

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CONTROL ELECTRÓNICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA ACCIONADO POR ENERGÍA SOLAR.

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

POR

JOB LIZARDO LIMA SOLARES

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO.

GUATEMALA, JUNIO DE 1997.

R
05
7/20/95
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**CONTROL ELECTRÓNICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO DE
AGUA ACCIONADO POR ENERGÍA SOLAR,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería
Mecánica Eléctrica, con fecha 24 de mayo de 1995.



Job Lizardo Lima Solares

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO
VOCAL 1ro.
VOCAL 2do.
VOCAL 3ro.
VOCAL 4to.
VOCAL 5to.
SECRETARIA

Ing. Herbert René Miranda Barrios
Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
Br. Víctor Manuel Lobos Aldana
Br. Wagner Gustavo López Cáceres
Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas.

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO
EXAMINADOR
EXAMINADOR
EXAMINADOR
SECRETARIO

Ing. Julio Ismael González Podszueck
Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
Ing. Edwin Alberto Solares Martínez
Ing. Julio César Solares Peñate
Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, 24 de abril de 1997.

Ingeniero:
Julio César Solares Peñate
Coordinador del Area de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

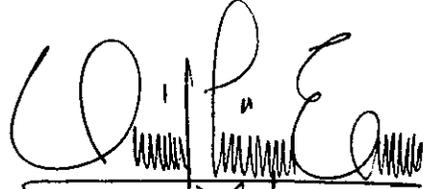
Estimado Ingeniero Solares:

Por medio de la presente hago constar que he revisado junto con el estudiante Job Lizardo Lima Solares, el trabajo de tesis titulado: "Control electrónico de un sistema de bombeo de agua accionado por energía solar". Luego de hacer las correcciones pertinentes, doy como aprobado el trabajo por considerar que cumple con los objetivos establecidos.

El autor de esta tesis y yo como asesor, nos hacemos responsables del contenido de la misma.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,


Ing. Oscar Stuardo Franco Escobedo
Colegiado No. 3782
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 7 de mayo de 1,997

Señor Director
Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

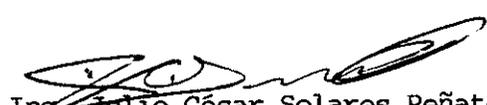
Señor Director.

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis titulado: **Control electrónico de un sistema de bombeo de agua accionado por energía solar**, desarrollado por el señor **Job Lizardo Lima Solares**, ya que considero que cumple los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador Area Electrónica

JCSP/sdem.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante Job Lizardo Lima Solares, titulada: Control electrónico de un sistema de bombeo de agua accionado por energía solar, procede a la autorización del mismo.

Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra

Director

Guatemala, 23 de mayo de 1,997.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: **Control electrónico de un sistema de bombeo de agua accionado por energía solar**, del estudiante **Job Lizardo Lima Solares**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Herbert René Miranda Barrios
Decano

Guatemala, 29 de mayo de 1,997.



AGRADECIMIENTOS.

A la FUNDACIÓN SOLAR.

Por su apoyo en el suministro de material Informativo y datos sobre proyectos instalados en Guatemala.

A la empresa Audiología e Ingeniería S.A., AUDINSA.

En especial al Sr. Walter Molina. Por permitirme hacer uso de los recursos de la empresa en la realización de este trabajo.

DEDICADO A:

Mis padres.

***Carlos Humberto Lima Batres,
Estela Solares de Lima.***

**Por su apoyo total. Por brindarme lo necesario para alcanzar esta meta.
Esta es una pequeña muestra de mi agradecimiento y amor hacia ellos.**

A mis hermanos.

Ever y Mildred.

Porque siempre están cuando los necesito.

A mi novia.

Paulette Amhamed.

Por impulsarme siempre a seguir hacia adelante.

INDICE

LISTA DE ILUSTRACIONES	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
GLOSARIO	vi
INTRODUCCIÓN	viii
1 FUNDAMENTOS DE ENERGÍA SOLAR	1
1.1 Aplicaciones de la energía solar	2
1.1.1 Calentamiento de agua	3
1.1.2 Calefacción y aire acondicionado	3
1.1.3 Energía térmico-solar	3
1.1.4 Energía fotovoltaica	4
1.2 Radiación solar	5
1.3 Angulos del sol con respecto a la tierra	7
2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR	8
2.1 Elementos del sistema	10
2.2 Diseño de sistemas de bombeo fotovoltaicos	10
2.2.1 Procedimiento de diseño	11
2.2.1.1 Ejemplo de diseño	13
2.3 Selección de componentes	13
2.3.1 Selección de bombas	13
2.3.2 Selección de los paneles	15
2.3.2.1 Orientación de los paneles	15
2.3.3 Selección de controladores	16
3 ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA	18
3.1 Panel Fotovoltaico	18
3.1.1 Célula solar	19
3.1.1.1 Modelo de una célula solar	21
3.1.2 Modelado del panel solar	23
3.1.3 Interconexión de paneles	25
3.1.3.1 Conexión de módulos en serie	25
3.1.3.2 Conexión de módulos en paralelo	26
3.1.3.3 Conexiones exteriores	26
3.2 Motores de corriente continua	27
3.2.1 Características de los motores de corriente continua	28

4 ACOPLAMIENTO ÓPTIMO PARA OBTENER LA POTENCIA MAXIMA	32
4.1 Potencia suministrada por paneles solares	33
4.2 Potencia máxima en función de la corriente	35
4.3 Requisitos del controlador de potencia	38
4.4 Diagrama de bloques del controlador	40
4.4.1 Componentes	40
5 DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA: CONVERTIDOR DC-DC	43
5.1 Funcionamiento de los convertidores DC-DC	43
5.2 Tipos de convertidores	44
5.3 Convertidor hacia arriba	46
5.3.1 Principio de balance de volt-segundo en el inductor	47
5.3.2 Razón de trabajo	49
5.4 Selección de los componentes	52
5.4.1 Inductor	52
5.4.2 Transistor de potencia	53
5.4.2.1 Ondas de corriente	53
5.4.2.2 Ondas de voltaje	54
5.4.3 Diodo	55
5.4.4 Capacitor	55
5.5 Circuito manejador del transistor	58
5.5.2 Procedimiento de diseño	61
6 CIRCUITO DE CONTROL: MODULADOR DE ANCHO DE PULSO	63
6.1 Principio de funcionamiento	63
6.2 Generador de diente de sierra	65
6.3 Circuito de referencia	73
6.4 Comparador	73
6.5 Implementación práctica del circuito	75
7 COSTO DEL SISTEMA	76
7.1 Mantenimiento	78
CONCLUSIONES	ix
RECOMENDACIONES	xi
BIBLIOGRAFIA	xiii

APENDICES

1 BOMBA SOLAR SLOWPUMP	xiv
2 NOMOGRAMAS DE DISEÑO	xvi
3 MAPAS DE INSOLACION	xix
4 PANELES SOLARES	xxiv
5 COMPONENTES PASIVOS: INDUCTORES Y CAPACITORES	xxvii
6 COMPONENTES ACTIVOS: DIODOS Y TRANSISTORES	xxi

LISTA DE SÍMBOLOS

c	velocidad de la luz
C	capacitancia
D	razón de trabajo
E	fuerza contraelectromotriz en un motor de corriente directa
f	frecuencia
ϕ	flujo de excitación
gal	galón
h	hora
i	corriente
la	corriente de armadura
If	fotocorriente
IF	corriente de campo
Io	constante solar. Insolación máxima
Is	corriente inversa de saturación
J	inercia
K	constante de un motor de corriente directa
k	constante de Boltzman
L	inductancia
λ	longitud de onda
min	minuto
Np	número de filas de células conectadas en serie
Ns	número de células conectadas en serie
Ra	resistencia de armadura
T	temperatura
TI	par de carga
Ts	período de conmutación
V	voltaje
ω	velocidad angular
W	watt

LISTA DE ILUSTRACIONES

GRÁFICAS	DESCRIPCIÓN	PAGINA
Fig. 2.1	Sistema fotovoltaico de bombeo de agua	9
Fig. 2.2	Inclinación de los paneles solares	16
Fig. 3.1	Estructura de una célula solar	20
Fig. 3.2	Circuito equivalente de una célula solar	21
Fig. 3.3	Curvas características de una célula solar	22
Fig. 3.4	Conexiones internas de un panel solar de 16 células. $N_p=4$. $N_s=4$.	23
Fig. 3.5	Circuito equivalente de un panel solar	24
Fig. 3.6	Conexión de paneles en serie	25
Fig. 3.7	Conexión de módulos en paralelo	26
Fig. 4.1	Curvas de potencia del panel solar	35
Fig. 4.2	Relación entre corriente de carga y fotocorriente a máxima potencia	36
Fig. 4.3	Corriente a máxima potencia	37
Fig. 4.4	Transformador de corriente directa	39
Fig. 4.5	Diagrama de bloques simplificado	41
Fig. 5.1	Principio de funcionamiento	44
Fig. 5.2	Convertidor hacia arriba	46
Fig. 5.3	Voltaje del inductor	48
Fig. 5.4	Corriente del inductor	49
Fig. 5.5	Corriente del transistor de potencia	53
Fig. 5.6	Ondas de voltaje en el transistor	54
Fig. 5.7	Corriente del diodo	55
Fig. 5.8	Períodos de conmutación	56
Fig. 5.9	Voltaje de salida del convertidor	57
Fig. 5.10	Circuito manejador del transistor de potencia	60
Fig. 6.1	Circuito de control	63
Fig. 6.2	V_{ref} . Vrs. Dts	64
Fig. 6.3	Señales de comparación	65
Fig. 6.4	Generador de rampa	66
Fig. 6.5	Circuito de descarga	67
Fig. 6.6	Detector de máximo	69
Fig. 6.7	Diseño completo del generador de diente de sierra	72
Fig. 6.8	Circuito de referencia	73
Fig. 6.9	Comparador de salida	74

GLOSARIO

Amplificador operacional. Circuito electrónico cuyas características son: alta impedancia de entrada, baja impedancia de salida. Se puede utilizar como comparador o como amplificador. Cuando se utiliza como amplificador, la señal de salida es una proporción de la de entrada de acuerdo a la relación de un conjunto de resistencias externas.

Bomba centrífuga. Máquina que mueve el agua constantemente por la acción de uno o mas impulsores, los cuales giran a alta velocidad, impartiendo energía al líquido.

Cabeza de bombeo. Carga estática.

Carga estática. La distancia desde el nivel del espejo de agua hasta el borde superior del tanque de almacenamiento; la medida de la altura de bombeo total de un sistema en reposo.

Célula solar. Dispositivo fabricado en base a semiconductores que convierte la luz en electricidad.

Central hidroeléctrica. Planta generadora de electricidad por medio del agua. El agua mueve una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Colector solar. Dispositivo diseñado para captar la energía lumínica procedente del sol. Refleja los rayos solares en una superficie y los concentra en determinado punto.

Comparador. Dispositivo electrónico que compara dos señales eléctricas de entrada. Cuando la diferencia es positiva, en la salida del dispositivo aparece un voltaje positivo y cuando la diferencia es negativa uno negativo.

Diodo. Dispositivo semiconductor de dos capas. Permite la circulación de corriente solo en un sentido.

Efecto fotovoltaico. Cuando la luz incide sobre un metal, se genera corriente eléctrica.

Fotocorriente. Corriente eléctrica producida en una célula solar, o en un panel solar, por la acción de la luz.

Fotosíntesis. Proceso natural en el cual las plantas toman energía de la luz del sol para producir clorofila.
inducido

Insolación. Indica la entrada de radiación solar. La tasa a la que incide la radiación solar directa sobre una superficie horizontal unitaria.

Inversor. Circuito eléctrico que transforma corriente directa en corriente alterna.

Nomograma. Un gráfico que consiste en tres curvas coplanas, normalmente líneas paralelas rectas, cada cual graduada para una variable distinta con el fin de que una línea recta que cruce las tres curvas intersecte los valores relacionados de cada variable.

Par de carga. Fuerza que se opone al movimiento giratorio de los motores.

Punto focal. Lugar donde concentran la energía los colectores solares.

Radiación Solar. Es la energía que el sol irradia. Puede ser luz visible, energía infrarroja o ultravioleta.

Resistencia de armadura. La resistencia propia del alambre que forma la bobina.

Semiconductor. Es un material que tiene una banda prohibida relativamente pequeña. En condiciones normales, se comporta como un aislante. En este caso no es posible la conducción de corriente. Al variar la temperatura o al aplicar un campo eléctrico exterior, los electrones atraviesan la banda prohibida hacia la banda de conducción y se permite la circulación de corriente. De este material están hechos todos los dispositivos electrónicos. Los principales semiconductores son el silicio y el germanio.

Transistor. Consiste en un cristal de silicio o germanio en el que una capa tipo n está colocada entre dos capas de tipo p. También puede estar constituido por dos capas de material tipo n que encierran una capa de material tipo p. El transistor es capaz de producir amplificación.

Turbina. Dispositivo que convierte el movimiento de un fluido en energía mecánica.

Watt. Unidad de potencia eléctrica equivalente a un Joule por segundo, según el sistema internacional de medición.

INTRODUCCION

El suministro de agua mediante medios fotovoltaicos está adquiriendo cada vez mas importancia. En algunas localidades es casi imposible disponer de la energía eléctrica comercial. Debido a este problema se recurre al uso de medios alternativos como por ejemplo la energía solar. Cuando se instala un sistema de bombeo fotovoltaico hay que tratar de invertir poco dinero y obtener los resultados deseados; un sistema rentable para satisfacer la demanda de agua. Una forma de optimizar dicha inversión es mediante incluir en el sistema un controlador electrónico para potencia máxima. Con este dispositivo, se obliga a los paneles fotovoltaicos a trabajar en su punto máximo de operación. El presente trabajo pretende formular un diseño para dicho controlador.

El diseño planteado en esta tesis se efectúa partiendo del conocimiento de cómo la energía solar ha cobrado auge en estos tiempos, principalmente los métodos fotovoltaicos, es decir generar electricidad mediante la luz solar. La electricidad generada se utiliza para accionar un motor eléctrico de corriente continua que a su vez suministra energía mecánica a una bomba que hace el trabajo de extraer el agua de un pozo. Este es un sistema de bombeo solar en su forma mas simple. Se estudia dicho sistema elemental de bombeo así como los métodos de diseño. Para diseñar el controlador se estudia por separado cada elemento que interviene en el proceso. Al final se escoje la opción de diseño, que es el controlador de potencia DC-DC. Este es un dispositivo que opera a una frecuencia de varios kilohertz y su característica sobresaliente es que realiza la transferencia de energía entre el panel solar y la bomba de una manera eficiente. Los convertidores tienen eficiencias por encima del 90%.

Para efectuar el diseño se hicieron algunas simplificaciones. Esto con el objeto de mostrar que es posible llegar a resultados satisfactorios mediante eliminar algunos parámetros que no son de primordial interés cuando se trabaja con sistemas experimentales.

Se hizo lo posible por presentar resultados prácticos; principalmente cuando seleccionan los elementos del sistema. Debido a eso los apéndices contienen información real de componentes que se encuentran disponibles en el mercado.

FUNDAMENTOS DE ENERGÍA SOLAR.

El sol es indirectamente el responsable de la producción de casi toda forma de energía. Desde el momento en que el sol comenzó a funcionar, ha emitido radiación solar suficiente como para producir combustibles fósiles que se consumen rápidamente en nuestro planeta. El sol también produce calor que evapora el agua de los océanos y la convierte en corrientes de agua en los ríos, que a su vez hacen posible la existencia de grandes centrales hidroeléctricas. Y que se puede decir del proceso de fotosíntesis que hace crecer las plantas de las cuales depende la vida en la tierra.

A pesar de la importancia del sol en los procesos energéticos, el uso directo de la energía solar ha sido un problema difícil de resolver y que ha llevado a muchos científicos e ingenieros a desarrollar sistemas de aprovechar la energía solar al máximo. Las dificultades cuando se trabaja con el uso directo de la energía solar se deben principalmente a que es de naturaleza intermitente, y la energía se produce en forma difusa y no concentrada.

El cantidad de potencia solar disponible en la superficie terrestre se ha calculado en 1.7×10^{14} kilowatts. La energía solar es una fuente renovable.. No se necesita transportarla por medio de recipientes, no hay que dirigirla de un lugar a otro mediante líneas de transmisión o tuberías, más bien está disponible en cualquier lugar de la tierra en donde brille el sol. Una característica importante de la energía solar es que podemos llamarle "limpia" debido a que no causa contaminación del medio ambiente, su impacto ambiental adverso es mínimo y no produce residuos y desechos industriales. Tomando en cuenta el día y la noche, las estaciones del año, días nublados y soleados, y la latitud de la superficie

terrestre, la potencia solar promedio a nivel del suelo es alrededor de 17 W/m^2 , la cual es suficiente para satisfacer las demandas mundiales de energía, siempre y cuando pueda ser colectada, almacenada y utilizada con un 100% de eficiencia.

A pesar que la energía solar promete muchas oportunidades para el futuro, existen algunas limitaciones que deben ser superadas con base en fuertes inversiones y trabajo constante. En secciones posteriores se demostrará que a pesar de la inversión inicial de instalar un sistema de energía solar, es más rentable pues una vez instalado, solo se requiere de mantenimientos periodicos. A continuación una lista de las limitaciones de la energía solar:

1. La energía no está concentrada en un solo punto.
2. Es de naturaleza intermitente debido al día y la noche, días nublados, y las estaciones del año, que afectan la recepción en la tierra.
3. La inversión en equipo solar es grande. Los sistemas necesarios para colectar, almacenar y procesar la energía son caros.
4. En algunos lugares donde la demanda de energía es máxima, la disponibilidad de radiación solar es mínima.

Conforme se avanza en la investigación hemos llegado al punto de pensar en energía solar para solucionar problemas relacionados con electrificación, transportación, calefacción, etc. Todas las aplicaciones que se dan a la energía solar se basan en el mismo principio de colectar la energía disponible en la superficie de la tierra y convertirla en potencia utilizable, ya sea mecánica o calorífica.

1.1 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR.

La incansable búsqueda de nuevos métodos para satisfacer las demandas de energía de la humanidad nos llevó a pensar en la energía directa que produce el sol. Existen varias aplicaciones de la energía solar actualmente. Brevemente se trata en este trabajo, cada una de estas así como el principio en que se basan para su funcionamiento. Para propósitos de esta tesis, interesan más las

plicaciones fotovoltaicas para generar electricidad y así bombear agua en regiones remotas.

1.1.1 CALENTAMIENTO DE AGUA.

El agua posee excelentes características para la transferencia de calor y para el almacenamiento del mismo. Por eso aunque la finalidad de obtener energía del sol es transferirla a otra forma de energía como por ejemplo, energía mecánica, aire acondicionado o calentamiento de fluidos industriales, en el proceso intermedio se comienza con la absorción de la radiación solar mediante el agua. Sin embargo, una de las principales aplicaciones es la de los llamados "calentadores solares", que no son mas que colectores solares que transfieren la energía procedente del sol hacia el agua que circula por una tubería y se mantiene a cierta temperatura en un tanque de almacenamiento, dispuesta para usarse en duchas, piscinas, saunas, etc. Para este tipo de sistemas, se utilizan colectores solares de tipo plano y concentrados. Los colectores planos pueden calentar agua hasta 200 grados, y los concentrados parabólicos a mas temperatura.

1.1.2 CALEFACCIÓN Y AIRE ACONDICIONADO.

Se utiliza agua caliente para proveer de calefacción a espacios interiores. Se almacena el agua caliente en tanques a altas temperaturas y entonces se hace circular por tuberías conectadas a radiadores convencionales. También se puede proporcionar enfriamiento a espacios cerrados mediante sistemas energizados por el sol. En este tipo de sistemas se utiliza el principio de refrigeración por absorción mas que por compresión.

1.1.3 ENERGÍA TÉRMICO-SOLAR

En este tipo de aplicación, se utilizan reflectores concentrados orientados en la dirección del sol para reflejar los rayos solares hacia un punto focal, en donde se

concentra la mayor parte de la energía. En el punto focal, se encuentra un generador el cual es accionado por turbinas que trabajan con vapor a alta presión. El principio fundamental es que los rayos solares calientan agua en el punto focal, produciendo vapor necesario para accionar una turbina que mueve un generador eléctrico que produce electricidad.

1.1.4 ENERGÍA FOTOVOLTAICA.

Particularmente, interesa más este tipo de aplicaciones de energía solar. La energía fotovoltaica se ha convertido en la opción para suplir de electricidad a localidades remotas, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. Se espera que en la década de los noventa se desarrollen importantes proyectos fotovoltaicos.

Esta es la tecnología mediante la cual se aprovecha los rayos solares para producir electricidad directamente; al decir directamente queremos decir que no hay procesos intermedios, como generadores, turbinas, etc. Las aplicaciones prácticas se encuentran generalmente en lugares en donde no es fácil el acceso a la red eléctrica; muchas veces resulta más económico instalar un sistema de generación fotovoltaico que hacer llegar la energía mediante líneas de transmisión.

La energía fotovoltaica se ha vuelto importante en países en vía de desarrollo debido a la necesidad de electrificación de localidades remotas. Se puede instalar un sistema fotovoltaico para satisfacer las demandas primarias de electricidad para un hogar (iluminación, TV, electrodomésticos, etc.) a un costo aproximado de unos \$500.00, según los precios de lista de distribuidores locales. Pero también en países industrializados se hace uso extensivo de la electricidad por medios fotovoltaicos. Algunas de las aplicaciones son:

- Alimentación de repetidores de microondas
- Teléfonos de emergencia
- Señalización de tráfico

- Bombeo de agua
- Iluminación de exteriores

Para dar cualquier aplicación a la energía solar, tenemos que estudiar el fenómeno de radiación solar, es decir como se propaga la energía procedente del sol y alcanza la superficie de la tierra, y cómo se hacen los cálculos necesarios para instalar un sistema solar en determinada localidad. En nuestro caso, estamos interesados en conocer las ecuaciones para el cálculo de radiación solar, para poder dimensionar un sistema de bombeo y así satisfacer la demanda de agua en determinada región.

1.2 RADIACIÓN SOLAR.

Con este término nos referimos a la energía que llega a la superficie de la tierra procedente del sol. Es necesario conocer la cantidad de radiación solar en determinada localidad para poder hacer el dimensionamiento del sistema de bombeo a instalar.

La radiación se propaga procedente del sol, en la forma de ondas electromagnéticas de distintas longitudes de onda y frecuencias, las cuales se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$c = \lambda f \quad \text{Ec.1.1}$$

donde:

c = velocidad de la luz

f = frecuencia

λ = longitud de onda

En los sistemas de bombeo y en general en cualquier sistema solar, nos interesa conocer la cantidad de potencia disponible en determinado lugar, la cual según la ecuación anterior depende de la longitud de onda. El 85% de la energía

que pueden captar los paneles fotovoltaicos que se utilizarán en este estudio está dentro del rango de la luz visible, el resto corresponde a radiación infrarroja y ultravioleta. Los paneles solares vienen protegidos con un material plástico que protege las células solares internas contra sobretensiones mecánicas que puedan destruirlas, sin embargo, estos protectores también tienen el propósito de filtrar cierta cantidad de luz de determinada longitud de onda. Como recomendación podemos decir que parte del mantenimiento que se le da a los sistemas solares es que los paneles tiene que estar completamente limpios; esto implica superficies brillantes porque de lo contrario cualquier superficie opaca no permitiría la buena difracción a través de ella.

La cantidad de radiación solar disponible en determinado lugar depende de los siguientes factores:

- Estación del año
- Latitud y altitud del lugar
- Hora del día
- Clima

Para propósitos de cálculo se ha definido la constante solar I_0 . Se define como la energía solar radiada por unidad de área, perpendicular a los rayos del sol, recibida en la parte alta de la superficie terrestre.

$$I_0 = 1.353 \text{ kW/m}^2$$

Este es el máximo valor de radiación debido al desvanecimiento por la masa del aire.

En materia de Ingeniería solar se habla de Insolación. La insolación se refiere a la cantidad de energía solar utilizable disponible en determinado lugar de la superficie terrestre. En otras palabras es la cantidad de radiación solar que incide perpendicularmente sobre una superficie plana. La insolación total se compone de

la insolación directa, la difusa y la reflejada. La radiación directa es la componente de los rayos solares que inciden perpendicularmente sobre la superficie en cuestión; la radiación difusa es la que se produce cuando un rayo se difracta en un objeto, el cual puede ser una nube por ejemplo; la radiación reflejada es la que se refleja en la superficie terrestre.

Estos datos de insolación se calculan generalmente con la ayuda de programas de computación y se colocan en tablas para que el diseñador pueda basarse en ellas para los cálculos.

En el desarrollo de cualquier sistema con energía solar tenemos que conocer con exactitud la localización de la tierra con respecto al sol. Aunque generalmente existen instituciones que se encargan de los aspectos climatológicos de cada país que proporcionan tablas con valores de insolación específicos para cada región bajo estudio, es conveniente conocer los ángulos del sol con respecto a la tierra. En ingeniería solar suele tomarse como referencia a la tierra, es decir que se considera a la tierra fija con respecto al sol, esto se llama "movimiento aparente del sol".

1.3 ÁNGULOS DEL SOL CON RESPECTO A LA TIERRA.

La posición del sol con respecto a un punto en la tierra puede darse mediante un conjunto de ángulos denominados ángulos solares, los cuales se definen como sigue:

- 1.- Ángulo de elevación o altitud solar, es la distancia angular entre el sol y el horizonte en cualquier punto de la tierra a determinada hora del día y período del año.
- 2.- Azimuth, es la distancia angular entre la proyección del sol sobre el horizonte y el eje sur.
- 3.- Latitud, se mide en grados norte o sur a partir del ecuador.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR

Sin agua es imposible vivir. Nuestra vida depende en gran manera de tener acceso al agua potable que llega hasta nuestro hogar mediante tuberías de distribución. Muchos estudios de ingeniería de suministro de agua se hacen con el objeto de llevar agua purificada que las personas puedan obtener con la mayor comodidad posible y cubrir la demanda de la misma. Toda el agua que llega hasta nuestro hogar ha sido objeto de un proceso bien definido: extracción de un pozo mediante bombeo, purificación, almacenamiento en tanques y conducción a través de las tuberías.

