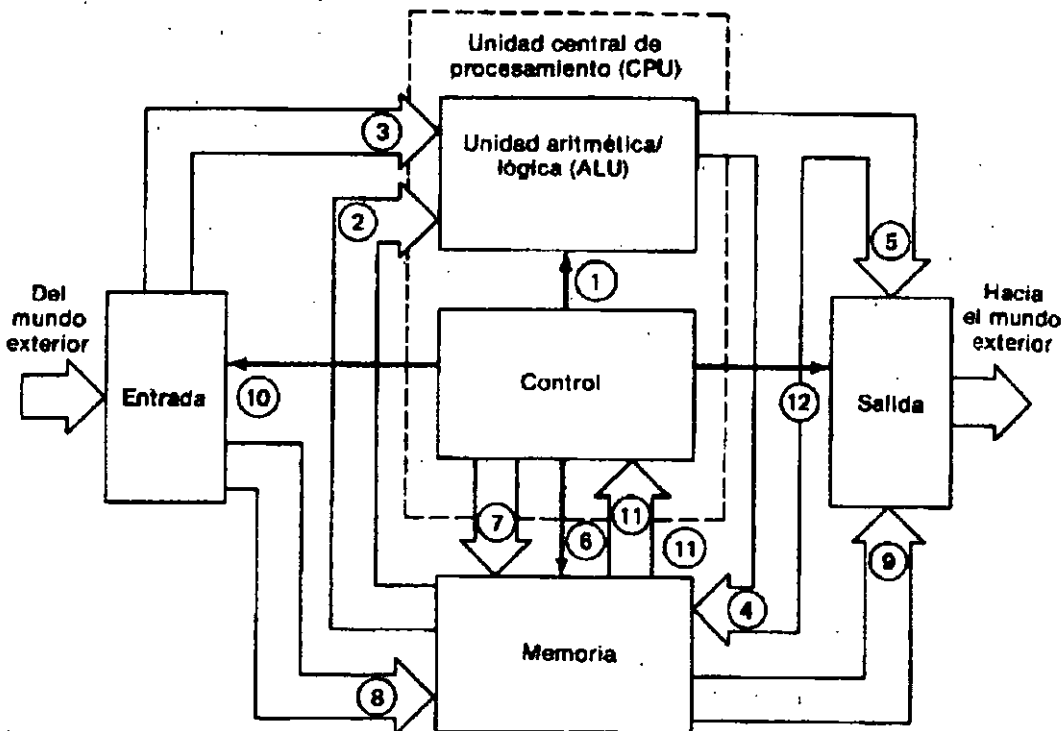


Figura 4.2 Organización básica de la computadora

Las flechas en este diagrama indican la dirección en la cual fluyen los datos, información o señales de control. Se usan dos flechas de diferente tamaño; las flechas mayores representan datos o información que consiste en un número relativamente grande de líneas paralelas y las flechas menores representan señales de control que por lo general son solo una o unas cuantas líneas. Las



diversas flechas también se numeran para permitir un fácil acceso a ellas en las descripciones que siguen.

#### **4.3.1.1 Unidad aritmética - lógica**

La ALU es el área de la computadora en la cual se realizan operaciones aritméticas y lógicas con datos. El tipo de operación que se realizará se determina por medio de señales de la unidad de control (flecha 1). Los datos que serán utilizados por la ALU pueden provenir de la unidad de memoria (flecha 2) o de la unidad de entrada (flecha 3). Los resultados de operaciones realizadas en la ALU pueden transferirse a la unidad de memoria para ser almacenados (flecha 4) o a la unidad de salida (flecha 5).

#### **4.3.1.2 Unidad de memoria**

La memoria almacena grupos de dígitos (palabras) binarios que pueden representar instrucciones (programa) que la computadora ejecutará y los datos que serán operados por el programa. La memoria sirve también como almacenamiento de resultados intermedios y finales de operaciones aritméticas (flecha 4). La operación de la memoria es controlada por la unidad de control (flecha 6), que indica una operación de lectura o de escritura. Una localidad dada en la memoria se accesa por la unidad de control la cual proporciona el código de dirección adecuado (flecha 7). Puede escribirse información en la memoria de la ALU o de la unidad de entrada (flecha 8) una vez más bajo el control de la unidad de control. Puede leerse información de la memoria de la ALU (flecha 2) o de la unidad de entrada (flecha 9).

La palabra memoria se refiere a cualquier dispositivo que almacena información para su uso posterior. De esta forma la memoria de un ordenador puede dividirse en dos categorías. Una relacionada con la parte del ordenador que

---

mantiene las instrucciones y los datos sobre los que se está operando actualmente. La otra categoría consta de los recursos que puedan almacenar la información; la cual debe ser transferida a la memoria de la primera categoría antes de que pueda ser utilizada por el procesador.

Uno de los principales atributos de una memoria es poder retener su contenido cuando se apaga la alimentación (memoria ROM, EPROM, etc) . Una memoria que puede hacerlo se dice que no es volátil, y en el caso contrario, que es volátil. Si la memoria es no volátil, entonces es importante si contiene instrucciones básicas y principales, pues al haber una falla de suministro energético, las instrucciones no se pierden, caso contrario lo que sucede en un memoria volátil en donde se pierde toda la información almacenada (RAM).

La memoria en la computadora esta dividida en varias partes. la memoria convencional es un bloque contiguo de 640 K bytes. Generalmente los programas de computadora corren en esta región. La región inmediatamente arriba de la memoria convencional, 640 K a 1024 K, contiene varias cosas, como la memoria para la pantalla y el BIOS en ROM, que controla componentes de la computadora como discos y teclado. A esta región se le llama Bloque de memoria superior (Uper memory block - UMB). La memoria expandida, formada por tarjetas especiales de memoria, aparece como parte de UMB. Algunos programas están diseñados para correr en memoria expandida.

En las computadoras 286 y posteriores es posible que se tenga memoria por encima de 1024 K (1 M byte). A esta área se le llama área de memoria extendida (Extended Memory Area - XMA).En la figura 4.3 se muestra el diagrama de la memoria.

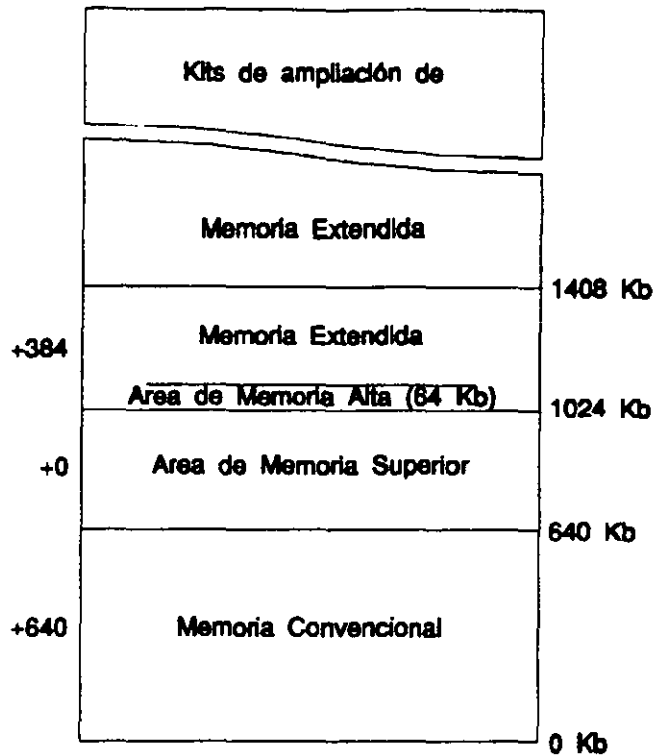


Figura 4.3 Diagrama de la memoria

La memoria virtual consiste en permitir al programador emplear un gran espacio de memoria (memoria virtual), generalmente contenido en un disco. Como se sabe el CPU solo puede acceder a través de las patitas que conforman sus buses a la memoria principal, que es la que hay implementada con circuitos integrados RAM y ROM, cuya capacidad es notablemente más pequeña que la memoria virtual, por volumen, precio y limitación de las líneas del bus de direcciones.

En todo momento, las instrucciones y datos que precisa la CPU deben residir en la memoria principal. El problema a resolver consiste en tener almacenada en la memoria principal, los bloques que precisa la CPU. Como en la memoria física no caben todos los bloques de la memoria virtual, se precisa de un mecanismo, denominado Unidad de Manejo de Memoria (MMU), que mantiene actualizada la memoria principal y se encarga de realizar las transferencias necesarias entre memoria virtual y memoria principal.

#### **4.3.1.3 Unidad de entrada**

Esta unidad consta de todos los dispositivos que se usan para tomar información y datos externos a la computadora; y colocarlos en la unidad de memoria (flecha 8) o la ALU (flecha 3). La unidad de control determina hacia donde se envía la información de entrada (flecha 10). La unidad de entrada se utiliza para meter el programa y los datos en la unidad de memoria antes de poner en marcha la computadora. Esta unidad se usa asimismo para introducir datos en la ALU desde un dispositivo externo durante la ejecución de un programa. Algunos de los dispositivos de entrada comunes son los teclados, interruptores, lectoras de tarjetas perforadas, unidades de disco magnético, unidades de cinta magnética y convertidores de analógico a digital (ADC).

#### **4.3.1.4 Unidad de salida**

Esta unidad consta de los dispositivos que se usan para transferir datos e información de la computadora al "mundo exterior". Los dispositivos de salida son dirigidos por la unidad de control (flecha 12) y pueden recibir datos de la memoria (flecha 9) o de la ALU (flecha 5), los cuales después se ponen en forma adecuada para su uso externo. Algunos ejemplos de dispositivos de salida comunes son dispositivos de exhibición LED, luces indicadoras, unidades de disco o cinta, monitores de video y convertidores de digital a analógico.

Conforme la computadora ejecuta su programa, generalmente tiene resultados o señales de control que debe presentar al mundo exterior. Por ejemplo, un sistema de computación podría tener una impresora de líneas como dispositivo de salida. Aquí, la computadora envía señales para imprimir los resultados en papel. Una microcomputadora podría exhibir sus resultados en luces indicadoras o en dispositivos de exhibición visual LED.

#### **4.3.1.5 Interfaz**

El aspecto más importante de las unidades de entrada / salida (E/S) implica la interfaz, que puede definirse como la unión de dispositivos que trabajan diferente tipo de señales, en tal forma que puedan funcionar de manera compatible y coordinada. La interfaz de la computadora se define más específicamente como la sincronización de la transmisión de información digital entre la computadora y dispositivos externos de entrada / salida.

Muchos dispositivos de entrada / salida no son directamente compatibles con la computadora debido a diferencias en características como velocidad de operación, formato de datos, modo de transmisión de datos (serial paralelo) y nivel de señales lógicas. Dichos dispositivos E/S requieren circuitos especiales de interfase que les permitan comunicarse con las porciones control, memoria y ALU del sistema de la computadora. Un ejemplo común es la terminal de video (VDT), la cual puede operar como dispositivo de entrada y de salida. La VDT transmite y recibe datos en serie (1 BIT a la vez) mientras que la mayoría de las computadoras manejan datos en la forma paralela. Por lo tanto, una VDT requiere circuitos de interfase a fin de enviar o recibir datos de una computadora.

#### **4.3.1.6 Unidad de control**

La función de la unidad de control es dirigir la operación de las otras unidades ofreciendo señales de temporización y control. En cierto sentido, es como el director de una orquesta, quien es responsable de mantener a cada uno de los miembros en sincronización adecuada. Esta unidad contiene circuitos lógicos y de temporización que generan señales adecuadas que se necesitan para ejecutar cada instrucción en un programa.

La unidad de control extrae una instrucción de la memoria enviando una dirección (flecha 7) y un comando de lectura (flecha 6) a la unidad de memoria. La palabra de instrucción almacenada en la localidad de la memoria se transfiere después a la unidad de control (flecha 11). Esta palabra de instrucción la cual está en alguna forma de código binario, es decodificada después por los circuitos lógicos de la unidad de control para determinar que instrucción es solicitada. La unidad de control utiliza esta información para generar las señales necesarias para ejecutar la instrucción.

#### **4.3.1.7 Unidad central de procesamiento (CPU)**

En la figura 4.2, la ALU y las unidades de control se muestran combinadas en una unidad denominada unidad central de procesamiento CPU por sus siglas en inglés. Esto se hace comúnmente con el objeto de separar el "cerebro" real de la computadora de las otras unidades. Se utiliza la denominación CPU debido a que en la microcomputadora la CPU está encapsulada en un solo circuito integrado llamado microprocesador (MPU).

El MPU es el corazón de cualquier microcomputadora. Realiza muchas funciones, entre las cuales se incluyen las siguientes:

- Proporcionar las señales de control y temporización para todos los elementos de la microcomputadora.
- Extraer las instrucciones y los datos de la memoria.
- Transferir los datos a y desde la memoria y los dispositivos de entrada / salida.
- Decodificación de instrucciones

- Ejecutar las operaciones aritméticas y lógicas invocadas por las instrucciones.
- Responder a las señales de control generadas en entrada / salida tales como reinicio e interrupción.

El MPU contiene toda la circuitería lógica necesaria para llevar a cabo las funciones anteriores pero, en general, no existe manera de tener acceso a la lógica interna. En lugar de ello, se puede controlar lo que ocurre dentro del MPU mediante un programa formado por varias instrucciones mismo que se coloca en la memoria para que el MPU lo ejecute. Esto es lo que hace al MPU tan versátil y flexible, cuando se desea cambiar, solo es necesario cambiar los programas almacenados en la RAM (software) o grabada en la ROM (firmware) sin necesidad de cambiar la electrónica (hardware).

La lógica interna del MPU es muy compleja pero puede considerarse como formada por tres secciones básicas: la sección de control y temporización, la sección de registros y la ALU como se observa en la figura 4.4. Aunque existen interacciones bien definidas entre estas secciones, cada una tiene funciones específicas.

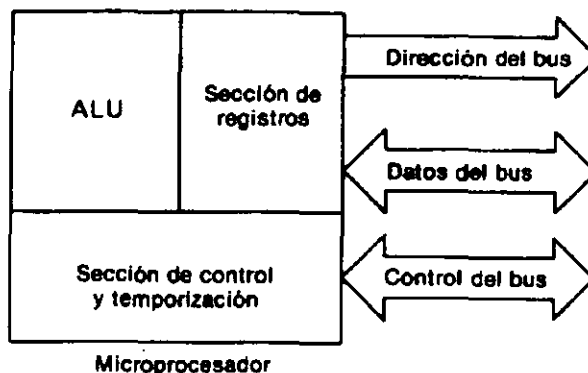


Figura 4.4 Áreas de funcionamiento para un MPU

La función principal de la sección de control y temporización es traer de la memoria y decodificar las instrucciones que están en la memoria y que forman parte de un programa, para después generar las señales de control necesarias

para ejecutar las instrucciones. Esta sección también genera las señales de control y temporización para la RAM, ROM y dispositivos de E / S externos.

