



01162  
UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

*RIEGO EN HUERTOS FAMILIARES MEDIANTE  
TANQUES DE DESCARGAS DE FONDO Y  
SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO*

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE  
MAESTRIA EN INGENIERIA  
(HIDRAULICA)

PRESENTA

ING. CANDIDO MILLAN DIAZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. NAHUN HAMED GARCIA VILLANUEVA

COORDIRECTOR DE TESIS: M.C. AARON SANCHEZ JUAREZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más profundo agradecimiento todas las instituciones y personas que de manera incondicional me brindaron su apoyo para la realización de este trabajo.

A la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) y al Sindicato Unico de Trabajadores de Electricistas de la República Mexicana. (SUTERM) que me permitieron poder realizar los estudios correspondientes para alcanzar un nivel mayor de conocimientos.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua que me dio la oportunidad de ingresar y cursar en la División de Estudios de Posgrado, Campus Morelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Centro de Investigaciones en Energía (CIE) de la Universidad Nacional Autónoma de México que mediante su departamento de Fotovoltaicos me permitió la realización de una parte del presente trabajo.

A mis profesores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por su gran capacidad y enseñanza.

A mis sinodales: Dr. Polioptro Martínez Austria, Dr. Nahun Hamed García Villanueva, M. C. Efrén Peña Peña, M.I. Victor Arroyo Correa, M.C. Aarón Sánchez Juárez.

Y de manera muy especial al Dr. Nahun Hamed García Villanueva y al M.C. Aarón Sánchez Juárez, por su tiempo y su capacidad técnica en la orientación y revisión para la elaboración del presente trabajo.

## DEDICATORIAS

Estoy seguro de que sin el apoyo de mi familia no hubiera sido posible realizar uno de mis mayores anhelos como profesionista y que ahora gracias a dios lo e concluido.

Ami esposa Elvia por su comprensión y gran cariño, a mis hijos Ivan y Xochitl, quienes por el cariño y la gran confianza que me tienen, permitieron que distrajera parte del tiempo que les correspondía, y no los he defraudado

A mis padres, quienes sembraron en mi la buena semilla.

A mis compañeros y amigos

# INDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
<b>CAPÍTULO I: CONCEPTOS BÁSICOS.....</b>	<b>6</b>
INTRODUCCION .....	6
I.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE ELÉCTRICIDAD .....	6
I.2 EL RECURSO SOLAR .....	7
I.2.1 IRRADIANCIA E INSOLACION .....	7
I.2.2 EL CONCEPTO DE HORA - PICO .....	12
I.2.3 LA TRAYECTORIA SOLAR .....	12
I.2.4 DATOS DE RADIACION SOLAR EN MEXICO .....	14
I.3 LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	16
I.4 SISTEMAS DE BOMBEO PARA IRRIGACION EN ZONAS AISLADAS .....	17
I.5 CLASIFICACION DE BOMBAS.....	18
I.5.1 LAS BOMBAS CENTRIFUGAS .....	19
I.5.2 LAS BOMBAS VOLUMÉTRICAS .....	21
I.6 RANGOS DE APLICACION DE LAS BOMBAS .....	23
<b>CAPÍTULO II: PRINCIPIOS DE LA CONVERSIÓN FOTOVOLTAICO.....</b>	<b>24</b>
INTRODUCCION .....	24
II.1 EL EFECTO FOTOVOLTAICO Y SUS CARACTERÍSTICAS .....	25
II.3 ANATOMÍA DE UNA CELDA SOLAR DE SILICIO CRISTALINO .....	29
II.4 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UNA CELDA SOLAR.....	30
II.6 EFECTO DE LA INTENSIDAD LUMINOSA Y DE LA TEMPERATURA .....	37
II.7 EL ARREGLO FOTOVOLTAICO .....	39
II.8 ENERGÍA GENERADA POR UN ARREGLO FOTOVOLTAICO .....	41
<b>CAPÍTULO III: SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO (SBFV).....</b>	<b>44</b>
INTRODUCCION .....	44
III.1 GASTO DIARIO .....	45
III.2 FUENTE DE AGUA .....	45
III.3 MOTOR .....	46
III.4 CONTROL DE LA ENERGÍA .....	48
III.5 TIPOS DE ACOPLAMIENTO .....	49
III.6 DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR .....	50
III.6.1 CÁLCULO DE LA CARGA DINÁMICA TOTAL .....	51
III.6.2 CÁLCULO DE LA POTENCIA HIDRÁULICA .....	52
III.6.3 SELECCIÓN DE LA BOMBA Y DETERMINACIÓN DE SU EFICIENCIA .....	53
III.6.4 EFICIENCIA DEL SISTEMA .....	54
III.6.5 CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL ARREGLO FV .....	55
III.6.6 CÁLCULO DEL NÚMERO MÍNIMO DE MÓDULOS FV .....	56
III.6.7 CONFIGURACIÓN POSIBLE DE L ARREGLO .....	56
III.6.8 TAMAÑO RESULTANTE DEL ARREGLO .....	57
III.7 CRITERIOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	57
<b>CAPÍTULO IV: DISPOSITIVO AUTO-OPERANTE PARA CONTROLAR LA ABERTURA Y CIERRE DE UN TANQUE DE DESCARGA DE FONDO.....</b>	<b>63</b>
IV.1 ANTECEDENTES .....	63
IV.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ABERTURA Y CIERRE .....	66
IV.3 BASES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE ABERTURA Y CIERRE .....	68
IV.3.1 MODELO MATEMÁTICO .....	68
IV.3.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL SISTEMA .....	68
IV.4 EQUILIBRIO DE MOMENTOS ACTUANTES EN EL SISTEMA .....	71
IV.5 VALIDACIÓN DEL MODELO DE DISEÑO .....	73

<b>CAPÍTULO V: CRITERIOS DE PLANEACIÓN Y DISEÑO PARA UN HUERTO FAMILIAR Y UN SISTEMA INTEGRAL TDF-SBFV.....</b>	<b>75</b>
INTRODUCCION .....	75
V 1 CRITERIOS DE DISEÑO DE UN HUERTO FAMILIAR DOTADO CON UN TDF-SB .....	76
V 2 TANQUE DE DESCARGA TDF .....	78
V 3 TUBERIAS DE DESCARGA CON COMPUERTAS .....	80
V 4 SISTEMA DE ABERTURA Y CIERRE .....	82
V 5 SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO .....	84
V 6 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO .....	85
V 6.1 CALCULO DE LA CARGA DINAMICA TOTAL .....	85
V 6.2 CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA COMPLETO .....	85
V 6.3 CALCULO DE LA POTENCIA HIDRAULICA .....	86
V 6.4 CALCULO DEL NUMERO MINIMO DE MODULOS FV .....	86
V 6.5 SELECCION DE LA BOMBA Y DETERMINACION DE SU EFICIENCIA .....	87
V 7 OPERACION DEL TDF - SB .....	90
<b>CAPÍTULO VI: ESTUDIO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>93</b>
INTRODUCCION .....	93
VI 1 PLANEACION DE LA PARCELA EXPERIMENTAL .....	93
VI 1.1 TOPOGRAFIA Y SUELO .....	93
VI 1.2 POSICION DEL TANQUE DE DESCARGAS DE FONDO .....	96
VI 1.3 CAPTACION DEL AGUA .....	96
VI 2 SISTEMA DE BOMBEO .....	98
VI 2.1 EL RIEGO Y TIPO DE CULTIVOS .....	99
VI 3 RENDIMIENTOS OBTENIDOS .....	101
VI.4 EXPERIENCIAS ASIMILADAS .....	102
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>103</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>105</b>

## Introducción

Un país con su población en crecimiento, como lo es México, necesita aumentar continuamente su producción agrícola en un porcentaje cercano a las necesidades de consumo. Esta actividad está ligada con una cada vez mayor dependencia de los recursos hídricos y por consecuencia se encuentra limitada por su cada vez menor disponibilidad tanto en cantidad como en calidad.

Las zonas rurales no son ajenas a este fenómeno y la mayoría de ellas, aparte de tener problemas con la disponibilidad del recurso, carecen en gran medida de tecnología apropiada y eficiente para la realización del riego agrícola. En este sentido y en particular los sistemas de riego por gravedad operan con eficiencias del orden del 50%, esto se debe a la magnitud de las pérdidas de agua por escurrimiento superficial y por percolación profunda. Estos aspectos aunados con los riegos inoportunos y otras prácticas culturales inapropiadas producen bajos rendimientos en la producción agrícola.

La problemática anteriormente señalada se magnifica en las zonas cuya disponibilidad hídrica es limitada, por ejemplo, en los sitios que se abastecen desde acuíferos ya sea con baja capacidad hídrica o que se están agotando rápidamente, o en zonas de riego en donde las sequías se presentan con cierta frecuencia. Para superar estos problemas, a los que se les suma el alto costo y baja disponibilidad de los energéticos convencionales –como son los derivados del petróleo y la electricidad– los técnicos y los productores agrícolas se han visto en la necesidad de adoptar mejores paquetes productivos y de participar en el desarrollo de tecnología acordes a las condiciones culturales, sociales y económicas que prevalecen en su entorno.

Una alternativa para modernizar y mejorar las eficiencias del riego por gravedad y que es motivo de este trabajo, es la tecnificación del riego a través del uso del dispositivo denominado Tanques de Descarga de Fondo (TDF) por medio del que es posible automatizar el riego intermitente por gravedad en surcos.

Los estudios experimentales realizados con el TDF en el laboratorio de hidráulica Dr. Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA [1], han permitido establecer un diseño sencillo y funcional de este sistema que permite su aplicación en pequeñas áreas de riego. En la práctica, el TDF permite aplicar el riego por gravedad en surcos mediante un sistema de tuberías de compuertas y aprovechar fuentes de abastecimiento pequeñas con

caudales de entre 0.02 l/s y 20 l/s. En este sentido, se tiene conocimiento que en zonas áridas y semiáridas, hay norias o pozos, con profundidades de hasta 200 m. que pueden ser habilitados y proporcionar caudales de ese orden. De este modo, la utilización del TDF se plantea como una solución alternativa para el problema del riego a pequeña escala.