Cuando hablamos de sistemas de bombeo mediante energía solar, estamos hablando de un sistema que bombea el agua hasta el lugar de almacenamiento (o distribución) utilizando la luz del sol como energía principal para realizar el trabajo de bombear. Este proceso se logra gracias al efecto fotovoltaico, que como veremos mas adelante se trata de la conversión de la energía lumínica procedente del sol en energía eléctrica. El voltaje producido sirve para accionar un dispositivo electromecánico que moverá la bomba hasta lograr extraer el agua del lugar deseado. Un esquema de sistema de bombeo en su forma más simple, se presenta en la figura 2.1.

Por qué utilizar energía solar para el bombeo de agua? Para poder abastecer de agua a localidades donde es muy difícil, si no, imposible, conseguir energía eléctrica mediante líneas de transmisión. Una vez hecho un estudio de factibilidad, es posible demostrar para algunas aplicaciones que resulta mas económico instalar sistemas de bombeo solares que pagar a la empresa que suministra los

servicios de electricidad por la extensión de líneas. Se ha demostrado que para una amplia gama de aplicaciones, los sistemas accionados con el proceso fotovoltaico son sumamente confiables y de menor costo que los otros métodos.

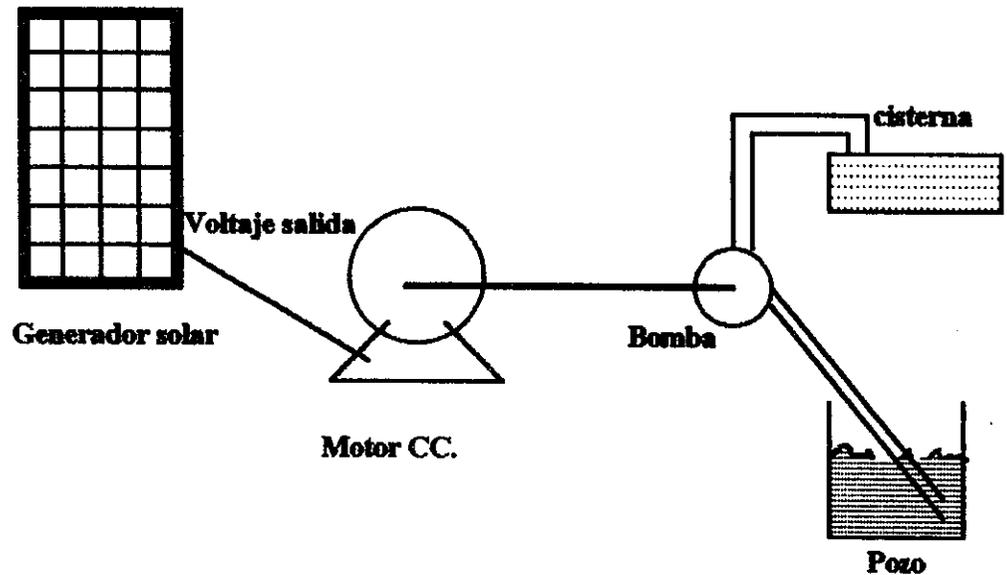


Fig.2.1. Sistema fotovoltaico de bombeo de agua.

Existen numerosos sistemas solares de bombeo instalados alrededor del mundo. Aunque la inversión inicial se considera grande, el poco mantenimiento y la confiabilidad hace que estos sistemas sean rentables y es por eso que están cobrando mucho auge en casi cualquier país. Las bombas solares son especialmente útiles para las demandas de cantidades medianas de agua. Lo único que se necesita para instalar un sistema de estos es un lugar donde haya suficiente luz solar (para satisfacer la demanda) y una fuente de agua. Aún así, a pesar de lo sencillo que esto suena, no existen muchos sistemas de bombeo solares ya que es una tecnología relativamente nueva que muchos desconocen. Muchos proyectos de bombeo de agua se aplican especialmente para comunidades que no tienen acceso al agua potable y que muchas veces consiguen financiamientos para este tipo de proyectos mediante organizaciones no gubernamentales.

Un ejemplo típico de esto son las comunidades de refugiados en nuestro país. Las ONG's financian los proyectos de energía los cuales son canalizados a través de organizaciones no lucrativas, con el fin de proveer a los pobladores remotos tanto de electricidad como agua.

2.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA.

Los cuatro elementos básicos de un sistema de bombeo mediante energía solar son los siguientes:

1. Paneles solares
2. Motor de corriente continua
3. Bomba
4. Accesorios (cables, tubería, etc.)

Aunque algunos proyectos de gran potencia se han desarrollado con motores de corriente alterna, éstos requieren del uso de inversores. Este trabajo pretende estudiar solo los sistemas de corriente continua y además incluir un quinto elemento en la lista anterior: El controlador. Este va entre el panel y el motor; es el objetivo de estudio del presente trabajo y se discutirá en capítulos posteriores.

2.2 DISEÑO DE SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICOS.

El diseño de sistemas de bombeo fotovoltaicos parte del conocimiento de los elementos individuales que intervienen en el proceso, así como de los requerimientos específicos de cada proyecto, los cuales se obtienen mediante un estudio y observación del sitio en donde se instalar el sistema.

Lo primero que hay que hacer es estimar la demanda de agua. Esto implica conocer la cantidad de agua que necesitamos bombear, hasta dónde hay que transportarla y la cantidad disponible de sol en dicha localidad.

Hay tres necesidades de agua que se deben considerar:

- Agua para beber y cocinar
- Agua para animales
- Agua para riego

Es difícil estimar la cantidad de agua diaria que consumen los seres humanos, sin embargo para propósitos de diseño se recomienda utilizar una tasa de consumo de 100 litros/persona/día. Si el proyecto es para dar de beber a ganado o un proyecto de riego, hay que hacer estudios de demanda preliminares, atendiendo a las necesidades específicas del cliente, los cuales generalmente son suministrados por ingenieros agrónomos, etc. Los ingenieros que instalan equipos de bombeo fotovoltaicos rara vez se ven en la necesidad de hacer cálculos de demanda; generalmente se parte de una demanda dada.

Todos los cálculos se hacen tomando como base "El mes crítico". Este es el mes en el que se dispone de la menor cantidad de insolación y la mayor demanda de agua.

Aunque existen métodos muy complejos con niveles de exactitud altos, aquí se trata con un método sencillo que logra buenos resultados. Este se basa en la utilización de nomogramas que definen el tamaño del sistema que cumpla con los requisitos de bombeo en el mes crítico.

2.2.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

El diseñador debe contar con el juego de nomogramas que se encuentra en el apéndice 2. Partiendo de que se conoce la cantidad de agua a bombear durante el día en metros cúbicos y la carga de bombeo, se puede calcular la energía necesaria para realizar dicho trabajo. Después de eso se sigue con el siguiente procedimiento.

Calcular carga hidráulica. El promedio de energía diaria en kW/hora se calcula para el mes crítico de cada estación. Se utiliza el nomograma 1 del apéndice 2

Calcular pérdidas del sistema. Incluye las pérdidas en los cables, pérdidas debido a malos empalmes y controladores electrónicos. Generalmente estas pérdidas son insignificantes, por lo que se toman únicamente las pérdidas en la bomba (40-60%) y en el motor (10-20%).

Definir la insolación local. Aunque en el primer capítulo se expone la utilización de tablas para cálculos de insolación local, en sistemas de bombeo es práctica común que se utilicen mapas de horas diarias de sol. Lo que interesa en sistemas de bombeo es la cantidad de agua diaria que pueda suministrarse, es decir interesan las cantidades globales y no puntuales, por lo tanto se toman los promedios medidos en diferentes lugares suministrándolos como horas diarias de sol. En el Apéndice 3 se muestran esos mapas.

Definir el período crítico. Se elige el mes con menos insolación y con mas demanda de agua. Esto exige cierta destreza de parte del diseñador que tiene que encontrar la peor combinación para mantener el suministro de agua en todo tiempo. Puede hacerse mediante la consulta de tablas de consumo, en períodos anteriores, junto con datos de insolación mensual; ya con este historial es posible encontrar el mes crítico.

Calcular la potencia de los paneles solares. Aunque en el capítulo anterior se demostró cómo calcular la insolación para determinada localidad, en sistemas de bombeo se utilizan regularmente mapas que dan la insolación en horas de sol. Esto es debido a que lo que importa es que se pueda satisfacer la demanda diaria de agua en su totalidad no importa cómo se produzca durante el día. Los paneles fotovoltaicos se especifican por producción de watts bajo condiciones estándar de 1000 W/m^2 , con la temperatura de 25° C . La temperatura tiene un efecto negativo de 0.5% por grado centígrado.

Ahora es momento de ejemplificar cómo se utiliza el método anterior para la selección de un sistema de bombeo. El objetivo principal de este procedimiento es encontrar la potencia necesaria que deben suministrar los paneles solares.

efectuado por una bomba que toma su energía de una fuente primaria, que puede tratarse de un motor eléctrico.

Existen diferentes tipos de bombas, las cuales manifiestan características particulares que las hacen aptas para una u otra aplicación; para este estudio en particular, estamos interesados en dos tipos de bombas: **centrífugas y volumétricas.**

Las bombas centrífugas se utilizan en aplicaciones de flujo moderado a elevado, pozos de tubo o en cisternas. Se diseñan para una carga fija y su rendimiento aumenta con la velocidad de rotación. Si el punto de operación del sistema se aleja mucho del punto de operación de diseño de la bomba, disminuye la eficiencia de la bomba. Se han instalado sistemas de bombeo con centrífugas que pueden bombear hasta 1200 metros cúbicos /día. Sin embargo, no es recomendable utilizarlas para cargas mayores de 6 metros.

Las bombas volumétricas pueden bombear a velocidad casi constante, independiente de la carga pero directamente proporcional a la velocidad. Son ideales para aplicaciones de velocidad baja y cargas muy grandes. Para dar una idea de su aplicación: se han instalado sistemas que bombean de 0.3 metros cúbicos por día a 40 metros cúbicos por día a cargas que van desde los 10 metros hasta los 500 mts.

La bomba se debe dimensionar un 20% más grande que la que se necesita para satisfacer la demanda diaria de agua. Esto se debe a la eficiencia.

Para dimensionar la bomba, los fabricantes suministran los datos técnicos, como los que se encuentran en el Apéndice 1. En este caso se trata de una bomba centrífuga de ¼ Hp, marca Solar Slowpump de la casa Dankoff Solar Products, Inc.

Si se necesita 2 m^3 /día, a una cabeza (distancia de bombeo) de 240 pies:

$$2 \text{ m}^3 = 264 \text{ galones.}$$

2.2.1.1 EJEMPLO DE DISEÑO.

Necesitamos bombear 10 m^3 de agua al día a una carga estática de 10 m. Se utilizará una bomba centrífuga. Según la localidad se dispone de 5 horas de sol (kWh/m^2 -día) a una temperatura ambiente de 30 grados centígrados.

Partiendo de la demanda, nos colocamos en el punto A del nomograma 1, que corresponde a 10 m^3 de agua al día. Se proyecta una línea horizontal hasta intersectar la recta de la carga de bombeo de 10 m (punto B). Se proyecta una línea vertical hasta intersectar la línea que corresponde a la bomba centrífuga (punto D), esto lleva al punto E que es la potencia que se requiere del motor.

Una vez conocida la potencia de entrada diaria del motor, se ubica en las ordenadas superiores del nomograma 2. Se proyecta una línea del punto E al punto F que corresponde a la cantidad de insolación.

Del punto F, se baja horizontalmente hacia el punto G que es la potencia requerida de los paneles. Se hace una corrección por temperatura que viene de dirigir la línea vertical hasta la línea con pendiente de 30° C . El resultado se encuentra en el punto Y:

$$P_{\text{panel}} = 160 \text{ W}$$

2.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES.

Existen algunos criterios para aplicar en determinado proyecto de acuerdo a la necesidades particulares. Conociendo el volumen de bombeo y la distancia de bombeo (carga o cabeza), se puede elegir el tipo de bomba que se utilizará.

2.3.1 SELECCIÓN DE BOMBAS.

Una bomba de agua es un dispositivo mecánico que transfiere energía al fluido mediante el movimiento de sus partes, que bien puede tratarse de un piston o un impulsor. Se necesita realizar trabajo en llevar el agua desde un punto hasta otro; por ejemplo desde un pozo hasta un tanque de almacenamiento. Dicho trabajo es

en un día:

$$(2 \text{ m}^3 / \text{día})(264 \text{ gal-día/m}^3) = 528 \text{ gal/día}$$

si tenemos 5 horas de sol/día, entonces:

$$(528 \text{ gal/día}) / (5 \text{ h/día}) / (60 \text{ min/hora}) = 1.76 \text{ galones/minuto.}$$

Si incrementamos en un 20% la demanda obtenemos: 2.11 galones/minuto

Según los datos del Apéndice 1, necesitamos:

1 Bomba Solar Slowpump Modelo 1304 de ¼ Hp.

2.3.2 SELECCIÓN DE LOS PANELES.

El método de nomogramas descrito anteriormente tiene como objetivo principal llegar a conocer cuánta potencia deben suministrar los paneles para satisfacer la demanda.

Los paneles se seleccionan de acuerdo con los requerimientos de la bomba. En el apéndice 4 se muestran los datos técnicos que corresponden a paneles solares marca Solarex. Se especifican por la cantidad de potencia que pueden producir en condiciones estándar, es decir sobre la insolación ideal.

Una vez que se encuentra la potencia de los paneles por el método de nomogramas, se divide ese valor entre la cantidad que puede suministrar cada módulo individualmente; así se obtiene la cantidad de paneles necesarios.

2.3.2.1 ORIENTACIÓN DE LOS PANELES .

Cuando se refiere a la orientación de los paneles solares, se trata de la posición del colector con respecto del ecuador. Cuando se diseña un sistema fotovoltaico se debe tener en cuenta que el panel debe ir orientado hacia la trayectoria del sol, es decir paralelo a la línea imaginaria Este-Oeste. Si la localidad donde se instala el sistema está al norte del ecuador, entonces los paneles irán orientados hacia el sur, y por consiguiente si la localidad es al sur del ecuador, los paneles irán hacia el norte. El ángulo de inclinación debe escogerse

Igual a la latitud del sitio de instalación. Esto se hace para que los rayos incidentes sean lo más perpendicular posible. La componente de radiación tangencial al panel solar tiene que ser mínima. Por lo tanto, cuando se instalan equipos solares hay que tener a mano la latitud de la localidad en donde se está trabajando; esos datos son fáciles de obtener mediante institutos geográficos.

En la siguiente figura se puede observar como se orienta un panel solar cuando se instala.

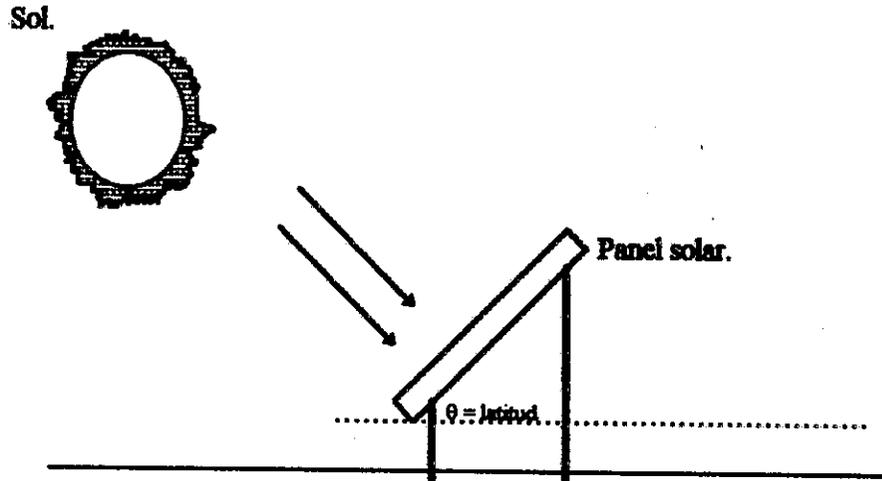


Fig.2.2. Inclinación de los paneles solares.

2.3.3 SELECCIÓN DE CONTROLADORES.

El controlador electrónico se coloca entre los paneles solares y el motor de corriente continua. Puede utilizar una fuente exterior para polarizar los circuitos internos.

Hay que tomar en cuenta que para aplicaciones de baja potencia, es decir en proyectos de baja demanda de agua, se utilizan equipos existentes que pueden operar dentro de un determinado rango. Los fabricantes de equipo solar proporcionan controladores electrónicos que pueden trabajar dentro del rango para el que están especificados los demás equipos.

A los controladores también se les conoce por PPT's (Power Peak Tracker) o acondicionadores del punto pico de potencia. Estos hay del tipo discreto y continuo.

Los controladores discretos intercambian las conexiones en serie y paralelo para obtener la mejor combinación para suministrar la máxima potencia disponible a la carga. La desventaja de estos es que se aplican a sistemas grandes debido a que hay que tener varios paneles interconectados.

Los controladores continuos son del tipo que estudiaremos aquí. Estos pueden ser lineales o de conmutación como se verá más adelante. Los convertidores de conmutación son más eficientes y pueden manejar grandes cantidades de corriente.

Sin duda que no hay mucho que seleccionar cuando se trata de controladores. Por eso es que en este trabajo se propone el diseño de uno para cierto proyecto en especial.

En proyectos grandes lo más recomendable es que el que instala el sistema construya su propio controlador ya que solo así se podrá solucionar las necesidades específicas de cada aplicación.



ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

El capítulo anterior trata sobre el funcionamiento de un sistema fotovoltaico de bombeo de agua así como de algunos métodos que se utilizan en la práctica para el diseño del mismo. En este capítulo se estudia cada componente por separado, analizando los principios que gobiernan su funcionamiento y cómo se comportan al interconectarlos. Para poder diseñar el controlador, hay que conocer los modelos de cada componente, examinar la forma en que se puede optimizar la potencia y proceder a establecer una opción de diseño. Cuando aquí se refiere a modelo, quiere decir encontrar la ecuación que relaciona los parámetros principales de cada componente, un circuito equivalente, y las curvas de operación.

A continuación se analizará cómo se produce el fenómeno de bombear agua utilizando un panel fotovoltaico, un motor de corriente continua y una bomba centrífuga.

3.1 PANEL FOTOVOLTAICO.

Es un dispositivo que convierte energía lumínica en energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en el principio del efecto fotovoltaico que se describirá más adelante cuando tratemos la forma de trabajo de los paneles solares.

Los paneles fotovoltaicos se clasifican de acuerdo a un conjunto bien definido de condiciones conocidas como Condiciones de Prueba Normalizadas (STC). Estas incluyen la temperatura de las células fotovoltaicas (30°C) y la intensidad de radiación (1 kW/m^2). En el proceso de producción, los paneles se prueban en una cámara conocida como simulador de destellos. Esta consiste en una lámpara de destello y un filtro que simula lo mejor posible la luz solar. Como

el destello dura tan solo 50 milisegundos, los paneles no se calientan mucho. Esto permite medir las características eléctricas del módulo a una temperatura que se aproxima a los 25° C.

3.1.1 CÉLULA SOLAR.

Esta es la unidad fundamental de que se componen todos los módulos fotovoltaicos. Una célula fotovoltaica típica tiene un diámetro de seis pulgadas y pesa únicamente seis gramos. Sin embargo, las potencias que pueden producir son muy bajas. Por ejemplo, una como la descrita anteriormente podría generar únicamente 1 W de potencia. Sin embargo, para desarrollar cantidades mas grandes de potencia, es posible interconectarlas en arreglos serie-paralelo; dichos arreglos forman los paneles fotovoltaicos.

Está construida de materiales semiconductores, principalmente silicio dopado con alguna cantidad de fósforo. En el silicio, se necesita una energía de 1.08 eV para liberar un electrón y así producir corriente eléctrica; casi el 50% de los fotones procedentes de radiación solar tienen una energía de 1.08 eV o mas, lo que hace al silicio un material idóneo para captar la radiación procedente del sol.

Las células necesitan un área superficial que sea lo mas grande posible y que de perpendicularmente a los rayos solares. La capa de material tipo p y los contactos metálicos son delgados de modo que la radiación incidente atraviese la capa y alcance la unión. El principio de operación se deriva del efecto fotoeléctrico que fue descubierto accidentalmente por Hertz en 1887 cuando experimentaba con las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético. Años después se hacen investigaciones por Millikan, Thompson, Zeeman y mas recientemente el propio Albert Einstein.

Su construcción es similar a la de un diodo, es decir que una celula solar es una union p-n tal como se muestra en la figura siguiente.

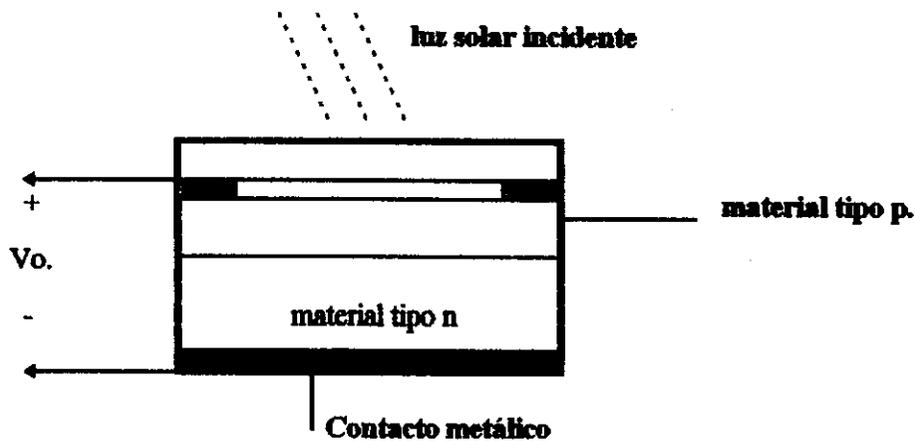


Fig.3.1. Estructura de una célula solar.

El efecto fotoeléctrico se puede explicar con base en los principios de la mecánica cuántica que dice que la energía electromagnética consiste en paquetes de energía que viajan a la velocidad de la luz. Así, se puede decir que la luz está compuesta de partículas llamadas fotones.

Un fotón puede chocar con un electrón de valencia e impartirle suficiente energía para que abandone el átomo al cual se encuentra ligado. El resultado de esto es una generación de electrones libres y huecos que producen la fotocorriente que circulará de el material tipo n al material tipo p. Sin embargo, si el dispositivo está eléctricamente aislado de el circuito externo, la corriente neta debería ser igual a cero. Esto significa que debe existir una corriente de retorno llamada corriente de unión, que debería ser igual a la fotocorriente. Esta fluye del material tipo p al tipo n y es por lo tanto del tipo directo. La corriente de polarización directa en una unión p-n está en función del voltaje de la unión y la podemos representar por la ecuación :

$$I = I_s(e^{kV / T k} - 1) \quad \text{Ec.3.1}$$

3.1.1.1 MODELO DE UNA CÉLULA SOLAR.

Dado que se genera corriente en una forma intrínseca, en el modelo debe aparecer una fuente de corriente como mínimo. La corriente generada depende de las condiciones ambientales (insolación, temperatura). El modelo incluirá el circuito equivalente con el que se puede entender el funcionamiento en términos eléctricos de la célula; la ecuación servirá para hacer cálculos y las curvas para un análisis gráfico.

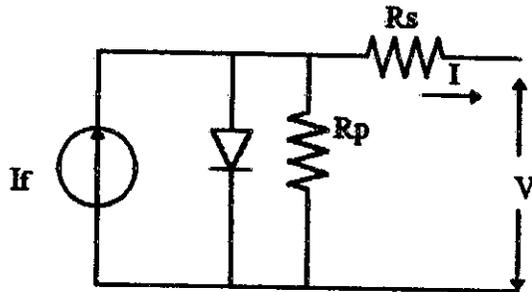


Fig.3.2. Circuito equivalente de una célula solar.

en donde:

I_f = fotocorriente proporcional a la insolación y temperatura.

R_s = resistencia en serie de la célula

R_p = resistencia en paralelo.

El diodo representa la unión PN de que está compuesta la célula.

Las ecuaciones características de la célula son:

$$I_f = I_{cc} S_n + I_t (T_c - T_r) \quad \text{Ec.3.2}$$

$$I_d = I_s (e^{kV/T_c} - 1) \quad \text{Ec.3.3}$$

$$I_{rp} = (V + IR_s)/R_p \quad \text{Ec.3.4}$$

$$I = f(V,I) = I_f - I_d - I_{rp} \quad \text{Ec.3.5}$$

S_n : insolación normalizada

I_{cc} : corriente de corto circuito bajo condiciones de prueba normalizadas.

I_t : coeficiente de temperatura de corto circuito ($1.7E-3 A/^{\circ}K$).

T_c : temperatura de operación de la célula.

T_r : temperatura de referencia ($300\text{ }^{\circ}K$)

Con estas cuatro ecuaciones y asumiendo una corriente inversa de saturación constante, podemos llegar a deducir la ecuación de voltaje-corriente que gobierna una célula solar.

$$I = I_f - I_s(e^{kv/Tk} - 1) - (V + IR_s)/R_p$$

$$I + I(R_s/R_p) = I_f - I_s(e^{kv/Tk} - 1)$$

$$I(1 + R_s/R_p) = I_f - I_s(e^{kv/Tk} - 1)$$

$$I = \frac{I_f - I_s(e^{kv/Tk} - 1)}{(1 + R_s/R_p)}$$

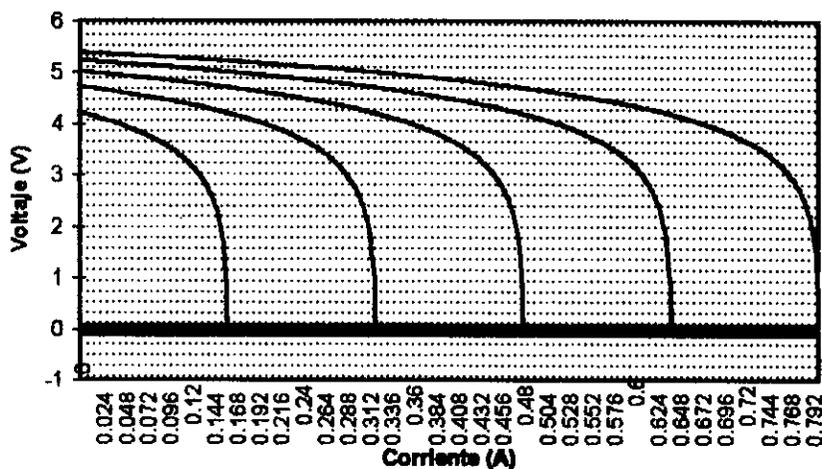


Fig.3.3 Curvas características de una célula solar

Una célula solar tiene una eficiencia baja; existen células con eficiencias entre 12 y 24%. Se están haciendo estudios para mejorar la eficiencia y reducir los costos de fabricación. Empresas como Texas Instruments y Southern California Edison están trabajando en el desarrollo de células esféricas. El objetivo es desarrollar células y fabricarlas en masa para bajar considerablemente los costos.