La sección de registros contiene varios registros y cada uno tiene una función especial. El más importante de todos es el contador de programa, el cual mantiene la dirección donde se encuentra la siguiente instrucción que se extraerá de la memoria. Los demás registros del MPU se emplean para realizar funciones tales como guardar los códigos correspondientes a las instrucciones mientras estas son decodificadas, retener los datos que constituyen los operandos con los que trabaja la ALU, almacenar las direcciones donde se encuentran los datos en la memoria y varias funciones más de conteo y almacenamiento con propósitos generales.

La ALU efectúa una gran variedad de operaciones aritméticas y lógicas. Estas operaciones siempre incluyen la adición y la sustracción, y las operaciones lógicas AND, OR, EX-OR, corrimiento, incremento y decremento. Los MPU más avanzados tienen una ALU que realiza operaciones de multiplicación y división. Durante la operación de la microcomputadora, las operaciones que la ALU realiza se llevan a cabo bajo el control de la sección de control y temporización la que hace lo que indican los códigos de instrucción que trae de la memoria.

#### **4.4 La interfaz programable con el CI 8255**

##### **4.4.1 Funcionamiento del C.I.8255**

El C.I. 8255 es un circuito programable de 24 entradas / salidas de utilización general, diseñado originalmente para ser acoplado a los microprocesadores INTEL 8080 y 8085, aunque puede ser utilizado por cualquier microprocesador. Dispone de 24 terminales (pines) de E/S que pueden ser agrupados en tres grupos de 8 bits (puertos) A, B y C. Los 8 bits del puerto C



pueden ser utilizados individualmente o ser agrupados en dos puertos de 4 bits cada uno C alto (Ch) y C bajo (Cl).

En la figura 4.5 se muestra la disposición de los pines del C.I. 8255

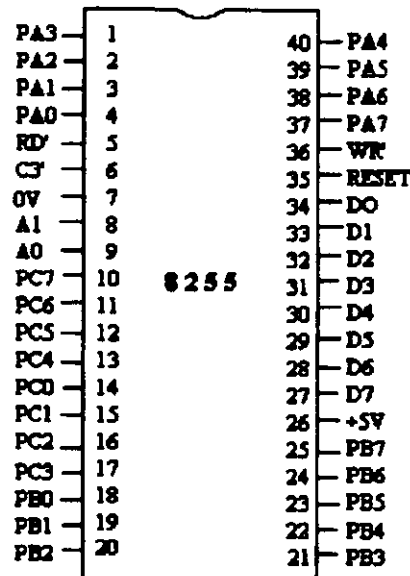


Figura 4.5 disposición de los pines del C.I 8255

La función de cada uno de los pines son:

- D7 - D0      Conexión al bus de datos
- RESET      Inicialización o puesta a cero
- CS'        Selección del circuito integrado
- RD'        Entrada de la señal de lectura
- RW'        Entrada de la señal de escritura
- A0 - A1      Líneas de dirección de los cuatro registros internos
- PA7 - PA0    Puerto A de E/S
- PB7 - PB0    Puerto B de E/S
- PC7 - PC0    Puerto C de E/S
- Vcc - GND    Alimentación

Las características eléctricas del circuito se muestran en la tabla 1:

**CARACTERISTICAS DE CORRIENTE DIRECTA (DC)**

Símbolo	Parámetro	Mínimo	Máximo	Unidad	Condiciones de prueba
V <sub>IL</sub>	Voltaje bajo de entrada	-0.5	0.8	V	
V <sub>IH</sub>	Voltaje alto de entrada	2.0	VCC	V	
V <sub>OL</sub> (DB)	Voltaje bajo de salida (Bus de datos)		0.45	V	I <sub>OL</sub> =2.5mA
V <sub>OH</sub> (PER)	Voltaje bajo de salida (Puerto periférico)		0.45	V	I <sub>OL</sub> =1.7mA
V <sub>OH</sub> (DB)	Voltaje alto de salida (Bus de datos)	2.4		V	I <sub>OH</sub> =-400µA
V <sub>OH</sub> (PER)	Voltaje alto de salida (Puerto periférico)	2.4		V	I <sub>OH</sub> =-200µA
I <sub>DAR</sub>	Corriente darlington de manejo	-1.0	-4.0	mA	R <sub>ext</sub> =750Ω V <sub>ext</sub> =1.5V
I <sub>CC</sub>	Corriente de suministro		120	mA	
I <sub>IL</sub>	Corriente de entrada de llamada		±10	µA	V <sub>in</sub> =V <sub>CC</sub> a 0V

Características de corriente directa.

Temperatura ambiente T<sub>A</sub>=0°C a 70°C, V<sub>CC</sub>=+5V ±10%, GND=0V

Tabla 1 Características de corriente directa del C.I. 8255

El 8255 puede ser programado en tres distintas modalidades principales:

**A) Modo 0: E/S básica**

En esta forma de funcionamiento los puertos A y B, de 8 bits cada uno, y los puertos C alto y C bajo, de 4 bits cada uno, pueden funcionar como entradas o salidas independientes.

**B) Modo 1: E/S controlada**

En el modo 1 los puertos A y B se pueden programar como entradas o como salidas, utilizando varias líneas del puerto C para el control.

El registro C, cuando los puertos A y B son entradas, se utiliza para emitir o para recibir las siguientes señales:

STB (Strobe) Señal

IBF (Input buffer Full) entrada de buffer lleno

INTR (Interrupt) Interrupción

Cuando el dispositivo se programa para que los puertos A y B se comporten como salidas, las señales de control que son emitidas o recibidas por el puerto C son las siguientes:

OBF (Output Buffer Full) Salida de Buffer llena

ACK (Acknowledge) Reconocimiento

INTR (Interrupt) Interrupción

---

Para el funcionamiento en el modo 1, con los puertos A y B como entradas, los bits C5, C4 y C3 se utilizan para el control del puerto A, y los bits C2, C1 Y C0 para el control del puerto B. C7 y C6 se pueden usar como entradas o salidas.

Cuando el dispositivo externo envía datos al 8255, a través del bus correspondiente, activa la línea STB a nivel cero para comunicar el envío. El 8255 responde a nivel 1 la señal de IBF, para indicar la aceptación de la información.

A partir de este momento pueden ocurrir dos cosas, según la forma de trabajo elegida:

1.- Si se conecta la salida INTR directamente a microprocesador, el 8255 manda una solicitud de interrupción a dicho dispositivo y este lee el dato del puerto correspondiente (A o B) poniendo a cero, automáticamente, INTR e IBF. La interrupción se produce si la bandera INTR lo permite.

2.- Si se utiliza una subrutina del programa para verificar el estado de los puertos de E/S, el microprocesador lee el puerto C, que se convierte en registro de estados del dispositivo, y comprueba la señal IBF para determinar si hay algún dato preparado para llevar al microprocesador. Si IBF vale 1, este dispositivo lee el puerto (A o B), transfiere el dato y pone a cero la bandera IBF.

Cuando los puertos A y B funcionan como salidas en modo 1, los bits C7, C6 y C3 se emplean para el control del puerto A y los bits C2, C1 y C0 para el control del puerto B. C4 y C5 se pueden utilizar como entradas o salidas.

En este caso el microprocesador transfiere los datos al puerto (A o B). La señal OBF pasa al nivel cero para indicar al periférico o dispositivo exterior que hay datos disponibles. Este lee OBF y responde colocando ACK a nivel cero para indicar la aceptación. La señal OBF pasa de nuevo a nivel 1.

### C) Modo 2: Bus bidireccional

Este modo de funcionamiento proporciona un bus bidireccional de 8 bits a través del puerto A. Para realizar esta operación son necesarias cinco líneas del puerto C, que se utilizan como control. Estas líneas son: OBF, ACK, STB, IBF e INTR. Los bits C2, C1 Y C0 como entradas o salidas.

Otra de las posibilidades del 8255 es la de programar, mediante la palabra de control, el puerto C, bit a bit. Cuando el bit D7 de la palabra de control vale cero, el 8255 interpreta que desea poner a cero o a uno (set/reset) cada uno de los bits del puerto C, por separado.

Las señales INTR de los puertos A y B. cuando trabajen en modo 1, y la del puerto A, en modo 2, pueden habilitarse o no, poniendo a uno o a cero, respectivamente, la bandera INTR asociado a estos puertos, activando o desactivando de forma individual el bit correspondiente al puerto C por el método descrito anteriormente.

#### 4.4.2 Descripción de la palabra de control

La palabra de control es la que define de que forma va a trabajar el circuito integrado 8255. Esta palabra se conforma de 8 bits y se define como se muestra en la figura 4.6

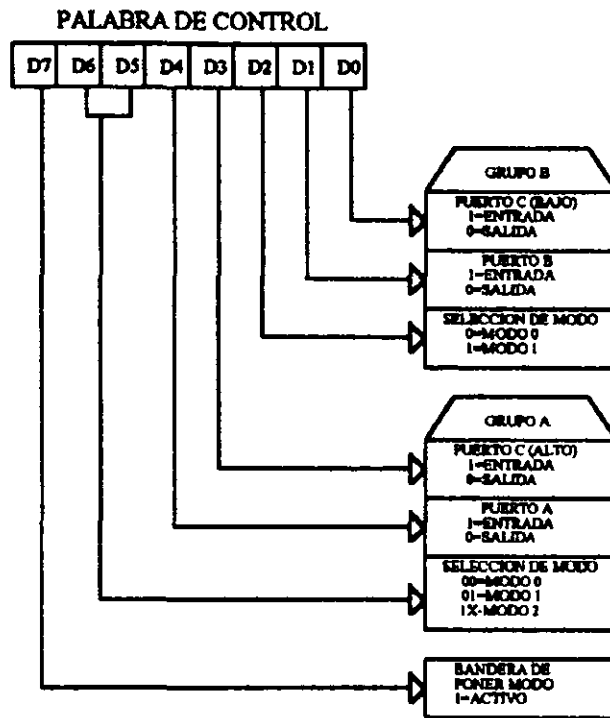


Figura 4.6 Esquema de la palabra de control

En el caso de la presente tesis la palabra de control que se utiliza es la siguiente:

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Bits de la palabra
1	0	0	0	1	0	1	1	Valor Binario
								139
								Valor Decimal

Lo cual nos indica que el C.I. 8255 estará activo (D7) y trabajará en el modo 0 de entrada y salida básica (D6 y D5), en donde, el puerto A funcionará únicamente como salida (D4) y el puerto B (D2 y D1) y el puerto C superior (D3) e inferior (D0) funcionan como entrada.

Esta forma de funcionamiento nos permite que los sensores de posición sean conectados al puerto B, los circuitos comparadores sean conectados al puerto C inferior, y los circuitos controladores de los motores se conecten al puerto

A. De esta forma las señales de entrada de los sensores de posición, los fotómetros y las señales de salida para el control de los motores, serán independientes estando cada una de las señales en un puerto diferente.

#### 4.4.3 Funcionamiento del C.I. 74LS688

El circuito integrado 74LS688 es un comparador de magnitud de 8 bits. Este dispositivo está diseñado para hacer comparaciones entre dos palabras de ocho bits. Se usa en la interfaz para comparar la dirección enviada por la computadora y la dirección asignada a la interfaz, cuando la comparación resulta igual este circuito integrado activa la entrada de selección de circuito (chip select) del circuito integrado 8255.

En la figura 4.7 se muestra el esquema y la disposición de los pines del circuito integrado.

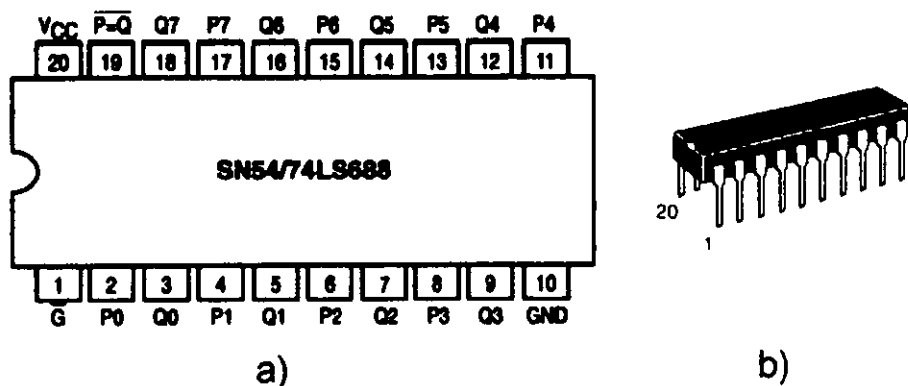


Figura 4.7. a) Esquema de la disposición de los pines del C.I. 74LS688 b) Esquema del C.I. 74LS688.

En las tablas 2 y 3 se muestran las especificaciones del circuito y su tabla de verdad.

Entradas			Salidas	
Dato	Activadas			
P,Q	$\overline{G}, GT$	$\overline{G2}$	$\overline{P=Q}$	$\overline{P>Q}$
P=Q	L	L	L	H
P>Q	L	L	H	L
P<Q	L	L	H	H
X	H	H	H	H

H= nivel alto L=nivel bajo X=no importa

Tabla 2 Tabla de verdad del C.I. 74LS688

Pin	Función
Vcc, Gnd	Alimentación
Q0-Q7	Grupo de datos a comparar
P0-P7	Grupo de datos a comparar
$\overline{G}$	Habilitación
$\overline{P=Q}$	Comparación

Tabla 3 Disposición de los pines del C.I. 74LS688

#### 4.4.4 Slot de expansión (BUS)

El Bus es una ranura que se encuentra en la tarjeta madre, y permite la transmisión de datos del MPU a otros dispositivos. En el bus se pueden insertar tarjetas o interfaces para ampliar la capacidad de la PC.

El éxito de la PC es directamente atribuible a la arquitectura abierta de su diseño original. Debido a las especificaciones del bus de expansión, los



fabricantes pueden diseñar y fabricar cualquier producto, con la garantía de que funcionara en cualquier PC.

El bus de expansión ha evolucionado a través de los años, en buena parte debido a la madurez tecnológica alcanzada. El bus de 8 bits del 8088 proporcionó paso al bus de 16 bits para el 80286 que, a su vez, dio paso al bus de 32 bits para el 386.