Es conocido que para poder regar por gravedad, la zona de cultivo deberá estar a un nivel menor que la fuente de agua, caso concreto de un río, permitiendo la posibilidad de utilizar su propia energía hidráulica para producir el escurrimiento a través del suelo que se quiere regar. Cuando no se cuenta con energía hidráulica el riego sólo se puede dar si se tiene un sistema de bombeo, lo que implica un consumo de energía. Esta se puede suministrar por sistemas convencionales de energía (red de energía pública, motogeneradores o con quema de combustibles fósiles), o bien mediante fuentes alternas de energía como es el caso del viento (bombeo aerogenerador, bomba alimentada por generador eléctrico), la solar (bombas eléctricas alimentadas con sistemas fotovoltaicos), la biomasa (producción de gas para motogeneradores eléctricos). El uso de fuentes alternas de energía para generar fuerza electromotriz en los sistemas de bombeo han mostrado ser una alternativa real para la solución del problema de riego en pequeñas parcelas y huertos familiares.

Recientemente con el avance de la tecnología de los semiconductores, la aparición de las celdas solares para convertir la energía luminosa en energía eléctrica, y al mismo tiempo, el avance tecnológico en los motores de corriente directa, han permitido que en mercado, se comercialicen los sistemas de bombeo fotovoltaico (SBFV). Los SBFV han demostrado ser una alternativa tecnológica y económica para extraer agua en un rango de muy bajo caudal (0.5 lps), hasta con profundidades de 200 m [2]. Los antecedentes anteriores han motivado la realización del presente trabajo de investigación denominado Riego en Huertos Familiares mediante Tanques de Descarga de Fondo y Sistemas de Bombeo Fotovoltaico.

*El objetivo de este trabajo es el de diseñar y aplicar un dispositivo auto-operante que controle la apertura y cierre de un Tanque de Descarga de Fondo, para el riego de huertos familiares en donde el agua es abastecida por un sistema de bombeo fotovoltaico. Así mismo se analiza y se discute el balance energético del sistema de bombeo fotovoltaico y la descripción técnica del sistema de riego. Su aplicación se analiza para que sea puesta en operación en un Huerto Familiar experimental de 144 m<sup>2</sup>.*

Para un mejor seguimiento del trabajo, este se ha dividido en varios capítulos, los que a continuación se describen:

En el capítulo I se presenta los conceptos básicos necesarios para la comprensión de los términos en el presente trabajo, mientras que en el capítulo II, se tiene una descripción general de un sistema de bombeo fotovoltaico. En el capítulo III, se describe el dispositivo auto-operante para controlar la abertura y cierre intermitente de un Tanque de Descarga de Fondo (TDF) y en el IV se expone la manera de cómo se debe planificar y diseñar un Huerto familiar con un sistema integral. Por último en el capítulo V, se reportan las experiencias asimiladas en un Huerto Familiar experimental de 144 m<sup>2</sup> así, como los cultivos asociados a dicha parcela

# Capítulo I: Conceptos básicos

## Introducción

Dado que el presente trabajo tiene la característica de ser multidisciplinario es importante el definir los conceptos inherentes en él. En éste capítulo se presenta una descripción simple de los conceptos más importantes que se estarán manejando en el desarrollo del mismo.

## I.1 Conceptos básicos de electricidad

Hay dos tipos de portadores de carga eléctrica. los electrones con carga eléctrica negativa, y los huecos (o deficiencia de electrones) con carga eléctrica positiva. Estos portadores al moverse generan la corriente eléctrica. Dependiendo de la capacidad de conducir la corriente eléctrica, los materiales en la naturaleza se clasifican como **Conductores, Aislantes y Semiconductores.**

La corriente eléctrica que circula en un material se define como el número de electrones que en un segundo, fluye a través de él. La corriente eléctrica se mide en amperes, cuyo símbolo es A (o amp).

Se llama voltaje eléctrico (con símbolo V) al trabajo que debe realizar una fuerza externa sobre los electrones, dentro del material, para producir una corriente eléctrica. El voltaje eléctrico se mide en volts, cuyo símbolo es V.

La potencia eléctrica que se genera o se consume en un instante dado se especifica por el voltaje, V, que obliga a los electrones a producir la corriente eléctrica, I. El símbolo usado para la potencia es P. La potencia eléctrica se define como el producto del voltaje con la corriente, es decir,

$$P = V * I$$

La unidad de medición es el Watt, donde 1 Watt = 1 volt \* 1 amper

La energía eléctrica (E) es la potencia generada (P) o consumida en un período de tiempo (t). La energía se define como el producto de la potencia eléctrica consumida por el tiempo de consumo de esta.

Si el tiempo está dado en horas, entonces las unidades para medir la energía serán Watt-hora, (W-h). La unidad de medición para la energía en el sistema internacional, es el Joule. Donde

1 Joule = (1 Watt ) \*(1 seg )

3600 joule = 1 W-hora

1 kW-h = 3 6 MJ

## 1.2 El recurso solar

El Sol nos envía constantemente energía. Esta se conoce comúnmente como Luz Solar. La luz solar está formada por una gran gama de radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda que abarcan desde  $0.2\mu\text{m}$  hasta  $2.6\mu\text{m}$ , es decir, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. En la fig. 1 se muestra el espectro típico de la luz solar. Aunque sólo “vemos” una porción de esta radiación, llamada el visible, cuyo rango se encuentra entre los  $0.35\mu\text{m}$  hasta  $0.8\mu\text{m}$ , zona donde podemos apreciar los colores como el azul, verde, amarillo y rojo, la existencia de las otras se pone de manifiesto por su efecto en los cuerpos donde incide y es absorbida. La absorción de la luz solar por los cuerpos expuestos a ella se pone de manifiesto debido al aumento de temperatura que ellos experimentan. Para fines prácticos se puede definir como captador solar a cualquier objeto expuesto a la radiación solar. La absorción de la radiación en un captador implica el calentamiento de éste. Ya que la luz solar es una forma de energía, las unidades de medición para cuantificarla deberán de corresponder a las unidades de energía; es decir el Joule en el sistema internacional (SI).

### 1.2.1 Irradiancia e Insolación

La intensidad de la luz solar que recibe la superficie de la tierra se conoce como **irradiancia**. Esta se define como el valor instantáneo de la potencia luminosa recibida en un captador de un metro cuadrado de área, y por lo cual, si la unidad de potencia es el Watt, la unidad de medición de la irradiancia será  $\text{W}/\text{m}^2$ . La irradiancia fuera de la atmósfera terrestre es constante. Su valor estándar es  $1.353\text{W}/\text{m}^2$  NASA/ASTM.

Debido a los procesos de absorción, reflexión y dispersión que se lleva a cabo en la atmósfera, la irradiancia que llega a la superficie de la tierra es menor que el valor recibido fuera de la atmósfera; es decir, se atenúa en su trayecto hacia la superficie terrestre. La irradiancia medida sobre una superficie horizontal varía a lo largo del intervalo diario de luminosidad. En un día despejado, muy claro, sin partículas en el aire, a nivel del mar y en

el momento que el Sol este en el zenit del captador, la máxima irradiancia que se puede medir en un captador horizontal es de  $1000 \text{ W/m}^2$ , que se considera como el valor máximo para la irradiancia sobre la Superficie Terrestre, o valor pico

La cantidad de energía recibida y acumulada en un captador a lo largo de un día se le llama **Insolación** y se evalúa como la potencia instantánea recibida en el captador en la unidad de tiempo dado. Si la unidad de medición para el tiempo es la "hora", entonces la insolación tendrá unidades de Watt-hora/m<sup>2</sup> ( $\text{W-h/m}^2$ ). Es conocido que existen otros sistemas de unidades de medición, por ejemplo, el sistema Inglés. Para expresar la insolación en otras unidades, es necesario considerar las unidades básicas de los sistemas. De esta manera, la insolación puede expresarse en Langley, BTU y Joule. Las transformaciones correspondientes son las siguientes

$$1000 \text{ W-h/m}^2 = \text{Langley}/89.5 = 316.96 \text{ BTU/ft}^2 \text{ (Unidades Inglesas)} = 3.6 \text{ MJ/m}^2$$

IRRADIANCIA  
ESPECTRAL  
( $\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ )

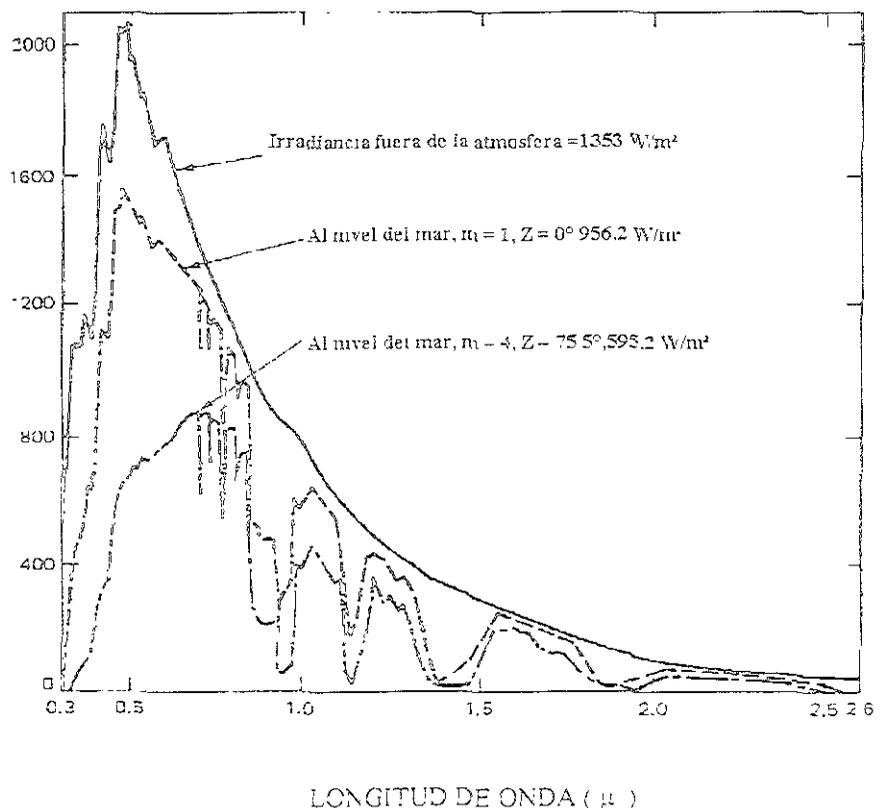


Fig. 1.1 espectro de la radiación solar mostrándose los efectos de la absorción atmosférica

Fuera de la atmósfera la radiación solar no se ve afectada por ninguna masa de aire y el espectro medido fuera de ella se define como el concepto de masa de aire cero.  $A_{m_0}$  (por

las siglas en Ingles, Air. mass) La trayectoria que siguen los rayos solares al atravesar la atmósfera se ven obstruidos por la masa de aire contenida en esta, la cantidad de masa que tiene que atravesar un rayo solar se cuantifica por la secante del ángulo que forman los rayos solares con la recta normal a una superficie horizontal Cuando dicho ángulo vale cero grados ( $0^{\circ}$ ), la secante = 1, y se dice que el espectro medido bajo estas condiciones (ios rayos perpendiculares a un captador horizontal), se le llama Am1 Si por ejemplo el ángulo entre la normal y los rayos del sol es  $75.5^{\circ}$ , la secante de este ángulo vale 4, y el espectro medido se le llama Am4 Por lo tanto  $Z$  = el ángulo cenital respecto a un plano horizontal y,  $A_m$  = la masa de aire

Generalmente el valor de la insolación se reporta como una acumulación de energía durante un período de tiempo dado, es decir, al día, al mes, al bimestre, al año, etc Comúnmente se reporta por día, o sea  $\text{Watt-h/m}^2$  al día. Por ejemplo  $2000 \text{ W-h/m}^2$  al día.