Según algunos datos, la tecnología fotovoltaica cuesta entre \$0.25 y \$0.30 por kilowatt-hora. Con las células esféricas se espera reducir los costos a la mitad. Debido a la baja eficiencia y baja potencia de las células individualmente, para lograr aplicaciones reales, estas se interconectan entre sí para obtener paneles solares; estos paneles son los que venden los fabricantes y están disponibles a los diseñadores de sistemas solares.

3.1.2 MODELADO DEL PANEL SOLAR.

Están constituidos por varias células conectadas en combinaciones serie-paralelo para poder lograr las características de voltaje y corriente deseadas, es decir satisfacer la demanda de potencia. Los paneles solares vienen sellados y constan de varias células conectadas entre sí, las cuales no están accesibles para modificación.

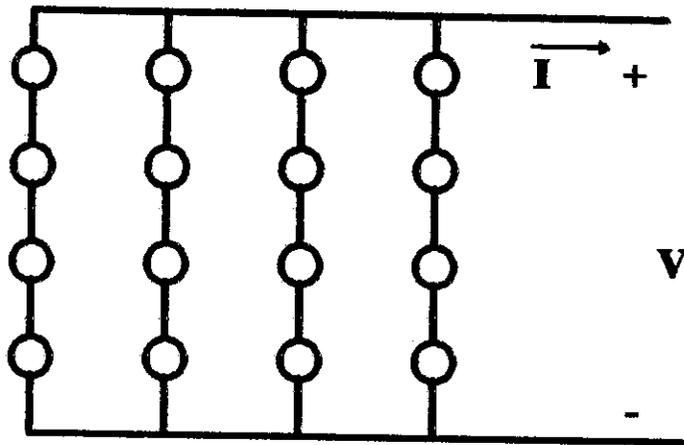


Fig.3.4. Conexiones internas de un panel solar de 16 células. $N_p=4$, $N_s=4$.

En la gráfica podemos observar un panel que consta de 16 células. Se conectaron de tal forma que hayan 4 filas conectadas en paralelo y cada fila consiste en 4 células conectadas en serie. Al conectar células en paralelo incrementamos la capacidad de corriente, y al conectarlas en serie incrementamos el voltaje que pueden suministrar. Para lograr buenas conexiones,

es necesario que todas las células tengan las mismas características de voltaje-corriente, si bien es cierto que en la práctica esto es difícil de lograr.

Para efectuar el diseño del controlador, hay que establecer claramente cuál es la ecuación que define el comportamiento del panel solar; aunque en la sección anterior se definió el modelo para una célula individual, aquí vamos a ampliar el modelo para que este sea válido para un panel que consta de N_p filas de N_s células conectadas en serie. La fotocorriente se incrementará en N_p , debido a que se suman N_p fuentes de corriente. El factor N_p también afecta la corriente del diodo. El voltaje a través del diodo se incrementará en N_s , debido a que se suman N_s fuentes de voltaje.

El modelo resultante de un panel solar es:

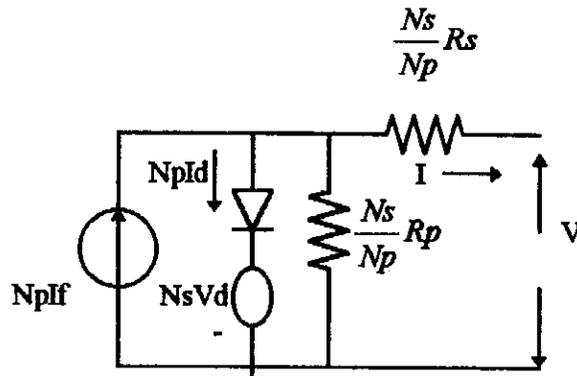


Fig. 3.5. Circuito equivalente de un panel solar

Donde:

$$\begin{aligned} I_d &= N_p \cdot I_{d1} & I_{d1}, V_{d1}, I_f: & \text{valores individuales (de una célula).} \\ V_d &= N_s \cdot V_{d1} \\ I_p &= N_p \cdot I_f \end{aligned}$$

La ecuación resultante es:

$$I = N_p I_f - N_p I_o \left(e^{\frac{k(V + (N_s/N_p) \cdot R_s I)}{T k N_s}} - 1 \right) - \frac{N_p}{N_s R_p} (V + \frac{N_s}{N_p} R_s I) \quad \text{Ec.3.6}$$

Las curvas para el modelo MSX 64 de SOLAREX se muestran en el apéndice 4.

3.1.3 INTERCONEXIÓN DE PANELES.

Puede ser necesario interconectar varios paneles para satisfacer la demanda de potencia. En algunos casos posiblemente se tenga una bomba de un voltaje que no sea igual al que suministra el panel. Hay que interconectarlos de tal modo que el resultado de voltaje y corriente sea el que necesite la bomba. Este es un proceso sencillo serie-paralelo hasta obtener los resultados deseados; es el mismo principio que se utiliza cuando se disponen de varias resistencias y se desea un valor específico de resistencia. Se pueden interconectar varios paneles de tal forma que las características resultantes sean iguales a interconectar todas las células de ambos paneles.

3.1.3.1 CONEXIÓN DE MÓDULOS EN SERIE.

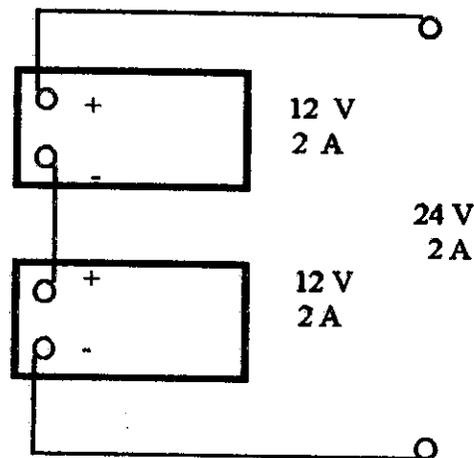


Fig.3.6. Conexión de paneles en serie.

El efecto de conectar 2 paneles en serie es aumentar el voltaje y mantener la corriente constante. Algunas cargas están especificadas para trabajar bajo las condiciones nominales; hay que ajustar el voltaje de salida de los paneles de modo que se logre el punto de operación deseado.

3.1.3.2 CONEXIÓN DE MÓDULOS EN PARALELO

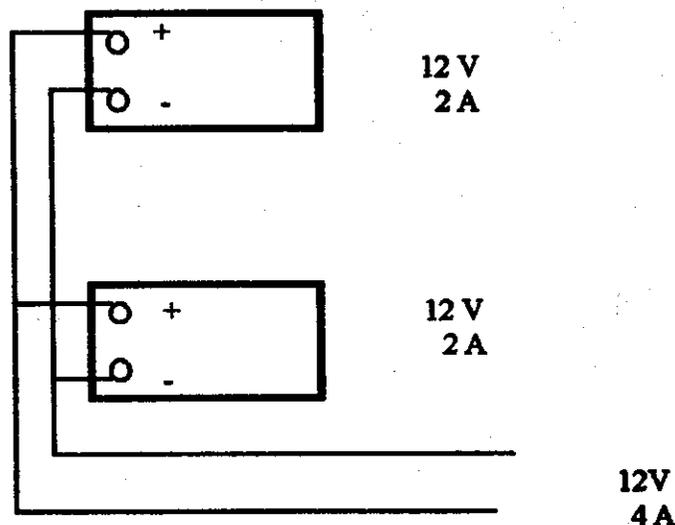


Fig.3.7. Conexión de módulos en paralelo.

El efecto de conectar 2 paneles en paralelo es aumentar la corriente y mantener el voltaje constante.

3.1.3.3 CONEXIONES EXTERIORES.

Cuando se conectan varios paneles entre sí, hay que tomar en cuenta también la instalación mecánica del equipo. Los paneles vienen con un marco de metal resistente para poder montarlo sobre las bases. Las bases deben escogerse de acuerdo a las condiciones específicas del diseño. En algunos lugares es necesario hacer el montaje sobre bases de hierro debido a que hay demasiado viento y cuando este choca contra la superficie del panel puede causar que quiebren si estos no están sujetos en unas buenas bases. Todos los paneles deben tener el mismo ángulo de inclinación. En algunos casos el montaje se hace sobre "racks" móviles; estos pueden moverse para lograr la mayor incidencia de radiación sobre la superficie del panel. En sistemas de bombeo no es recomendable invertir en este tipo de montaje ya que colocando los paneles a un ángulo cercano a la latitud del lugar se obtiene un desempeño aceptable.

El alambrado de los paneles suele hacerse por electricistas debidamente entrenados, si se trata de cantidades grandes de potencia, es decir cientos de

paneles. Cuando se realiza el alambrado hay que tener ciertas precauciones para prevenir descargas eléctricas que puedan causar daño humano. Estas precauciones son las mismas que se toman en la instalación de cualquier sistema eléctrico residencial o industrial: utilizar guantes, zapatos aislados, herramientas aisladas, etc.

Cuando se realiza el alambrado, se utilizan cajas de conexión. La mayoría de los fabricantes de equipos solares suministran junto con los paneles, los accesorios para conexión, que incluyen la caja de conexión. Es muy importante que las conexiones se hagan por medio de esta caja para evitar que se dañen los contactos de los paneles. En el momento de la conexión eléctrica, las polaridades deberán ser respetadas y las conexiones realizadas de forma que se evite la corrosión, las fugas de corriente y las resistencias en serie.

Para concluir con esta sección, hay que hacer notar que los fabricantes de paneles fotovoltaicos dan una garantía promedio de 20 años. Esta se basa en cálculos de envejecimiento que se basan en una larga experiencia práctica, pruebas de simulación y verificación constante de las técnicas de manufactura utilizadas.

3.2 MOTORES DE CORRIENTE CONTÍNUA.

Este tipo de motores se alimentan de una fuente de voltaje constante o a través de rectificadores estáticos. Se aplican donde se requiere variedad de velocidades o una regulación muy precisa. Tienen grandes ventajas debido a su versatilidad; esto quiere decir que se pueden hacer diferentes combinaciones de conexión para lograr las características deseadas de par-velocidad o tensión-corriente.

En sistemas de bombeo se aplican principalmente por 2 razones. La primera es porque los paneles solares producen corriente continua; esto implica que hasta pueden conectarse directamente al panel solar sin tener que conectar dispositivos intermedios; pero, por supuesto, la introducción de un controlador electrónico mejora el desempeño del conjunto. La segunda razón es porque es más fácil

controlar un motor de corriente continua; es decir que dadas sus características inherentes, son los dispositivos electromecánicos mas aptos desde el punto de vista del control.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES DE CC.

El devanado del estator o de campo crea una fuerza magnetomotriz a lo largo del devanado. El rotor o armadura también crea una fuerza magnetomotriz estacionaria que está desfazada 90° eléctricos con respecto al campo. La acción de estas dos fuerzas magnetomotrices produce el par.

El valor de la FEM inducida para el motor depende de sus características de construcción, de la velocidad de la máquina y de la corriente del campo. El torque o par depende también de las características de construcción y de la corriente de campo y la intensidad del inducido.

Las ecuaciones de la tensión inducida y el torque son:

$$E = K \phi \omega$$

$$T = K \phi I_a$$

donde:

K: constante del motor
 ϕ : flujo de excitación
 I_a : corriente del inducido
 ω : velocidad de rotación.

Los motores de corriente continua se clasifican de acuerdo a cómo se produce la excitación del campo o dicho de otro modo; la forma de conectar el devanado de campo y el inducido. Las conexiones se llevan a cabo gracias a que el inducido toma la corriente a través de escobillas de carbón. Los tipos de motores son:

- a) Independiente
- b) Serie

- c) Derivación
- d) Compuesto

Las ecuaciones eléctricas para cada tipo de motor son:

Independiente: $V = E + I R_a$

Serie: $V = E + I (R_a + R_f)$

Derivación: $V = E + I_a R_a$
 $I = I_a + I_f$

Las ecuaciones anteriores son de mucha utilidad cuando se estudia el sistema en conjunto, es decir el funcionamiento del motor con la carga incorporada. Se incluyen en estas ecuaciones las de la carga mecánica y se obtiene así un modelo completo del sistema.

La ecuación dinámica que describe el funcionamiento del sistema completo es:

$$T = k \phi i_a = J \frac{d\omega}{dt} + T_L \quad \text{Ec3.7}$$

Siendo J el momento de inercia y TL el par mecánico resistente que se opone a la carga.

Para aplicaciones en sistemas de bombeo con paneles solares, existen algunos lineamientos que se deben tener presentes cuando se escoje el tipo de motor. Se han hecho estudios de los diferentes tipos de motores conectados a bombas centrífugas y volumétricas. Las soluciones a las ecuaciones dinámicas se han hecho mediante programas de simulación. El objetivo principal al escoger el tipo de motor debe ser el de lograr un acoplamiento óptimo de modo que se aproveche la energía máxima que pueden suministrar los paneles solares. Desde el punto de vista del panel solar, es decir sacar la máxima potencia del panel, los estudios realizados conducen a las siguientes conclusiones:

A. El motor con excitación independiente (ó de imán permanente) acoplado a una bomba centrífuga es la mejor combinación para un mejor acoplamiento al generador solar.

B. El motor serie es muy compatible con un generador solar.

C. Cuando un conjunto de paneles (generador solar) se conectan a un motor derivación, se obtienen malos resultados.

D. La bomba centrífuga es mucho mas compatible con el generador solar que la bomba volumétrica.

E. El tiempo de arranque del sistema depende de la inductancia de la armadura y del campo, la inercia del sistema, y las limitaciones de corriente del generador solar. El tiempo mas corto de arranque se obtiene con el motor de excitación independiente, y el mas largo con el motor derivación. Los tiempos de arranque para todos los tipos de motores, alimentados por generadores solares, son mas largos que mediante fuentes de convencionales de voltaje constante.

En algunos casos, los sistemas de bombeo accionados por energía solar utilizan motores de corriente alterna; motores de inducción para ser mas específicos. Esto es principalmente cuando hay que trabajar con cantidades grandes de potencia y el costo de instalar motores de corriente continua es elevado. Sin embargo, al utilizar motores de inducción, es necesario colocar un inversor entre el generador solar y el motor. El punto clave cuando se elige corriente directa o corriente alterna, es el factor económico; hay que estudiar el costo de instalación de cada sistema, así como los costos de mantenimiento y la disponibilidad de los motores con las características necesarias en el mercado local.

Cuando se coloca un controlador electrónico entre el generador solar y el motor, es posible obtener buenos resultados aún cuando las combinaciones no sean las mas aptas para sistemas solares. En estos casos el funcionamiento del sistema en conjunto dependerá en gran medida de el diseño del controlador y no de los otros componentes. Analizando cuidadosamente el modelo de cada sistema, es posible encontrar una relación entre sus parámetros (corriente, voltaje, par, velocidad., etc.) tal que ponga al generador solar a su punto máximo de

potencia. La precisión depende del controlador; sin embargo, el costo que hay que pagar por una buena precisión es la complejidad del mismo. Se han incorporado controladores para máxima potencia que están gobernados por computadoras; para estos sistemas, existe gran cantidad de datos de entrada, como temperatura, niveles de insolación, orientación, etc. La computadora analiza los datos de entrada y modula el controlador de modo que trabaje a una razón de trabajo ideal para potencia máxima en cualquier instante.

Debido a que los estudios han demostrado que, sin un controlador electrónico, la mejor alternativa para sistemas de bombeo es el motor independiente acoplado a una bomba centrífuga, utilizaremos estos resultados para diseñar el controlador en base a esta configuración. Esto permitirá que enfoquemos el desarrollo del proyecto hacia el controlador electrónico porque los cálculos para el sistema dinámico con motor independiente se simplifican considerablemente. Al hablar de excitación independiente, nos referimos en este caso a motores de imán permanente; es decir que el flujo del campo se obtiene mediante un imán colocado en la carcasa del motor.

ACOPLAMIENTO ÓPTIMO PARA OBTENER LA POTENCIA MÁXIMA

Los generadores fotovoltaicos son dispositivos no lineales que responden continuamente a las variaciones en el nivel de insolación, temperatura, etc. Las características constructivas de los generadores y su funcionamiento se explicaron en detalle en los capítulos anteriores; sin embargo, cualquier sistema debe funcionar en las condiciones óptimas para las cuales fue diseñado y principalmente en los sistemas fotovoltaicos, en donde la fuente primaria de energía es gratuita y la inversión inicial en equipo es grande.

Para estudiar el acoplamiento de dos elementos de una red eléctrica, puede hacerse un estudio por separado de los elementos, luego unir los resultados y estudiar el sistema en conjunto. En este caso, si se coloca en una gráfica de voltaje-corriente las curvas de el generador, el motor y la bomba se obtiene el punto de operación del sistema, que es el lugar donde se intersectan las diferentes curvas. Lo anterior es un análisis gráfico; daría el mismo resultado si se resuelven las ecuaciones de cada elemento, aunque posiblemente con un poco mas de dificultad. En este trabajo no se pretende profundizar mucho en el análisis matemático, sino utilizar los resultados para obtener las condiciones óptimas de operación.

Se puede construir una curva de máxima potencia para los generadores solares, multiplicando la corriente con el voltaje y luego derivar con respecto a un parámetro (voltaje, corriente) e igualando a cero. Cuando se logra que la carga que se conecta al generador, que en este caso es un conjunto motor-bomba tenga una curva de potencia idéntica a la del generador, entonces se habrá logrado un acoplamiento perfecto; dado que esto es casi imposible, debe diseñarse el sistema de modo que ambas curvas sean lo mas parecido posible. Como se demostrará mas adelante existe cierta relación entre la fotocorriente y la corriente

de carga en el generador que permite la máxima transferencia de potencia; lo que se pretende entonces, es que el controlador que se diseña sea capaz de mantener esa relación mediante un monitoreo de la fotocorriente y un sistema de control que ajuste la corriente de carga. Sin embargo, se puede encontrar mediante el análisis que se hará en las secciones siguientes, que no es necesario emplear sistemas complejos de monitoreo debido a que existe una relación lineal entre la fotocorriente y la corriente suministrada por el generador.

Cuando se conectan directamente el generador solar y el motor, hay que tomar en cuenta varios factores para la operación continua del sistema. Si se conecta el generador a un motor serie acoplado a una bomba volumétrica (carga constante) la velocidad se mantendrá en cero hasta que se produzca suficiente torque para vencer el torque de carga y la velocidad se incrementa hasta que se alcance el estado estable; sin embargo, a niveles bajos de insolación (60 % en algunos sistemas), el motor se encuentra parado, la corriente se limita únicamente por la resistencia de armadura y la misma no es suficiente para vencer el par de carga por lo que el motor nunca arrancará. Si este nivel de insolación permanece durante ciertas épocas del año, no habrá producción de agua, teniendo por lo tanto un sistema ineficiente y muy poco rentable.

Debido a esta limitación del motor serie, es mejor utilizar para proyectos de pequeña magnitud (1/4 Hp aprox.) motores con excitación independiente acoplados a una bomba centrífuga. De aquí en adelante no se tratan las otras configuraciones y trataremos únicamente el sistema generador-motor independiente-bomba centrífuga. En este tipo de sistema de bombeo, la carga es variable de acuerdo a la velocidad. Cuando no hay suficiente insolación y no se produce suficiente corriente, la velocidad es baja; sin embargo, como el par resistente está en función de la velocidad, el par resultará bajo y con la corriente disponible habrá torque como para que arranque la máquina.

4.1 POTENCIA SUMINISTRADA POR PANELES SOLARES.

Depende de cuántas células posee el generador, el tamaño y la calidad del

mismo. Teóricamente se puede determinar la potencia a partir de los datos suministrados por el fabricante que provienen de pruebas de laboratorio.

El modelo del generador solar estudiado en capítulos anteriores, contiene la ecuación de voltage-corriente que se utiliza para el cálculo de la potencia. Algunas veces, resulta más ventajoso utilizar la ecuación en la siguiente forma:

$$V = \frac{N_s}{D} \ln \left[\frac{I_o + I_f - I}{I_o} \right] - I * R_s * \frac{N_s}{N_p} \quad \text{Ec.4.1}$$

donde:

$D = q/kT$. $q = 1.6 \text{ E } -19 \text{ C}$. Carga del electrón
 A = factor de idealidad
 k = constante de Boltzman
 T = temperatura de operación (Kelvin)

N_s = # de células conectadas en serie en cada fila
 N_p = # de filas
 I_o = corriente inversa de saturación del modulo completo.
 I_f = fotocorriente
 I = corriente del módulo.
 R_s = resistencia en serie de una célula.

Nota: Este modelo se ha simplificado de manera que no se incluye la corriente que circula por la resistencia en paralelo de cada célula. Esta corriente se puede despreciar sin afectar los resultados.

Los datos para el modelo MSX-64 de SOLAREX son $N_s=18$, $N_p=2$, $I_f=4.0005$ A, $I_o=.0005$ A, $R_s= 0.005 \Omega$. Sustituyendo datos en la ecuación 4.1 obtenemos:

$$V = 1.305 * \ln \left[\frac{0.0005 + I_f - I}{0.0005} \right] - 0.045 I \text{ Ec} \quad \text{Ec.4.2}$$

Al multiplicar por la corriente, se obtiene la ecuación de potencia. La curva de potencia de un generador solar se muestra en la figura 4.1 junto con los puntos de potencia máxima, para diferentes niveles de insolación. Para determinar los puntos máximos basta con maximizar la ecuación; esto es, derivar con respecto a la corriente e igualar a cero.

$$\frac{d[VI]}{dI} = 0$$

Curvas de potencia del generador

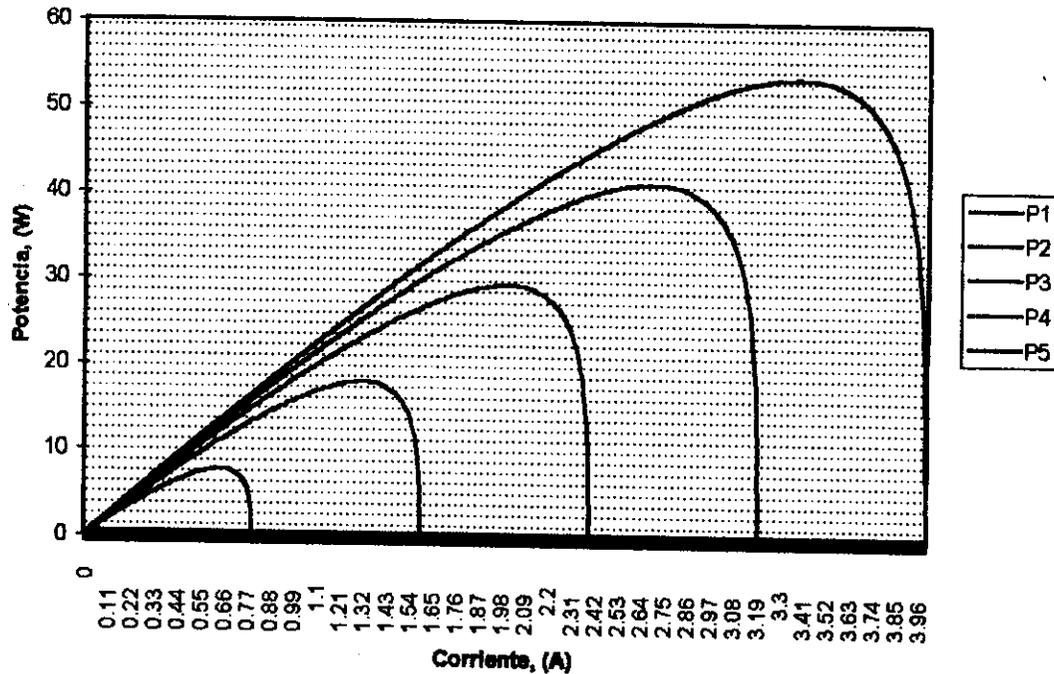


Fig.4.1. Curvas de potencia del panel solar.

4.2 POTENCIA MAXIMA EN FUNCION DE LA CORRIENTE.

Anteriormente se definió que para encontrar los puntos de máxima potencia se debe derivar la potencia en función de la corriente e igualarla a cero. De la ecuación 4.2 puede deducirse que la potencia suministrada por el generador solar es:

$$P = VI = 1.305 \cdot I \cdot \ln \left[\frac{0.0005 + I_f - I}{0.0005} \right] - 0.045I^2 \quad \text{Ec.4.3}$$

$$\frac{dP}{dI} = 1.305 \cdot I \cdot \left(\frac{0.0005}{0.0005 + I_f - I} \right) \left(\frac{-1}{0.0005} \right) + 2.90 \cdot \ln \left[\frac{0.0005 + I_f - I}{0.0005} \right] - 0.09I \quad \text{Ec.4.4}$$

En el punto máximo $dP/dI = 0$, entonces:

$$I \left(\frac{1.305}{0.0005 + I_f - I} + 0.09 \right) = 1.305 * \ln \left[\frac{0.0005 + I_f - I}{0.0005} \right]$$

La ecuación anterior es no lineal y la forma más conveniente de resolverla es mediante métodos numéricos. Para esto se procedió a una tabular la corriente de carga en incrementos de 0.001 y la fotocorriente en incrementos de 0.5 ambos partiendo desde cero. La razón por la cual los incrementos en la fotocorriente son mas grandes que en la corriente de carga es porque la primera varía linealmente con la insolación mientras que la segunda lo hace en forma logarítmica; al variar de esta forma, suceden cambios drásticos en la potencia en pequeños intervalos de corriente. Lo que interesa es llegar a una relación entre la fotocorriente y la corriente de carga. Aplicando el método numérico se llega a la siguiente tabla:

I_f	I
0.0	0.000
0.5	0.421
1.0	0.854
1.5	1.290
2.0	1.728
2.5	2.168
3.0	2.609
3.5	3.051
4.0	3.493

Fig. 4.2. Relación entre corriente de carga y fotocorriente a máxima potencia.

Para ver mejor la relación anterior, se presenta una grafica que muestra en las abcisas la fotocorriente y en las ordenadas la corriente de carga. Con esto se logra ver si es posible formular una relación continua entre ambas variables.

Relación If-I para Pmax.