Un bus de expansión debe estar diseñando de manera que permita una fácil expansión del sistema, usando las tarjetas disponibles. Así, incluso el más modesto PC basado en el 8088, puede usar una tarjeta para super-VGA, aceleradora de Windows, modem/fax o cualquier otra de los miles de tarjetas disponibles. Independientemente de la tarjeta conectada, el bus de expansión tiene un único objetivo, que es transferir datos desde la placa principal a aquella, y viceversa. Para ello, se puede asemejar a una autopista de varios carriles. El número de carriles y la limitación de velocidad en ella debe estar en relación con las posibilidades de la CPU usada. En esto radica la clave de los distintos buses de expansión.

A continuación se describe el Bus ISA debido a que la interfaz que se utiliza está diseñada para este tipo de Bus.

#### **4.4.4.1 Bus ISA**

Sobre el bus ISA se basa la revolución de los PC allá por 1980. Su nombre procede de Industry Standard Architecture, esto es, arquitectura estándar para la industria. Desde su origen fue un bus de 8 bits y, como tal, estuvo en uso durante unos diez años. Con la aparición del PC AT en 1984, fue ampliado a 16 bits. Para hacerlos compatibles. La frecuencia de operación del bus de expansión era inicialmente de 4,77 MHz (coincidiendo con la velocidad de la CPU del IBM PC).

Con la aparición del PC AT, esta velocidad fue aumentada a 6 MHz y posteriormente a 8 MHz (una vez más, coincidiendo con la velocidad de la CPU). Ignorando las posibles mejoras futuras, IBM decidió cerrar su especificación a 8MHz. Pero, en menos de lo que se tarda en parpadear, las CPU estaban funcionando a 12 MHz o más, excediendo lo previsto en la especificación. Aunque algunos fabricantes, como NEC o Hewlett Packard, introdujeron tarjetas especiales en sus ordenadores, que eran capaces de funcionar con buses ISA a 16 MHz, la mayoría de las producidas por otros fabricantes presentaban problemas al funcionar por encima de los 10 MHz. Los diseños posteriores fueron modificados para que la velocidad de operación del bus fuera configurable, o bien incorporaban lógica adicional de forma que se introducían automáticamente estados de espera para que la velocidad resultante se ajustara a los 8 MHz. De esta manera, un ordenador a 16 MHz utilizará el bus de expansión a 8 MHz añadiendo un estado de espera, mientras que una CPU a 33 MHz necesitará cuatro estados de espera. Como vemos, el bus de expansión ISA produce un estrechamiento, un "cuello de botella", tanto mayor cuanto mayores sean las prestaciones de la CPU. En la figura 4.8 y en la tabla 4 se muestra la descripción física y su patillaje, resp

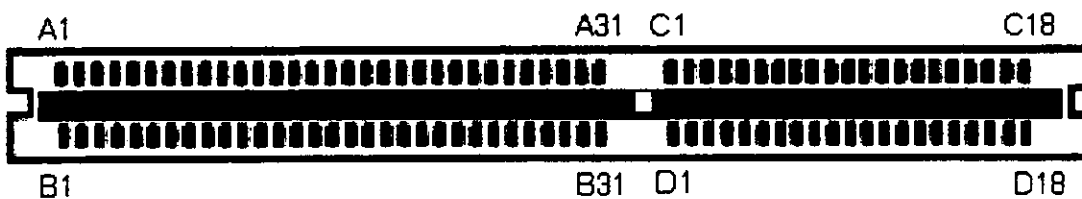


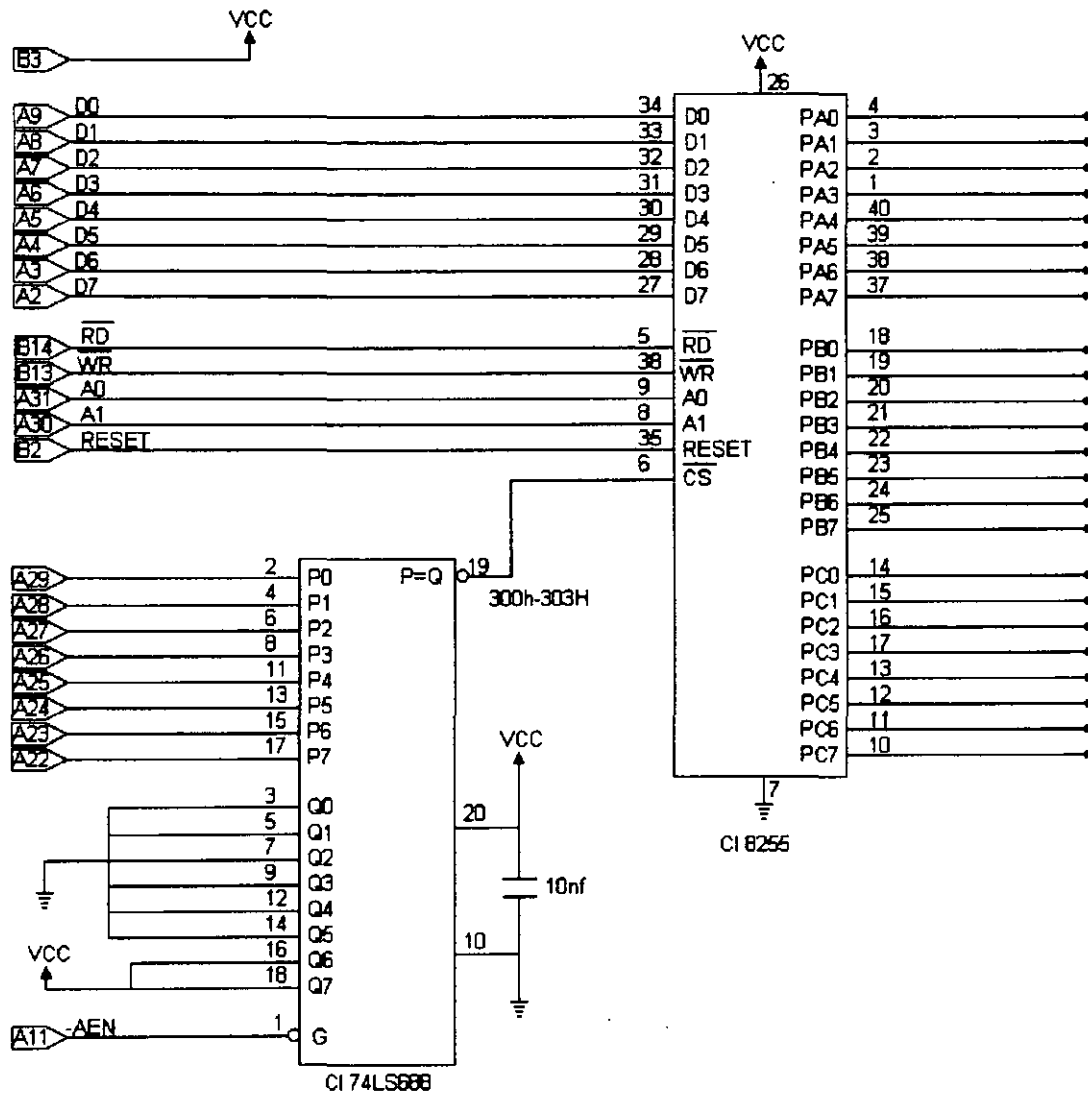
Figura 4.8 Esquema del slot ISA

SLOT de Expansión ISA

Descripción de la señal			Descripción de la señal
I/O Revisión de canal	A1	B1	Común
Dato bit 7	A2	B2	Control de reset
Dato bit 6	A3	B3	+ 5 volts
Dato bit 5	A4	B4	IRQ 9
Dato bit 4	A5	B5	- 5 volts
Dato bit 3	A6	B6	DRQ2
Dato bit 2	A7	B7	- 12 volts
Dato bit 1	A8	B8	Estado de espera a cero
Dato bit 0	A9	B9	+ 12 volts
I/O Canal listo	A10	B10	Común
Habilitación de dirección	A11	B11	Sistema de memoria de escritura
Dirección bit 19	A12	B12	Sistema de memoria de lectura
Dirección bit 18	A13	B13	I/O Escritura
Dirección bit 17	A14	B14	I/O Lectura
Dirección bit 16	A15	B15	DACK 3
Dirección bit 15	A16	B16	DRQ 3
Dirección bit 14	A17	B17	DACK 1
Dirección bit 13	A18	B18	DRQ 1
Dirección bit 12	A19	B19	Refresco
Dirección bit 11	A20	B20	Reloj del slot
Dirección bit 10	A21	B21	IRQ 7
Dirección bit 9	A22	B22	IRQ 6
Dirección bit 8	A23	B23	IRQ 5
Dirección bit 7	A24	B24	IRQ 4
Dirección bit 6	A25	B25	IRQ 3
Dirección bit 5	A26	B26	DACK 2
Dirección bit 4	A27	B27	Conteo de palabra terminal
Dirección bit 3	A28	B28	Habilitación de línea de dirección
Dirección bit 2	A28	B29	+ 5 volts
Dirección bit 1	A30	B30	Oscilador
Dirección bit 0	A31	B31	Común
Estado de bit habilitado en alto	C1	D1	Memoria de transferencia
LA23	C2	D2	Transferencia de datos
LA22	C3	D3	IRQ 10
LA21	C4	D4	IRQ 11
LA20	C5	D5	IRQ 12
LA19	C6	D6	IRQ 13
LA18	C7	D7	IRQ 14
LA17	C8	D8	DACK 0
Memoria de escritura	C9	D9	DRQ 0
Memoria de lectura	C10	D10	DACK 5
Bit de datos 8	C11	D11	DRQ 5
Bit de datos 9	C12	D12	DACK 6
Bit de datos 10	C13	D13	DRQ 6
Bit de datos 11	C14	D14	DACK 7
Bit de datos 12	C15	D15	DRQ 7
Bit de datos 13	C16	D16	+ 5 volts
Bit de datos 14	C17	D17	BUS maestro
Bit de datos 15	C18	D18	Común

Tabla 4 Patillaje del Bus ISA

4.4.5 Descripción de la interfaz propuesta



La interfaz que se utiliza para conectar el panel solar y la computadora se muestra en la figura 4.9.

Figura 4.9. Diagrama de la interfaz, la cual está compuesta por el C.I. 8255 y el C.I. 74LS688

Como se puede observar la interfaz está diseñada para bus tipo ISA y se compone de dos circuitos integrados, el C.I. 74LS688 y el C.I. 8255, de los cuales ya se explico su funcionamiento. En la interfaz el C.I. 74LS688 tiene como función la de activar al C.I. 8255, comparando la dirección que envía la computadora por

medio del bus ISA (terminales A22 a A29 y A11) con la dirección asignada a la interfaz. El C.I. 8255 recibe los datos que procesará por medio del bus ISA (terminales A2 a A9, A30, A31, B2, B3, B13 y B14)

La interfaz está diseñada en una tarjeta de circuito impreso de doble cara, que se muestra en la figura 4.10a y 4.10b , y las direcciones a las que responde son las que se muestran en la tabla 5.