Por otra parte, al incidir la radiación solar en la atmósfera terrestre, ésta actúa como un filtro gigantesco que afecta el comportamiento del espectro de la radiación absorbiéndola o desviándola (ver Fig. 1.1), de tal manera que, un captador solar puede recibir la radiación de dos maneras: Directa y Difusa.

La irradiancia Directa es la que recibe el captador cuando su superficie es perpendicular a los rayos solares.

La irradiancia Difusa está compuesta por la refractada y la reflejada. El captador la ve como si viniera de la bóveda celeste.

En un día nublado, la radiación solar recibida en un captador es sólo difusa, ya que la directa es obstruida por las nubes En un día nublado, la irradiancia típica es del orden del 10% del valor pico

Ya que la irradiancia solar depende de las condiciones atmosféricas, y también de la manera en que el captador solar "ve" al Sol durante su trayectoria diaria y anual (transito solar), la cantidad de energía captada, en un sitio en particular, dependera de las condiciones meteorológicas del lugar y del tránsito solar

De esta manera, la insolación en el desierto de Sonora será diferente a la del Norte de Veracruz, o también, a la de San Cristóbal Las Casas en Chiapas O bien, la insolacion en los Altos de Chiapas será diferente a la de sus costas

Sabemos por ejemplo que Sonora es un estado desértico, sin nubes, y en consecuencia su insolación será alta, sin embargo, en los Altos de Chiapas se presentan muchos nublados, por lo cual, la insolación será menor que la de Sonora. En la Fig 1.2 se muestra el comportamiento típico de la irradiación recibida en un captador horizontal, durante las horas del día, en diferentes localidades: Hermosillo, Son y San Cristóbal Las Casas, Chis. Se nota que la máxima irradiancia captada en Sonora es de  $1000 \text{ W/m}^2$ , mientras que en la otra localidad, es de tan sólo  $700 \text{ W/m}^2$ , de aquí que la energía captada en este último lugar es mucho menor.

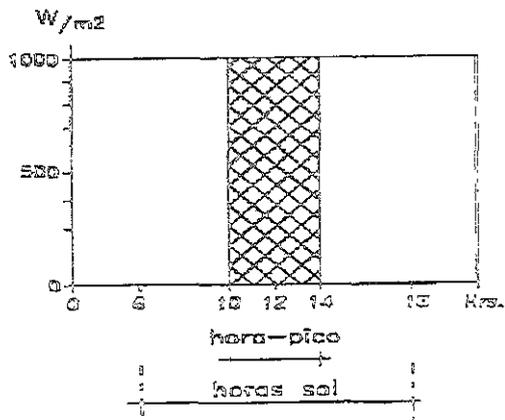
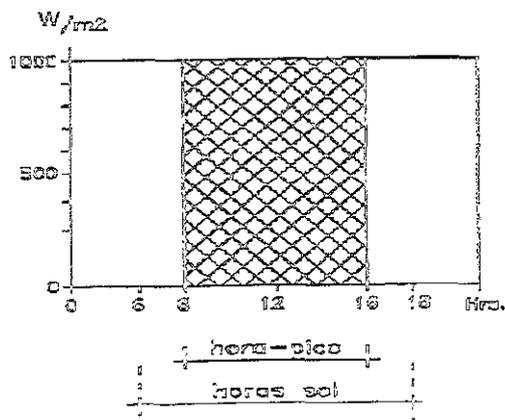
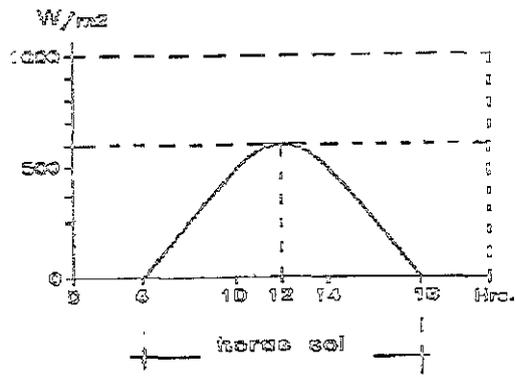
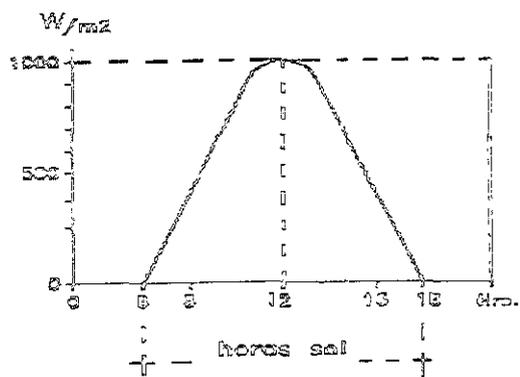


Fig 1.2 Insolación en dos sitios diferentes y el concepto de hora - pico [3]

## I.2.2 El Concepto de hora - pico

El área bajo la curva mostrada en la figura I.2 nos proporciona la energía acumulada durante las horas del día. Para el caso de Hermosillo Son, el área calculada es de 8000 W-h/m<sup>2</sup>. Si este valor lo dividimos entre 1000 W/m<sup>2</sup> (valor máximo medible para la irradiancia), tendremos 8 horas durante las cuales, aparentemente el captador recibió el valor "pico" de la irradiancia. Para el caso de San Cristóbal Las Casas, el área acumulada es de 3800 W-h/m<sup>2</sup>, que dividiendo entre el valor "pico" para la irradiancia nos da 3.8 has.

El número de horas en que el captador "aparentemente" estuvo recibiendo "el valor pico" de la irradiancia, se le llama horas pico.

En el lenguaje de la Ingeniería Solar, al concepto de hora pico se le da equivalencia de energía.

## I.2.3 La Trayectoria Solar

La Tierra tiene dos tipos de movimiento: uno alrededor de su eje dejando lugar al día y la noche (movimiento rotacional), y el otro, alrededor del sol (movimiento traslacional). Como la Tierra gira alrededor del sol siguiendo la trayectoria de una elipse, siendo el sol uno de los focos de esta, siguiendo una trayectoria elíptica. Esta trayectoria forma un plano imaginario llamado plano de la eclíptica. Ya que el eje de rotación de la Tierra forma un ángulo de 23° 5' con respecto al plano de la eclíptica, entonces al efectuar su movimiento traslacional, se producen las cuatro estaciones del año. La Fig. I.3 muestra un esquema de la traslación de la Tierra alrededor del Sol y las fechas del año en las cuales se tienen las estaciones del año.

Debido a la inclinación del eje terrestre, un observador situado en el Hemisferio Norte observa que el Sol no sigue la misma trayectoria aparente durante el año. Por ejemplo, un observador situado en Cuernavaca, Morelos notará que en

INVIERNO (21 de Enero) El Sol sale (amanece a las 6:29) por el Sur-Este formando un ángulo azimutal de 65° 41', a las 12:00 alcanza un ángulo de elevación de 50° 44' (respecto

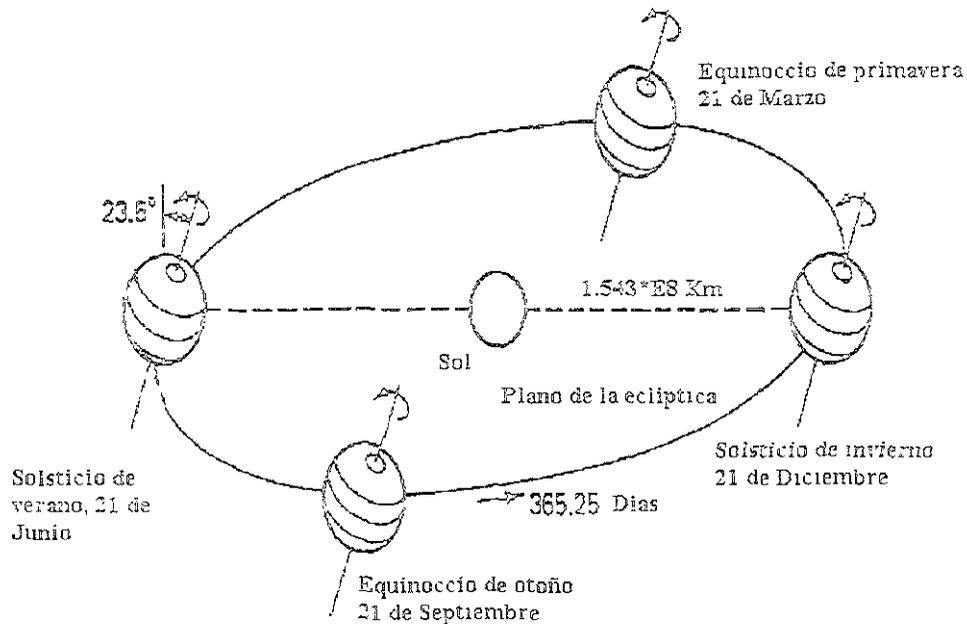


Fig 1.3 Movimiento traslacional de la Tierra

de la horizontal) y se oculta por el Sur-Oeste. La característica típica son los días cortos. El más corto corresponde al 21 de Diciembre.