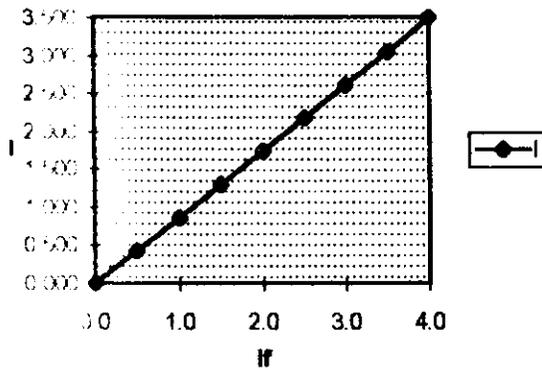


Fig. 4.3. Corriente a máxima potencia

Con la gráfica anterior se puede observar que cuando el generador solar suministra la máxima potencia, es decir que está trabajando a plena capacidad, existe una relación aproximadamente lineal entre la fotocorriente y la corriente de carga. Esta es una conclusión importante ya que tomando la fotocorriente como referencia, ésta se multiplica por una constante mediante el convertidor DC-DC y así se obliga al sistema a trabajar en el punto óptimo. La constante no es más que la relación o la pendiente de la curva entre If e I. Por el método de los mínimos cuadrados aplicado a los datos de la gráfica 4.2 se puede demostrar que la relación entre la fotocorriente y la corriente de carga para máxima potencia es:

$$I = 0.875 I_f$$

Por lo tanto, para optimizar el uso de paneles solares del tipo que estudiamos en este trabajo en sistemas de bombeo y en general, hay que hacer que la corriente de carga sea aproximadamente el 88% de la fotocorriente. En términos prácticos se puede considerar que la fotocorriente es la corriente de corto circuito para determinado nivel de insolación.

4.3 REQUISITOS DEL CONTROLADOR DE POTENCIA.

El objetivo al diseñar un controlador electrónico es mantener al sistema en estos puntos de potencia máxima. Para cada punto de potencia máxima, hay un voltaje y una corriente que satisfarán esa condición.

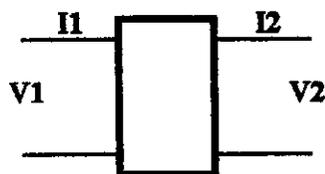
Para aplicaciones de potencia, específicamente en el rango de varios kilowatts, es de suma importancia que la transferencia de potencia sea de manera eficiente porque de lo contrario serían cantidades considerables las que se estarían perdiendo; potencia considerable como para hacer más rentable al sistema. Dicho de otra forma podemos decir que para mantener al sistema de bombeo en su punto óptimo, se puede recurrir a una resistencia variable de acuerdo a las condiciones de insolación. Esta función se puede lograr mediante un regulador lineal por ejemplo. Sin embargo los reguladores lineales trabajan en un punto de operación determinado, de modo que siempre consumen potencia. Debido a que un regulador lineal funcionando con grandes cantidades de corriente disipa también grandes cantidades de potencia, no puede ser aplicable para este caso. Es cierto que el sistema que estamos trabajando no llega a estas cantidades de potencia, sin embargo se pretende establecer un modelo para aplicaciones mayores.

Debido a que los reguladores lineales no son la mejor opción, en aplicaciones de este tipo se utilizan **convertidores de swítcheo o de conmutación**. Estos convertidores tienen eficiencias por encima del 90 % y se estudiarán con más detalle en el siguiente capítulo.

El convertidor básicamente tiene que cumplir con las siguientes condiciones: si hay una variación en el nivel de insolación, el punto de operación se moverá hacia un punto de la curva que no corresponde al de máxima potencia, por lo tanto el convertidor corregirá ese punto de operación, mediante limitar o aumentar la corriente que circula por el panel solar obligándola a que se coloque en el lugar deseado. El convertidor DC-DC no es más que un dispositivo que convierte un valor de voltaje de corriente directa, en otro de corriente directa pero de una manera eficiente. De ahí que pueda llamarse un transformador de corriente

directa. El transformador de corriente directa guarda las mismas relaciones que uno de alterna. A diferencia de los transformadores de corriente alterna, los convertidores de conmutación DC-DC no dependen de los devanados primario y secundario para establecer una relación de transformación; más bien, estos dependen de un circuito electrónico que ajusta el tiempo que el conmutador principal se encuentra encendido. A pesar de la flexibilidad de los convertidores de corriente continua en cuanto a control, se demostrará que para optimizar la transferencia de potencia desde el panel hasta el conjunto motor-bomba, basta con mantener una relación lineal entre la corriente de salida del panel y la fotocorriente. Se utiliza un convertidor DC-DC porque este se puede ajustar de modo que cumpla con esta condición

Posteriormente puede verse las tipos topologías internas de estos dispositivos. Por el momento puede imaginarse el convertidor como una "caja negra", cuyas parámetros exteriores que interesan son el voltaje de entrada, el voltaje de salida, la corriente de entrada y la corriente de salida.



$$V2 = k \cdot V1$$

$$I2 = 1/k \cdot I1$$

Fig.4.4. Transformador de corriente directa.

Estas ecuaciones son idénticas a las de un transformador ideal de corriente alterna. El valor k puede ser controlado para modificar así el punto de operación del sistema y de ese modo obligarlo a trabajar en el punto máximo de operación. El parámetro que servirá como referencia para el control es la corriente.

4.4 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR.

Hasta este momento se han presentado visto los requisitos básicos del controlador. Basandonos en las conclusiones anteriores que es necesario mantener al 88% de la fotocorriente la corriente de carga, ya se puede visualizar que el circuito controlador deberá incluir en alguna parte un dispositivo que mida el valor de la fotocorriente disponible. El circuito principal que es el convertidor DC-DC funciona a frecuencias de varios kilohertz, por lo que también es necesario que se incluya un oscilador que funcione a la frecuencia seleccionada. El oscilador se conecta a un circuito PWM o modulador de ancho de pulso, el cual mantiene al circuito principal apagado o encendido determinado tiempo tomando como base de funcionamiento la frecuencia de entrada del oscilador y un valor de referencia.

4.4.1 COMPONENTES.

1. **Convertidor DC-DC.** Efectúa la transferencia de potencia eficiente entre el generador solar y el conjunto motor-bomba.
2. **Fuente de alimentación.** Sirve para suministrar voltaje a los circuitos de control. Se implementará una batería de 12 V.
3. **Oscilador.** Establece la frecuencia de operación
4. **Modulador de ancho de pulso (PWM).** Controla las condiciones necesarias para mantener al convertidor DC-DC trabajando bajo las condiciones deseadas. Controla la razón de trabajo del convertidor.
5. **Manejador.** Este se utiliza para manejar al convertidor. El driver o manejador es simplemente una interface y amplifica la potencia proveniente del modulador de ancho de pulso para garantizar que reaccione el convertidor. Este circuito es indispensable en aplicaciones de gran potencia sin embargo aquí lo incluiremos.

En la siguiente página se muestra un diagrama de bloques completo del sistema, incluyendo el generador solar, el motor y la bomba.

Un primer paso en el proceso de diseño es dividir el diagrama de bloques en uno más simplificado. Básicamente el sistema completo consta de dos partes:

- A. Circuito de potencia
- B. Circuito de control

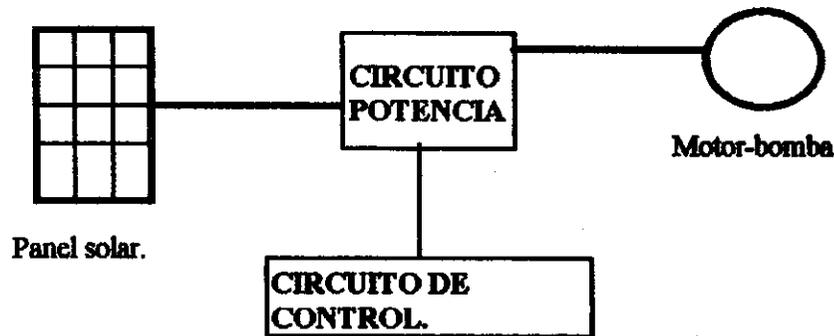


Fig. 4.5. Diagrama de bloques simplificado.

En el siguiente capítulo se estudiará toda la parte de potencia; esta tiene que ver con el convertidor DC-DC. Ahí se analizará el funcionamiento de un convertidor de potencia, el tipo de convertidor que se usará para el sistema. Además se encontrará el valor de todos sus componentes internos en base a las especificaciones del proyecto así como la frecuencia de operación.

Lo que en el diagrama de bloques de la Fig. 4.5 se refiere como a circuito de control se estudiará en el capítulo seis. Esta parte incluye el amplificador de error, el modulador de ancho de pulso, el oscilador, y el manejador o la interface hacia el circuito de potencia.

Cuando se desea diseñar un sistema de bombeo de agua mediante energía solar, se parte de los requerimientos de bombeo, es decir, caudal, cabeza de bombeo y niveles de insolación de la localidad. Después de esto, se escogen las partes principales o sea el generador solar, el motor y la bomba apropiados. Luego para optimizar el sistema se diseña el convertidor de potencia para que cumpla con los requisitos de optimización; en este caso los requisitos de

optimización es mantener la corriente de carga al 88 % de la fotocorriente. Una vez diseñado el circuito de potencia, se procede a la parte de control. La parte de control es un circuito analógico-digital en la mayoría de los casos que mantendrá al convertidor de potencia situado en un punto de operación tal que la transferencia de potencia entre el generador y el motor sea máxima.



DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA: CONVERTIDOR DC-DC

El circuito de potencia que consiste en el convertidor DC-DC es la parte principal y novedosa de éste sistema para optimizar la potencia del panel solar hacia el motor y la bomba. Aquí el convertidor actúa como un condicionador de potencia; ésto quiere decir que condiciona o controla la forma de hacer la transferencia de potencia de forma que se logren resultados óptimos. Para controlar la potencia hay que variar los parámetros principales: voltaje y corriente. Los convertidores DC-DC son transformadores de corriente continua de estado sólido. Su componente principal es un switch o conmutador que puede ser un BJT, MOSFET, IGBT, GTO, etc. Los dos primeros son aplicables en casos de mediana potencia, sin embargo, el desarrollo en las técnicas de fabricación de dispositivos ha llevado a producir los dos últimos tipos de conmutadores que son capaces de manejar corrientes del orden de kilo-amperios. El presente trabajo se realiza utilizando los procedimientos generales que se utilizan en electrónica de potencia a pesar que estamos trabajando a una escala relativamente baja. En nuestro medio son pocas las aplicaciones de gran potencia; la mayoría se encuentra en el campo de los UPS (Uninterrupted Power Supply) y en el control de motores industriales. Algunas otras aplicaciones de la electrónica de potencia se pueden hallar en medios de transportación, líneas de transmisión en alto voltaje de corriente directa y fuentes de corriente de alto poder.

5.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS CONVERTIDORES DC-DC.

La topología básica de un convertidor DC-DC se muestra en la siguiente figura 5.1. El switch se está abriendo y cerrando a una frecuencia f_s , la cual es el inverso del período de conmutación mostrado. Se muestra que el voltaje de entrada es constante y el voltaje de salida se puede variar mediante variar el

tiempo que el "switch" se mantiene encendido. Al referirse al voltaje de salida, se trata del valor medio del voltaje.

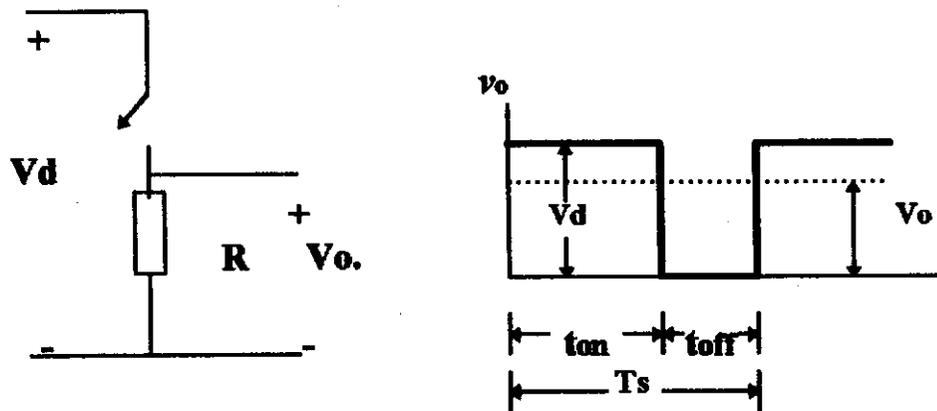


Fig 5.1. Principio de funcionamiento

El valor promedio V_o a la salida del convertidor se puede controlar mediante el tiempo en que el switch se mantiene encendido; generalmente ese es el método aceptado ya que así se mantiene la frecuencia constante. Como se ve en el siguiente capítulo esta forma de controlar el voltaje es conocida como modulación de ancho de pulso PWM. Aquí se introducirá el concepto de la variable D o razón de trabajo, que no es mas que la relación entre el tiempo de encendido y el período de conmutación.

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad \text{Ec.5.1}$$

5.2 TIPOS DE CONVERTIDORES

Existen dos topologías básicas de convertidores de corriente continua:

1. Convertidor hacia arriba
2. Convertidor hacia abajo.

En el convertidor hacia arriba el voltaje de salida siempre es mayor que el voltaje de entrada; de ahí se deriva su nombre. Sus principales aplicaciones son el control de motores y fuentes conmutadas. El circuito que vemos en la figura 5.1 se trata de un convertidor hacia abajo en su forma básica de funcionamiento. De este circuito podemos sacar conclusiones importantes: es posible que el voltaje de salida sea de cualquier valor deseado entre cero y el voltaje de entrada con solo variar la razón de trabajo D. Esto se puede demostrar mediante encontrar el valor medio del voltaje de salida:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{ton} V_d dt + \int_{ton}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{ton}{T_s} V_d = DV_d \quad \text{Ec. 5.2}$$

Otra conclusión es que es posible mediante el uso de este tipo de convertidores reducir el voltaje sin la necesidad de un divisor de tensión, el cual produce considerables pérdidas de potencia debido al calentamiento de las resistencias.

En la práctica; los convertidores contienen una inductancia a la entrada para evitar que existan cambios drásticos en la corriente. También contienen un capacitor a la salida para evitar las fluctuaciones de voltaje entre cero y el valor deseado. Estas fluctuaciones son indeseables en la mayoría de las aplicaciones, en donde se desea mantener un voltaje constante. El inductor y el condensador actúan como un filtro de paso bajo que atenúa los armónicos producidos por el constante apagado y encendido del conmutador. La frecuencia de corte de este filtro se escoge mucho más baja que la frecuencia de conmutación con el objeto de eliminar el rizado causado por dicha frecuencia en el voltaje de salida.

El conmutador es un dispositivo semiconductor de potencia. Además en la implementación práctica se utiliza un diodo para suministrar un camino de descarga al circuito inductivo de entrada mientras el conmutador está en estado apagado. Las frecuencias típicas de operación son de varias decenas de kilohertz. Entre mas grande sea la frecuencia de conmutación, más pequeños serán los elementos inductivos del sistema, sin embargo existe la desventaja que cuanto mayor es la frecuencia, mayores son las pérdidas por conmutación en el

dispositivo semiconductor. Las frecuencias varían entre 3 y 40 kHz. En la realidad existe una pequeña resistencia de encendido la cual causa pérdidas por calentamiento. Por lo tanto en cualquier tipo de convertidor hay que tomarlas en cuenta cuando se está trabajando en sistemas grandes de potencia; para los propósitos de éste trabajo se utiliza el modelo ideal del conmutador que es una resistencia infinita en estado apagado y una resistencia cero cuando se encuentra encendido. La inductancia también tiene una resistencia despreciable.

En nuestro sistema de bombeo, el panel solar producirá un voltaje entre cero y 18 voltios aproximadamente que corresponde a la condición de insolación nula e insolación máxima a plena carga. Sin embargo el conjunto motor-bomba trabaja con un voltaje nominal de 24 voltios, por eso es necesario implementar un convertidor hacia arriba. En este tipo de convertidor el voltaje de salida siempre es mayor que el voltaje de entrada.

5.3 CONVERTIDOR HACIA ARRIBA

El voltaje de salida siempre es mayor que el voltaje de entrada. Sin embargo los mismos principios básicos que se examinaron anteriormente para el convertidor hacia abajo aplican a este tipo. En la siguiente figura se puede observar un convertidor hacia arriba con todos sus elementos de potencia:

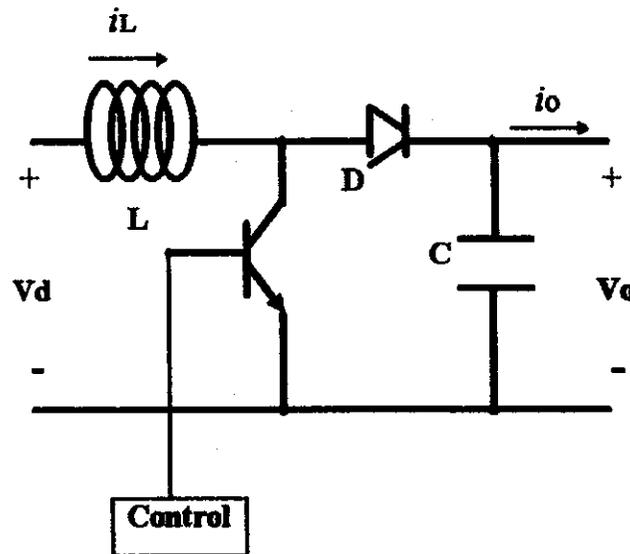


Fig 5.2. Convertidor hacia arriba

En teoría, los convertidores de conmutación tienen eficiencias del 100%, sin embargo debido al calentamiento de los transistores, diodos y la resistencia en serie del inductor, este porcentaje no se logra; sin embargo por estudios realizados se sabe que la eficiencia supera el 90%. El voltaje de entrada alimenta al circuito y suministra energía al inductor cuando el transistor se encuentra en estado encendido. Este voltaje es el que proviene del panel solar. En este estado, el diodo se encuentra apagado debido a que está polarizado en inversa ya que el voltaje de salida es siempre mayor al voltaje de entrada. El siguiente estado de operación del sistema, es cuando el circuito de control coloca un voltaje bajo a la entrada del transistor; en este estado, el transistor se apaga el diodo comienza a conducir la corriente que es suministrada tanto por la energía que estaba almacenada en el transistor como por el panel solar.

Para el análisis de los convertidores se emplean técnicas en estado estacionario; generalmente cuando se diseñan convertidores con el propósito que funcionen como reguladores, manteniendo un voltaje estrictamente constante a la salida sí es necesario hacer análisis de transitorios y de estabilidad, sin embargo para nuestro diseño solo se efectuarán cálculos en estado estacionario. Estos principios tienen como base el comportamiento de los elementos pasivos (inductores y capacitores) en corriente directa.

5.3.1 PRINCIPIO DE BALANCE DE VOLT-SEGUNDO EN EL INDUCTOR.

En estado estacionario un inductor se comporta como un corto circuito. Al integrar el voltaje sobre un período de conmutación queda:

$$i_L(Ts) - i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^{Ts} v_L(t) dt \quad \text{Ec.5.2}$$

En estado estacionario, el valor inicial y final de la corriente del inductor debe ser igual. El segundo término de la ecuación 5.2 es igual a cero. Si se divide el segundo término entre Ts que es el período de conmutación y se anula L , entonces se llega a la conclusión que el voltaje en estado estable a través del inductor. es igual a cero.

Para aplicar este principio examinemos la forma de onda de voltaje en el inductor. Al integrar en un período de conmutación se encuentra el voltaje promedio del inductor.

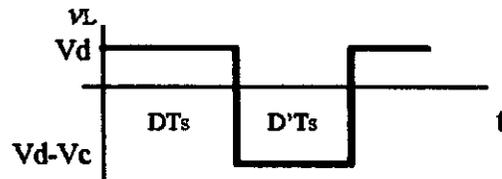


Fig. 5.3. Voltaje del inductor.

El voltaje promedio es el área bajo la curva dividido entre el período T_s . El voltaje V_c es de salida, es decir al valor que se carga el capacitor; cuando el transistor se apaga, el diodo está conduciendo y el voltaje en el inductor será la diferencia entre el voltaje de entrada y el de salida despreciando la caída en el diodo.

$$\langle V_L \rangle = DVd + D'(Vd - V_o) = 0 \quad \text{Ec.5.3}$$

$$D'V_o = (D + D')Vd$$

$$V_o = \frac{Vd}{D'}, \text{ como } D' = 1 - D$$

$$V_o = \frac{Vd}{1 - D} \quad \text{Ec.5.4}$$

Asumiendo que las pérdidas son despreciables, la potencia de entrada y la potencia de salida permanecen iguales, $P_d = P_o$

$$Vd \cdot I_d = V_o \cdot I_o$$

$$\frac{I_o}{I_d} = (1 - D) \quad \text{Ec.5.5}$$

Las ecuaciones anteriores nos sirven para encontrar la razón de trabajo D cuando se conocen los valores de voltaje o corriente de entrada y salida. Para encontrar los valores de los elementos pasivos hay que establecer límites de diseño. Le llamamos límites de diseño a los valores permitidos del voltaje de

rizado en el capacitor y la corriente de rizado en el inductor. Generalmente se admite que estos valores no excedan el 10 % del valor medio de voltaje o corriente.

5.3.2 RAZÓN DE TRABAJO.

Hay que escoger la frecuencia de conmutación y la razón de trabajo D de tal modo que se cumpla la relación para transferencia máxima de potencia: $I = .875I_f$. Aquí, I es la corriente de entrada al convertidor y de salida del generador solar. Según los datos de Dankoff Solar Products Inc., la bomba Solar Slowpump es necesario que mantenga una corriente casi constante para poder operar en condiciones óptimas. Hay que notar que este dispositivo incluye el motor eléctrico.

La corriente de entrada del convertidor puede fijarse así: Para que ésta sea del 87.5% de la fotocorriente hay que lograr que la corriente de entrada tenga un valor máximo de I_f y un valor mínimo de $0.75I_f$.

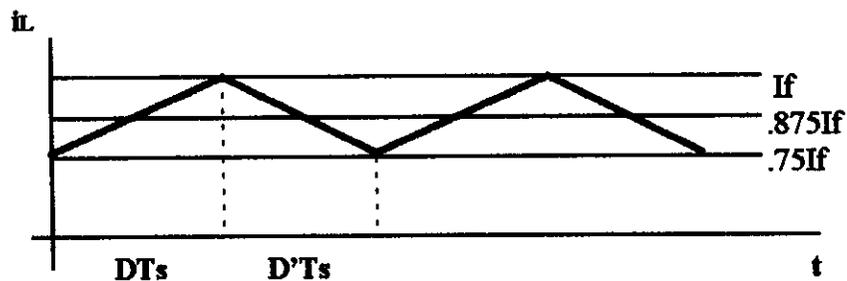


Fig. 5.4. Corriente del inductor.

En el primer período de conmutación, la corriente se incrementa desde $0.75I_f$ hasta I_f en un tiempo DT_s . La gráfica es una aproximación porque realmente la forma de la corriente es del tipo exponencial debido a la naturaleza inductiva del circuito formado por el inductor de entrada del convertidor y la resistencia de salida del panel solar. El circuito tiene una constante de tiempo L/R . Para lograr alcanzar la corriente de estado estable que es la fotocorriente deben transcurrir unas cuatro constantes de tiempo, por lo tanto:

$$DTs = 4 \frac{L}{R}$$

Ec.5.6

Durante el segundo período de conmutación, la corriente tiene que decrecer hasta el 75 % de su valor inicial. En este período, el circuito está formado por la inductancia en paralelo con el capacitor de salida y la carga y está excitado por la condición inicial que establece la energía almacenada en el inductor durante el primer período así como también por el panel. Si asumimos que el capacitor es lo suficientemente grande como para bloquear toda la componente de corriente directa y filtrar los armónicos de la corriente del inductor, se puede simplificar el circuito a hasta considerarlo como un circuito inductivo de primer orden formado solo por el inductor y la resistencia del motor.

Un circuito de primer orden puede describirse según la ecuación:

$$i(t) = i(0)e^{-at}$$

Para cumplir con la condición de máxima transferencia de potencia, la corriente en el tiempo cero, es decir en el momento que se corta el transistor de potencia, debe ser I_f . Nos interesa conocer el exponente at de la ecuación anterior. Es necesario que el tiempo en que la corriente decaiga desde I_f hasta $0.75I_f$ sea $D'Ts$, por lo tanto:

$$0.75I_f = I_f e^{-at}$$

$$0.75 = e^{-at}$$

sacando el logaritmo natural en ambos lados de la ecuación:

$$-0.28 = -at$$

Como el tiempo en el instante en que la corriente ha decrecido el 25% es $D'Ts$ y a es igual al inverso de la constante de tiempo: R_m/L (R_m es la resistencia del motor). Se puede obtener la ecuación que describe el segundo período de conmutación.

$$0.28 = \frac{R_m}{L} D'Ts$$

$$(1 - D)Ts = 0.28 \frac{L}{Rm} \quad \text{Ec.5.7}$$

Ahora se puede calcular el inductor, la frecuencia de conmutación y la razón de trabajo D, mediante resolver el sistema de ecuaciones simultáneas formado por las ecuaciones 5.5, 5.6 y 5.7.

La corriente de entrada del motor, que es la de salida del generador solar debe ser:

$$I_o = 875D' If \quad \text{Ec.5.8}$$

Para bombear ½ galón por minuto con una bomba Solar Slowpump a una cabeza de bombeo de 60 pies, se necesitan 36 Watts de energía proveniente del panel solar. Estos datos se pueden ver en la tabla suministrada por el fabricante en el Apéndice 2. El panel solar puede suministrar hasta 64 W pico, sin embargo de los 36 Watts necesarios se deben agregar 9 Watts que corresponde a un sobredimensionamiento de seguridad del 20 %. El resto de la potencia disponible en el panel puede tenerse por precaución debido a que los sistemas nunca operan bajo condiciones ideales. Cuando la potencia adicional del panel se esté utilizando, entonces habrá mas agua disponible, sin embargo no debe garantizarse que se producirá.

Si el motor necesita 36 Watts para funcionar y está conectado en 12 V, entonces la corriente de salida es 3A. La fotocorriente producida por el panel solar a insolación plena y en el punto de máxima transferencia de potencia es, según los datos del fabricante mostrados en el apéndice 4, 3.8 A. Sustituyendo estos datos en la ecuación 5.8 obtenemos:

$$D' = 0.9$$

$$D = 0.1$$

Con este valor de la razón de trabajo D ya se pueden calcular la frecuencia de conmutación y la inductancia de entrada. La resistencia en serie del panel solar es de 0.045 Ω, y la resistencia del motor es 2mΩ. En el Apéndice 3 se pueden ver valores comerciales de inductores para conmutación y transferencia de energía.