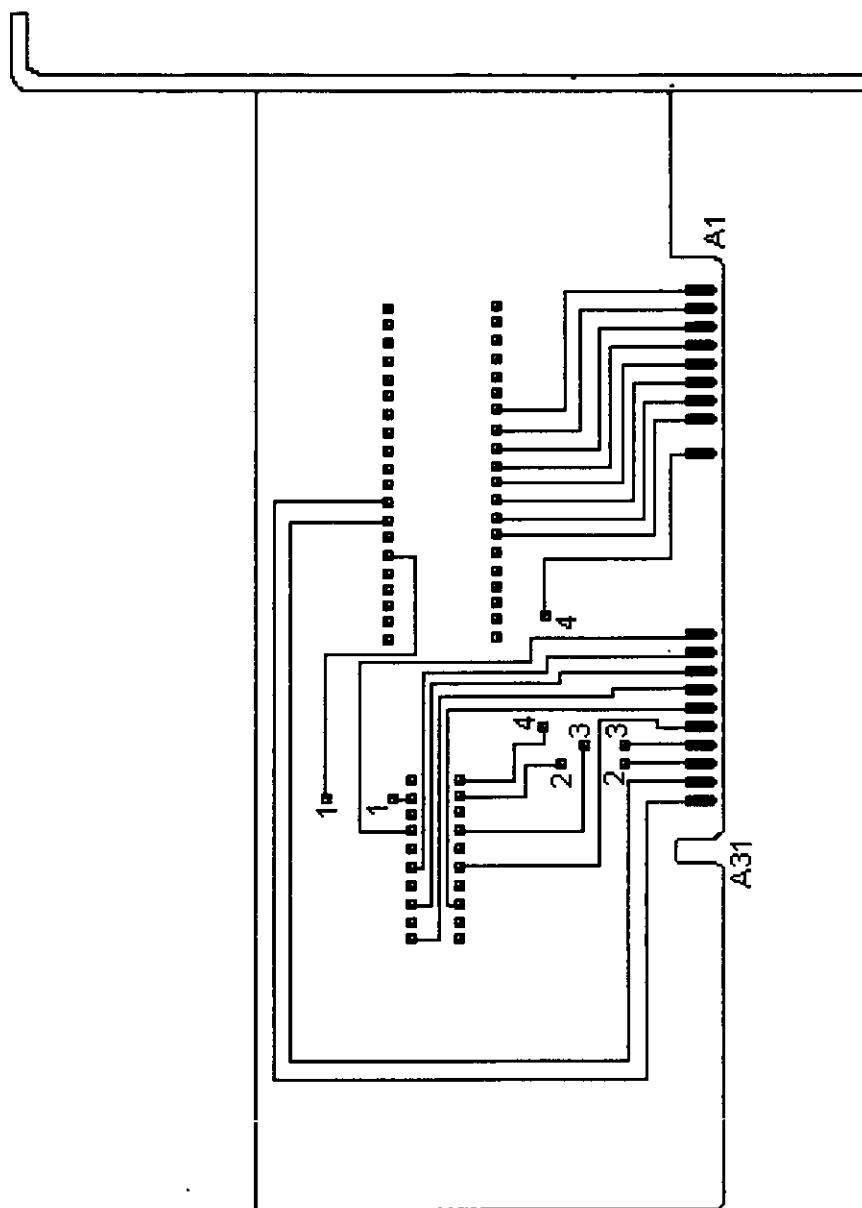


Figura 4.10a Circuito impreso de la interfaz 8255 cara a del slot

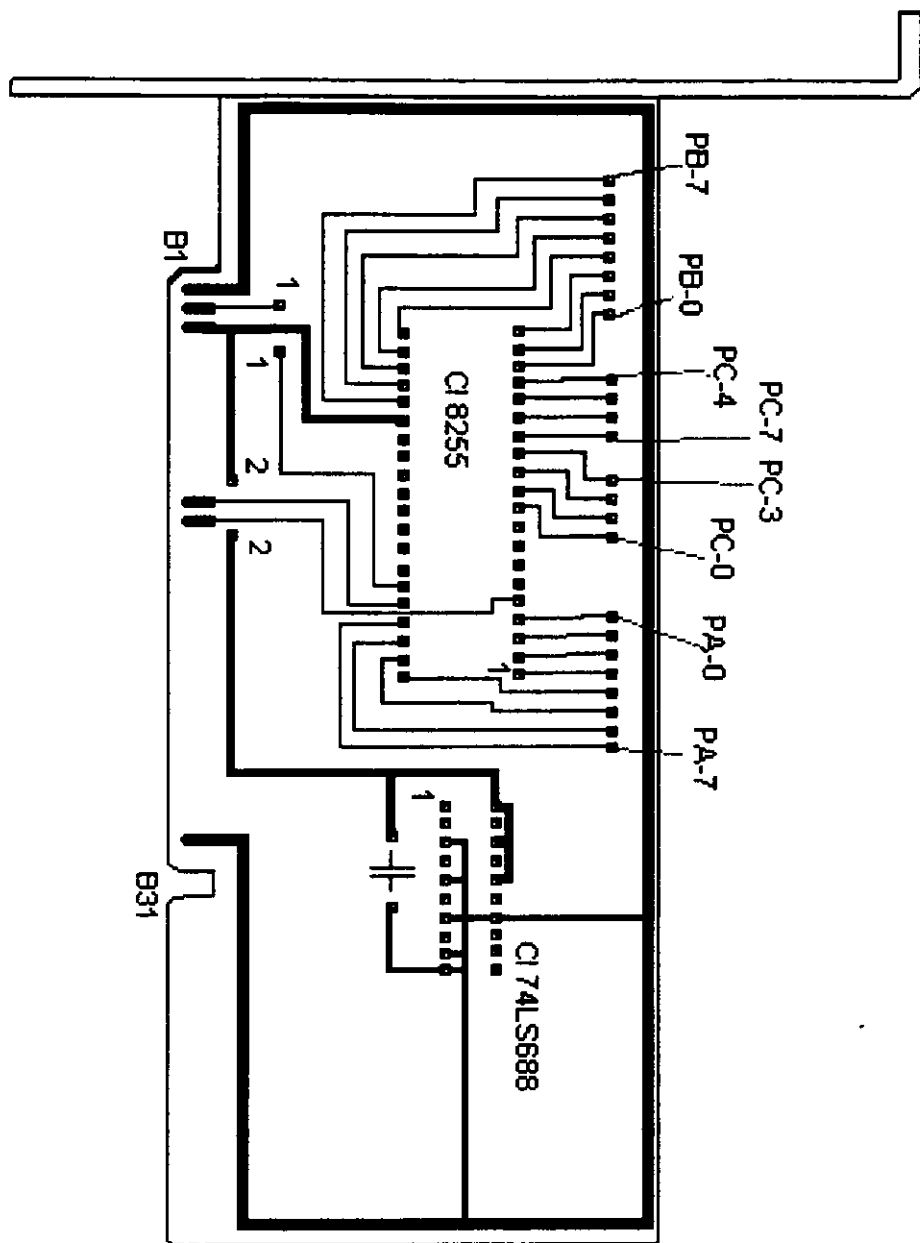


Figura 4.10 b Circuito impreso de la interfaz 8255 cara b del slot

Los circuitos impresos mostrados en las figuras 4.10a y 4.10b estan en escala 1:1.

Valor	Dirección de la palabra de control	Dirección del Puerto A	Dirección del Puerto B	Dirección del Puerto C superior e inferior
DECIMAL	771	768	769	770
HEXADECIMAL	303	300	301	302

Tabla 5 Direccionamiento de la interfaz

Para poner en funcionamiento esta interfaz, se tiene que asignar el modo de funcionamiento mediante la palabra de control, la cual se mandará a la dirección 303 en hexadecimal o 771 en decimal, dependiendo del lenguaje de programación utilizado. Una vez asignado el modo de funcionamiento, se puede hacer uso de los puertos A, B o C mandando o recibiendo las señales mediante las direcciones que se indican en la tabla 5.

#### **4.5 Circuitos para el control**

El panel solar va a ser controlado por la PC, para lo cual se requieren los siguientes circuitos que se encarguen de la comunicación entre la PC y el panel.

##### **4.5.1 Circuito de protección**

Para proteger la computadora de posibles fallas eléctricas (corto circuito, sobrecarga, variaciones de tensión) en el sistema que se va a controlar se utiliza un sistema con optoacoplador, el cual es el 4N33, y en la tabla 6 se muestran sus características eléctricas y en la figura 4.11 se muestra la disposición de los pines y la configuración interna.

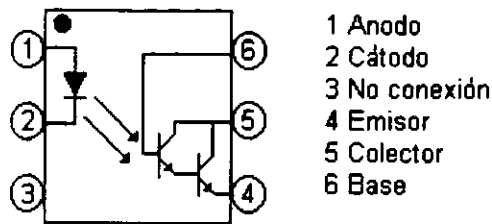


Figura 4.11 Configuración interna y disposición de los pines del optoacoplador 4N33.

Valores totales del dispositivo			Valores máximos del LED			Valores máximos del fototransistor		
Voltaje de aislamiento	Potencia total	Rango de transferencia de corriente DC	Corriente en directa	Voltaje en directa	Voltaje en inversa	Voltaje de colector base	Voltaje de colector emisor	Corriente de colector en oscuridad
(Volts)	(mW)	(%)	(mA)	(Volts)	(Volts)	(Volts)	(Volts)	(nA)
$V_{ISO}$	$P_T$	$C_{TR}$	$I_F$	$V_F$	$V_R$	$BV_{CBO}$	$BV_{CEO}$	$I_c$
7500	250	200	60	1.5	3	—	30	100

Tabla 6. Características eléctricas del optoacoplador 4N33

Se usa el optoacoplador como protección debido a que la señal que hay entre la computadora y el panel es únicamente luz, de tal forma que la computadora y el panel están aislados eléctricamente, por lo que si los circuitos de control llegan a tener una variación muy grande de voltaje o corriente, la computadora no se verá afectada o dañada.

#### 4.5.2 Circuito comparador de voltaje

Este circuito compara las señales que mandan los pares de sensores de luz (fotómetros) ya sea el par de sensores 1 y 2 o el par de sensores 3 y 4, que se encuentran en el marco del panel, de tal forma que cuando un par de sensores no



recibe la luz en forma perpendicular, este circuito manda una señal que indica una diferencia en la iluminación que recibe el panel.

El circuito que se propone en esta tesis es un circuito con un amplificador operacional en configuración de restador de voltajes, el cual se muestra en la figura 4.12.

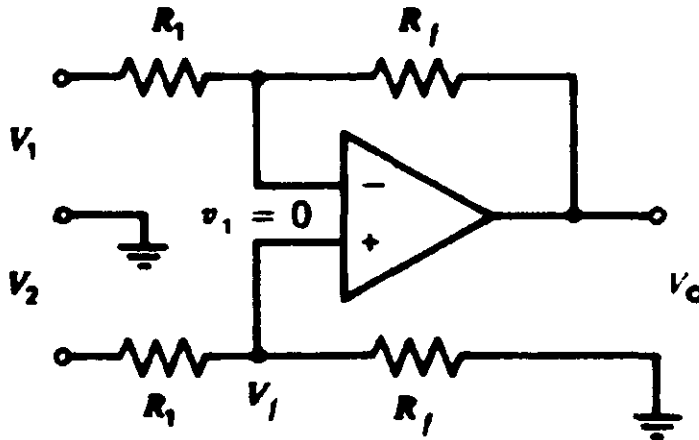


Figura 4.12 Circuito de restador de voltajes

En el circuito de restador de voltaje tenemos la conjugación de un amplificador inversor (entrada V1) y de un amplificador no inversor (entrada V2), por lo que la ecuación que se tiene en este circuito para el voltaje de salida es:

$$V_o = \frac{R_f}{R_1}(V_2 - V_1) \dots \dots \dots (4.1)$$

De la ecuación 4.1 se puede observar que cuando los voltajes de entrada (V1 y V2) sean iguales la salida de voltaje será cero, cuando el voltaje V1 sea mayor la salida será negativa y cuando el voltaje V2 sea mayor la salida será positiva. Como los sensores de luz están diseñados con las mismas características, el voltaje que entregaran cuando la radiación solar sea perpendicular al panel será el mismo, por lo que la señal de salida del circuito restador será cero volts, en cuanto la radiación solar no sea perpendicular algún

sensor entregara mayor voltaje, de tal forma que el circuito nos dará una señal diferente de cero, y esta señal pasara a un circuito de transistores PNP y NPN.

#### 4.5.3 Circuito inversor de transistores NPN y PNP

Estos transistores reciben la señal del restador y dependiendo de la señal que reciban se activara el NPN (señal positiva) o el PNP (señal negativa) de tal forma que el transistor que este activo presentará en su salida una señal de 12 V, la cual activa al optoacoplador de entrada. Cada transistor tiene un optoacoplador en su salida.

Para este circuito se proponen los transistores Tip 41 (NPN) y Tip 42 (PNP) de los cuales se muestran sus características en la tabla 6

Característica	Valor	Unidades
Voltaje colector-emisor	60	Vcd
Voltaje colector-base	60	Vcd
Voltaje emisor-base	5	Vcd
Corriente de colector		
Continua	6	Acd
Pico	10	
Disipación de potencia	65	Watts
25°C		
Ganancia de corriente		
Min	15	
Max	75	

Tabla 6. Características eléctricas de los transistores Tip 41 y Tip 42

En la figura 4.13 se muestra el circuito de los transistores.

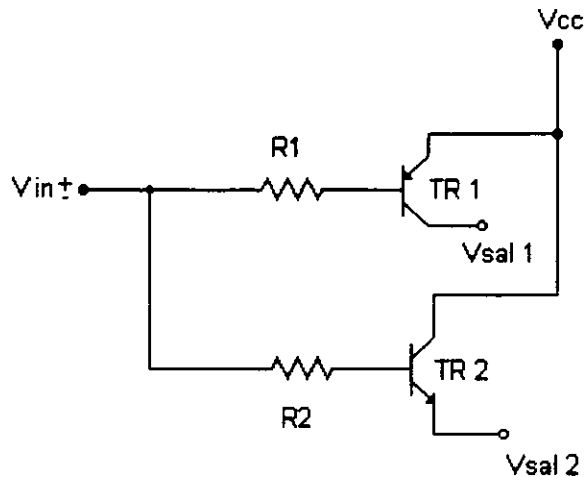


Figura 4.13 Circuito de Transistores PNP y NPN

Cuando se tiene una señal negativa se activa el transistor 1, el transistor 2 permanece en inversa y por lo tanto solo se tendrá un voltaje en la salida del transistor 1. Si se tiene una señal positiva el transistor que se activa es el TR 2 Y el transistor 1 se mantiene en inversa, por lo que solo se tiene señal en la salida del transistor 2. Se tienen dos salidas debido a que cada una de las señales que se obtienen indican un dato diferente a la computadora.

#### 4.5.4 Circuito de control de los motores

Cuando la computadora registra las señales de los sensores una vez que son iluminados por el sol y no es en forma perpendicular, la computadora manda una señal para que el panel sea movido y tome la posición para que la radiación sea en forma perpendicular.

Para lograr que los motores puedan girar en cualquier sentido se propone utilizar el circuito de control llamado H, el cual se muestra en la figura 4.14

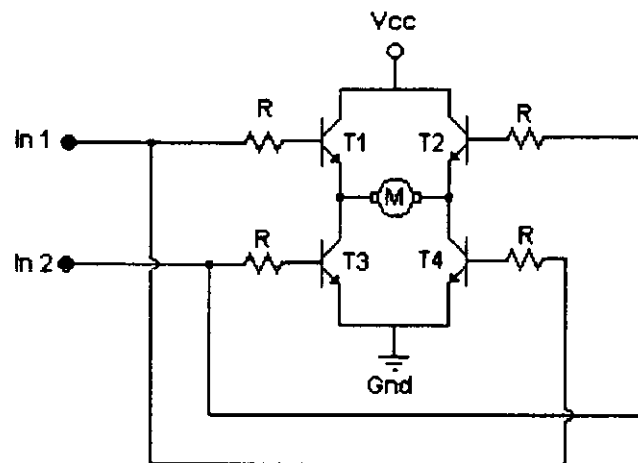


Figura 4.14 Circuito de control tipo H

Este circuito funciona de la siguiente manera: En la base de cada transistor está colocada una resistencia ( $R$ ) para limitar la corriente y poder hacer que el transistor trabaje en la región adecuada, además estos transistores tienen conectadas sus bases por pares ( $T1$  y  $T4$ ,  $T3$  y  $T2$ ), con el fin de que se activen por pares.

En este circuito se requiere que los transistores se encuentren en dos regiones, saturación y corte, de tal forma que los transistores se usan como interruptores.

Cuando la computadora manda una señal (1) a la entrada 1 ( $In 1$ ) del circuito, se saturan los transistores  $T1$  y  $T4$ ; mientras que  $T3$  y  $T2$  están en corte con la señal 0 en la entrada 2 ( $In 2$ ), de esta manera la corriente fluye a través del motor haciéndolo girar en sentido horario como se muestra en la figura 4.15 (a). Cuando la señal (1) llega a la entrada 2 del circuito ( $In 2$ ) los transistores  $T2$  y  $T3$  se encuentran en saturación; mientras que  $T1$  y  $T4$  conmutan a corte con la señal 0 en  $In 1$ , y el motor gira en sentido antihorario como se muestra en la figura 4.15(b).

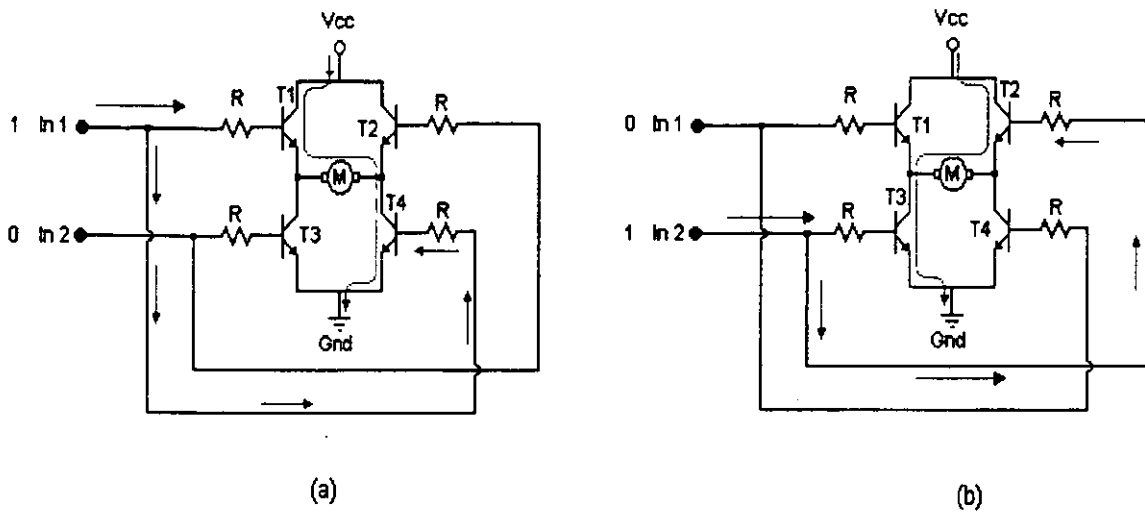


Figura 4.15 Diagrama de funcionamiento del circuito. (a) T1 y T4 en saturación, T2 y T3 en corte.  
 (b) T2 y T3 en saturación y T1 y T4 en corte.