**PRIMAVERA** Conforme avanza el año, la trayectoria del Sol se levanta y la salida se mueve hacia el Este. El día del equinoccio de Primavera (amanece a las 6:00), el Sol sale por el Este, al mediodía presenta un ángulo de elevación de  $70^{\circ}58'$  y se oculta por el Oeste.

**VERANO** El Sol sale por el Nor-Este y se oculta por el Nor-Oeste. El día del solsticio de verano, a las 12:00 el Sol presenta un ángulo de elevación de  $85^{\circ}23'$  y se presenta el día más largo del año con una duración de 12hrs 57'.

**OTOÑO** De la posición anterior el Sol regresa y el día del equinoccio de Otoño, el Sol sale por el Este y se oculta por el Oeste.

La trayectoria aparente del Sol vista por dos observadores situados a diferentes latitudes se observa en la Fig 1.4. La importancia de conocer las diferentes trayectorias del Sol permiten evaluar las sombras que pueden proyectar objetos cerca de los captadores solares.

## 1.2.4 Datos de radiación solar en México

Como la generación de electricidad por medio de sistemas fotovoltaicos depende de la insolación, es importante el conocer el recurso solar de los sitios de donde se piense instalar dichos sistemas. Los datos de radiación solar en nuestro país se pueden conseguir a través de mapas editados por diferentes organismos gubernamentales. Es muy conocido, por ejemplo, "El atlas de radiación solar", cuyos autores son Y. Galindo E. y E. Valdés B. editado por la UNAM 1991. También está disponible, "Radiación solar en México mapas", Fig. 1.5, que es una actualización de los anteriores, editado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. La insolación en los mapas se expresa usualmente como un valor promedio diario (la media diaria) para el periodo considerado: mensual, estacional o anual. Los valores que se proporcionan corresponden a la insolación global (insolación directa más la insolación difusa) para un captador horizontal. Generalmente los datos se proporcionan en unidades de  $\text{cal}/\text{cm}^2$  al día. Para transformar dichas unidades a horas-pico, es necesario multiplicar el valor de las  $\text{cal}/\text{cm}^2$  por 0.0116.

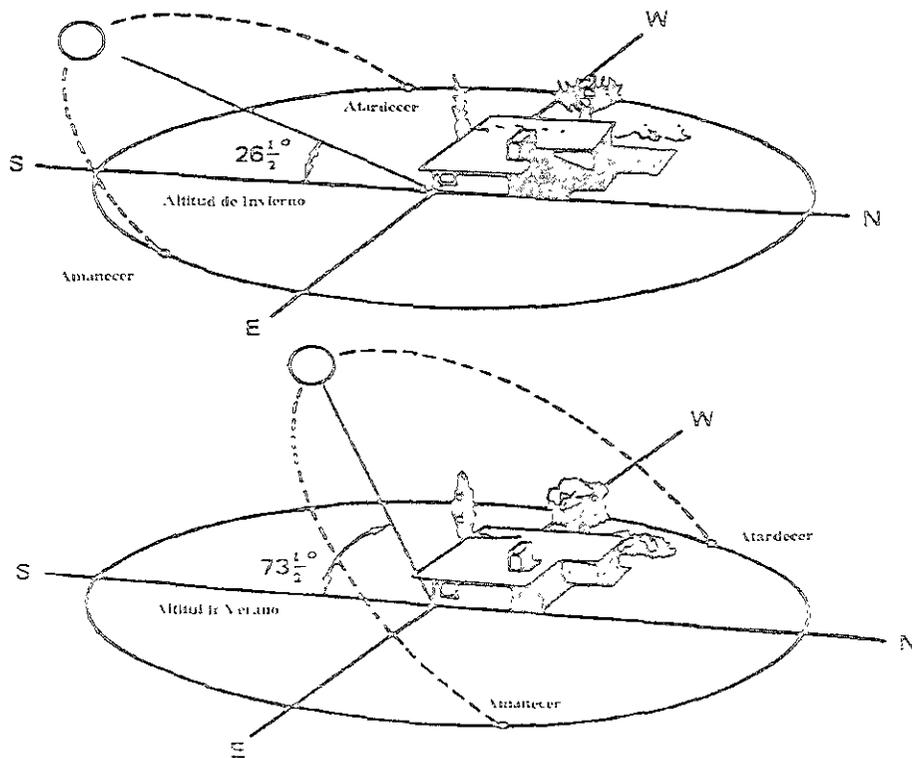


Fig. 1.4 Trayectoria aparente del Sol para dos observadores situados a latitudes de  $40^{\circ}\text{N}$  y  $18^{\circ}50'$

Ejemplo  $300 \text{ cal./cm}^2 \text{ al día} = 300 * 0.016 = 3.48 \text{ horas - pico}$

En la Fig 1.5 se muestra un mapa de la República Mexicana en donde se ha representado datos de radiación mediante líneas de igual valor. Las isólinas que se encuentran dibujadas corresponden a las horas-pico de insolación global diaria promedio al año.

La insolación es un parámetro clave en el diseño de los sistemas solares. Existen tablas producidas por instituciones académicas que resumen los valores promedio de la insolación en diferentes épocas del año. Un ejemplo de este tipo de tablas se muestra en la Tabla 1.1, en donde los valores dados están referidos en horas-pico. En ella se observa que la insolación cambia con respecto a la inclinación del captador. Por ejemplo, la insolación es mayor cuando el plano está inclinado a un ángulo igual al de la latitud geográfica,  $L$ , del sitio.

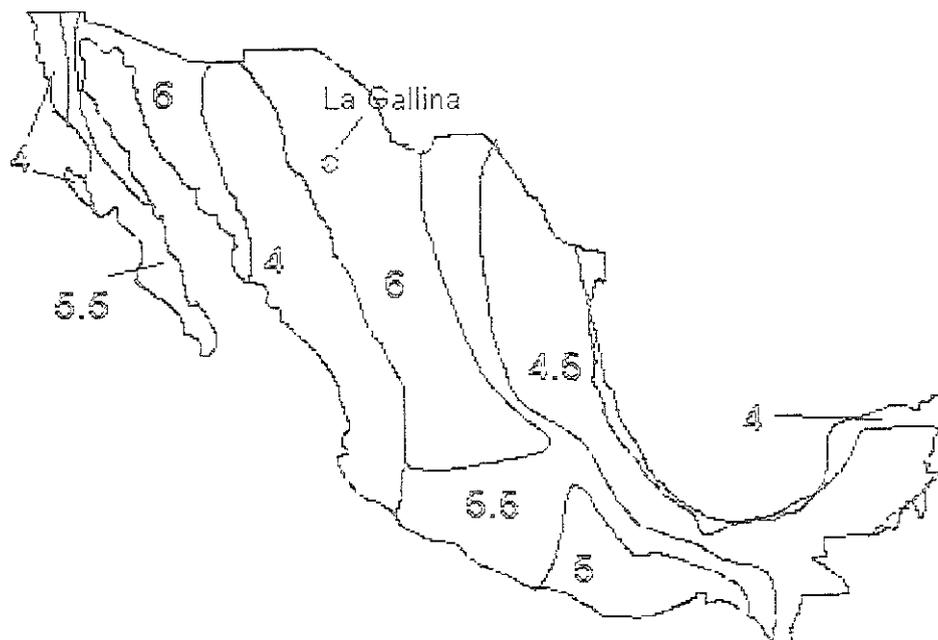


Fig 1.5 Datos de radiación solar en la República Mexicana. Los valores mostrados corresponden a la insolación global diaria promedio anual recibida en un captador horizontal en unidades de hora-pico.

Tabla I 1 Valores de insolación en la localidad de Cd. Juárez, Chihuahua. La letra L significa latitud. Los valores corresponden a la insolación diaria promedio mensual

Inclinación	Enc	Feb	Mar	Abril	May	Jun.	Jul.	Ago	Sept.	Oct.	Nov	Dic	Anual
L-15°	4.69	6.07	6.92	7.8	8.25	8.22	7.7	7.35	8.79	6.5	5.24	4.55	6.67
L	5.51	6.85	7.35	7.78	7.78	7.56	7.18	7.15	7.01	7.18	6.1	5.43	6.91
L+15°	6.01	7.24	7.36	7.32	6.89	6.51	6.28	6.56	6.85	7.45	6.61	6.99	6.75

### 1.3 Los sistemas fotovoltaicos

El efecto fotovoltaico es la generación de electricidad debido a la absorción de la luz en un dispositivo. A la unidad mínima en donde sucede se realiza dicho fenómeno se le llama celda solar. Las celdas solares convierten la luz solar en energía eléctrica tipo directa. Por lo cual también se les llama generadores fotovoltaicos.

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de equipos y/o aparatos cuya función es la de generar electricidad útil en corriente directa y/o alterna a partir de la luz solar. En forma general se componen de, un generador fotovoltaico, un controlador de carga, un sistema de almacenamiento de energía, un sistema de inversión de corriente y las cargas eléctricas que se alimentan de él, en la figura 1.6 se muestra un diagrama básico de un sistema fotovoltaico.