Si se escoge un inductor de $1 \mu\text{H}$ entonces la frecuencia de conmutación tiene que ser de 4.5 KHz. Estos valores se obtienen a partir de la ecuación 5.6.

Hay que notar que la razón de trabajo D no depende ni de la fotocorriente ni de la corriente de entrada del convertidor. Esto implica que para mantener la transferencia de potencia al máximo no es necesario variar la razón de trabajo; esta es una técnica atractiva ya que evita que se hagan gastos al instalar complejos sistemas de monitoreo y control. El sistema de control para manejar el transistor de potencia se diseñará entonces, para que sea capaz de mantener el valor D a 0.1.

5.4 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES.

Ahora que ya se ha determinado la frecuencia de conmutación, la razón de trabajo D y la inductancia L , se escogerán los demás componentes para que cumplan con las especificaciones dadas.

5.4.1 INDUCTOR.

La información de entrada necesaria para seleccionar el inductor es la inductancia L , la corriente pico I_p , la corriente promedio I y la frecuencia de conmutación f . Estos valores ya fueron calculados y se presentan en la sección anterior, de tal forma que se necesita un inductor con las siguientes características:

- Corriente pico: 3.8 amperios
- Corriente promedio: 3 amperios
- Frecuencia de conmutación: 4.5 kHz.
- Inductancia: 1 microHenry.

Los inductores se construyen de diferentes tipos de materiales, los cuales también deben tomarse en cuenta en el proceso de selección. Se entiende por material a la estructura en donde se monta la bobina de cobre o aluminio. A esto se llama núcleo; los diferentes tipos de núcleos que se encuentran disponibles son

ferritas, laminaciones de acero y polvo de hierro. Los inductores de ferrita son más atractivos para este tipo de aplicaciones debido a que son relativamente pequeños y vienen en más variedad. Para nuestro convertidor DC-DC utilizaremos un inductor de ferrita.

El siguiente paso en el proceso de selección consiste en consultar con las hojas de los fabricantes para encontrar un inductor que cumpla con las condiciones antes establecidas. El apéndice 2 contiene hojas de catálogo de varios fabricantes de inductores.

El siguiente inductor fue seleccionado: DC1-10G.

Este es fabricado por la compañía WILCO. Tiene el valor de inductancia requerido, maneja un margen de corriente grande (87 A) y la resistencia es de $3\text{m}\Omega$. Es ideal para aplicaciones de conmutación en altas frecuencias.

Los inductores pueden seleccionarse en tamaño tomando en cuenta la frecuencia de operación.

5.4.2 TRANSISTOR DE POTENCIA.

Para seleccionar el transistor de potencia, hay que investigar primero las formas de onda de voltaje y corriente para cada intervalo de conmutación.

5.4.2.1 ONDAS DE CORRIENTE.

Durante el intervalo DT_s , el transistor está en saturación; la corriente que circula es la corriente de corto circuito suministrada por el generador solar. Cuando el transistor pasa al estado de corte, es decir durante el período $D'T_s$, la corriente que circula es cero; para este caso asumiremos las condiciones ideales asumiendo que no existe resistencia de encendido ni de apagado.

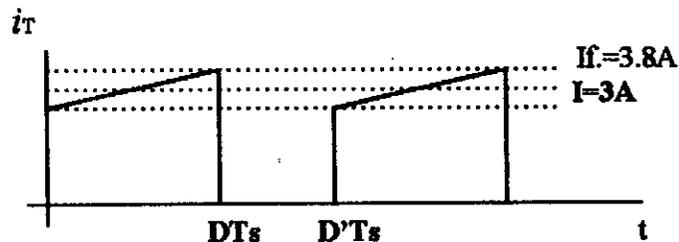


Fig. 5.5. Corriente del transistor de potencia.

En la figura anterior se observa que el transistor que se seleccione debe ser capaz de manejar una corriente promedio de 3 amperios, y una corriente de pico de 3.8 A.

Cuando el transistor se encuentra en saturación, circula la corriente determinada por la carga. La caída de voltaje V_{ce} se encuentra entre 1 y 2 voltios para transistores que manejan algunas decenas de amperios; en transistores de mediana potencia la caída es menor; en cualquiera de los casos, las pérdidas en estado encendido son despreciables.

5.4.2.2 ONDAS DE VOLTAJE.

En estado estacionario, cuando el transistor se encuentra en saturación, el voltaje es V_{ce} ; este se puede aproximar a cero dado que como se mencionó anteriormente no afecta en la pérdida de potencia del convertidor. En el segundo intervalo de conmutación, $D'Ts$, el transistor está en corte y el voltaje que aparece a través de sus terminales es V_o .

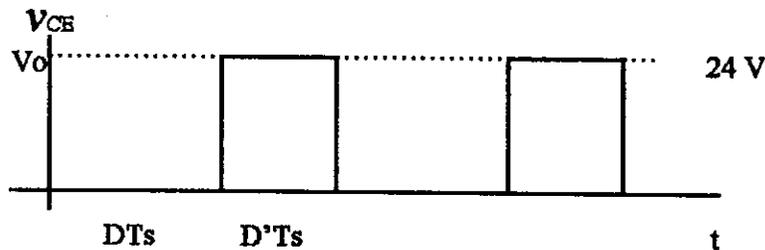


Fig. 5.6. Ondas de voltaje en el transistor.

Por lo tanto tenemos que escoger un transistor que sea capaz de sostener una tensión entre terminales cuando se encuentre apagado de 24 V.

En el Apéndice 3 se muestran las hojas de catálogo de algunos tipos de transistores de potencia. El que cumple con las condiciones de corriente y voltaje establecidas anteriormente es el siguiente:

BUT18F (Detalles de las características pueden consultarse en el Apéndice).

5.4.3 DIODO.

Cuando el convertidor se encuentra en el primer período de conmutación, el diodo se encuentra polarizado inversamente porque el voltaje de cátodo es el voltaje de salida, mientras que el voltaje de ánodo es el V_{ce} ; aquí el diodo debe ser capaz de soportar un voltaje inverso entre terminales de $V_o - V_{ce}$. Como el voltaje de saturación entre colector y emisor lo consideramos despreciable, se concluye que el diodo debe manejar un voltaje inverso de V_o o mayor para evitar alcanzar el voltaje de ruptura inverso y destruir el dispositivo.

En aplicaciones de convertidores de potencia con voltajes no tan elevados, es común utilizar diodos Schottky. Estos dispositivos tienen una caída de voltaje en polarización directa baja (típicamente 0.3 voltios). El voltaje inverso es bajo también; más o menos entre 50 y 100 voltios.

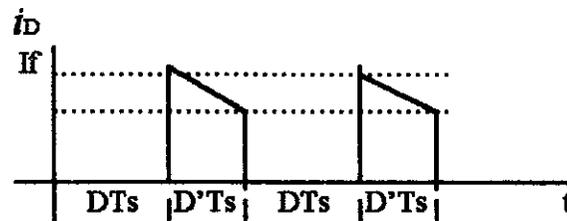


Fig. 5.7. Corriente del diodo

En la figura anterior se puede observar que la corriente promedio que circula por el inductor es $D'I$. Por lo tanto para este sistema necesitamos un diodo capaz de mantener una corriente en polarización directa de $(0.9) \cdot (3) = 2.7$ A.

Un diodo que satisface esa condición es:

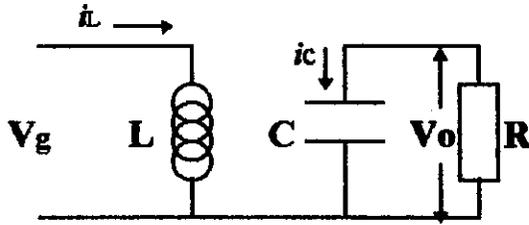
BAL 174 de National Semiconductors.

5.4.4 CAPACITOR.

El capacitor de salida sirve para mantener un voltaje constante en la salida, a la vez que forma un filtro de paso-bajo con el inductor. Para seleccionar el capacitor

hay que investigar la corriente que circula por el para cada período de conmutación.

Período de conmutación 1.



Período de conmutación 2

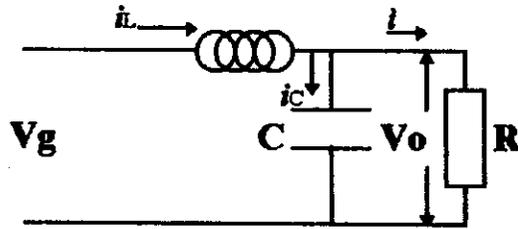


Fig. 5.8. Períodos de conmutación.

En la figura anterior se muestra como se comporta el convertidor durante los dos períodos de conmutación. La suposición inicial fue que la corriente del capacitor es sólo las componentes de rizado causadas por el constante "switcheo" del transistor de potencia. La resistencia R se utiliza para modelar la carga; en el caso del sistema bajo estudio, esta carga se trata de un motor de corriente continua. Como se trabaja en estado estable, es válida la aproximación de que la carga es de naturaleza resistiva.

Cuando el convertidor se encuentra en la posición 1, las ecuaciones de salida son:

$$C \frac{dV_o}{dt} = i_c = -\frac{V_o}{R} \quad \text{Ec.5.9}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad \text{Ec.5.10}$$

Con el transistor en la posición 2, las ecuaciones de salida son:

$$C \frac{dV_o}{dt} = i_c = i_L - \frac{V_o}{R} \quad \text{Ec.5.11}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ec.5.12}$$

En las ecuaciones 5.10 a 5.12 se ha encontrado la forma del voltaje de salida del convertidor. Se hizo la aproximación que la corriente de salida es casi constante (despreciando el rizado de la corriente de salida). El término V_o/R que aparece en las ecuaciones anteriores se refiere entonces a la corriente de carga del convertidor, que es la corriente de 3 A que demanda el motor de la bomba centrífuga. Con estas ecuaciones podemos ver ahora la forma de voltaje de salida del convertidor hacia arriba.

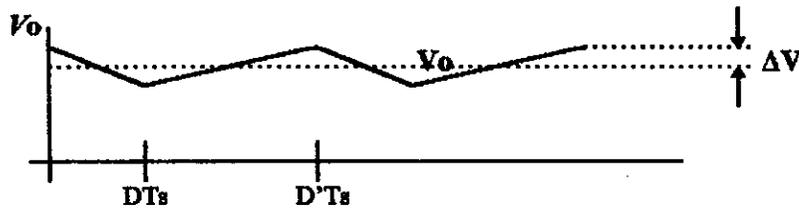


Fig. 5.9. Voltaje de salida del convertidor

Siendo ΔV , el rizado de voltaje en el capacitor, es deseable que este valor se mantenga lo mas bajo posible. Los voltajes de rizado por encima del 10 % pueden causar fluctuaciones en los circuitos de carga y por lo tanto no son adecuados. Se pueden escoger voltajes de rizado en porcentaje del voltaje de salida o escoger un voltaje específico de rizado que se desea a la salida del convertidor.

De la Fig.5.10 se puede ver que haciendo un análisis gráfico de la recta que pertenece al primer período de conmutación es posible determinar el voltaje de rizado.

$$\Delta V = \frac{DT_s V_o}{2RC} \quad \text{Ec.5.13}$$

V_o/R es la corriente de carga I . Si se asume un rizado de diseño de 0.5 voltios, que sería un 2% del voltaje de salida del sistema bajo condiciones nominales, se puede encontrar el capacitor de salida despejando C de la Ec. 5.13. Cuando el sistema no esté trabajando en condiciones nominales, debido a la caída del nivel de insolación, la corriente disminuirá y en este caso hay que bajar el valor del capacitor para no causar un rizado mas grande a la salida. Este problema se

puede resolver escogiendo un capacitor 5 veces más grande de modo que cuando la corriente caiga, exista suficiente margen de seguridad para no fluctuar el voltaje de salida mediante un rizado grande. Por supuesto que esto incrementa el costo del capacitor.

$$C = \frac{DTsI}{2\Delta V_o} \quad \text{Ec.5.14}$$

Sustituyendo valores en la Ec.5.14. $D=0.1$, $Ts=1/4500$ seg, $I=3A$, $\Delta V_o=0.5$ voltios.

$$C = 67 \mu F.$$

El valor escogido para cumplir con el margen de seguridad es 5^*C , por lo tanto:

$$C = 335 \mu F$$

En electrónica de potencia se suelen utilizar capacitores electrolíticos. Estos ofrecen una mayor capacitancia por unidad de volumen y están polarizados. Tienen una vida útil mas baja que los demás elementos del convertidor de potencia, incluyendo los elementos activos. Al consultar las hojas de los fabricantes suministradas en el Apéndice 1, seleccionamos el siguiente capacitor:

Serie RMR. Capacitor electrolítico de aluminio. Tipo radial. 6.3 a 450 Voltios.

5.5 CIRCUITO MANEJADOR DEL TRANSISTOR.

Los transistores de potencia necesitan de circuitos manejadores en la base debido a que se manejan corrientes grandes. Generalmente los circuitos de control no son capaces de suministrar toda la corriente de base necesaria para conmutar el transistor a saturación. Esto se debe a que la ganancia de corriente de los transistores de potencia es baja y siendo la corriente de colector alta, también hay corrientes altas en la base. Otro aspecto importante es que para minimizar las pérdidas de conmutación, los transistores deben actuar rápidamente. El circuito manejador del dispositivo tiene que ser capaz de extraer la carga almacenada en el transistor durante el período de transición de estado de corte a

saturación. Principalmente este fenómeno se da cuando la frecuencia de conmutación es de varias decenas de kilohertz; en estos casos es de primordial importancia que no se pierda potencia por conmutación. Para propósitos de diseño se decidió en este trabajo utilizar un circuito manejador que solo cumpla con la primera característica; solo será una interface entre los circuitos de control de baja corriente y la base de corriente alta. Esto se puede justificar porque la frecuencia de conmutación que se escogió es solo de 4.5 KHz.

Lo primero que se debe tomar en cuenta es que el transistor opera en la región no lineal de operación, esto es corte y saturación. En el estado de corte, ambas uniones del transistor se encuentran polarizadas en sentido inverso, mientras que en saturación las uniones se polarizan en sentido directo. Cuando se encuentra en saturación, la corriente de colector está determinada únicamente por la carga. La corriente mínima que hay que suministrar a la base para garantizar la saturación del transistor es la que resulta de la siguiente ecuación:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad \text{Ec.5.15}$$

hFE es la ganancia de corriente del transistor. Para el transistor seleccionado en este diseño, corresponde un valor de ganancia de corriente de 4. La corriente de carga es la que circula por el motor y en este caso se escogió el transistor de modo que fuera capaz de operar en condiciones máximas para que no sufra ninguna ruptura debido a sobrecorrientes.

En la figura 5.10 se muestra el circuito a utilizar como manejador del transistor. Este circuito suministra suficiente corriente de base al transistor de potencia mediante un transistor auxiliar PNP y una fuente de alimentación Vcc. La señal de entrada tiene que tomarse de un amplificador operacional con transistor de salida de colector abierto. El circuito LM311 cumple con estas características. Este es un comparador rápido y puede manejar corrientes de salida de hasta 40 mA.

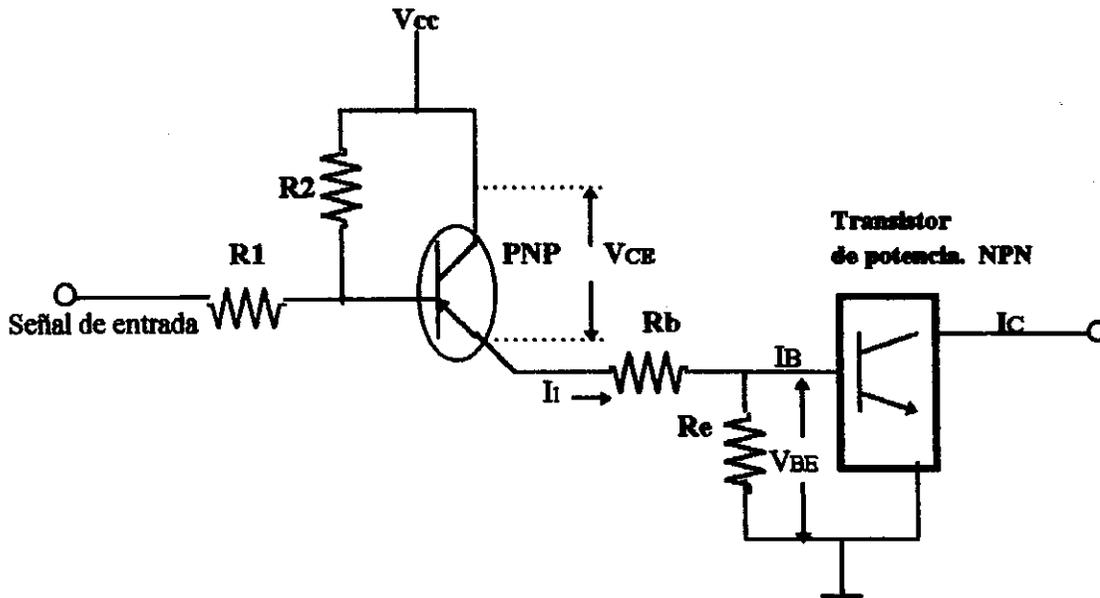


Fig. 5.10. Circuito manejador del transistor de potencia.

En este circuito no se incluye el LM311 debido a que lo estudiaremos en el siguiente capítulo como parte de los circuitos de control con su respectivos componentes de polarización.

$$V_{CC} = V_{ce(sat)} + I_1 R_b + V_{BE(on)} \quad \text{Ec.5.16}$$

$$I_{B(on)} = I_1 - \frac{V_{BE(on)}}{R_e} \quad \text{Ec.5.17}$$

Las ecuaciones anteriores describen el comportamiento del circuito que controla la corriente de entrada al transistor de potencia. Para completar el diseño hay que encontrar el valor de las resistencias R1 y R2, así como también la fuente de polarización Vcc.

La corriente máxima de colector se conoce a partir de las hojas del panel Solarex MSX-64; esta es la corriente de corto circuito. Como la ganancia de corriente del transistor de potencia viene especificada, es posible encontrar la corriente de base. La caída de voltaje entre la base y el emisor cuando el dispositivo se encuentra saturado es un dato conocido también y no es mas que el voltaje de la unión polarizada directamente. La caída de voltaje Vce del transistor

auxiliar cuando este se encuentra en saturación también se conoce de los datos técnicos.

La resistencia R_e sirve para remover la carga almacenada en la unión durante el estado encendido; es necesario incluirla para acortar el tiempo de conmutación del estado encendido a apagado. Una resistencia baja permitirá que el tiempo de descarga sea mas pequeño, sin embargo no se puede reducir mucho la resistencia porque la disipación de energía será mayor y por lo tanto la resistencia de mayor tamaño. Además cuanto mas pequeña sea R_e , la corriente que circula por el circuito manejador se incrementa causando pérdidas innecesarias de potencia. El valor de R_e se escoge entonces solo para satisfacer la condición de un tiempo de descarga bajo. Algunos fabricantes suministran este dato como parte de las especificaciones técnicas de los transistores de potencia.

5.4.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

1. Encontrar la resistencia R_e .

Cuando se suspende la corriente de base al transistor, este no se cortainstantaneamente. Transcurre el tiempo t_s , que se define como el tiempo en que el voltaje de colector emisor comienza a caer hasta el valor de saturación.

En un transistor de potencia, la capacitancia entre base y emisor es aproximadamente 500 pF. Como el transistor está pasando del estado de saturación al estado de corte, se necesita que la carga almacenada se disipe lo mas rápido posible. Para propósitos de diseño se adopta que el tiempo de descarga sea un centésimo del tiempo en que el transistor está cortado, esto es:

$$t_s = \frac{.9}{(100)(4500)} = 2 \mu\text{seg}$$

La constante de tiempo es $R_e.C$. De ahí se puede encontrar la resistencia R_e . Resolviendo la ecuación, queda que:

$$R_e = 4 \text{ k}\Omega$$

2. Encontrar la resistencia R_b .

El voltaje de saturación del transistor auxiliar es 0.2 voltios. El voltaje de saturación del transistor de potencia es 0.7 voltios. El voltaje de polarización es el mismo que se utilizará en los circuitos de control y se establece en 12 V. Solo es necesario conocer la corriente I_1 para completar la ecuación 5.16. Dicha corriente puede encontrarse a partir de la ecuación 5.17. El h_{FE} típico del transistor de potencia es 4.

$$I_b = \frac{3.18}{4} = 0.795A$$

Sustituyendo este valor en la ecuación 5.17 encontramos que:

$$I_1 = 0.795175 A.$$

Despejando R_b de la ecuación 5.16 y sustituyendo I_1 encontramos la resistencia R_b .

$$R_b = 13.96$$

Una resistencia más pequeña puede permitir el paso de mas corriente lo que garantiza que el transistor entra en saturación.

Se utilizará una resistencia $R_b = 10 \Omega$ y 15 W.

3. *Por un procedimiento similar se encuentran las resistencias R_1 y R_2 . Estas se fijan a $10 k\Omega$.*

El transistor auxiliar debe ser capaz de manejar la corriente de base del transistor de potencia y soportar voltajes inversos entre las uniones de 12 V. Una opción puede ser el modelo ECG 43.

CIRCUITO DE CONTROL: MODULADOR DE ANCHO DE PULSO

En el capítulo anterior se presenta la forma en que el circuito de potencia hace la transferencia óptima de la potencia procedente del generador solar hacia el conjunto motor-bomba. Hay que hacer notar que independiente de la carga, el convertidor de potencia coloca al generador solar en su punto óptimo de operación. Para obtener buenos resultados, hay que seleccionar el motor y la bomba que mejor se adapten a las condiciones óptimas de operación; esto se hizo de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo tres.

Para administrar la transferencia de potencia es necesario diseñar un sistema de control que cumpla con las siguientes características:

- Proporcionar la señal de control a la frecuencia de operación y razón de trabajo seleccionada.
- Suministrar la corriente necesaria para el circuito manejador de la base del transistor de potencia.

6.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

La acción principal que realiza un modulador de ancho de pulso es comparar una señal de referencia con una señal que se le llama "portadora". La portadora es una diente de sierra a la frecuencia de operación del sistema.

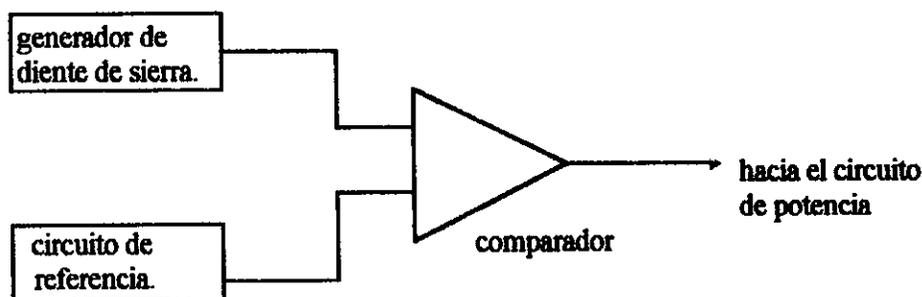


Fig. 6.1. Circuito de control

En la figura anterior se observa el diagrama de bloques del circuito de control. A pesar que este es un circuito sencillo, constituye la base de operación del sistema en general. La salida del circuito de control es la razón de trabajo D a la frecuencia de operación escogida que es 4.5 KHz.

Existe una relación lineal entre la señal que produce el circuito de referencia y la salida. Las variaciones de la referencia deben ser mucho más lentas que la frecuencia de operación. En este caso, se escoge el voltaje de referencia fijo; solo para hacer que se cumpla la relación de máxima transferencia de potencia que corresponde a una razón de trabajo $D=0.1$.

El ancho del pulso de la salida es cambiado o modulado por el voltaje de referencia. Bien se pudo haber escogido un oscilador simple para controlar la base del transistor, sin embargo al escoger un PWM (modulador de ancho de pulso), se hace al sistema más versátil para cambios futuros. Es decir que si es necesario hacer alguna modificación en el generador solar para agregar potencia, el sistema de control puede obtener el voltaje de referencia mediante un transductor que mida la cantidad de insolación disponible. Aún sin agregar potencia, es posible implementar este sistema, sin embargo solo en aplicaciones grandes es donde se nota su rentabilidad.

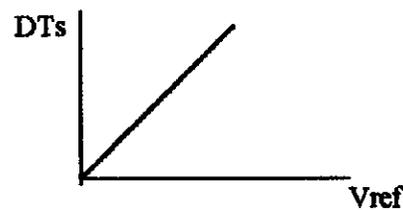


Fig. 6.2. V_{ref} vs. DTs

La ecuación de salida del modulador es:

$$DTs = V_{ref} \cdot \frac{T_s}{V_{max}} = \frac{V_{ref}}{V_{max}} \quad \text{Ec. 6.1}$$

donde,

T_s : período de conmutación.
 V_{ref} : voltaje de referencia

V_{max} : voltaje máximo de la señal de diente de sierra.

Como se desea que la razón de trabajo $D=0.1$ para que haya máxima transferencia de potencia, entonces:

$$0.1 = \frac{V_{ref}}{V_{max}}$$

$$V_{max} = 10V_{ref}$$

Ec.6.2

Cuando el voltaje de la onda de diente de sierra es menor que el voltaje de referencia, entonces la salida es positiva o de estado encendido. Cuando el voltaje es mayor, entonces produce a la salida un estado bajo que corta el transistor del circuito de potencia.

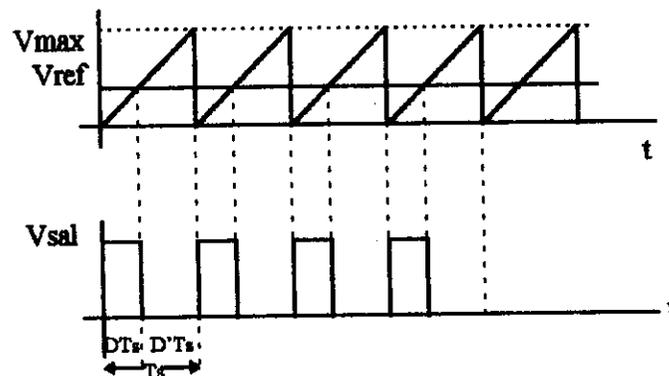


Fig 6.3. Señales de comparación.