El transistor que se utiliza para este circuito es el Tip 41 del cual se muestran sus características en la tabla 6.

**4.6 Diseño de los circuitos para el control.**

En los circuitos propuestos se realizaron los siguientes cálculos para obtener los valores de las resistencias, corrientes y voltajes necesarios para el funcionamiento del control.

A continuación se presentan los diagramas de:

- Senado de luz: que comprende los circuitos sensores de luz (fotómetros), restador de voltaje, inversor y optoacopladores.
- Control de movimiento del panel: que comprende los circuitos optoacopladores y circuito tipo H de control de motores

➤ Sensores de posición: que se conectan a la interfaz.

La figura 4.16 contiene el diagrama de los circuitos que se utilizan para sensar la luz y transformarla en una señal digital para ser leída por la computadora. Los fotómetros reciben la luz del sol y la transforman en una señal de voltaje (0 a 0.55v) que pasa al circuito restador, el cual compara y resta las señales y entrega un voltaje ( $\pm 12v$  dependiendo de la resta realizada) al circuito inversor, que dependiendo de la señal de entrada activa a uno de los transistores dando señal de salida solo en uno de los transistores, esta señal activa al optocoplador, el cual dará una señal de salida de 5V adecuada para la interfaz

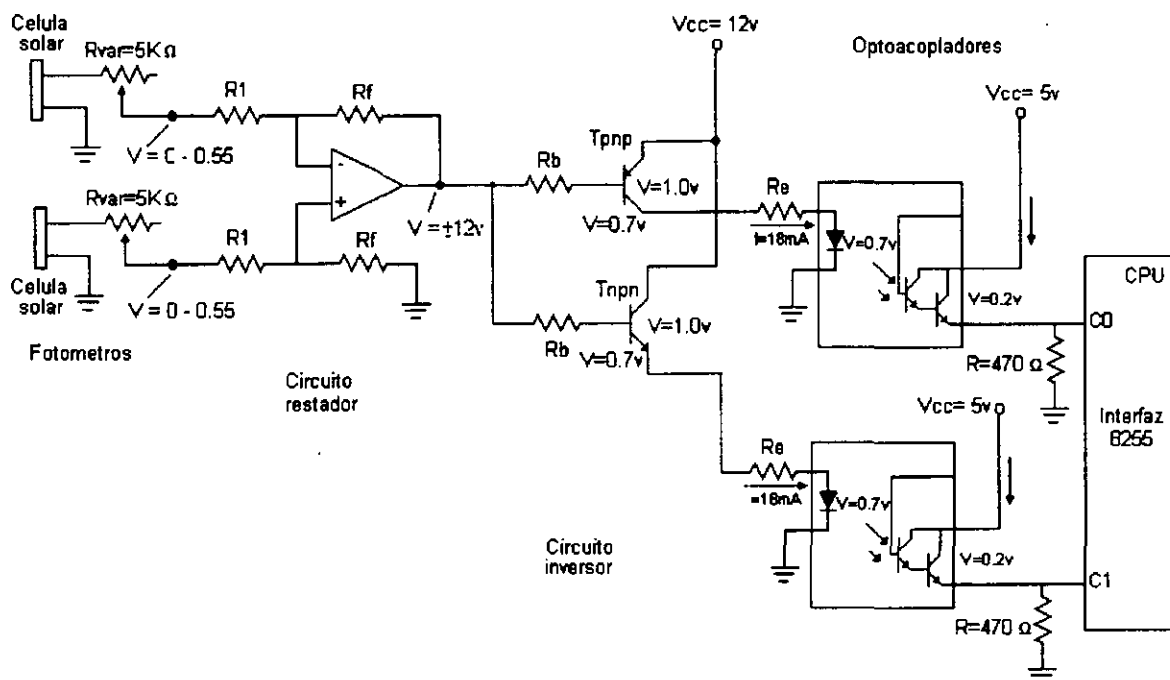


Figura 4.16 Diagrama del sensado de luz.

## a) Diseño del fotómetro

El fotómetro esta formado por una resistencia variable y una célula de silicio con las siguientes características (datos del fabricante):

Voltaje de circuito abierto  $V_{OC}=0.45 - 0.55 \text{ V}$

Corriente de corto circuito  $I_{SC}=60 \text{ mA}$

Dimensiones  $2 \times 2 \text{ cm}$

La resistencia variable es de  $5K\Omega$  para poder controlar la corriente que entrega a la salida y así evitar que la célula se dañe, ya que no debe trabajar con una corriente de  $60\text{mA}$  ( $I_{SC}$ ).

## b) Diseño del circuito restador:

Para el calculo de las resistencias  $R_1$  y  $R_f$  del circuito restador se utilizo la formula 4.1, tomando como voltaje de salida  $V_0 = \pm 12\text{v}$  debido a que este voltaje puede ser entregado por el mismo panel, y una diferencia de voltaje entre los voltajes de entrada ( $V_1$  y  $V_2$ ) de  $0.09 \text{ v}$ , debido a que con esta diferencia se logra que no sea muy sensible a pequeños movimientos y el panel no logre detenerse, por se tiene:

$$V_{sal} = \frac{R_f}{R_1}(V_2 - V_1), \quad 12 \text{ v} = \frac{R_f}{R_1}(0.09\text{v}),$$

$$\frac{R_f}{R_1} = \frac{12}{0.09}, \quad \frac{R_f}{R_1} = 134,$$

$$R_f = 134 R_1$$

como  $R_f = 134R_1$  se observa que el circuito amplifica la diferencia que hay entre las señales de entrada, proponiendo  $R_1 = 100 \Omega$ , se tendrán los siguientes valores:

$R_1 = 100\Omega$  y  $R_f = 13.4K\Omega$

Para el calculo de la potencia de las resistencias se utiliza la formula  $P = V^2/R$ , como el voltaje máximo con el que trabajan las resistencias es de 0.55 v, la potencia en las resistencias es:

$$P_{R1} = 0.003025W$$

$$P_{Rf} = 0.0000225W$$

Por lo que se propone que las resistencias sean a 1/4 W

c) Diseño del circuito inversor

Para el calculo de la resistencia de base  $R_b$  del circuito de transistores y la resistencia de salida  $R_e$  del circuito de transistores, se sigue la malla base emisor y la malla colector emisor que se muestra en el circuito de la figura 4.17.

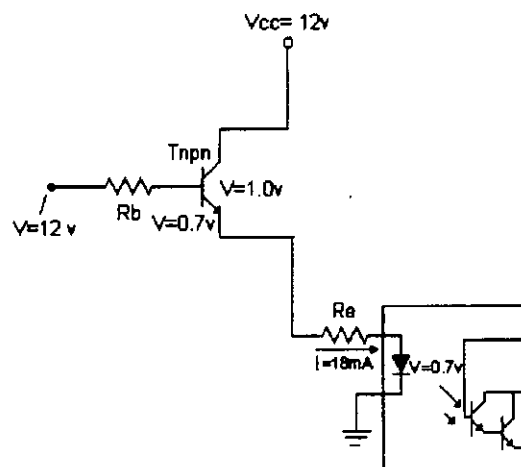


Figura 4.17 Circuito utilizado para el calculo de las resistencias ( $R_b$  y  $R_e$ )

Para el calculo de la resistencia  $R_e$  se tiene la ecuación 4.2:

$$V_{CC} = V_{CE} + I_E R_e + V_D \dots \dots \dots (4.2)$$



Donde voltaje de alimentación ( $V_{CC}$ )= 12 v ,debido a que es el voltaje que puede entregar el panel, voltaje colector-emisor ( $V_{CE}$ )=1v (voltaje de saturación, dato del fabricante), corriente de emisor ( $I_E$ )=18 mA, debido a que es la corriente que se necesita para que el diodo del optoacoplador funcione adecuadamente y voltaje del diodo ( $V_D$ )=0.7v (dato del fabricante)por lo que:

$$12v - 1v - 0.7v - 0.018A(Re) = 0,$$

$$Re = \frac{12 - 1 - 0.7}{0.018} = 572.222\Omega$$

Para la potencia que consume la resistencia:

$$P=VI \quad P=(10.3V)(18mA)=0.1854W$$

Como el valor de la resistencia no se encuentra comercialmente se propone que sea de 570Ω a 1/2 w.

Para la resistencia Rb se tiene la ecuación 4.3:

$$V_B = I_B Rb + V_{BE} + V_{Re} + V_D \dots\dots\dots(4.3)$$

Donde voltaje de base ( $V_B$ )=12v, voltaje base-emisor ( $V_{BE}$ )=0.7v, voltaje en la resistencia Re ( $V_{Re}$ )=10.3 y  $V_D = 0.7$

Como  $I_B = I_E / (\beta + 1)$ ,  $I_B = 0.018A / (70 + 1)$  entonces  $I_B = 0.2535mA$

Sustituyendo los valores en la ecuación 4.3:

$$12V - Rb(0.2535mA) - 0.7v - 10.3v - 0.7v = 0$$

$$Rb = \frac{0.34v}{0.2535mA}$$

$$Rb = 1341.22\Omega$$

Para la potencia  $P=VI \quad P=(0.34v)(0.2535mA)=0.86mW$

Por lo que se propone una resistencia de 1.4KΩ a 1/4 W

Para los dos transistores del circuito se utilizan los mismos valores de resistencias ya que son transistores complementarios.

d) Diseño del circuito optoacoplador

De el optoacoplador a la interfaz se tiene en paralelo una resistencia de  $470 \Omega$ , con el fin de que cuando el optoacoplador se encuentre en corte la interfaz no lo interprete como alta impedancia "1" lógico, Se toma en cuenta que a la computadora le llegara un voltaje de 4.8 v ya que el voltaje de saturación del darlington es de 0.2V(dato del fabricante).

En la figura 4.18 se muestra el diagrama de los circuitos que se utilizan para el movimiento del panel.

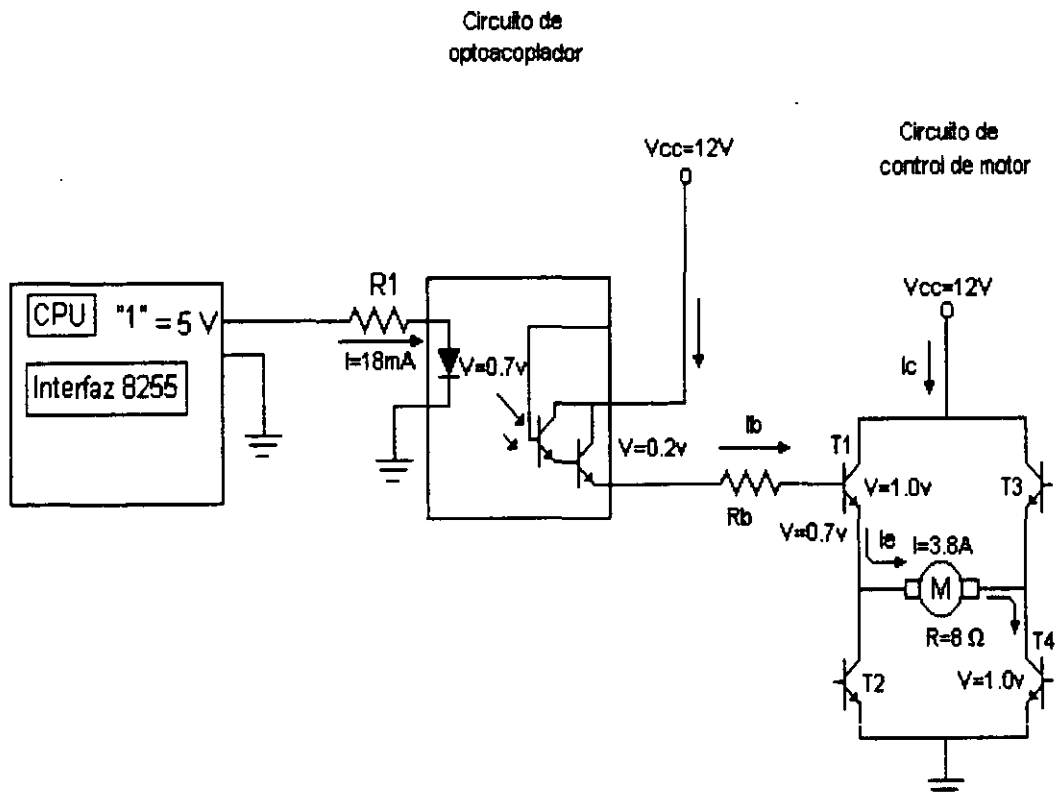


Figura 4.18 Diagrama de control de movimiento del panel.

a) Diseño del circuito CPU optoacoplador

Para el cálculo de la resistencia de entrada del optoacoplador (R1) se tiene la ecuación  $5v=R1(I) +V_D$   $5v=R1(18mA) +0.7v$ . Se utilizan 5v debido a que la computadora entrega "1" logico que es equivalente a 5v y 18mA debido a que es la corriente que utiliza el diodo del optoacoplador para funcionar.

Despejando R1:

$$R1 = \frac{5 - 0.7}{0.018}$$

$$R1 = 238.88\Omega$$

Para la potencia  $P=VI$   $P=(4.3v)(0.018A)=0.0774W$

Por lo que se propone que la resistencia sea de  $220\Omega$  a  $1/2 W$ .

b) Diseño del circuito de control de motor

Para el calculo de la resistencia Rb se utiliza la malla que comprende Vcc, optoacoplador, T1, motor M y T4, donde se tiene la ecuación 4.4:

$$V_{CC} = V_{CE} + (I_b)R_b + V_{BE1} + (I_m)(R_m) + V_{CE4} \dots\dots\dots(4.4)$$

Donde  $V_{CC}=12v$ ,  $V_{CE} = 0.2$  (voltaje de saturación), voltaje base-emisor del transistor T1 ( $V_{BE1}$ )= $0.7v$ , resistencia del motor ( $R_m$ )= $6\Omega$  y voltaje colector-emisor del transistor T4 ( $V_{CE4}$ )= $1v$ .