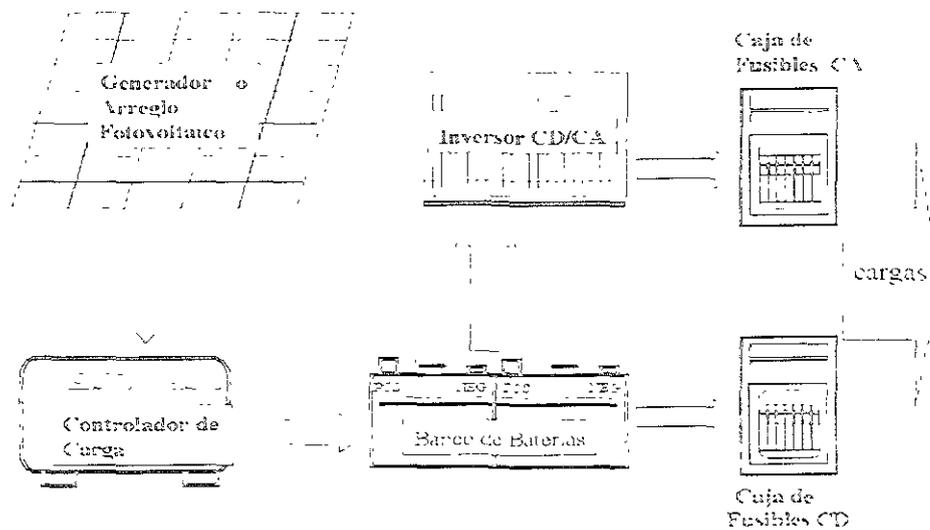


Fig. 1.6 Diagrama básico de un sistema fotovoltaico

## I.4 Sistemas de bombeo para irrigación en zonas aisladas

Un sistema de bombeo tiene como objetivo principal extraer o disponer de agua suficiente para propósitos de riego, abrevadero y consumo humano. Por lo general, el objetivo principal ha sido contar con agua suficiente y permanente durante las temporadas de estiaje y permitir un adecuado aprovechamiento en agostaderos y contar con agua para los animales, así como el establecimiento de pequeñas áreas de riego para siembra de forraje, hortalizas para el consumo familiar. Estos sistemas están compuestos generalmente de tres componentes; a) el suministro de agua, que generalmente puede ser de pozo, manantial o alguna fuente de suministro superficial, b) un sistema de almacenamiento que puede ser un tanque elevado o presurizado y c) un sistema de conducción, consistiendo en tuberías y válvulas para llevar el fluido al sitio requerido

Los parámetros principales en un sistema de bombeo son los siguientes:

- Consumo diario
- Fuente de abastecimiento
- Energía disponible para el bombeo

El consumo diario es el parámetro que definirá la demanda de agua por bombear para los diferentes fines de esta

La fuente de abastecimiento, este podrá ser cualquier manto o escurrimiento superficial o subterráneo de agua disponible en el sitio

La energía necesaria para el bombeo de agua se obtendrá de las fuentes de energía disponible en el sitio en cuestión. Las fuentes alternativas para generar energía recomendables en aquellos lugares remotos donde la disponibilidad de combustibles fósiles o redes de distribución sería costosa llevarlos donde se requieran para tal fin.

Como fuentes renovables podemos mencionar a la Energía Solar, Eólica, Geotérmica, Biomasa o incluso Microeléctrica.

Existen en el mercado dos grupos de bombas, los que operan con sistemas eléctricos y sistemas mecánicos.

Dentro de los eléctricos están los que necesitan la energía eléctrica para funcionar su motor  
Bombas centrífugas y volumétricas

Los de sistemas mecánicos son Los eólicos, de combustión interna, manuales(hidrantes), de tracción animal, etc

En alguna circunstancias el método preferido ha sido la energía solar (fotovoltaica), especialmente donde haya recursos solares adecuados y una mediana demanda de agua

En la tabla 1 2 se muestra una comparación de los diferentes sistemas de bombeo que se han estado usando a la fecha

Tabla 1 2 Comparación de sistemas para bombeo de agua [4]

TIPO DE BOMBA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Manual	Bajo costo con Tecnología sencilla Mantenimiento fácil Limpieza No necesitas combustible Puede ser usado en pozos Excavados a mano	Mantenimiento constante Bajo flujo Demanda tiempo y energía Podrían ser más en otra actividad Uso poco económico de una perforación muy cara.
Solar (accionado por un proceso fotovoltaico)	No necesita combustible, Poco mantenimiento, Limpio Fácil de instalar y Confiable De larga duración Pocos costos repetitivos Sistema modular flexible	Inversión de capital relativamente caro Menor producción en climas de poca insolación
Diesel (o gas)	Inversión de capital moderada Puede ser portátil Tecnología muy conocida Fácil de instalar	Servicio inadecuado de mantenimiento, tiende reducir su vida útil. Combustible es caro y de regular abastecimiento. Problemas de ruido, hollín, gases y humo

## 1.5 Clasificación de bombas

Un sistema de agua impulsado por energía solar es parecido a cualquier otro. Como mínimo tendrá un conjunto fotovoltaico, un motor y una bomba. El conjunto se puede conectar directamente a un motor de DC o a un motor de AC, por medio de un inversor. Puede usarse también un banco de baterías para acumular energía. El motor se conecta a cualquier variedad de bomba de velocidad variable, hay dos amplias categorías de bombas que se usan en sistemas fotovoltaicos independientes en todo el mundo: centrífugas (roto-

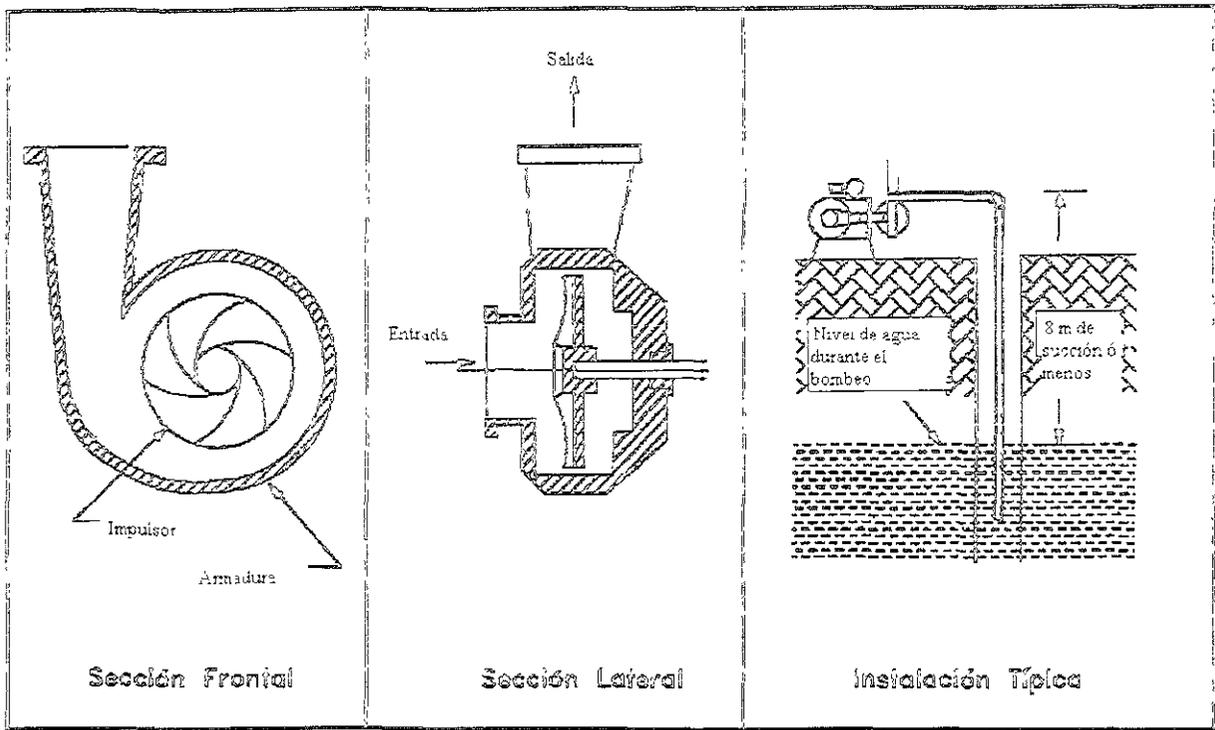
dinámicas) y volumétricas o de desplazamiento positivo con características fundamentalmente diferentes

### 1.5.1 Las bombas centrífugas

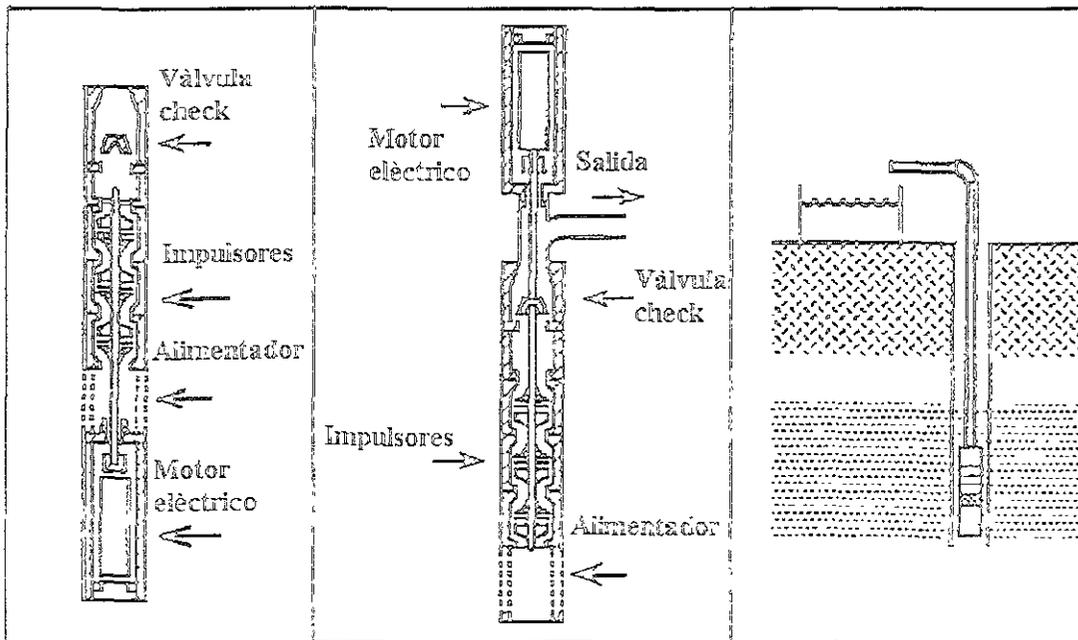
Estas se adaptan idealmente a las condiciones de flujo moderado a elevado en los pozos de tubo, cisternas o en otros embalses. Estas bombas se diseñaron para una presión hidráulica fija (carga) y su rendimiento de agua aumenta con la velocidad de rotación. Entre más se aleja esa presión hidráulica del punto fijo de diseño, más disminuye la eficiencia de la bomba. Son las más comunes en el mercado. Utilizan un mecanismo centrífugo para el bombeo de agua que les permite tolerar cantidades limitadas de arena y otros sedimentos, pero pueden sufrir daños si trabajan en seco, son adecuadas para aplicaciones cuando se requieren grandes flujos de agua a una carga dinámica total relativamente baja. Hay dos tipos de bombas centrífugas: succión superficial y sumergibles.

Las bombas centrífugas de succión superficial no trabajan adecuadamente cuando la altura de succión es mayor a 8 metros, pero presentan la versatilidad de que el proceso de sustitución y reparación no es problemático.