El voltaje de operación se escogerá de 12 V. La razón de hacerlo así es porque se puede utilizar una batería de carro para suministrarla períodos largos de operación debido a que el circuito consume poca corriente. Incluir las baterías no influye considerablemente en el costo del sistema.

6.2 GENERADOR DE DIENTE DE SIERRA.

El primer paso es diseñar un circuito rampa que genera un voltaje que crezca linealmente con el tiempo.

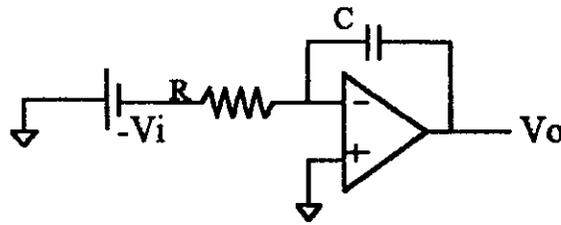


Fig. 6.4. Generador de rampa.

Este circuito actúa como un integrador y la ecuación del voltaje de salida es:

$$V_o = \frac{V_i}{RC} t \quad \text{Ec.6.3}$$

El amplificador operacional seleccionado es el de uso general 741. Más adelante veremos que el circuito comparador de salida del generador de diente de sierra obtendrá el voltaje de referencia de un diodo de silicio polarizado en sentido directo; esto causa una caída de tensión de aproximadamente 0.6 V. Como el voltaje de pico o V_{max} tiene que ser 10 veces el de referencia según la ecuación 6.2, se escoge $V_{omax} = 6$ V.

De la ecuación 6.3 es posible encontrar ahora los valores de R y C para establecer la frecuencia de conmutación de 4.5 kHz.

$$V_{O_{max}} = \frac{V_i}{RC} T_s$$

$$RC = \frac{V_i}{V_{O_{max}} f_s} \quad \text{Ec.6.4}$$

Sustituyendo los valores $V_{omax}=6$ V, $f_s=4.5$ kHz y $V_i= 0.6$ V. El voltaje V_i se selecciona así porque es el que se toma de un diodo de silicio polarizado en directa; el mismo caso que sucede con el voltaje de referencia del comparador final.

$$RC = 2.22 \times 10^{-5} \text{ seg.}$$

De las hojas de fabricante de KEMET Electronics Corporation, se puede seleccionar un capacitor cerámico de 1000 pF. Al hacer esta selección se determina el valor de la resistencia. Los elementos serían:

$$R = 22 \text{ k}\Omega$$
$$C = 1000 \text{ pF}$$

El circuito anterior genera una rampa de voltaje que comienza a crecer a partir de cero y que llega a 6 voltios en 0.22 milisegundos. Este circuito no tiene la capacidad de cortar el voltaje a un valor determinado; más bien conforme el tiempo transcurre, el voltaje alcanzaría el voltaje de saturación que es el de polarización del 741 y dejaría de funcionar como un circuito rampa.

Para solucionar este problema es necesario que se corte la rampa hasta el voltaje máximo deseado que es 6 voltios. Una forma de hacer esto es mediante descargar el condensador en el circuito RC anterior. Si se coloca un transistor de propósito general en paralelo con el condensador y se pone en saturación en el momento que el voltaje de rampa alcance el valor deseado, entonces es posible descargar el capacitor a través del transistor.

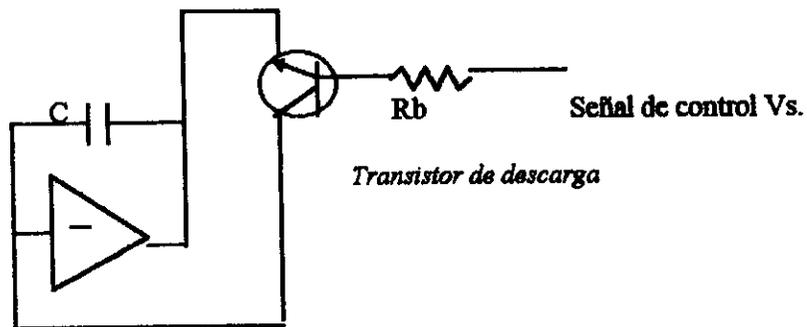


Fig. 6.5. Circuito de descarga.

El circuito formado por la resistencia en saturación del transistor de descarga y el capacitor tiene una constante de tiempo lo suficientemente baja como para que la descarga ocurra casi instantáneamente, y si no, al menos ocurre en un tiempo mucho menor que el período de conmutación del sistema. Debido a que en saturación el transistor tiene una resistencia de encendido muy baja (casi cero), es posible lograr la descarga rápida.

Lo que hay que lograr es que el transistor entre en saturación. Para esto se escoge R_b de tal forma que permita el paso de la corriente de base mínima para saturar el dispositivo. La corriente de colector se establece por el voltaje de salida

y la resistencia de salida del amplificador operacional. En el momento que se desea descargar el capacitor, el voltaje de salida es 6 voltios y la resistencia de salida según las especificaciones técnicas del amplificador operacional es 75 ohmios. Como el emisor está conectado a la entrada inversora del amplificador, es lo mismo que decir que se encuentra conectado a cero voltios porque la entrada no inversora se encuentra a tierra. La corriente de colector máxima es 0.08 A; se dice máxima porque en el momento en que se satura el transistor, el voltaje de salida del amplificador 741 cae a cero voltios y provoca una circulación nula de corriente de colector.

La corriente de base mínima para saturar el transistor es(para un hFE de 100):

$$I_B = \frac{0.08}{100} = 0.8mA$$

La señal de control, como se muestra en la Fig.6.5 es el voltaje de salida de un comparador, esto es ± 12 V. Analizando la malla de entrada del transistor de descarga, se puede encontrar el valor de la resistencia Rb.

$$V_s - R_b I_b - 0.7 = 0 \quad \text{Ec.6.5}$$

Vs es el voltaje de la señal de control. La caída de tensión entre base y emisor aparece en la ecuación anterior como el voltaje de 0.7 V. Sustituyendo datos llegamos a encontrar Rb.

$$R_b = 14125 \Omega$$

Una resistencia de uso comercial de 14 k Ω puede ser utilizada.

La señal de control se logra mediante un circuito comparador. Utilizaremos el LM311. Este circuito tiene corrientes de entrada bajas, por lo que no afecta cualquier operación realizada por un circuito de etapa anterior.

Decidimos llamarle detector de máximo al circuito anterior porque cuando el voltaje de rampa llega a un valor deseado, este lo corta inmediatamente para iniciar un nuevo ciclo; el voltaje máximo es el pico de la diente de sierra

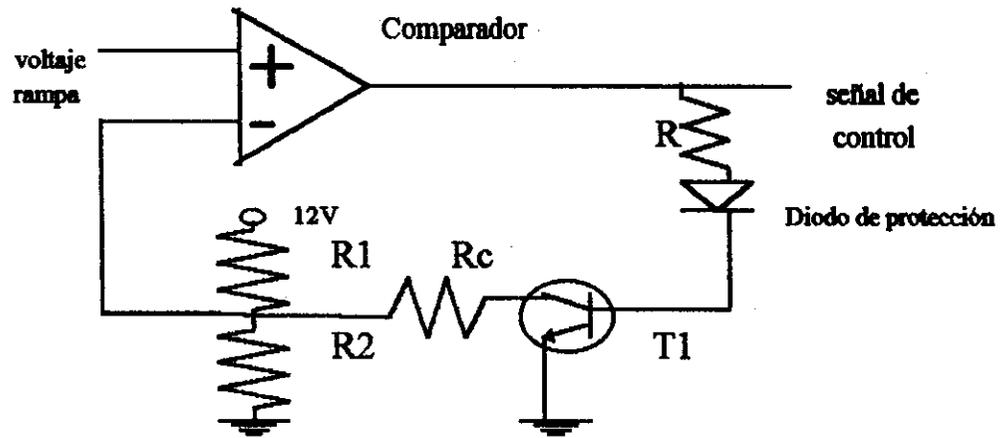


Fig. 6.6. Detector de máximo

Cuando el voltaje generado por el circuito rampa no ha llegado a alcanzar el voltaje de referencia establecido por el divisor de tensión R1 y R2, el voltaje a la entrada de la terminal inversora es mayor. Esto conduce a que a la salida del comparador exista el voltaje de polarización negativa que es -12 voltios. Bajo dichas circunstancias el diodo de protección se encuentra inversamente polarizado; no circula corriente por él. Al no circular corriente por el diodo, no hay corriente de base del transistor T1 por lo que este se encuentra en corte. Este circuito permite que el voltaje de rampa siga creciendo, hasta que alcance el valor deseado.

Una vez el voltaje de rampa alcanza al voltaje de referencia, la entrada en la terminal no inversora es mayor y por lo tanto el comparador pasa al estado positivo. Cuando esto sucede, el voltaje de alimentación 12 V aparece a la salida del comparador proporcionando la señal de control deseada para saturar el transistor de descarga. Sin embargo, si el voltaje de referencia permanece fijo, entonces el capacitor del circuito rampa no se descargará por completo. El transistor T1 se satura en el mismo instante en que el comparador pasa a estado positivo; esto pone en corto la resistencia que produce el voltaje de referencia, dando como resultado una referencia de 0 voltios. Así se garantiza que el condensador se descargue por completo. Cuando esto sucede el voltaje de

referencia es ligeramente mayor debido a la caída de colector-emisor de T1 en saturación; ahora se cortan ambos transistores y el condensador se comienza a cargar nuevamente, iniciando así un nuevo período de operación.

El diodo sirve para protección. Al colocarlo en la base del transistor se evita que el voltaje inverso producido a la salida del comparador aparezca directamente en la unión base-emisor de ambos transistores. Un voltaje negativo aplicado directamente a la unión puede significar el deterioro del dispositivo o su ruptura en un determinado momento.

Aunque anteriormente se había escogido un capacitor en el circuito rampa de tal forma que el tiempo de descarga fuera mucho menor que el período de conmutación, es conveniente agregar siempre el transistor T1 para no depender de las variaciones que puedan resultar en los valores nominales de capacitancia y resistencia de saturación del transistor de descarga.

Para escoger R1 y R2 se procede a resolver un simple divisor de tensión. Al solucionar las ecuaciones encontramos que para que haya un voltaje de referencia de 6 voltios con un voltaje de alimentación de 12 voltios, es necesario que $R1=R2$. Escogeremos resistencias de precisión de 10 k Ω .

Para dimensionar el transistor T1 se procede en la misma forma en que se hizo para el transistor de descarga en el circuito de rampa. La resistencia Rc no puede ser muy grande porque produciría una caída de tensión grande y no permitiría que el condensador se descargue hasta cero voltios. Esta resistencia se escoge para mantener una caída de una décimas de voltio.

Si se escoge $R_{c1c} = 0.1$ voltios y se resuelve la malla del circuito de colector del transistor T1, llegamos a obtener:

$$R_c = 85 \Omega$$

$$I_c = 0.07 \text{ A.}$$

Utilizaremos el mismo transistor que se usó en el circuito rampa. Este tiene un $hFE=100$. Por lo tanto la corriente de base mínima es:

$$I_b = \frac{0.07}{100} = 0.7mA$$

Para encontrar la resistencia R_b , se divide el voltaje de salida del comparador que es 12 voltios, entre dicha corriente:

$$R_b = \frac{12}{0.0007} = 17143$$

Se utilizará una resistencia $R_b = 15 \text{ k}\Omega$.

Ambos transistores, tanto el del circuito de rampa como el de descarga, tienen que escogerse tomando en cuenta lo siguiente:

1. Que manejen una corriente de colector aproximada de 1 Amperio.
2. Que tengan una ganancia de corriente directa $h_{FE} = 100$.
3. Voltaje de colector a base V_{CBO} mayor que 12 voltios.
4. Voltaje de emisor a base V_{EBO} de aproximadamente 6 voltios.
5. Baja capacitancia de salida.

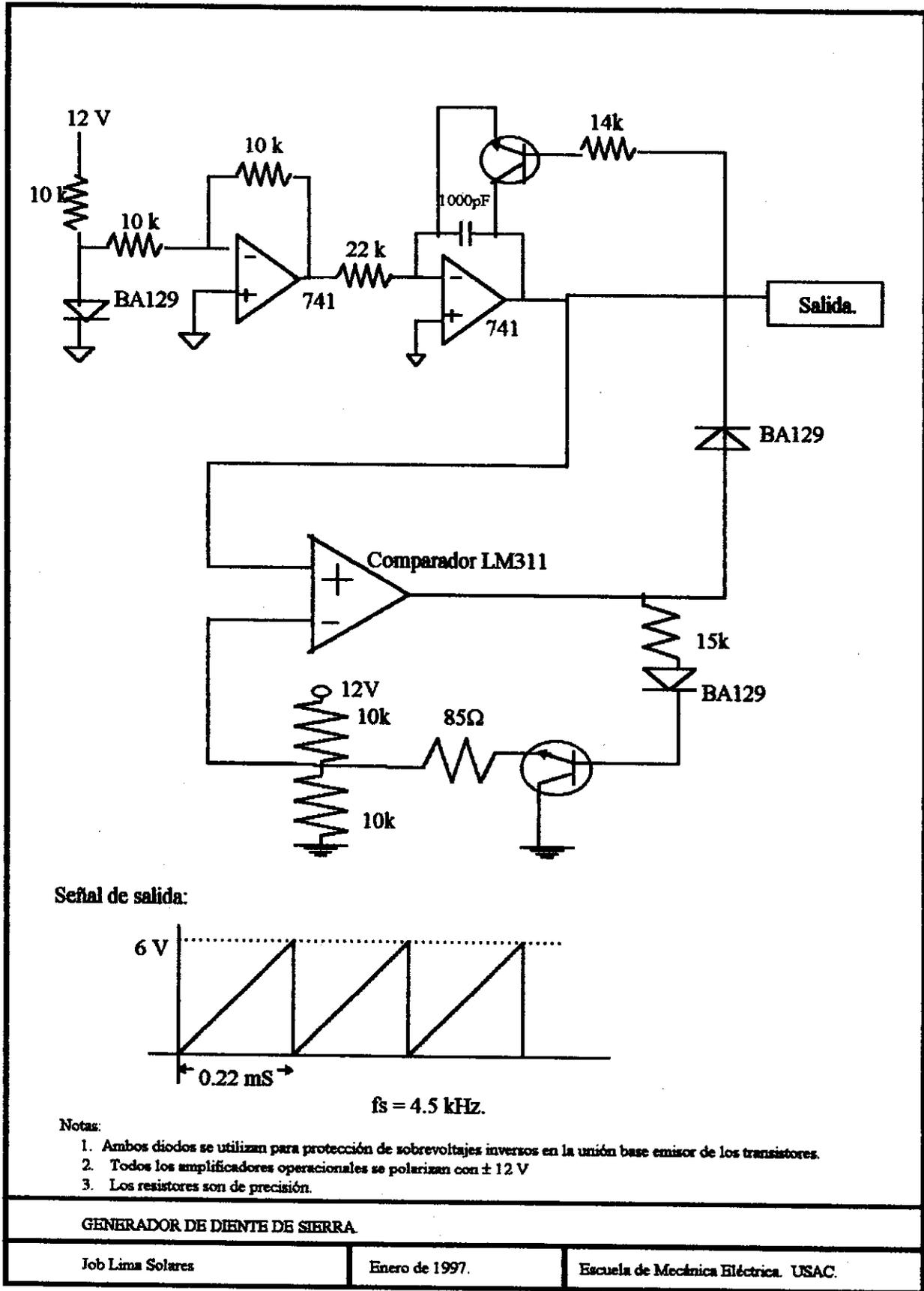
El transistor que cumple con esto es: ECG 49.

Igualmente los diodos de protección se escogen de acuerdo a:

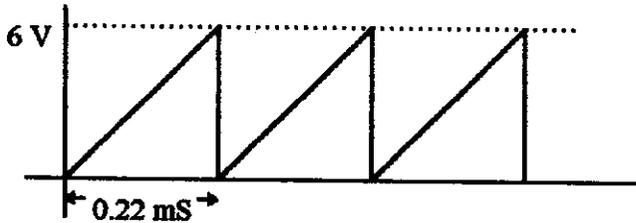
1. Corriente aproximada de 0.1 amperio.
2. Voltaje de polarización inverso hasta 12 voltios
3. capacitancia baja (unos 5 pF)

El diodo que se puede utilizar es un BA129 de Fairchild.

En la siguiente figura se puede observar como queda el diseño completo del generador rampa. Algunas variaciones que pueda sufrir debido a la temperatura no fueron consideradas debido a que los dispositivos semiconductores operan en un rango que es aproximadamente igual al que se sometería el circuito. Las resistencias se escogen con tolerancias de $\pm 1\%$ potencia de $\frac{1}{4}$ Watt.



Señal de salida:



$f_s = 4.5 \text{ kHz}$.

Notas:

1. Ambos diodos se utilizan para protección de sobrevoltajes inversos en la unión base emisor de los transistores.
2. Todos los amplificadores operacionales se polarizan con $\pm 12 \text{ V}$
3. Los resistores son de precisión.

GENERADOR DE DIENTE DE SIERRA.

Job Lima Solares

Enero de 1997.

Escuela de Mecánica Eléctrica. USAC.

Fig. 6.7. Diseño completo completo del generador diente de sierra.

6.3 CIRCUITO DE REFERENCIA.

El voltaje de diente de sierra se compara contra el voltaje de referencia para producir la onda cuadrada que contiene la frecuencia de operación y la razón de trabajo. Generalmente, los circuitos de referencia pueden construirse con voltajes de baterías de precisión, diodos Zener o diodos comunes. Se utiliza un diodo de silicio común BA129 para establecer una referencia de entrada al comparador de 0.6 V.

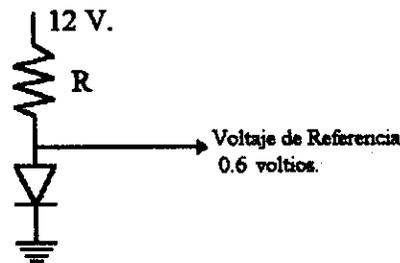


Fig.6.8. Circuito de Referencia.

La resistencia R es únicamente limitadora de corriente. Es deseable mantener la menor corriente posible debido a que las características V-I del diodo no son ideales. Entre mas corriente circula la caída de tensión tiende a ser mayor que la nominal. Bajo condiciones de prueba de $I_f = 1\text{ mA}$ habrá un voltaje entre terminales de 0.6 V.

La resistencia R se calcula en base a las condiciones anteriores y da como resultado:

$$R = 12\text{ k}\Omega$$

6.4 COMPARADOR.

Este es el último bloque del sistema de control. La salida de este circuito es la onda cuadrada que entra directamente al manejador de la base del transistor de potencia.

Para realizar el diseño del circuito comparador se utilizará un LM311. Este tiene corrientes de entrada hasta 100 veces menores que otros dispositivos

comparadores. Además es de respuesta rápida. Se escogió porque puede manejar corrientes altas hasta de 50 mA en la salida. El transistor de salida proporciona la corriente necesaria para saturar el transistor auxiliar en el manejador de la base el transistor de potencia.

El objetivo al diseñar el circuito es hacerlo estable y de respuesta rápida; es deseable que la desviación del voltaje de salida sea casi nula.

En un modulador de ancho de pulso es posible que el comparador final entre en oscilación cerca del punto de cruce. Para evitar esto hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

- 1.- Colocar un condensador de $0.1 \mu\text{F}$ a la entrada de polarización positiva. La entrada negativa se conecta a cero voltios.
- 2.- Balancear el circuito. Entre las terminales 5 y 6 se conecta un condensador de $0.01 \mu\text{F}$ en paralelo con un potenciómetro de ajuste.
- 3.- Colocar todos los componentes de polarización cerca del circuito integrado. Evitar los cables largos que podrían captar señales no deseadas y causar mal funcionamiento en la salida. No se recomienda utilizar cables de varias pulgadas de longitud. Si es necesario colocar cables largos, estos deben ir trenzados.

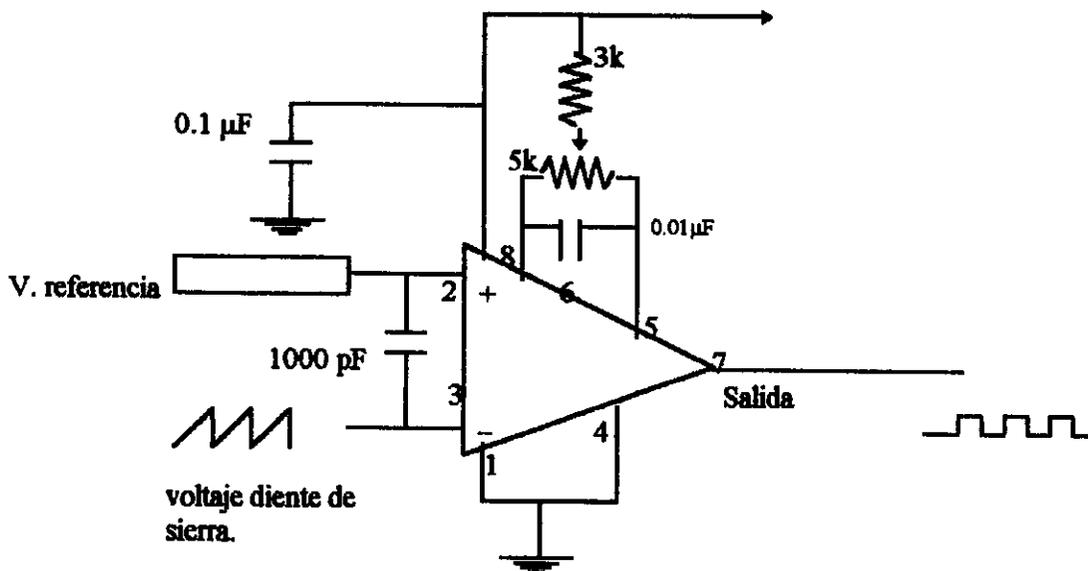


Fig.6.9. Comparador de salida

Con el circuito anterior se concluye la etapa de diseño del modulador de ancho de pulso. El resultado de salida es una onda cuadrada de 12 voltios, frecuencia de 4.5 kHz y razón de trabajo $D=0.1$. El 10% del período de conmutación estará encendido el transistor de potencia. A partir de esta etapa se puede conectar directamente al circuito de potencia; el pin 7 del LM311 va directamente conectado a la resistencia de entrada del manejador del transistor de potencia en el convertidor DC-DC.

6.5 IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL CIRCUITO.

Hasta ahora solo se ha tratado el diseño del circuito. Sin embargo a la hora de instalarlo en el lugar del proyecto es necesario tomar algunas consideraciones relacionadas principalmente con la temperatura y la puesta a tierra del sistema.

El diseño se hizo con base en la temperatura ambiente de operación que es entre 25 y 30 grados centígrados. En algunas localidades, la temperatura será mayor por lo que los resultados pueden cambiar. Se recomienda que el circuito se aloje en una caja de aluminio y esta a su vez en una caja exterior robusta para realizar las conexiones hacia el panel solar y la bomba. La caja de conexiones debe colocarse en la dirección norte-sur para minimizar los efectos de los rayos solares al incidir directamente.

En cuanto al aterrizaje del equipo, todos los puntos neutros deben coincidir. Para este equipo en especial no es necesario la instalación de una tierra física ya que esta incrementa el costo del sistema y debido a que los voltajes de operación son bajos, no representan ningún riesgo para los operarios.

COSTO DEL CIRCUITO

Cuando se incluye dentro de un sistema de bombeo a un controlador electrónico, evidentemente se incrementa el costo del mismo. Sin embargo se debe ver como una inversión ya que al estar el sistema trabajando en su punto óptimo se va a bombear mas agua durante el día.

A continuación se da una lista de los componentes utilizados para el circuito controlador así como los costos.

COMPONENTE	PRECIO(\$)
<i>Inductor DC1-10G</i>	2.00
<i>Capacitor Electrolítico de 335 uF</i>	0.50
<i>Diodo BAL 174</i>	1.00
<i>Transistor de potencia BUT18F</i>	4.00
<i>Comparador LM 311</i>	2.00
<i>Transistor ECG 43</i>	2.00
<i>Capacitor Cerámico 1000 pF</i>	0.30
<i>Resistencia de 10 Ω, 15 W</i>	2.00
<i>2 Resistencias de 10 kΩ, 1 W</i>	2.00
<i>Amplificador operacional LM 741</i>	1.50
<i>Resistencia de 14 kΩ, 1 W</i>	1.00
<i>Resistencia de 85 Ω, 1 W</i>	1.00
<i>Transistor ECG 49</i>	2.00
<i>2 Diodos BA129</i>	3.00
<i>Resistencia de 12 kΩ</i>	1.00

TOTAL: \$25.30

Como se puede ver, el costo del circuito es mínimo cuando se compara con el sistema en general. Si no se pensara en incluir un controlador electrónico, el costo

se reduciría pero no considerablemente. El sistema de bombeo en forma básica contiene:

2 Paneles Solarex MSX-64	\$1000.00
1 Bomba Dankoff ¼ Hp.	<u>\$2000.00</u>
Total:	\$3000.00

Según algunos datos experimentales, cuando se incluye un controlador electrónico en un sistema de bombeo básico, el suministro de agua mejora. La forma de medir el incremento en la producción puede medirse en las horas de sol que el sistema puede aprovechar cuando se incluye el dispositivo.

Sin incluir el controlador el sistema arrancó a las diez de la mañana y se apagó a las 4 de la tarde. Cuando se hicieron las pruebas con el circuito, el sistema empezó a bombear agua a las 8 de la mañana y terminó a las 5 de la tarde. Esto quiere decir que se aprovecharon 3 horas más de sol.

Si se parte de que las seis horas de sol que trabajaba el sistema anteriormente es el máximo posible, es decir trabajando al 100 %, entonces 3 horas de sol implican un incremento en operación del 50%.

El costo del circuito electrónico es aproximadamente el 10 % del costo del sistema en general. Para obtener resultados en productividad del 50%, es aconsejable siempre que se incluya este dispositivo en sistemas de bombeo mediante energía solar.

Sin embargo, los cálculos anteriores son aproximados y experimentales y pueden variar de un lugar tras otro y de acuerdo al tipo de sistema que se esté utilizando, por lo tanto nunca debe tomarse como un hecho o como una ley que al incluir un controlador de conmutación electrónico se va incrementar la productividad del sistema en un 50%.