Para el calculo de la corriente del motor ( $I_m$ ) se utiliza la malla que comprende VCC, T1, motor y T4, ecuación 4.5.

$$V_{CC} = V_{CE1} + R_m(I_m) + V_{CE2} \dots\dots\dots(4.5)$$

Sustituyendo valores en la ecuación 4.5:

$$12v = 1v + 6\Omega(I_m) + 1v$$

Despejando  $I_m$

$$I_m = \frac{12v - 1v - 1v}{6\Omega}$$

$$I_m = \frac{10v}{6\Omega}$$

$$I_m = 1.66A$$

Para la corriente de base se tiene que la corriente del motor es igual a la corriente del emisor por lo que:

$$I_b = I_e / (\beta + 1)$$

$$I_b = 1.66 / 76 \quad I_b = 0.0218 A$$

Sustituyendo en la ecuación 4.4 se tiene:

$$12v - 0.2v - 0.7v - 9.96v - 1.0v - (R_b)(0.0218A) = 0$$

$$R_b = \frac{0.14}{0.0218} = 6.42\Omega$$

Para la potencia de la resistencia

$$P = VI \quad P = (0.14v)(0.0218) = 0.00392 W$$

Por lo que se propone una resistencia de  $6\Omega$  a  $1/2 w$

En la figura 4.18 se muestra el diagrama de conexión de los sensores de posición a la computadora.

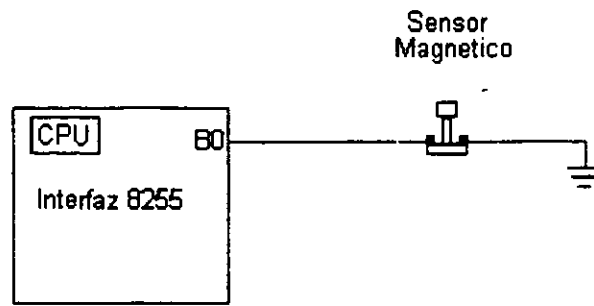


Figura 4.18 Diagrama de conexión del sensor magnético a la computadora.

En este caso el sensor está conectado a tierra con el fin de que la tarjeta siempre lea un "0" lógico, cuando el sensor se activa el circuito queda abierto por lo que la interfaz lo reconocerá como alta impedancia o un "1" lógico.

#### 4.7 Programa de control para la PC

El programa de control se encarga de procesar los datos que lee la interfaz de los sensores y entregar los datos (resultado del procesamiento de la información) a la interfaz para que pueda mandarlos a los actuadores (motores).

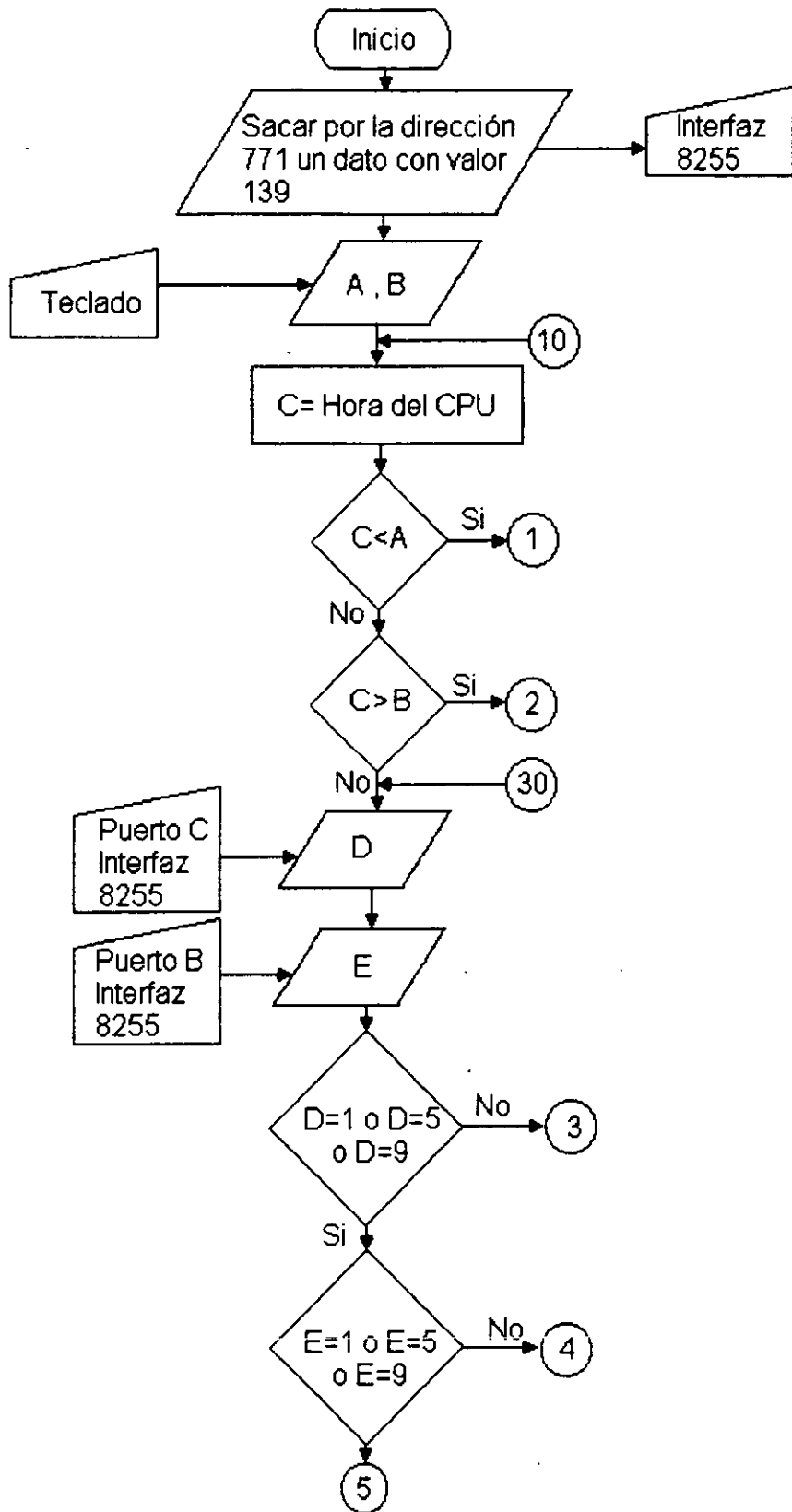
El funcionamiento del programa se describe con el algoritmo, diagrama de flujo y además se presenta el listado del programa, el cual está hecho en lenguaje C debido a que este lenguaje es compatible con cualquier PC.

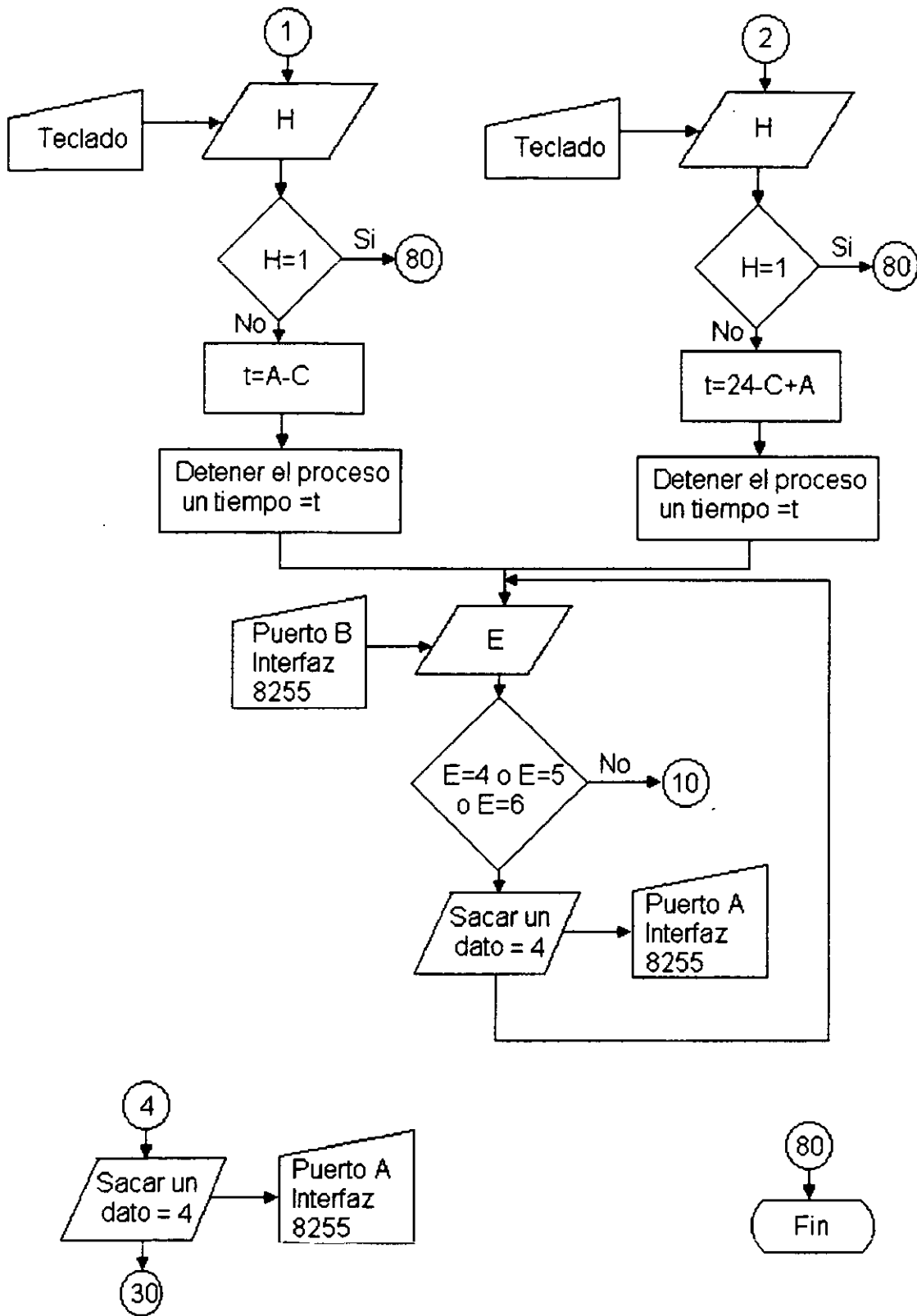
##### 4.7.1 Algoritmo

- El programa preguntará al usuario del panel la hora en que el sol se pone y la hora en que el sol se mete (ocaso).
- Compara la hora actual con la hora del ocaso y puesta del sol

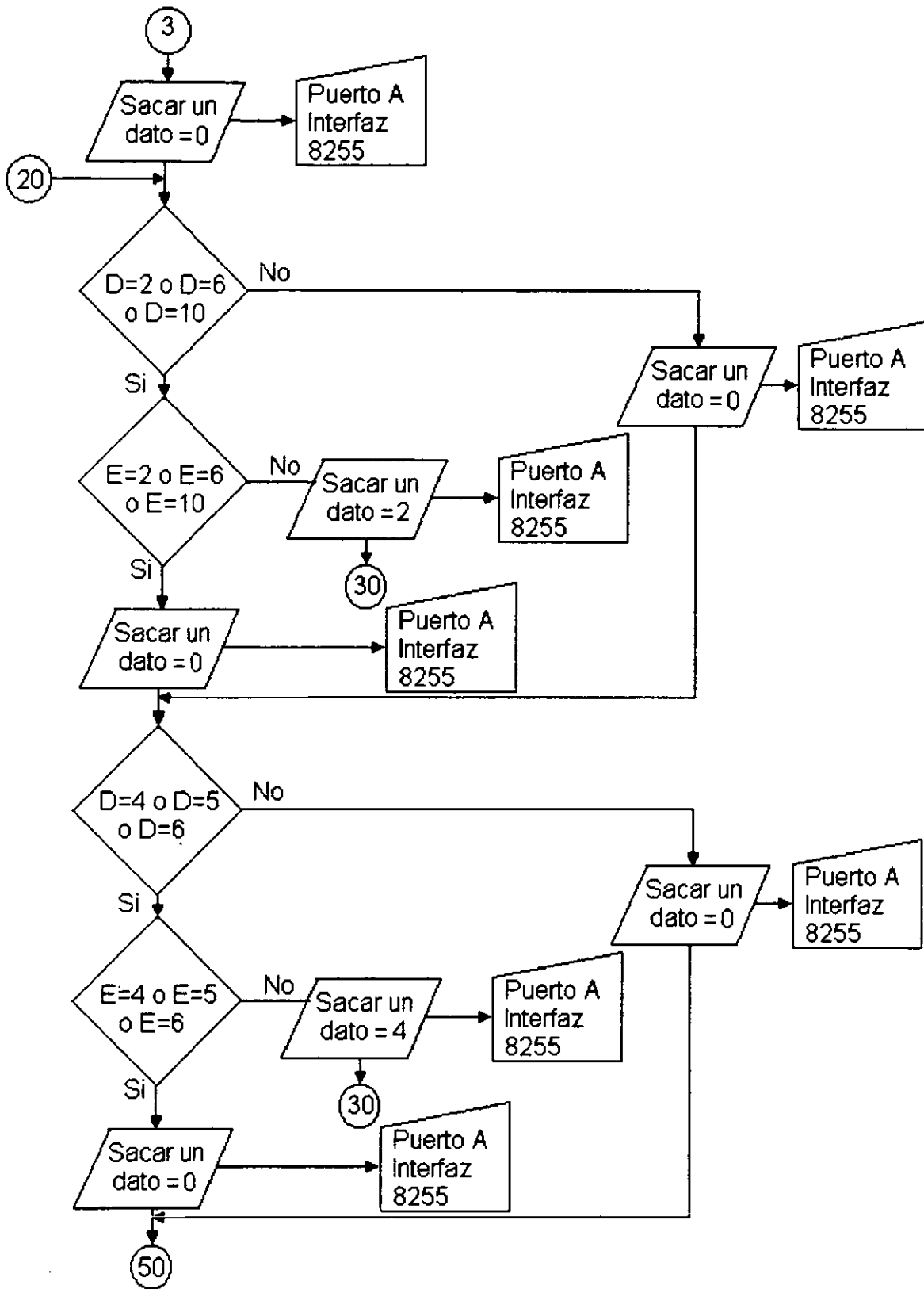
- Si la hora actual de la PC está entre el intervalo en que el sol sale y se mete, el programa iniciará el proceso de los datos y si no el usuario tendrá la opción de salir o de mantener al programa en espera hasta que la hora de la PC este entre el intervalo de tiempo del sol.
- Al iniciar el programa lo primero es leer las señales de los sensores de posición para saber si el panel no está en una posición extrema. Si está en una posición extrema el programa hará una pausa de 15 minutos y volverá a leer los datos de los sensores de posición.
- Si el panel no está en una posición extrema, el panel leerá los datos de los fotómetros para registrar si el sol está en posición perpendicular al panel, si el sol está en posición perpendicular el programa hará una pausa de 10 minutos y volverá a leer los datos de los sensores de posición y fotómetros.
- Si el Sol no se encuentra en posición perpendicular al panel, el programa mandara una señal para que el panel se modifique su posición hasta que se encuentre perpendicular a los rayos del sol.
- Cuando el panel se encuentre en posición perpendicular a los rayos del sol, el programa mandara una señal para detener el movimiento del panel y después hará una pausa de 10 minutos y volverá a leer los sensores de posición.
- Cuando la hora de la PC sea igual a la hora en que el sol se mete, el programa mandará una señal para que el panel vaya a la posición inicial