Las bombas centrífugas sumergibles son las que más comúnmente se utilizan en sistemas de bombeo con energía FV. Estas bombas alcanzan su máxima eficiencia de bombeo en un rango relativamente estrecho de carga dinámica total, o sea que el modelo apropiado para cada proyecto se debe elegir cuidadosamente, la eficiencia de bombeo es función de la presión, flujo y de la radiación, lo cual varía todo el día. Un diagrama esquemático de dichas bombas se muestra en la Fig.17.



( a ) bomba centrífuga superficial



( b ) bomba centrífuga sumergible

Fig. 1.7 Diagrama esquemático de un corte transversal de bombas centrífugas

## 1.5.2 Las bombas volumétricas

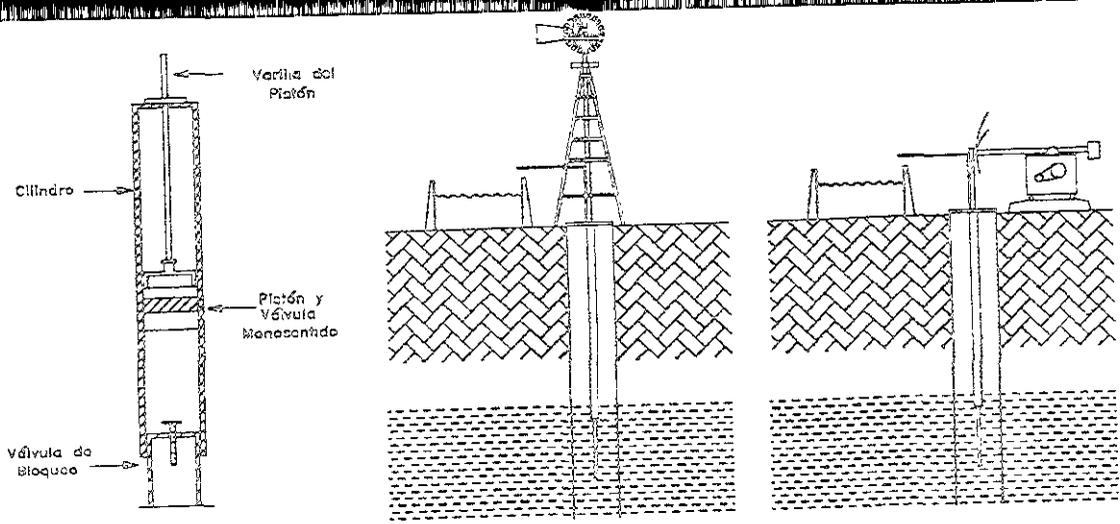
Dichas bombas dan una capacidad de bombeo casi independiente de la carga pero directamente proporcional a la velocidad, y se clasifican en: bombas de cilindro y bombas de diafragma

Las bombas de cilindro se usan para bombear agua de pozos más profundos (50m o más), o donde se requiere relativamente poco volumen de agua, estas bombas no deben conectarse directamente a la salida de un arreglo fotovoltaico porque la corriente de carga requerida cambia drásticamente durante cada ciclo de bombeo.

Las bombas de diafragma son útiles para aplicaciones donde se requieren menos de 5 m<sup>3</sup> de agua en instalaciones sumergibles de menos de 50 m o superficiales, se distinguen por su bajo costo, tamaño pequeño y peso ligero, lo cual permite su fácil remoción para reparación o inspección, la mayoría de los modelos utilizan motores de C.C. con escobillas, tanto las escobillas como los diafragmas necesitan ser reemplazados periódicamente

A diferencia de las bombas centrifugas, el rendimiento de las bombas volumétricas es prácticamente independiente de la carga dinámica total. Esto quiere decir, que la bomba funciona eficientemente en un rango relativamente amplio de carga dinámica total, al aumentar la radiación, aumenta la velocidad del motor, lo que a su vez aumenta el flujo de agua

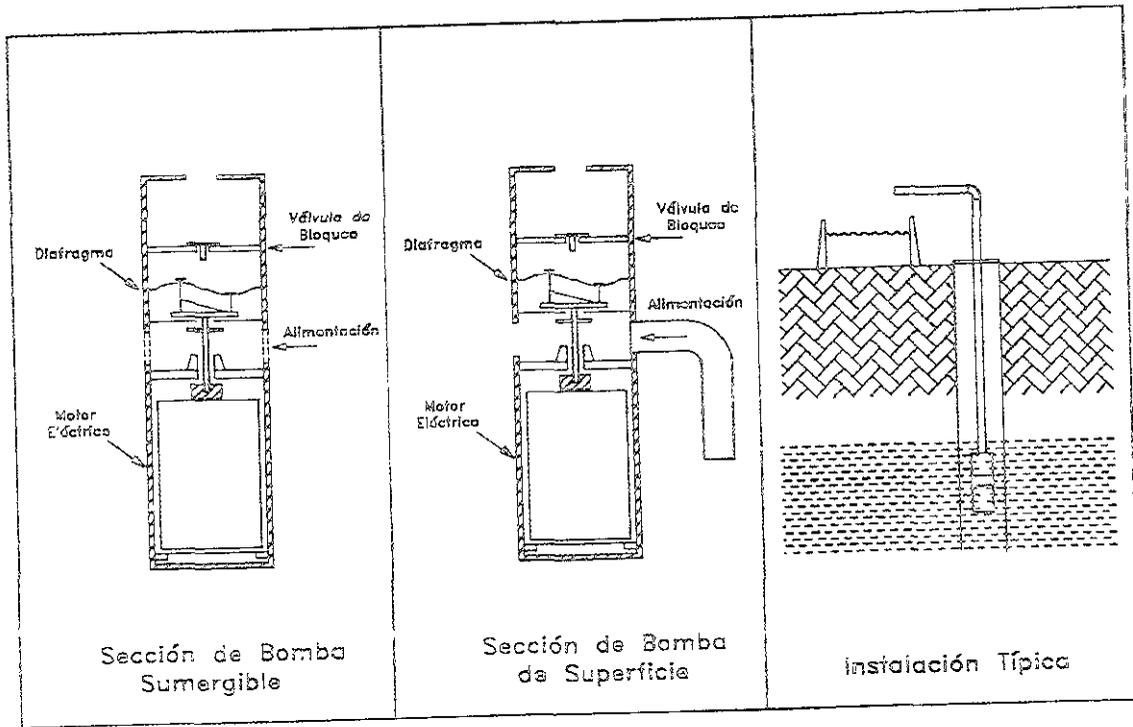
La decisión de bombear agua con energía solar dependerá de algunas consideraciones generales: localización y factores de demanda. La localización depende de los recursos naturales como el sol, el viento, las caídas de agua, etc., y la disponibilidad de fuentes convencionales de energía, distancia a la red, etc. Los factores de la demanda de agua depende de: la demanda de agua promedio diaria (para consumo o riego) en m<sup>3</sup>, la profundidad de la fuente de agua en metros y la carga dinámica total, que es la suma de la altura de bombeo, fricción y abatimiento ( pozos y norias). En la Fig. 1.8 se muestran diagramas esquemáticos de las bombas de cilindro y de diafragma; así como un corte transversal de estas y esquemas típicos de instalación.



Sección de Cilindro

Instalación Activada por Movimiento  
(a) bomba de cilindro

Instalación Activada por Motor Eléctrico



Sección de Bomba Sumergible

Sección de Bomba de Superficie

Instalación Típica

(b) bomba de diafragma

Fig. 18 Diagramas esquemáticos de bombas de cilindro y de diafragma. En (a) se muestra la bomba de cilindro, y en (b) la bomba de diafragma [5]

## 1.6 Rangos de aplicación de las bombas

En un sistema de bombeo, la bomba se debe de seleccionar en función de los requerimientos de agua establecidos y de la producción de la fuente. La elección del tipo de bomba depende principalmente de esos factores. En la Fig 19 se muestra un diagrama carga de bombeo en función del flujo bombeado en donde se ha compactado la información relevante de estos parámetros, para los diferentes tipos de bombas que se encuentran disponibles en el mercado. Es claro que habrá bombas que operen de una manera eficiente fuera de los rangos mostrados, pero siempre es recomendable consultar la información que proporciona el fabricante de bombas con respecto al modelo elegido y determinar si éste satisface las condiciones de bombeo especificadas.

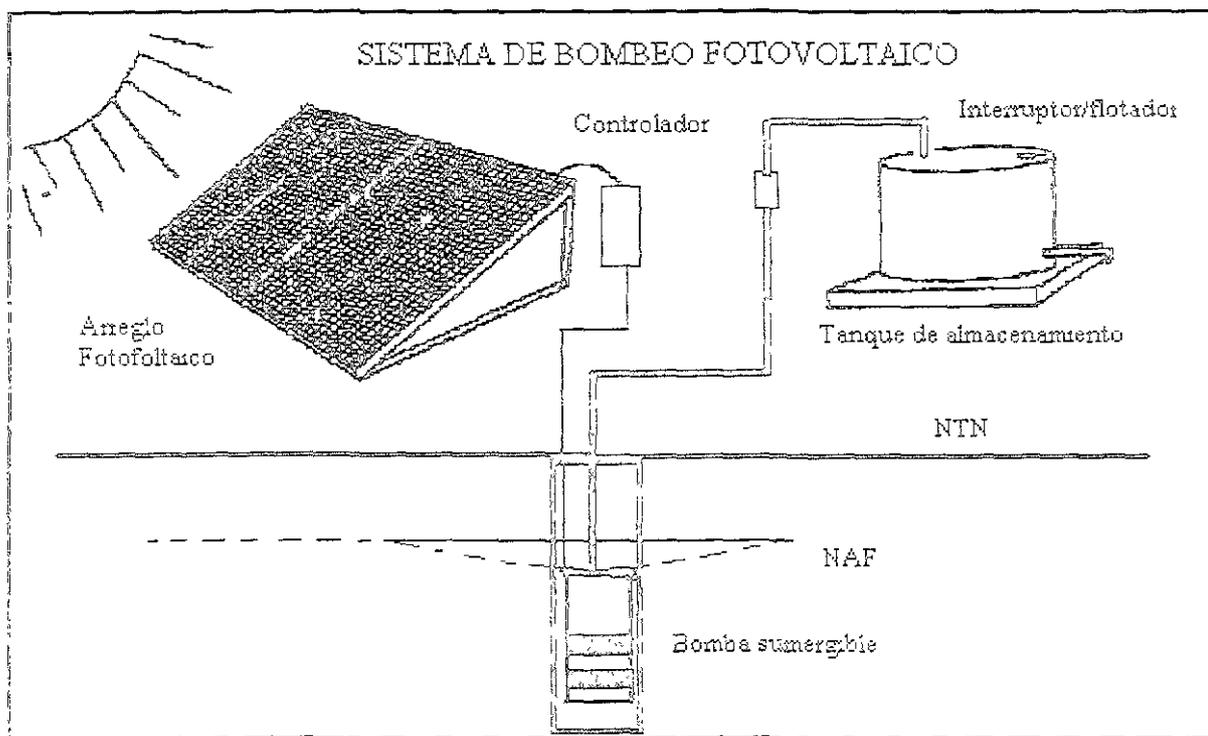


Fig 19 Diagrama de aplicación para los diferentes tipos de bombas [3]

## Capítulo II: Principios de la conversión Fotovoltaica

### Introducción

El Sol ha sido considerado durante mucho tiempo como un “dador de vida”. La energía proporcionada por el Sol es enorme. En promedio, la superficie de la Tierra recibe alrededor de  $1.2 \times 10^{17}$  W de potencia solar. Esto significa que en menos de una hora, la energía solar que arriba a la Tierra es la suficiente para satisfacer la demanda energética anual de la población humana del mundo. Esta es la energía de la luz solar que los organismos biológicos han ido asimilando durante millones de años y que ha hecho posible el crecimiento industrial que conocemos hoy día. La disponibilidad de la Energía Solar en todo el mundo hacen de ésta una fuente renovable de energía universal, la que también es responsable de la aparición de otras fuentes renovables tales como, la energía del viento, la hidroeléctrica y la maremotriz.