Lo que se pretende probar aquí, es que independientemente del tamaño del proyecto, siempre es recomendable incluir dentro del presupuesto inicial para la inversión, un controlador. Nunca será una mala inversión. Mas bien según los

datos anteriores debe verse como una inversión muy rentable. Por supuesto entre mas grande sea el sistema, mas caro será el dispositivo; sin embargo, debido al avance en los procesos de manufactura de circuitos electrónicos, los dispositivos tienden a bajar de precio cada vez mas.

7.1 MANTENIMIENTO.

Como todo circuito electrónico, el controlador necesita poco mantenimiento. Lo recomendable es mantener el circuito libre de humedad y no exponerlo directamente al sol. De todos los componentes electrónicos, el que tiene mayor probabilidad de falla es el condensador electrolítico.

Un costo estimado es de Q 150.00 anuales. Esto incluye revisar que los contactos no esten oxidados; aplicar limpiador de contactos eléctricos.

El tiempo de vida del circuito puede estimarse en 5 años. A ese tiempo puede que sea necesario una reparación. Sin embargo debido al relativo bajo costo del mismo, lo mas recomendable es cambiarlo por completo.



CONCLUSIONES

1. Los sistemas de bombeo de agua mediante energía solar no trabajan en el punto óptimo de operación si se conectan directamente los elementos del sistema. Para el mejor desempeño es necesario incluir un controlador electrónico para ajustar la curva de potencia del panel solar con la de la carga.
2. El motor independiente y la bomba centrífuga son las mejores opciones para utilizar en sistemas de bombeo fotovoltaicos.
3. Existe una relación lineal entre la corriente producida por el generador solar y la corriente de carga cuando el sistema está trabajando en el punto de potencia máxima. Se encontró que si la corriente de carga está cerca del 88% de la que se produce por la radiación solar, el generador está suministrando la máxima potencia a la carga.
4. Para mantener la relación de potencia máxima no es necesario recurrir a complicados sistemas de monitoreo y control. Una forma de hacerlo es mediante un convertidor de potencia DC-DC. Si se ajustan los valores máximos y mínimos de la corriente de entrada al controlador puede lograrse que circule la corriente que optimiza la potencia.
5. La corriente de corto circuito del generador puede aproximarse a la fotocorriente sin afectar los cálculos del sistema.
6. Para manejar la base del transistor de potencia en el convertidor DC-DC se necesita de un circuito capaz de hacer que el transistor conmute rápidamente para evitar que hayan pérdidas excesivas de conmutación. Como los transistores de potencia tienen ganancia de corriente baja, la corriente de base es alta y por lo tanto no es posible acoplar directamente los circuitos de control.

- 7. Utilizar un comparador LM311 resulta ventajoso debido a que maneja corrientes relativamente altas y el tiempo de comparación es bajo. Para mayor precisión es necesario añadir en este circuito una red de compensación mediante un potenciómetro y un capacitor de $0.01 \mu\text{F}$ a las entradas de balance.**

- 8. Cuanto más grande es la frecuencia de conmutación, los elementos del sistema como los inductores y capacitores son mas pequeños. Esto es deseable, sin embargo, no se puede aumentar demasiado la frecuencia porque ésta se escoje con base en la constante de tiempo del circuito inductivo formado por la resistencia de salida del generador y la inductancia de entrada del convertidor de potencia.**

- 9. Para optimizar los sistemas de bombeo fotovoltaicos se debe seguir un procedimiento detallado de diseño. Después de eso se debe escojer el controlador para que optimizar los recursos existentes; generalmente los elementos se seleccionan tomando en cuenta un sobredimensionamiento del 20%. Si el controlador está bien diseñado es posible aprovechar ese 20% adicional.**

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a los propietarios de sistemas de bombeo fotovoltaicos hacer un estudio de rentabilidad de sus sistemas. Puede ser que éstos no cumplan con las condiciones para optimizar la potencia disponible y esta se esté desperdiciando. Una vez hecho el análisis, un controlador electrónico puede ser la mejor opción para solucionar el problema.
2. Para el diseño de un controlador, hay que comenzar con la parte de potencia. Una vez se han seleccionado los componentes del circuito de potencia que cumplen con las condiciones establecidas para máxima transferencia, se procede a diseñar un circuito de control.
3. Debido a los avances de la electrónica, los costos se están reduciendo considerablemente. Por eso incluir un controlador entre el generador solar y el motor y la bomba no incrementa demasiado los costos; sin embargo, si incrementa su rentabilidad.
4. Cuando se piense en bombear agua en localidades remotas, se sugiere el uso de energía solar. Esta es energía limpia y gratuita. No necesita de períodos cortos de mantenimiento. Además es de fácil montaje.
5. Al seleccionar controladores, se recomienda que se utilicen transistores de potencia BJT si se está trabajando con frecuencias abajo de 15 kHz y corrientes de hasta 10 amperios. En aplicaciones de alta frecuencia puede utilizarse circuitos con MOSFET. Si la corriente es de más de 10 amperios, implementar dispositivos mas grandes como IGBT por ejemplo.

- 6. En sistemas de bombeo pequeños, es posible que sea más económico comprar un controlador disponible en el mercado que diseñar uno propio. Un sistema de bombeo pequeño, puede bombear hasta mil galones diarios.**

- 7. Para sistemas de bombeo más grandes, se recomienda que se haga un análisis matemático de todos los componentes del sistema para poder establecer la relación que maximiza la transferencia de potencia, y con base en esto, diseñar el controlador.**

BIBLIOGRAFÍA

APPLIED POWER INC. Photovoltaic pump basics. s.e. México:1992.

COUGHLIN, Robert F. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. 4ta. ed. México: Prentice Hall. 1993.

HARRIS, Norman C. Solar energy systems design. Canadá: John Wiley and Sons, Inc. 1985.

LAWRENCE, W.B. "A versatile PV module simulation model based on PSI/e". Solar Energy. Vol. 52. No.2. pp 191-195. USA: Elsevier Science Ltd.

MILLMAN, Jacob. Electrónica integrada. España: Editorial Hispano Europea, S.A. 1981.

LEONHARD, Werner. Control of electrical drives. Berlin, Alemania: Springer - Verlag. 1985.

MOHAN, Ned. Power Electronics: Converters, applications and design. Canadá: John Wiley and Sons, Inc. 1989.

SAIED, Mohamed M. "Optimal design parameters for a PV array coupled to a DC motor via a DC-DC transformer". Transactions on Energy Conversion. Vol 6. No. 4. Dec. 1991. USA: IEEE.

THOMAS, Michael G. La opción solar para el bombeo de agua. USA: Sandia National Laboratories. 1992.



1. The first part of the document is a list of names and addresses.

2. The second part of the document is a list of names and addresses.

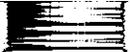
3. The third part of the document is a list of names and addresses.

4. The fourth part of the document is a list of names and addresses.

5. The fifth part of the document is a list of names and addresses.

APÉNDICE 1

Bomba solar Slowpump



1/4 HP Series • PV-Direct at 15 or 30V (12 or 24V nominal)

not shown:	1321		1305		1304		2505	
MODEL#	1322-12/24		1308-12/24		2503-12/24		2507-12/24	
LIFT(FT)	GPM	WATTS	GPM	WATTS	GPM	WATTS	GPM	WATTS
20	0.51	27	1.25	30	2.50	48	4.00	57
40	0.51	32	1.25	48	2.50	60	3.95	78
60	0.51	36	1.20	54	2.40	78	3.90	102
80	0.49	40	1.20	60	2.30	93	3.90	120
100	0.49	45	1.20	66	2.30	105	3.85	144
120	0.48	50	1.20	66	2.25	120	3.80	165
140	0.48	56	1.20	75	2.20	138	3.65	195
160	0.47	62	1.20	84	2.20	153		
180	0.47	68	1.18	93	2.15	165		
200	0.47	74	1.16	99	2.15	180		
240	0.45	90	1.14	117	2.15	204		
280	0.44	102	1.10	135				
320	0.41	120	1.10	153				
360	0.41	134	1.05	171				
400	0.40	150	1.00	198				
440	0.39	168						

not shown models:
 subtract 20% from GPM
 & Watts of the model shown

Watts listed are power use at pump • for PV-Direct, oversize array by min. 20%

Actual performance may vary ±10% from specifications

1/2 HP Series for higher lifts -- please inquire

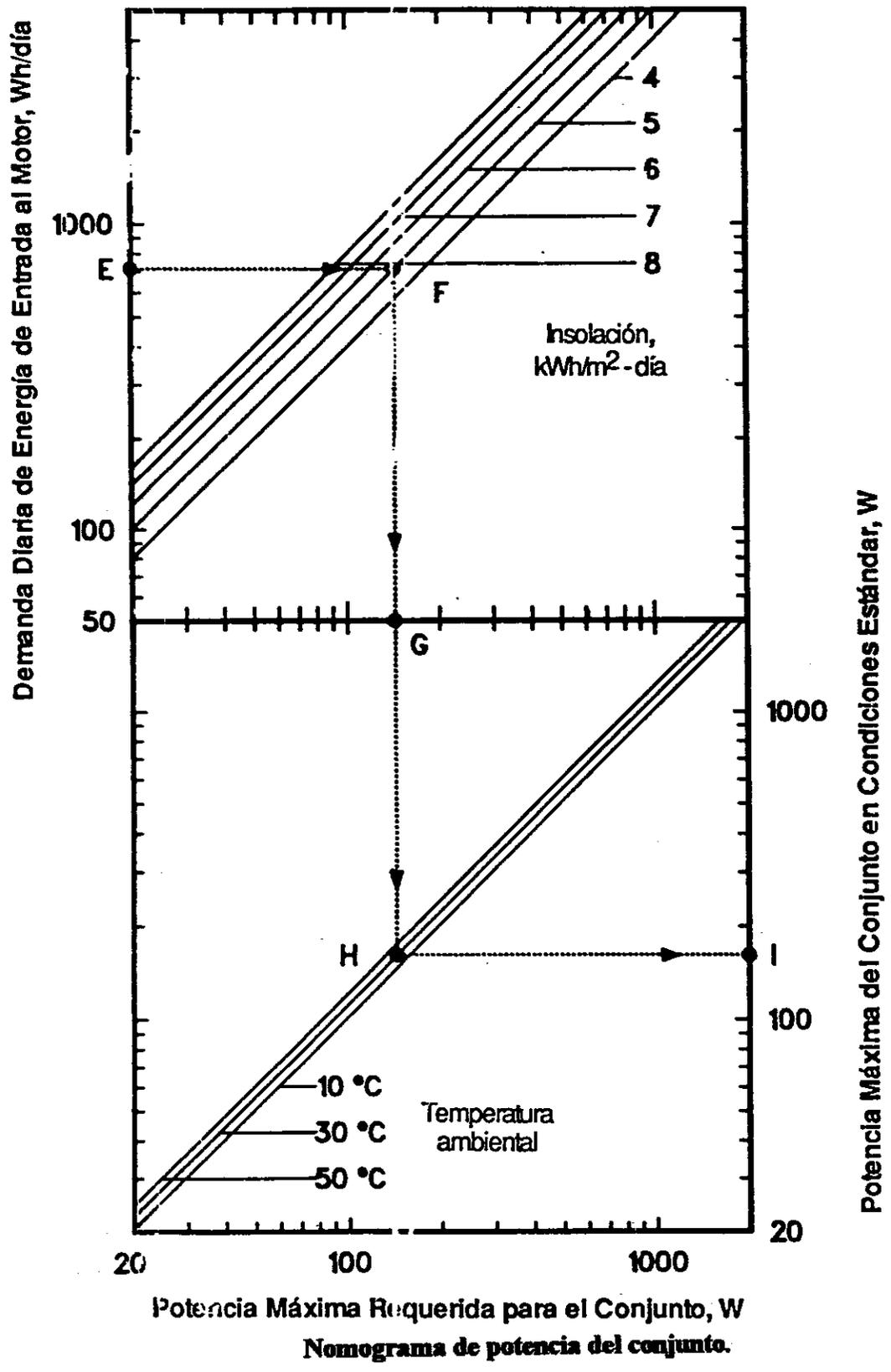
**Características técnicas de la bomba solar Slowpump.
 Cortesía de Dankoff Solar Products.**



APÉNDICE 2

Nomogramas de diseño





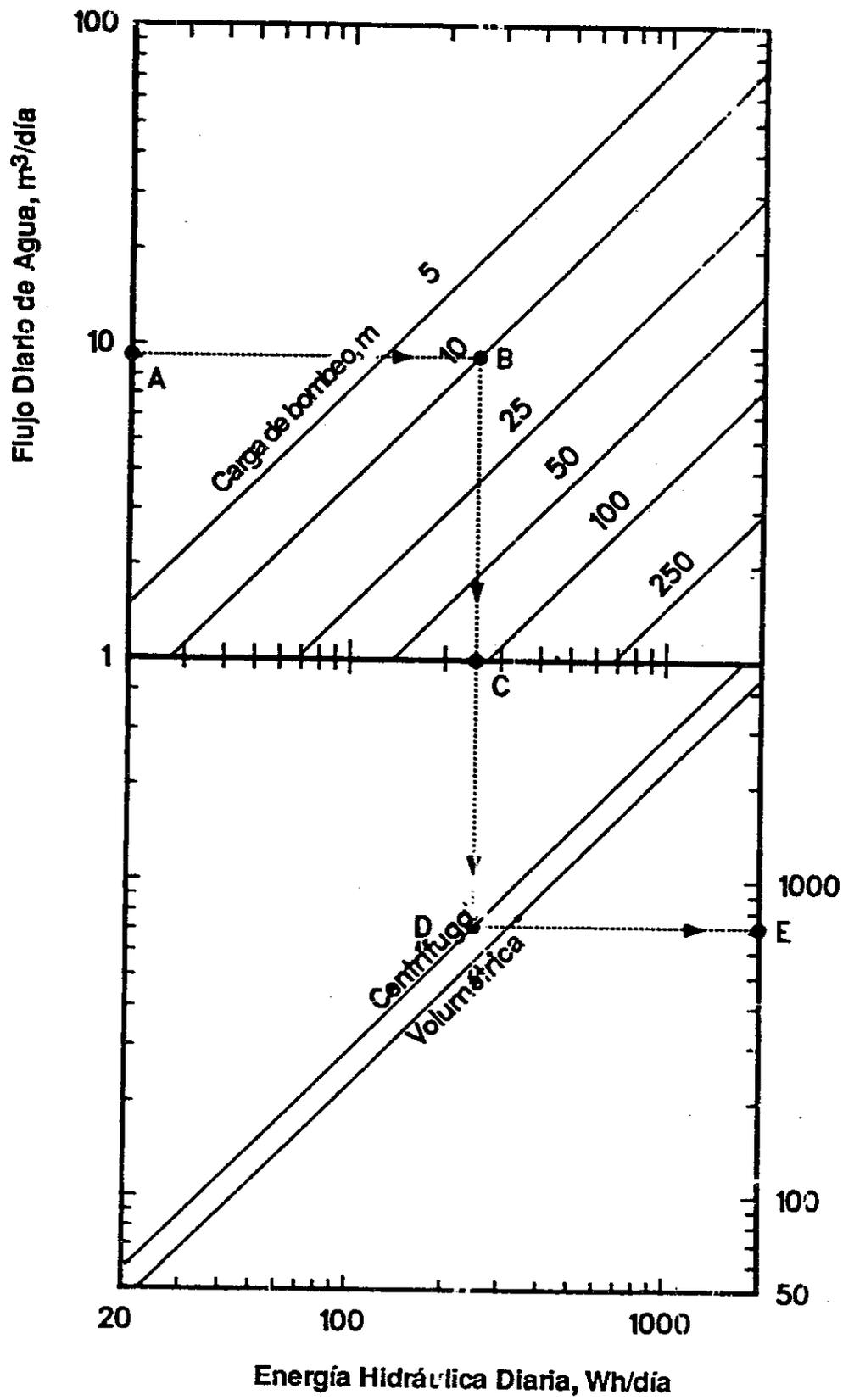
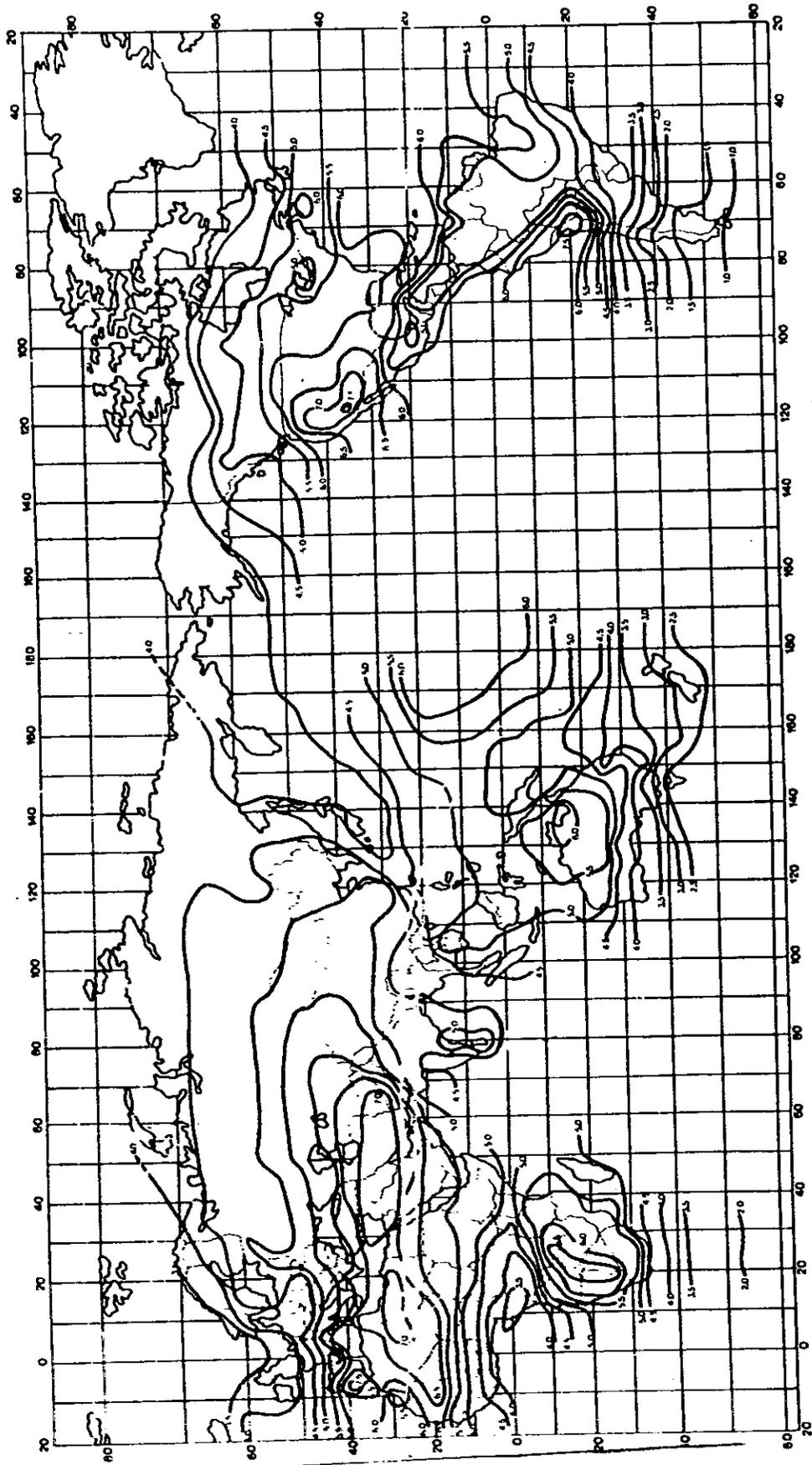