4.7.2 Diagrama de flujo









### 4.7.3 Listado

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <time.h>

struct tm {
    int tm-min;
    int tm-hour;
}horas;
struct sol{
int min;
    int hora;}salida,entrada;

void main ( )
{
{int PC=139;}
{int a,b,c,d,e,D,E;}
{a=0;
b=1;
c=2;
d=4;
e=8;}
outportb(771,PC);
}
{
cout<<"¿ Salida del sol?";
cin>>salida.hora;cout<<".";cin>>salida.min;
cout<<"¿ Entrada del sol?";
cin>>entrada.hora;cout<<".";cin>>entrada.min;
```

```

cout<<"Hora actual:"<<horas.tm-hour,":"<<horas.tm-min;
comparacion(salida.hora,salida.min,entrada.hora,entrada.min);
getch( );
}

void comparacion(int salhora,int salmin,int enthora, int entmin)
{
struct tm{
int tm-hour;
int tm-min;
}horas; int thora,tmin; char resp;
if((horas.tm-hour!=salhora)&&(horas.tm-min<salmin))
{
while((horas.tm-hour!=salhora)&&(horas.tm-min!=salmin))
{
thora=salhora-horas.tm-hour;
tmin=salmin-horas.tm-min;
cout<<"falta:"<<thora,":"<<tmin<<"para que comience el programa.";
do{
cout<<"¿Deseas esperar s/n?\n";cin>>resp;
if(resp=='n')
{
cout<<"ADIOS";
exit(0);
}
else(resp=='s')
cout<<"Programa en espera..\n";}
while((resp!='s')||(resp!='n')); 70(salhora,salmin,enthora,entmin);
}
else{
if((horas.tm-hour>enthora)&&(horas.tm-min>entmin))

```

```

{
while(horas.tm-hour!=enthora && horas.tm-min!=entmin)
{
thora=(24-horas.tm-hour)+salhora;
tmin=60-horas.tm-min)+salmin;
cout<<"falta:"<<thora,":",tmin<<"para que comience el programa";
do{
cout<<"¿Deseas esperar s/n?\n";cin>>resp;
if(resp=='n')
{
cout<<"ADIOS";
exit(0);
}
else(resp=='s')
cout<<"Programa en espera..\n";}
while((resp!='s')||((resp=='n ')); 70(salhora,salmin,enthora,entmin);
}
else
30( );
return(0);
}

void 30(void)
{
(D= inportb(769));
(E= inportb(770));
}
{
while((D!=1 || D!=5 || D!=9)&&(E!=1 || E!=5 || E!=9))
outportb(768,b)
if((D==1 || D==5 || D==9)&&(E==1 || E==5 || E==9))

```

```
{
outportb(768,a);
20(Void);
}
```

```
void 20(void)
```

```
{
{
(D= inportb(769));
(E=inportb(770));
}
if(D==2 || D==6 || D==10)
{
if(E==2 || E==6 || E==10)
{
outportb(768,c);
40( );
}
else
{
outportb(768,a);
30( );
}
else
outportb(768,a)
return(0);
}
}
```

```
void 40(void)
```

```
{
{
```

```
(D= inportb(769));
(E=inportb(770);
}
if(D==4 || D==5 || D==6)
{
if(E==4 || E==5 || E==6)
{
outportb(768,d);
50( );
}
else
{
outportb(768,a);
30( );
}
else
outportb(768,a);
return(0);
}
```

```
void 50(void)
{
{
(D= inportb(769));
(E=inportb(770);
}
if(D==8 || D==9 || D==10)
{
if(E==8 || E==9 || E==10)
{
outportb(768,e);
```