Hay dos formas conocidas en que el ser humano puede aprovechar la energía solar: una es por medio de procesos fototérmicos para calentamiento de fluidos y generar calor de proceso, y la otra es por medio del Efecto Fotovoltaico a través del cuál, la luz solar se convierte en electricidad sin usar ningún proceso intermedio. Los dispositivos donde se lleva a cabo la transformación de luz solar en electricidad se llaman Generadores Fotovoltaicos y a la unidad mínima en la que se realiza dicho efecto se les llama Celdas Solares. En la figura II.1 se ilustra dicho efecto.

La energía solar fotovoltaica ha sido identificada como una tecnología de rápido crecimiento con un potencial de aplicación alto. Por ser modular, puede ser usada en muchas aplicaciones. El mayor obstáculo para su uso en gran escala es el alto costo de inversión inicial. Los costos de generación de electricidad están entre los US \$ 0.25 a \$ 1.00 por kW-hr para diferentes tipos de sistemas y diferentes localizaciones. Como resultado, el uso de los generadores fotovoltaicos está limitado principalmente a aplicaciones en las que el costo de introducción de la red eléctrica convencional y del consumo de la electricidad es alto, o bien, donde es necesario un generador limpio, silencioso y confiable. Este es el caso de áreas remotas (electrificación rural, telecomunicaciones, bombeo de agua, señalización, etc.) o para amortiguar los picos de

consumo altos Sin considerar el costo inicial de inversión, la popularidad de la tecnología fotovoltaica se basa en su fácil uso, confiabilidad, relativo bajo mantenimiento y la disponibilidad del recurso solar. Debido a que son modulares, los sistemas fotovoltaicos pueden ser dimensionados para satisfacer las necesidades exactas de energía del usuario, disminuyendo el costo global sistema e incrementando la eficiencia del mismo. Conforme aumentan las necesidades energéticas del usuario, el tamaño energético del sistema se puede expandir

## II.1 El Efecto Fotovoltaico y sus características

Se llama EFECTO FOTOVOLTAICO (FV) a la aparición de un voltaje en las terminales de un captador solar cuando éste es iluminado. Si a las terminales del captador se le conecta un aparato eléctrico, por ejemplo, un foco, entonces el foco se encenderá debido a la corriente eléctrica que circula por él. Esta es la evidencia física del efecto fotovoltaico Fig. II 1

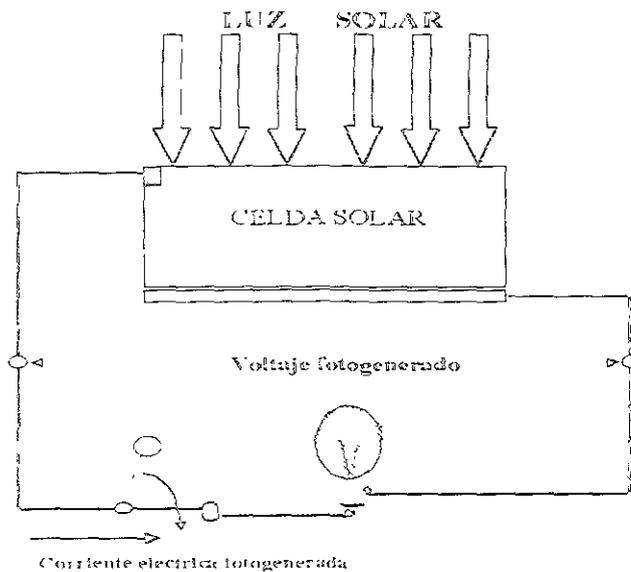


Fig II 1 Representación física del efecto fotovoltaico en una célula solar

## II.2 Materiales de Fabricación para celdas solares

El Efecto Fotovoltaico se puede llevar a cabo en materiales sólidos, líquidos o gases, pero es en sólidos, especialmente en los materiales semiconductores, en donde se han encontrado eficiencias de conversión, de energía luminosa a eléctrica, grandes.

Existen muchos materiales semiconductores con los cuales se pueden elaborar celdas solares, pero el usado más comúnmente, desde un punto de vista de infraestructura tecnológica, es el silicio

Silicio Monocristalino: Las celdas solares de silicio monocristalino se elaboran de un sólo cristal de silicio de alta pureza. La eficiencia de estas celdas ha llegado hasta el 25% presentando un buen desempeño, sin degradamiento, hasta por 20 años. La tecnología de fabricación de celdas de silicio monocristalino es la más madura en el mercado, proporcionando con esto confiabilidad en el dispositivo, de tal manera, que algunos fabricantes garantizan su producto hasta por 20 años.

Silicio Policristalino: Como su nombre lo dice las celdas están formadas por pequeños cristales de silicio. La tecnología de fabricación de celdas de silicio policristalino fue desarrollada buscando disminuir los costos de fabricación de éstas. Dichas celdas presentan eficiencias de conversión un poco inferiores a las monocristalinas, pero se ha encontrado que pueden obtenerse hasta del orden del 23%. La garantía del producto puede ser hasta por 20 años, dependiendo del fabricante.

Silicio Amorfo: La palabra significa carencia de estructura. El silicio amorfo no tiene un patrón ordenado como es el caso del monocristalino. La tecnología de fabricación del silicio amorfo ha sido desarrollada con el objeto de abaratar el costo de fabricación de las celdas solares y ha estado cambiando y mejorando constantemente. Desafortunadamente y debido a las bajas eficiencias de conversión (del orden del 6% hasta hace unos años) las principales aplicaciones de las celdas solares de silicio amorfo estaban guiadas hacia pequeños dispositivos electrónicos tales como relojes, calculadores, etc. En la actualidad y con el mejoramiento de la tecnología de fabricación se ha llegado a eficiencias de

conversión del orden del 12%. La garantía del producto es de 10 años y realmente el producto es mas barato que las mono/policristalinas

En la Fig II 2 se muestra una fotografía de celdas solares basadas en silicio cristalino. El monocristal es producido en lingotes cilindricos con diámetros del orden de 150 mm, mientras que el policristalino, su forma es la de un paralelepípedo rectángulo. Así mismo, se puede apreciar la diferencia entre el silicio monocristalino y el policristalino.

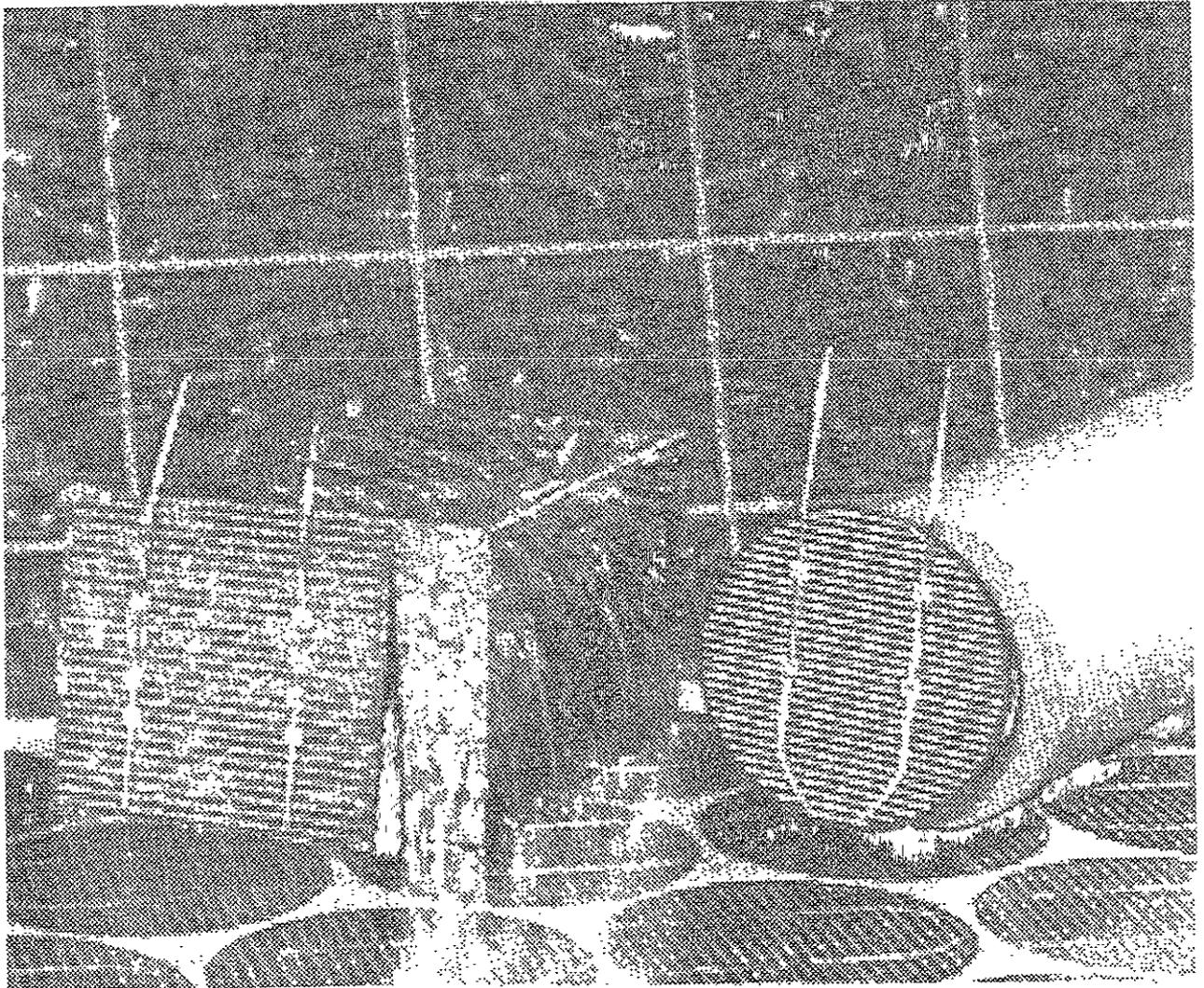


Fig II 2 Fotografía de celdas solares de silicio y el material con los cuales se fabrican.