Diagrama 7. Nomograma de Energía Hidráulica

APÉNDICE 3

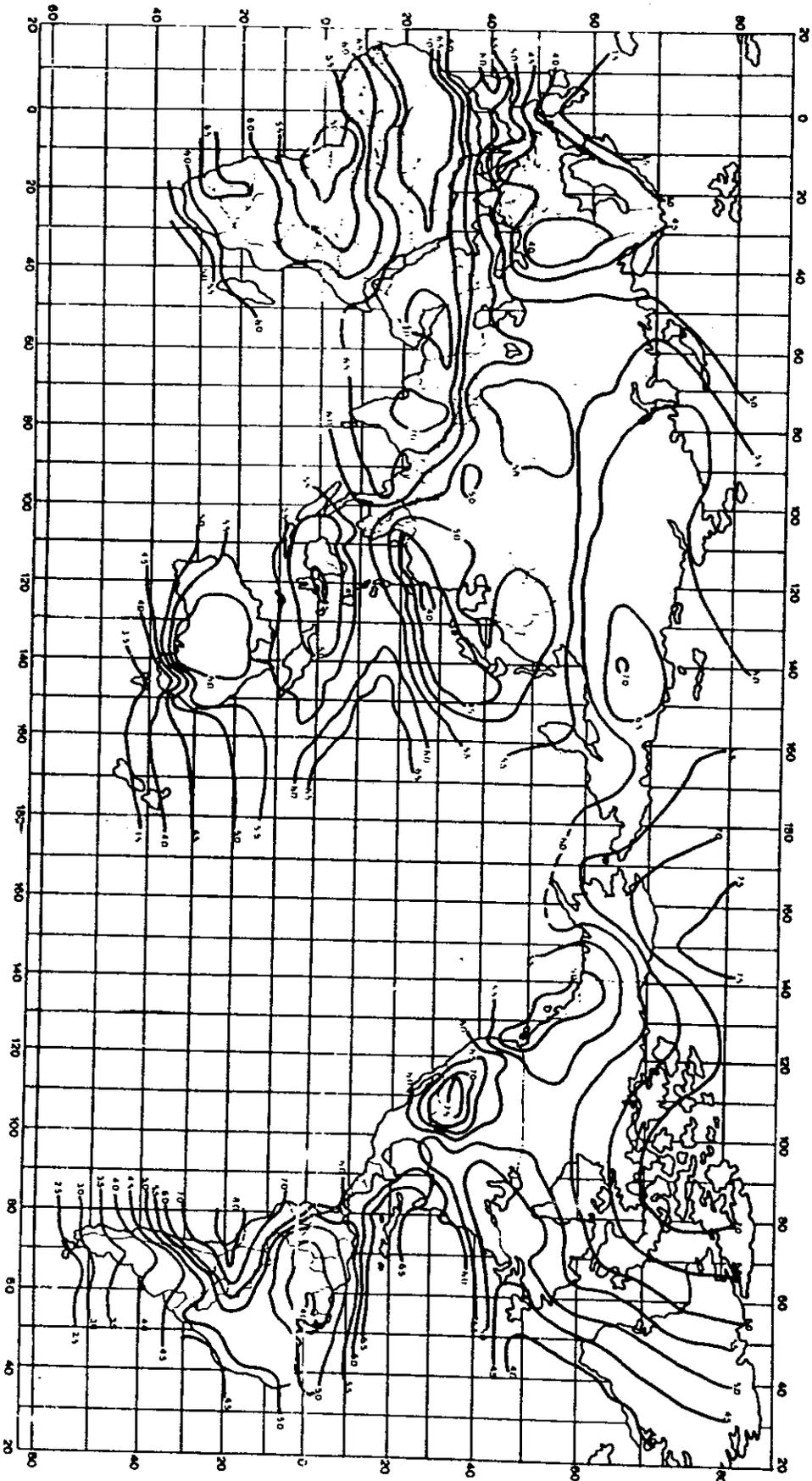
Mapas de insolación

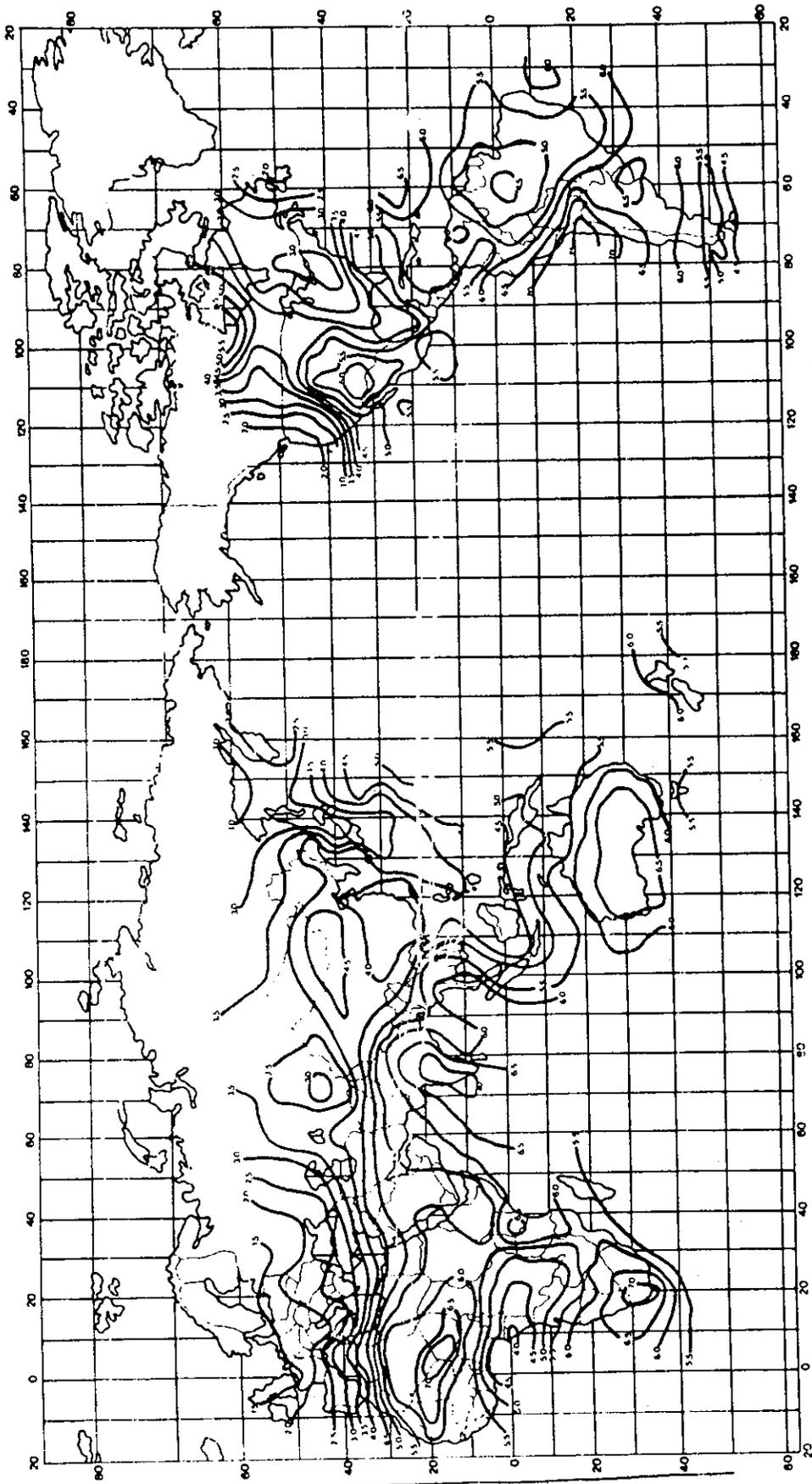




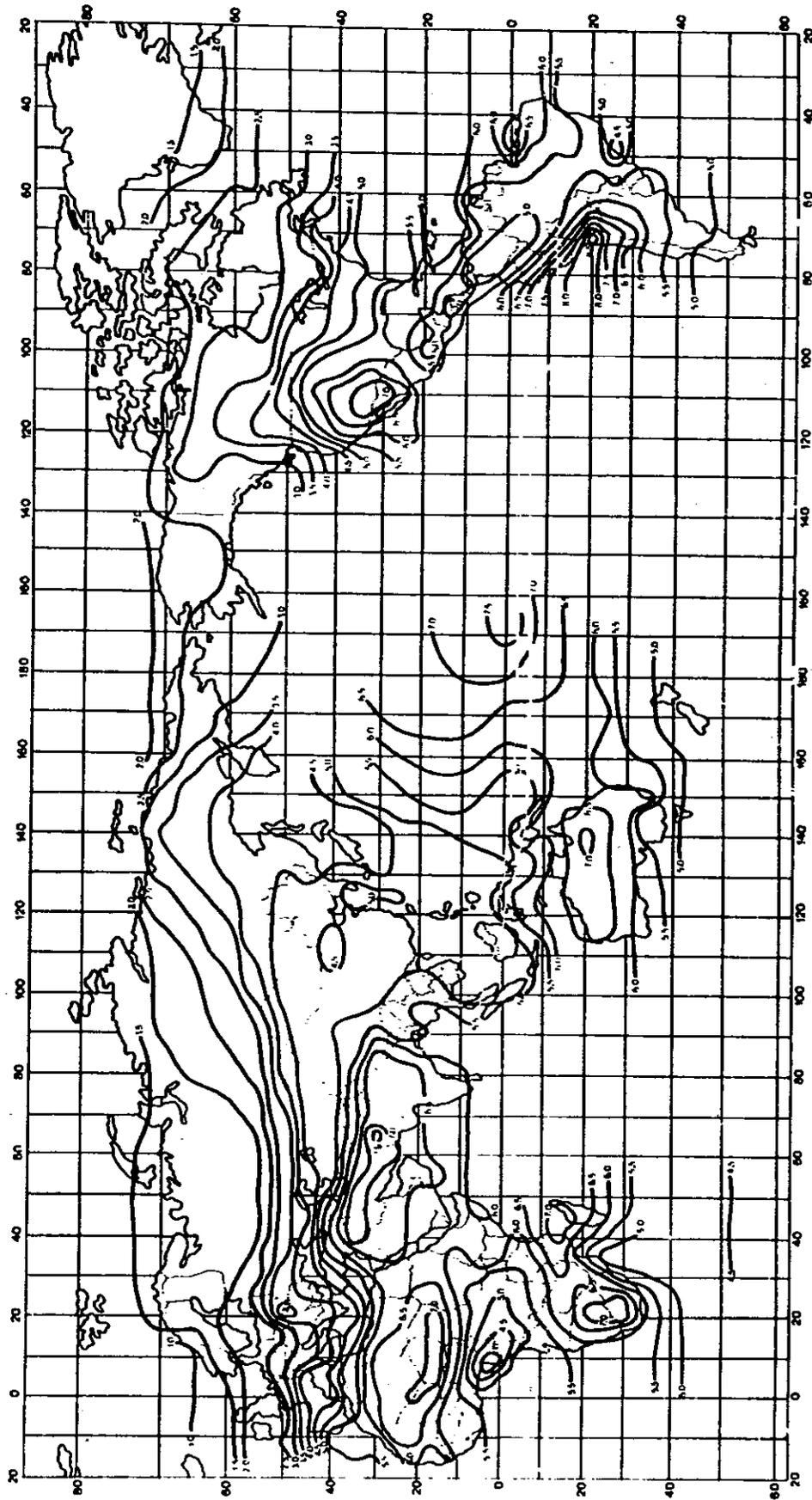
VERANO - Ángulo de inclinación igual al ángulo de latitud
 Total diario de radiación (en kWh/m²/día) que incide en una superficie inclinada

PRIMAVERA - Ángulo de inclinación igual al ángulo de latitud
Total diario de radiación (en kWh/m²/día) que incide en una superficie inclinada





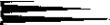
INVIERNO - Angulo de inclinación igual al ángulo de latitud
 Total diario de radiación (en kWh/m²/día) que incide en una superficie inclinada

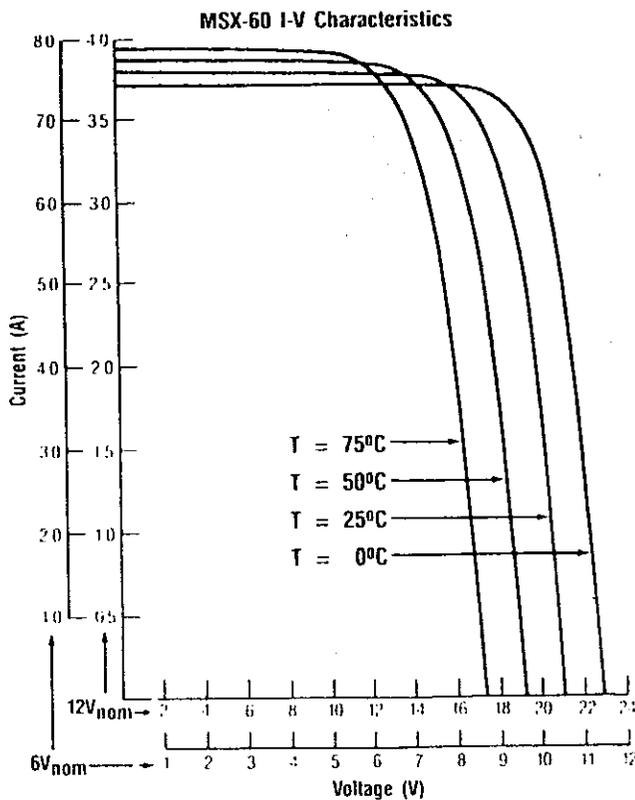
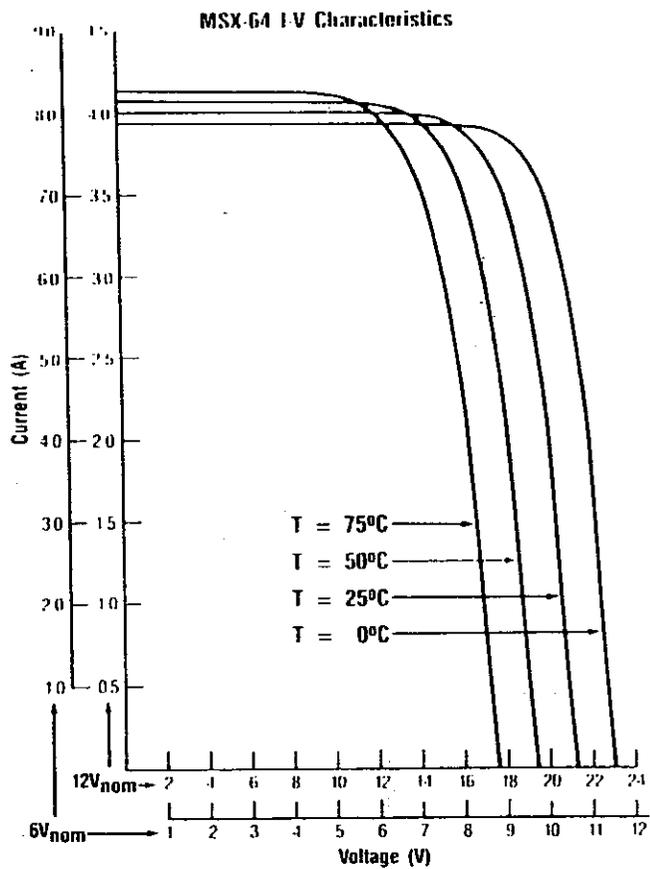


OTOÑO - Angulo de inclinación igual al ángulo de latitud
 Total diario de radiación (en kWh/m²/día) que incide en una superficie inclinada

APÉNDICE 4

Paneles solares





Curvas dadas por Solarex de los paneles MSX-60 y MSX-64.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS TÍPICAS.

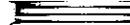
Configuración en 12 voltios		
	MSX 64	MSX 60
Potencia pico (Pp)	64 W	60 W
Voltaje aproximado a la potencia pico (Vpp)	17.5 V	17.1 V
Corriente aproximada a corriente pico (Ipp)	3.66 A	3.5 A
Potencia pico mínima garantizada	62 W	58 W
Corriente de corto circuito (Isc)	4.0 A	3.8 A
Voltaje en circuito abierto (Voc)	21.3 V	21.1 V
Coefficiente de temperatura del voltaje en circuito abierto	-73mV/°C	-73mV/°C
Coefficiente de temperatura de la corriente de corto circuito	3 mA/°C	3 mA/°C
Efecto aproximado de la temperatura sobre la potencia	-0.38 %/°C	-0.38 %/°C
NOCT	49 ° C	49 ° C

NOTAS:

1. La tabla anterior representa el funcionamiento de módulos típicos tal como se mide en las terminales de salida, y no incluyen los efectos de equipos adicionales como diodos y cables. Los datos se basan en mediciones hechas a las condiciones estándar de prueba (Standard Test Conditions, STC), las cuales son:
 Iluminación de $1kW / m^2$ (1 sol)
 Temperatura de célula de 25 ° C.
2. Cerca de casi cualquier condición de clima, las células en de un módulo en operación están más calientes que la temperatura ambiente. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) es un indicador de la temperatura que alcanzan las células bajo las Condiciones Standard de Operación.

APÉNDICE 5

Componentes pasivos: inductores y capacitores



CAPACITANCE	KEMET PART NUMBER
200 VOLT — C32X SIZE (Cont'd)	
47 pF	C32(2)C470(3)2G5CA
56 pF	C32(2)C560(3)2G5CA
68 pF	C32(2)C680(3)2G5CA
82 pF	C32(2)C820(3)2G5CA
100 pF	C32(2)C101(3)2G5CA
120 pF	C32(2)C121(3)2G5CA
150 pF	C32(2)C151(3)2G5CA
180 pF	C32(2)C181(3)2G5CA
220 pF	C32(2)C221(3)2G5CA
270 pF	C32(2)C271(3)2G5CA
330 pF	C32(2)C331(3)2G5CA
390 pF	C32(2)C391(3)2G5CA
470 pF	C32(2)C471(3)2G5CA
560 pF	C32(2)C561(3)2G5CA
680 pF	C32(2)C681(3)2G5CA
820 pF	C32(2)C821(3)2G5CA
1,000 pF	C32(2)C102(3)2G5CA
1,200 pF	C32(2)C122(3)2G5CA
1,500 pF	C32(2)C152(3)2G5CA
1,800 pF	C32(2)C182(3)2G5CA
2,200 pF	C32(2)C222(3)2G5CA
2,700 pF	C32(2)C272(3)2G5CA
3,300 pF	C32(2)C332(3)2G5CA
200 VOLT — C33X SIZE	
2,700 pF	C33(4)C272(3)2G5CA
3,300 pF	C33(4)C332(3)2G5CA
3,900 pF	C33(4)C392(3)2G5CA
4,700 pF	C33(4)C472(3)2G5CA
5,600 pF	C33(4)C562(3)2G5CA
6,800 pF	C33(4)C682(3)2G5CA
8,200 pF	C33(4)C822(3)2G5CA
.01 μ F	C33(4)C103(3)2G5CA
.012 μ F	C33(4)C123(3)2G5CA
.015 μ F	C33(4)C153(3)2G5CA
.018 μ F	C33(4)C183(3)2G5CA
200 VOLT — C340 SIZE	
.012 μ F	C340C123(3)2G5CA
.015 μ F	C340C153(3)2G5CA
.018 μ F	C340C183(3)2G5CA
.022 μ F	C340C223(3)2G5CA
.027 μ F	C340C273(3)2G5CA
.033 μ F	C340C333(3)2G5CA
.039 μ F	C340C393(3)2G5CA
.047 μ F	C340C473(3)2G5CA
200 VOLT — C350 SIZE	
.039 μ F	C350C393(3)2G5CA
.047 μ F	C350C473(3)2G5CA
.056 μ F	C350C563(3)2G5CA
.068 μ F	C350C683(3)2G5CA

**Tabla de selección de capacitores cerámicos.
Cortesía de Kemet Corporation.**

IC SERIES	DESCRIPTION	TYPE	CAPACITANCE MFD.	WVDC	TEMP RANGE	STANDARD TOLERANCE	FEATURES
CKR	Sub-Miniature	Radial	0.1 to 15,000	6.3 to 250	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	Small Size Low Std. Leakage Current
CKS	Sub-Miniature	Radial	.33 to 15,000	6.3 to 50	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	New Very Small Size
CKH	High Temperature Sub-Miniature	Radial	0.1 to 15,000	6.3 to 250	-40°C to +105°C	+20% Std. (+10% Opt.)	New Smaller Size Extended Temperature (+105°C)
RMR	High Temperature Sub-Miniature	Radial	.47 to 10,000	6.3 to 450	-40°C to +105°C	+20% Std. (+10% Opt.)	Extended Temperature (+105°C) Small Size Low Leakage Current
RSC	Sub-Subminiature/ Low Profile	Radial	10 to 6,800	6.3 to 50	-40°C to +85°C	+20% Std.	New Small Size - Low Profile
RSS	Sub-Subminiature/ Low Profile	Radial	.1 to 3,300	6.3 to 50	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	Extremely Small Size Tantalum Alternative
RLR	Low Leakage	Radial	.1 to 2,200	6.3 to 50	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	Timing Circuits Tantalum Alternative
RLS	Low Leakage	Radial	.1 to 1,000	6.3 to 50	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	New Smaller Size Timing Circuits Tantalum Alternative
RZM	High Frequency/ High Temperature	Radial	.47 to 15,000	6.3 to 50	-55°C to +105°C	+20% Std. (+10% Opt.)	New Small Size High Frequency (100 KHz)
RZS	High Frequency/ High Temperature	Radial	22 to 2,200	6.3 to 63	-55°C to +105°C	+20% Std. (+10% Opt.)	High Frequency (100 KHz) Low ESR, Low ESL High Ripple Current
BPS	Non-Polarized	Radial	.47 to 1,000	10 to 100	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	Smaller Size Polarity Reversing Low Power AC
TTA	Miniature	Axial	.47 to 22,000	6.3 to 450	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	Low Std. Leakage Current
TLS	Low Leakage	Axial	.1 to 100	10 to 50	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	New Smaller Size Timing Circuits Tantalum Alternative
BPA	Non-Polarized	Axial	.47 to 1,000	16 to 100	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	Polarity Reversing Low Power AC
LBA	Snap-Mount	Snap-Mount	47 to 47,000	16 to 450	-40°C to +85°C	+20% Std. (+10% Opt.)	High Ripple Current Power Supplies
LMU	Snap-Mount	Snap-Mount	330 to 1,500	200 to 400	-40°C to +105°C	+20% Std. (+10% Opt.)	High Ripple Current Power Supplies

**Tabla de selección de capacitores electrolíticos.
Cortesía de Illinois Capacitor Inc.**

"DC" SERIES • POWER LINE INDUCTORS

The use of high saturation flux density ferrite drum cores make these Inductors Ideal for use in switching power supply applications.

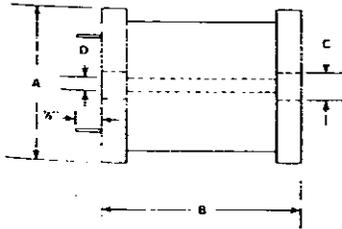
MAXIMUM PHYSICAL DIMENSIONS				
	A	B	C	D
DC1	660	840	195	Clearance Hole For 4 40 Screw
DC2	825	840	195	
DC3	11	840	195	



DC1

Typical Applications Are:

- Power Supplies
- Switching Regulators
- SCR and Triac Controls
- RFI Suppression
- Filters



NOTES:

- Saturation current lowers inductance 5%
- Inductance $\pm 10\%$ measured at 1 KHz.
- Leads for PC mounting tinned to within 1/16" of body
- Non-listed values available on request.
- Coils finished with sleeving (Polyolefin shrink tube)
- Center hole for mechanical mounting
- RDC measured @ 20°C.
- Values below 10uH $\pm 20\%$

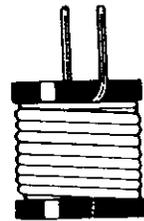
WILCO Part	Inductance at 0 DC (uH)	Max. DCR (Ohms)	Saturation Current (DC Amps)	Rated Current (AC Amps)
DC1-10G	1.0	.003	87.0	8.0
DC1-12G	1.2	.003	86.0	8.0
DC1-15G	1.5	.004	58.0	8.0
DC1-18G	1.8	.004	58.0	8.0
DC1-22G	2.2	.005	47.0	8.0
DC1-27G	2.7	.005	47.0	8.0
DC1-33G	3.3	.005	40.0	9.0
DC1-39G	3.9	.006	36.0	9.0
DC1-47G	4.7	.007	32.0	9.0
DC1-56G	5.6	.007	29.0	9.0
DC1-68G	6.8	.008	26.0	9.0
DC1-82G	8.2	.009	24.5	9.0
DC1-100	10.0	.010	21.2	9.0
DC1-120	12.0	.011	19.0	9.0
DC1-150	15.0	.015	17.8	7.2
DC1-180	18.0	.018	16.5	7.2
DC1-220	22.0	.020	15.8	5.5
DC1-270	27.0	.030	14.4	4.5
DC1-330	33.0	.040	13.2	4.0
DC1-390	39.0	.046	11.8	4.0
DC1-470	47.0	.062	11.0	2.8
DC1-560	56.0	.068	10.0	2.8
DC1-680	68.0	.077	8.9	2.8
DC1-820	82.0	.083	8.2	2.8
DC1-101	100.0	.095	7.5	2.8
DC1-121	120.0	.127	6.8	2.0
DC1-151	150.0	.181	5.6	1.6
DC1-181	180.0	.217	5.1	1.6
DC1-221	220.0	.240	4.3	1.6
DC1-271	270.0	.300	4.1	1.6
DC1-331	330.0	.336	3.8	1.3
DC1-391	390.0	.460	3.3	1.0
DC1-471	470.0	.636	3.2	0.8
DC1-561	560.0	.696	2.9	0.8

DC2



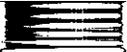
WILCO Part	Inductance at 0 DC (uH)	Max. DCR (Ohms)	Saturation Current (DC Amps)	Rated Current (AC Amps)
DC2-10G	1.0	.003	108.0	11.4
DC2-12G	1.2	.003	108.0	11.4
DC2-15G	1.5	.003	83.0	11.4
DC2-18G	1.8	.003	86.0	11.4
DC2-22G	2.2	.004	68.0	11.4
DC2-27G	2.7	.005	58.0	11.4
DC2-33G	3.3	.005	58.0	11.4
DC2-39G	3.9	.005	50.0	11.4
DC2-47G	4.7	.005	50.0	11.4
DC2-56G	5.6	.006	44.0	11.4
DC2-68G	6.8	.007	39.0	11.4
DC2-82G	8.2	.007	36.0	11.4
DC2-100	10.0	.009	30.0	11.4
DC2-120	12.0	.009	27.0	11.4
DC2-150	15.0	.013	25.0	9.4
DC2-180	18.0	.018	22.0	7.2
DC2-220	22.0	.019	21.0	7.2
DC2-270	27.0	.026	20.5	5.5
DC2-330	33.0	.029	18.6	5.5
DC2-390	39.0	.030	17.0	5.5
DC2-470	47.0	.035	15.1	5.5
DC2-560	56.0	.039	13.6	5.5
DC2-650	66.0	.053	12.7	4.8
DC2-820	82.0	.060	11.3	4.8
DC2-101	100.0	.080	10.4	4.0
DC2-121	120.0	.090	9.4	4.0
DC2-151	150.0	.100	8.6	4.0
DC2-181	180.0	.110	7.8	4.0
DC2-221	220.0	.150	7.0	2.8
DC2-271	270.0	.213	6.3	2.0
DC2-331	330.0	.305	5.2	1.6
DC2-391	390.0	.320	4.9	1.6
DC2-471	470.0	.355	4.5	1.6
DC2-561	560.0	.388	4.1	1.6
DC2-681	680.0	.430	3.7	1.6
DC2-821	820.0	.590	3.4	1.3
DC2-102	1000.0	.818	3.1	1.0
DC2-122	1200.0	1.14	2.7	0.8
DC2-152	1500.0	1.28	2.4	0.8
DC2-182	1800.0	1.39	2.2	0.8
DC2-222	2200.0	1.54	2.0	0.8

DC3



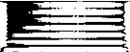
WILCO Part	Inductance at 0 DC (uH)	Max. DCR (Ohms)	Saturation Current (DC Amps)	Rated Current (AC Amps)
DC3-10G	1.0	.003	116.0	21.0
DC3-12G	1.2	.003	116.0	21.0
DC3-15G	1.5	.003	116.0	21.0
DC3-18G	1.8	.003	90.0	21.0
DC3-22G	2.2	.003	90.0	21.0
DC3-27G	2.7	.003	74.0	21.0
DC3-33G	3.3	.003	74.0	21.0
DC3-39G	3.9	.003	62.0	21.0
DC3-47G	4.7	.003	54.0	21.0
DC3-56G	5.6	.003	54.0	21.0
DC3-68G	6.8	.004	47.0	21.0
DC3-82G	8.2	.004	47.0	21.0
DC3-100	10.0	.006	38.0	17.0
DC3-120	12.0	.006	35.0	13.5
DC3-150	15.0	.009	32.0	13.5
DC3-180	18.0	.010	29.0	13.5
DC3-220	22.0	.011	25.0	13.5
DC3-270	27.0	.012	23.0	13.5
DC3-330	33.0	.017	20.0	13.5
DC3-390	39.0	.022	19.0	11.4
DC3-470	47.0	.024	19.1	9.0
DC3-560	56.0	.026	17.5	9.0
DC3-680	68.0	.029	15.6	9.0
DC3-820	82.0	.032	14.0	9.0
DC3-101	100.0	.034	13.2	9.0
DC3-121	120.0	.046	12.1	7.2
DC3-151	150.0	.064	10.8	5.5
DC3-181	180.0	.072	9.7	5.5
DC3-221	220.0	.080	8.7	5.5
DC3-271	270.0	.110	7.9	4.5
DC3-331	330.0	.122	7.1	4.5
DC3-391	390.0	.169	6.7	4.0
DC3-471	470.0	.187	6.0	4.0
DC3-561	560.0	.205	5.5	4.0
DC3-681	680.0	.256	5.0	2.8
DC3-821	820.0	.288	4.5	2.8
DC3-102	1000.0	.428	4.1	2.0
DC3-122	1200.0	.482	3.7	2.0
DC3-182	1800.0	.705	3.4	2.0
DC3-222	2200.0	1.02	2.5	1.3
DC3-272	2700.0	1.14	2.3	1.3
DC3-332	3300.0	1.27	2.0	1.3
DC3-392	3900.0	1.87	1.8	1.0
DC3-472	4700.0	1.86	1.7	1.0

Tabla de selección de inductores.
Cortesía de Wilco.



APÉNDICE 6

Componentes activos: diodos y transistores



Type	Pkg	I_c mA	V_{ce}	V_{ce} (Sat) Max I_c/I_b R/R
High Speed, High Voltage Transistors				
BUX86	TO-126	0.5	400	1.5@0.1
BUX87			450	
BUX89	TO-126	1.5	300	1@0.2
BUX84	TO-220A	2	400	1@1/0.2
BUX85			450	
BUX84F	SOT-186	2	400	1@1/0.2
BUX85F			450	
BUT11	TO-220AB	5	400	1.5@3/0.6
BUT11A			450	1.5@2.5/0.5
BUT11F	SOT-186	5	400	1.5@3/0.6
BUT11AF			450	1.5@2.5/0.5
BUW11	SOT-93	5	400	1.5@3/0.6
BUW11A			450	1.5@2.5/0.5
BUT211	TO-220AB	5	400	2@3/0.3
BUT18	TO-220AB	6	400	1.5@4/0.8
BUT18A			450	
BUT18F	SOT-186	6	400	1.5@4/0.8
BUT18AF			450	
BUT12	TO-220AB	8	400	1.5@6/1.2
BUT12A			450	1.5@5/1
BUT12A	SOT-93	8	400	1.5@6/1.2
BUW12			450	1.5@5/1
BUW12A			450	1.5V@5A
BUW12AF	SOT-199	8	450	1@25/0.5
BU1708X	SOT-186A	8	850	1@25/0.5
BUW13	SOT-93	15	400	1.5@10/2
BUW13A			450	1.5@8/1.5
BUV98V	SOT-227B1	30	450	1.5@20A/4A
BUV98AV			450	1.5V@16A/3.2A

Tabla de selección de transistores de potencia Philips.

Type	Pkg	V_F V	I_F mA	V_F @ I_F mA	t_{on}
Switching Diodes					
1N914	DO-35	75	75	1.00	10
1N914A	DO-35	75	75	1.00	20
1N914B	DO-35	75	75	0.72	5
1N916	DO-35	75	75	1.00	10
1N9164B	DO-35	75	75	0.73	5
1N4148	DO-35	75	200	1.00	10
1N4149	DO-35	75	200	1.00	10
1N4150	DO-35	50	200	0.74	10
1N4151	DO-35	75	200	1.00	50
1N4153	DO-35	75	200	0.88	20
1N4446	DO-35	75	200	1.00	20
1N4448	DO-35	75	200	0.72	5
1N4449	DO-35	75	200	0.73	5
1N4531	DO-34	75	200	1.00	10
1N4532	DO-34	75	200	1.00	10
BA511	DO-35	300	350	1.10	300
BAV10	DO-35	60	300	1.00	200
BAV18	DO-35	50	250	1.00	100
BAV19	DO-35	100	250	1.00	100
BAV20	DO-35	150	250	1.00	100
BAV21	DO-35	200	250	1.00	100

Tabla de selección de diodos.