```
delay(600);  
comparacion( );  
}  
else  
{  
  outportb(768,a);  
  30( );  
}  
else  
  outportb(768,a)  
  return(0);  
}
```

---

## Conclusiones

En el desarrollo de la presente tesis nos hemos dado cuenta de la importancia en el desarrollo de la investigación en todos sus ámbitos y en especial de la producción de energía eléctrica utilizando medios no contaminantes, esto para no acabar más rápido de lo que lo hemos hecho con el planeta.

Desde nuestro punto de vista el gran desarrollo de los diferentes tipos de células solares permite convertir, cada día con mayor eficiencia y más bajo costo, la energía solar en energía eléctrica. Y si aunado a este desarrollo de las células solares se desarrolla la investigación en los paneles solares, la energía fotovoltaica puede ser la más viable en cuanto a costo y repercusiones en el medio ambiente.

En la realización de esta tesis se propone un panel el cual, con base a un sistema electromecánico controlado por una computadora sigue al sol con el fin de que se mantenga en posición perpendicular con respecto a los rayos del sol. Esta propuesta nos parece adecuada ya que el costo de este panel, el mantenimiento y la funcionalidad superan por mucho a los paneles estáticos con los que se cuenta en la actualidad, además que este panel puede ser utilizando en una casa o en la industria, teniendo como ventaja que si se necesitan varios paneles con uno que este conectado a la PC es suficiente ya que todos los demás se pueden guiar por el panel conectado a la PC.

El Panel propuesto puede mejorar en cuanto las células solares mejoren su eficiencia, aunque es importante señalar que el panel propuesto cuenta con una eficiencia por encima de otras fuentes utilizadas en la producción de energía eléctrica.



En el desarrollo de la presente tesis se investigaron las características de las células solares y así pudimos seleccionar el tipo de células que convenía a nuestras necesidades de acuerdo a su eficiencia.

Debido a que el conjunto de células conforma un módulo fue muy importante la investigación de las diferentes formas en que se conectan y la forma en que se encapsulan los módulos para dar mayor eficiencia y durabilidad, así como la forma en que se pueden interconectar los módulos para formar un panel con la potencia que se necesite. Los módulos que se escogieron tienen la ventaja de que el mantenimiento que requieren es mínimo ya que solo es necesario limpiar el polvo que se acumule en la superficie. aunque la limpieza del polvo es muy importante ya que si se acumula polvo la eficiencia de los módulos es baja.

Para construir el panel, además de definir el tipo de módulo fue muy importante la selección de las componentes mecánicas y el material que se utilizó, ya que debido a la durabilidad del material y a su poco peso se necesita menos energía para mover el panel, además de que al ser poca la energía eléctrica que se necesita para mover al panel nos permitió que el diseño de los circuitos electrónicos fuera con componentes que son de bajo costo debido a que son de baja potencia. Además que por el tipo de material que se utilizó el mantenimiento que se necesita es mínimo.

En cuanto al diseño de los circuitos electrónicos que se utilizaron componentes comerciales, es decir, que se consiguen fácilmente, con el fin de que el mantenimiento preventivo y correctivo sea sencillo.

El programa que se hizo, fue en lenguaje C ya que es compatible con todas las PC y la mayoría de los programadores lo conocen y saben programarlo, con el fin de que si alguien lo requiere puede modificar el programa de acuerdo a sus necesidades.

Para la colocación del panel es muy importante hacerlo en un lugar donde no se tenga ninguna sombra ya que cualquier sombra de postes o edificios provoca una baja considerable en la eficiencia del panel. El diseño de el panel móvil permite que su colocación sea sumamente sencilla ya que no se necesita conocer datos geográficos como acimut, latitud o longitud para orientarlo.

Es importante señalar que esta investigación se puede continuar, ya que la conversión de energía solar a energía eléctrica es un campo muy amplio, uno de las líneas de investigación que se propone seguir es el almacenamiento de la energía que se produce con los paneles solares, esta investigación debe ir dirigida hacia la forma de almacenaje que se puede utilizar, como las baterías. Otra línea de investigación que se propone es el aprovechamiento de esta energía subiéndola a las red eléctrica nacional, para esto es importante el desarrollo de circuitos de conversión de corriente continua a corriente alterna. Estas dos líneas de investigación serian el complemento para la investigación que se realizo en la presente tesis, ya que aparte de convertir la energía solar en energía eléctrica es muy importante saber como aprovecharla.

---

## Bibliografía

- E. Lorenzo y otros  
Electricidad solar. Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos  
Editorial Universidad Politécnica de Madrid
  
- Horenstein Mark N.  
Microelectrónica : Circuitos y Dispositivos  
Editorial Prentice Hall
  
- Higuera Teresa, De Miguel Miguel A.  
Arquitectura de computadoras Teoría y ejercicios resueltos  
Editorial Alfa omega S.A. de C.V.
  
- Jamsa Kris  
C++ Programación exitosa  
Editorial Alfa Omega
  
- Mompín Poblet José y otros  
Energía solar fotovoltaica  
Editorial Marcombo
  
- Morales Acevedo Arturo  
La electricidad que viene del sol una fuente de energía limpia  
Grupo editorial Iberoamericana
  
- NTE Semiconductores  
Octava edición

- Ronald J. Tocci  
Sistemas digitales principios y aplicaciones  
Editorial Prentice Hall Quinta edición.

- Rufus P. Turner  
Células solares y fotocélulas  
Editorial Marcombo

## NOMENCLATURA

<b>a</b>	Parámetro adimensional ( $a = v_{oc} + 1 - 2v_{oc}f_s$ )
<b>a<sub>m</sub></b>	Elemento de las matrices de transición de índices de claridad
<b>a<sub>1</sub></b>	Coefficiente empírico en la relación entre horas de sol e irradiación
<b>A<sub>C</sub></b>	Area iluminada de la célula
<b>A<sub>G</sub></b>	Area de un generador fotovoltaico
<b>A(E,W)</b>	Absortancia espectral de un semiconductor de anchura W, para un flujo de fotones de energía E
<b>AM</b>	Masa relativa del aire
<b>(A/P, r<sub>d</sub>, N)</b>	Anualidad correspondiente a un capital unitario inicial durante N años a un interés r <sub>d</sub>
<b>b</b>	Parámetro adimensional ( $b = a / (1 + a)$ )
<b>b<sub>1</sub></b>	Coefficiente empírico en la relación entre horas de sol e irradiación
<b>B</b>	Irradiancia directa sobre superficie perpendicular al sol
<b>B(0)</b>	Irradiancia directa sobre superficie horizontal
<b>B(β, α)</b>	Irradiancia directa sobre superficie inclinada
<b>B<sub>h</sub>(0)</b>	Irradiación directa horaria sobre superficie horizontal
<b>B<sub>hm</sub>(0)</b>	Media mensual de B <sub>h</sub> (0)
<b>B<sub>0</sub></b>	Constante solar (1.367 kW *m <sup>-2</sup> )
<b>B<sub>od</sub>(0)</b>	Irradiación extraterrestre diaria sobre superficie horizontal
<b>B<sub>od</sub>(β, α)</b>	Irradiación extraterrestre diaria sobre superficie inclinada
<b>B<sub>odm</sub>(0)</b>	Media mensual de B <sub>od</sub> (0)
<b>B<sub>oh</sub>(0)</b>	Irradiación extraterrestre horaria sobre superficie horizontal
<b>B<sub>ohm</sub>(0)</b>	Media mensual de B <sub>oh</sub> (0)
<b>C</b>	Velocidad de la luz (2.998x10 <sup>8</sup> ms <sup>-1</sup> )
<b>C</b>	Capacidad de una batería
<b>C<sub>A</sub></b>	Capacidad normalizada de un generador fotovoltaico
<b>C<sub>B</sub></b>	Capacidad nominal de una batería
<b>C<sub>i</sub></b>	Costo unitario inicial de un sistema (pts./kWp)
<b>C<sub>s</sub></b>	Capacidad normalizada de un acumulador
<b>C<sub>u</sub></b>	Capacidad utilizable de una batería ( $C_u = C_B PD_{MAX}$ )

---

$C_1$	Constante de proporcionalidad entre $G$ e $I_{sc}$ ( $A \cdot cm^2 \cdot mW^{-1}$ )
$C_2$	Constante de proporcionalidad entre $(T_c - T_a)$ y $G$ ( $^{\circ}C \cdot cm^2 \cdot mW^{-1}$ )
$C_{10}$	Capacidad de una batería para un régimen de descarga de 10 horas
$C_{100}$	Capacidad de una batería para un régimen de descarga de 100 horas
$d_n$	Número de orden de un día dentro del año
$d\Omega$	Elemento de ángulo sólido de la esfera terrestre
$D(0)$	Irradiancia difusa sobre superficie horizontal
$D(\beta, \alpha)$	Irradiancia difusa sobre superficie inclinada
$D^c(\beta, \alpha)$	Contribución de la región circunsolar a $D(\beta, \alpha)$
$D^h(\beta, \alpha)$	Contribución de la banda del horizonte a $D(\beta, \alpha)$
$D^i(\beta, \alpha)$	Contribución de la región isotrópica a $D(\beta, \alpha)$
$D_d(0)$	Irradiación difusa diaria sobre superficie horizontal
$D_{dm}(0)$	Media mensual de $D_d(0)$
$D_h(0)$	Irradiación difusa horaria sobre superficie horizontal
$D_{hm}(0)$	Media mensual de $D_h(0)$
$E$	Carga del electrón ( $1.60 \times 10^{-19}$ C)
$E$	Energía de un fotón
$E_{EL}$	Energía eléctrica (Kw*h)
$E_H$	Energía hidráulica (kW*h)
$E_G$	Anchura de la banda prohibida (eV)
$E_{GO}$	Anchura de la banda prohibida a 0 K
$ET$	Ecuación del tiempo
$f, f_1, f_2$	Parámetros adimensionales utilizados en el dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos
$F$	Fracción de la energía anual producida por un sistema fotovoltaico conectado a la Red que consume directamente el usuario
$F_i$	Factor de interceptación
$F_c(r_d, r_e, N)$	Factor de corrección de precios de la energía eléctrica
$F_{S1}, F_{S2}$	Factores de seguridad en el dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos
$F_T(\theta_s)$	Modificador del ángulo de incidencia
$FF$	Factor de forma o factor de llenado
$FF_0$	Factor de forma correspondiente a una célula solar ideal, con $R_s=0$

---

$G$	Irradiancia global
$G(0)$	Irradiancia global sobre superficie horizontal
$G(\beta, \alpha)$	Irradiancia global sobre superficie inclinada
$G_{ce}$	Irradiancia en condiciones estándares ( $1.000 \text{ Wm}^{-2}$ )
$G_d(0)$	Irradiación global diaria sobre superficie horizontal
$G_d(>G_{umbral})$	Irradiación global diaria con $G > G_{umbral}$
$G_{dm}(0)$	Media mensual de $G_d(0)$
$G_h(0)$	Irradiación global horaria sobre superficie horizontal
$G_{hm}(0)$	Media mensual de $G_h(0)$
$\overline{G_d}$	Valor medio, correspondiente a un cierto periodo de tiempo, de la irradiación diaria sobre un receptor
$\overline{G_d(0)}$	Valor medio, correspondiente a un cierto periodo de tiempo, de la irradiación diaria sobre superficie horizontal
$G^R$	Irradiancia reflejada por una superficie
$G^I$	Irradiancia incidente sobre una superficie
$G^T$	Irradiancia transmitida por una superficie
$h$	Constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ J*s}$ )
$I$	Corriente que entrega una célula solar
$I_{CARGA}$	Corriente de carga de una batería
$I_D$	Corriente de diodo o de oscuridad
$I_{DESCARGA}$	Corriente de descarga de una batería
$I_{DN}$	Componente de la corriente de diodo con polarización directa debida a la recombinación en la zona neutra n
$I_{DP}$	Componente de la corriente de diodo con polarización directa debida a la recombinación en la zona neutra p
$I_{DT}$	Componente de la corriente de diodo con polarización directa debida a la recombinación en la zona de carga de espacio
$I_G$	Corriente que entrega un generador fotovoltaico
$I_L$	Corriente generada o fotocorriente
$I_{LN}$	Componente de la fotocorriente que se origina en la zona neutra n
$I_{LP}$	Componente de la fotocorriente que se origina en la zona neutra p
$I_{LT}$	Componente de la fotocorriente que se origina en la zona de carga de espacio

---

$I_M$	Corriente en el punto de máxima potencia de una célula solar
$I_{MG}$	Corriente en el punto de máxima potencia de un generador fotovoltaico
$I_0$	Corriente inversa de saturación de una célula solar
$I_{O1}, I_{O2}$	Componentes de $I_0$
$I_{ON}$	Componente de la corriente de diodo con polarización inversa debida a la recombinación en la zona neutra $n$
$I_{OP}$	Componente de la corriente de diodo con polarización inversa debida a la recombinación en la zona neutra $p$
$I_{OT}$	Componente de la corriente de diodo con polarización inversa debida a la recombinación en la zona de carga de espacio
$I_{SC}$	Corriente de cortocircuito de una célula solar
$I_{SCG}$	Corriente de cortocircuito de un generador fotovoltaico
$I_{SCM}$	Corriente de cortocircuito de un módulo fotovoltaico
$I_{20}$	Corriente de una batería para un régimen de 20 horas
$K$	Constante de Boltzman ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$K_{i1}, K_{i2}$	Parámetros adimensionales característicos de un inversor
$K$	Característica de los semiconductores ( $A \cdot K^{-3}$ )
$K_D$	Proporción difusa de la irradiación horaria
$K_T$	Índice de claridad horario
$K_D$	Proporción difusa de la irradiación diaria
$K_T$	Índice de claridad diario
$K_{Dm}$	Media mensual de $K_D$
$K_{Tm}$	Media mensual de $K_T$
$k_1, k_2, k_3, k_4$	Factores de modulación de la radiación difusa, o índices de anisotropía
$L$	Media mensual de la energía diaria consumida por la carga de un sistema fotovoltaico ( $W \cdot h$ )
$L(\theta', \Psi')$	Radiancia difusa de un punto de la esfera celeste
$L_{BOS}$	Pérdidas del resto del sistema ( $h$ , o $kW \cdot h/kWp$ )
$L_C$	Pérdidas de captura ( $h$ , o $kW \cdot h/kWp$ )
$L_n$	Energía consumida durante la noche en la carga de un sistema fotovoltaico
$LH$	Longitud del origen de un uso horario
$L L$	Longitud de un lugar



---

L LP	Probabilidad de pérdida de carga
m	Factor de idealidad ( $1 \leq m \leq 2$ )
n	Índice de refracción
N	Tiempo de funcionamiento de un sistema fotovoltaico (días o años)
N <sub>MS</sub>	Número de módulos en serie en un generador
N <sub>MP</sub>	Número de módulos en paralelo en un generador
N <sub>P</sub>	Número de células en paralelo en un generador
N <sub>S</sub>	Número de células en serie en un generador
N <sub>PM</sub>	Número de células en paralelo en un módulo
N <sub>SM</sub>	Número de células en serie en un módulo
ñ	Variable gaussiana incorrelada de media 0 y varianza 1
p <sub>a</sub>	$P_G/P_{MAXG}$
p <sub>c</sub>	Precio de la energía comprada a la Red (pts./kW*h)
p <sub>o</sub>	Parámetro adimensional que define las pérdidas en vacío de un inversor
p <sub>p</sub>	Costo de la energía fotovoltaica producida (pts./kW*h)
p <sub>i</sub>	Relación de carga de un inversor ( $p_i = P_F/P_{MAX}$ )
p <sub>v</sub>	Precio de la energía eléctrica vendida a la Red (pts./kW*h)
P	Potencia entregada por una célula solar
P <sub>CD</sub>	Potencia entregada por un generador fotovoltaico directamente conectado a una carga
P <sub>DIS</sub>	Potencia disipada en la <<célula peor>> de un módulo fotovoltaico
P <sub>fricción</sub>	Perdidas de fricción
P <sub>F</sub>	Potencia que un sistema fotovoltaico entrega a una carga
P <sub>G</sub>	Potencia entregada por un generador fotovoltaico
P <sub>I</sub>	Potencia a la salida de un inversor
P <sub>MAX</sub>	Potencia máxima, o nominal, que puede entregar un inversor
P <sub>L</sub>	Potencia de la radiación incidente sobre una célula solar
P <sub>MAX</sub>	Máxima potencia que puede entregar una célula solar en condiciones estándares
P <sub>MAXG</sub>	Máxima potencia que puede entregar un generador fotovoltaico en condiciones estándares
P <sub>MAXM</sub>	Máxima potencia que puede entregar un módulo fotovoltaico en

---

	condiciones estándares
PD	Profundidad de descarga de una batería
PD <sub>d</sub>	Profundidad de descarga diaria de una batería
PD <sub>e</sub>	Profundidad de descarga estacional de una batería
PD <sub>MAX</sub>	Profundidad de descarga máxima de una batería
Q	Cantidad de corriente almacenada en una batería (Ah)
Q <sub>M</sub>	Media mensual de la cantidad de corriente diaria que consume una carga de un sistema fotovoltaico (Ah)
Q <sub>sc</sub>	Cantidad de corriente que entra en una batería a partir del instante en el que comienza el gaseo (Ah)
r	Distancia entre el Sol y la Tierra
r <sub>d</sub>	Tasa de descuento anual (diferencial con respecto a la inflación)
r <sub>e</sub>	Tasa de crecimiento anual del precio de la energía (diferencial con respecto a la inflación)
r' <sub>e</sub>	$(r_d - r_e)/(1 + r_e)$
r <sub>o</sub>	Unidad astronómica ( $1496 \times 10^8$ km)
r <sub>s</sub>	Resistencia serie normalizada ( $r_s = R_s/(V_{oc}/I_{sc})$ )
R	Carga resistiva
R <sub>b</sub>	Parámetro adimensional ( $R_b = B_{od}(\beta, \alpha)/B_{od}(0)$ )
R <sub>BI</sub>	Resistencia interna de un elemento de batería
R <sub>F</sub>	Rendimiento global de un sistema fotovoltaico
R <sub>S</sub>	Resistencia serie de una célula solar
R <sub>SG</sub>	Resistencia serie de un generador fotovoltaico
R <sub>P</sub>	Resistencia paralelo de una célula solar
S(E)	Flujo de fotones con energía E
S <sub>m</sub>	Valor medio mensual del número de horas de sol del día
S <sub>o</sub>	Longitud de un día
S <sub>om</sub>	Valor medio mensual de S <sub>o</sub>
SOC	Estado de carga de una batería
T	Longitud del día (T = 24 h)
T <sub>a</sub>	Temperatura ambiente
T <sub>am</sub>	Temperatura ambiente mínima a lo largo de un día
T <sub>aM</sub>	Temperatura ambiente máxima a lo largo de un día

---

$T_c$	Temperatura de una célula solar
TO	Tiempo oficial de un lugar
$T_{OFF}$	Tiempo de permanencia en OFF de un interruptor
$T_{ON}$	Tiempo de permanencia en ON de un interruptor
$T_{ONC}$	Temperatura de operación nominal de las células solares
$u, u_1, u_2$	Parámetros adimensionales utilizados en el dimensionado
$U_s$	Tensión a la salida de un sintetizador
$U_{SC}$	Tensión umbral de regulación de sobrecarga de un elemento de batería
$U_{SD}$	Tensión umbral de regulación de sobredescarga de un elemento de batería
$V_{oc}$	Tensión de circuito abierto normalizada ( $V_{oc} = V_{oc}/V_i$ )
V	Tensión entre extremos de una célula solar
$V_B$	Tensión entre bornes de un elemento de batería
$V_{BI}$	Tensión interna de un elemento de batería
$V_{BF}$	Tensión final de carga de un elemento de batería
$V_{CD}$	Tensión de trabajo de un generador fotovoltaico conectado directamente a una carga
$V_{fc}$	Tensión final de carga de un elemento de batería
$V_g$	Tensión de un elemento de batería a la que comienza el gaseo
$V_G$	Tensión entre extremos de un generador fotovoltaico
$V_M$	Tensión en el punto de máxima potencia de una célula solar
$V_{MG}$	Tensión en el punto de máxima potencia de un generador fotovoltaico
$V_{NOM}$	Tensión nominal de un generador fotovoltaico
$V_{OC}$	Tensión de circuito abierto de una célula solar
$V_{OCM}$	Tensión de circuito abierto de un modulo fotovoltaico
$V_{OCG}$	Tensión de circuito abierto de un generador fotovoltaico
$V_R$	Tensión a la salida de un inversor
$V_t$	Voltaje térmico cuyo valor general es $mkT/e$
VAN	Valor actual neto de una inversión
W	Espesor de una célula solar
X	Nivel de iluminación o factor de concentración
$X_g$	Concentración geométrica

Y	Fracción de origen fotovoltaico de la energía consumida diariamente en un sistema mixto
$Y_A$	Productividad de un generador fotovoltaico (h o kW h/kWp)
$Y_F$	Productividad de un sistema fotovoltaico (h o kW h/kWp)
$Y_m$	Media mensual de Y

## SIMBOLOGIA

$\alpha$	Acimut de una superficie con respecto al sur (este negativo)
$\beta$	Inclinación de una superficie respecto de la horizontal
$\beta_c$	Coefficiente de variación de $\eta$ con TC(%/°C)
$\Gamma$	Parámetro adimensional ( $r = 27r(dn-1)/365$ )
$\gamma$	Elevación de un punto de la esfera celeste
$\gamma_m$	Parámetro libre en el modelo de Barra
$\gamma_s$	Elevación del Sol
$\Delta$	Parámetro utilizado en el modelo de Pérez
$\Delta_m$	Media mensual de la longitud del día. Normalizada a 24 horas
$\delta$	Declinación solar
$\varepsilon$	Parámetro utilizado en el modelo de Pérez
$\varepsilon_0$	Excentricidad de la eclíptica
$\eta_{BOS}$	Eficiencia del resto del sistema
$\eta_c$	Rendimiento farádico de una batería
$\eta_{ce}$	Eficiencia de un dispositivo fotovoltaico (célula, módulo, etc.) en condiciones estándares
$\eta_{col}(E)$	Eficiencia de colección de portadores
$\eta_G$	Eficiencia de un dispositivo fotovoltaico (célula, módulo, etc.) iluminado con una irradiancia $G$
$\eta_i$	Eficiencia instantánea de un inversor
$\eta_I$	Eficiencia energética de un inversor
$\eta_{MB}$	Eficiencia energética de una motobomba
$\eta_{qe}(E)$	Eficiencia cuántica externa
$\eta_{qi}(E)$	Eficiencia cuántica interna
$\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_5$	Componentes de la eficiencia de un generador fotovoltaico
$\theta_i$	Angulo de incidencia de un rayo, en general, sobre una superficie
$\theta_s$	Angulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie inclinada
$\theta_z$	Distancia cenital de un punto de la esfera celeste
$\theta_{zs}$	Distancia cenital del Sol

---

$\theta'$	Coordenada de un punto de la esfera celeste en un sistema solidario con una superficie inclinada
$\theta$	Apertura angular de un concentrador
$\lambda$	Longitud de onda
$\xi_m$	Coefficiente de disipación de temperatura ( $\cong C^2$ )
$\xi_1$	Extensión angular de la región circunsolar
$\xi_2$	Extensión angular de la banda del horizonte
$\rho$	Reflectividad del suelo
$\rho(E,W)$	Reflectancia de un semiconductor de anchura $W$ para un flujo de fotones de energía $E$
$\rho_e$	Densidad del electrolito
$\rho(\theta_i)$	Reflectividad de una superficie para un ángulo de incidencia $\theta_i$
$\tau(E,W)$	Transmitancia de un semiconductor de anchura $W$ para un flujo de fotones de energía $E$
$\tau_{sc}$	Constante de tiempo de la tensión de batería en proceso de sobrecarga
$\Phi$	Latitud de un lugar
$\psi$	Acimut de un punto de la esfera celeste
$\psi_s$	Acimut del Sol
$\psi'$	Coordenada de un punto de la esfera celeste en un sistema solidario con una superficie inclinada
$\omega$	Tiempo solar verdadero u hora solar
$\omega_s$	Hora de salida del Sol sobre el horizonte
$\omega_{ps}$	Hora de puesta del Sol sobre una superficie inclinada
$\omega_{ss}$	Hora de salida del Sol sobre una superficie inclinada
$\alpha(E)$	Coefficiente de absorción de fotones de energía $E$