En la Tabla II 1 se muestra cual es el estado actual de la tecnología fotovoltaica, pero la información vertida ahí no da a entender que son los únicos materiales donde se realiza tal efecto. Existe una amplia gama de materiales semiconductores que son candidatos aceptables para formar estructuras fotovoltaicas.

Tabla II.1

<i>ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA</i>		
	Diseño en homounión	Estatus
TIPO DE TECNOLOGÍA	*Silicio monocristalino (gruesa) *Silicio policristalino (gruesa) *Silicio amorfo (película delgada) Películas delgadas monocristalinas *Arsenuro de Galio (GaAs)	Disponible comercialmente  Bajo desarrollo
	Diseño en Heterounión	Estatus
TIPO DE TECNOLOGÍA	Películas delgadas policristalinas *Cobre-Indio-Diselenio *Telenuro de Cadmio	Próximamente Disponibles comercialmente
	Diseño de unión múltiple	Estatus
TIPO DE TECNOLOGÍA	a-SiC/a-Si a-Si/a-Si a-Si/a-SiGe a-Si/poli-Si a-Si/CuInSe <sub>2</sub> GaAs/GaSb	Bajo Desarrollo
CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS	Módulos Planos  Módulos con concentrador	Disponible comercialmente  Disponible comercialmente

Una celda solar es un dispositivo optoelectrónico en donde se lleva a cabo el efecto fotovoltaico. Para que se genere el efecto fotovoltaico se debe de realizar un proceso de absorción de luz. Debido a este proceso, la energía de la luz es transferida a los electrones de los átomos del material con el que esta fabricado el dispositivo.

Al ganar energía, los electrones (carga eléctrica negativa ) rompen los enlaces que los mantenían ligados a sus átomos, y pueden moverse "libremente" por el material, dejando espacios vacíos en sus lugares (vacancia o huecos) Por cada electrón que se libera, aparece un hueco. Estos huecos se comportan como partículas con carga positiva (+).

En consecuencia, debido a la absorción de la luz, aparecen por parejas, portadores de carga positivos y negativos (portadores de carga fotogenerados), que se pueden mover "libremente" dentro del dispositivo. Algunos de estos electrones se recombinan, regresando la energía generada al material, cosa que se pone de manifiesto por el aumento de la temperatura que se detecta en el dispositivo. Otros portadores fotogenerados son forzados a

separarse por medio de un campo eléctrico interno, construido para ese fin, que obliga a los electrones a acumularse en una "superficie" del dispositivo, y a los huecos, en la otra "superficie". La acumulación de cargas en la superficie del dispositivo da como resultado un voltaje eléctrico que se puede medir externamente. Este es el voltaje fotogenerado del efecto fotovoltaico. Si se establece un circuito eléctrico externo que una a las dos superficies, los electrones acumulados fluirán a través de él regresando a su "posición inicial". Este flujo de electrones forma precisamente la corriente fotogenerada o fotovoltaica. En la Fig. II.3 se tiene una representación esquemática de este fenómeno.

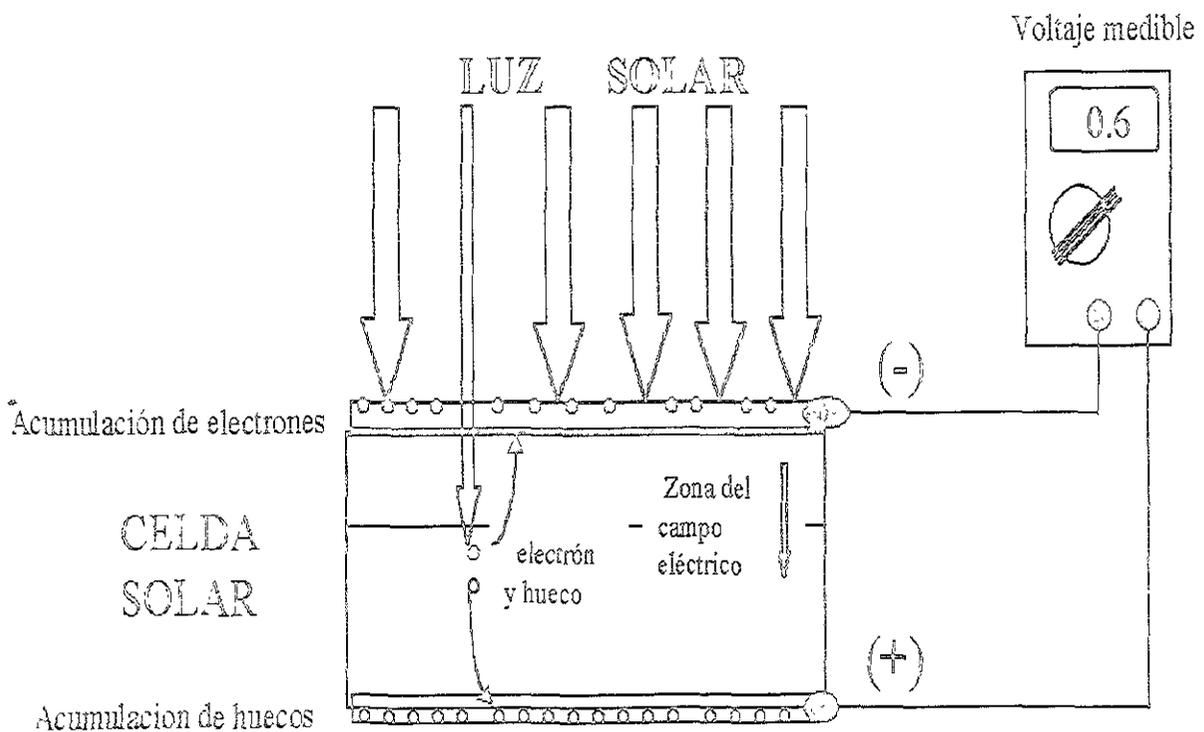


Figura II.3 Representación esquemática del efecto fotovoltaico

### II.3 Anatomía de una celda solar de silicio cristalino

Una celda solar es un dispositivo óptico (absorbe la luz solar) y eléctrico (genera electricidad tipo CD) formada por la unión entre dos capas de materiales semiconductores con diferente conductividad eléctrica. Las celdas solares comerciales se fabrican con lingotes de silicio de alta pureza, material muy abundante en la arena de la cual es

refinado. El lingote es rebanado en forma de placas delgadas llamadas obleas. El espesor típico usado es del orden de  $300\mu\text{m}$  ( $0.3\text{mm}$ ).

**Capa tipo-n y capa tipo-p.** Una fracción muy pequeña del espesor de la oblea (del orden de  $0.5\mu\text{m}$ ) es altamente impurificado con átomos de fósforo formando una capa conocida como tipo-n. El resto de la oblea es impurificado con átomos de boro formando la capa conocida como tipo-p. Estas capas forman dentro de la oblea y cerca de la superficie que recibirá la luz solar, un campo eléctrico interno (voltaje interno construido), el cual será el responsable de separar a las cargas fotogeneradas positivas (huecos) y negativas (electrones).

**Contactos metálicos superficiales y la colección de cargas eléctricas:** Sobre la cara de la oblea expuesta a la luz, se coloca un enrejado metálico muy fino (plata y/o aluminio) para coleccionar a los electrones fotogenerados y extraer la corriente eléctrica. Esta es la terminal negativa ya que en ella se encontrarán acumulados los electrones fotogenerados. Sobre este enrejado se conecta uno de los conductores del circuito exterior.

Por la cara posterior se coloca una capa metálica, usualmente de aluminio que corresponderá a la terminal positiva, ya que en esta cara estará la acumulación de cargas positivas. Sobre esta capa se conecta el otro conductor del circuito exterior. Por último, se texturiza la superficie y se recubre a la celda con una película antirreflejante para disminuir la reflexión superficial y atrapar más luz.

## II.4 Parámetros eléctricos de una celda solar

Una celda solar expuesta a la luz genera electricidad; es decir, en las terminales eléctricas externas del dispositivo aparece un voltaje que puede ser medido con un voltímetro. Si las terminales se cortocircuitan, circulará una corriente eléctrica. A continuación se define cada uno de estos parámetros eléctricos de la celda solar.

**Voltaje a circuito abierto** Es el voltaje máximo que genera una celda solar. El símbolo para este parámetro es  $V_{ca}$  y su unidad de medición es el volt. Este voltaje se mide cuando no existe un circuito externo conectado a la celda.

**Corriente a corto circuito** La corriente a corto circuito es la máxima corriente generada por la celda solar y se mide cuando se conecta un circuito exterior a la celda con resistencia nula. El símbolo correspondiente es  $I_{cc}$  y la unidad de medición es el amper.

La corriente generada por una celda solar es proporcional al área iluminada de ésta. La densidad de corriente,  $J$ , se define como la razón entre la magnitud de la corriente y el área transversal por donde pasa esa corriente. La Fig II 4 muestra la manera de medir estos parámetros

En el caso de las celdas solares de silicio cristalino que se encuentran disponibles en el mercado, se tienen los valores representados en la Tabla II 1.

Tabla II.2 Valores típicos en una celda solar de silicio cristalino [5]

$V_{ca}$ (volts)	$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
0.59	320
No se genera potencia ya que $I=0$	No se genera potencia ya que $V=0$

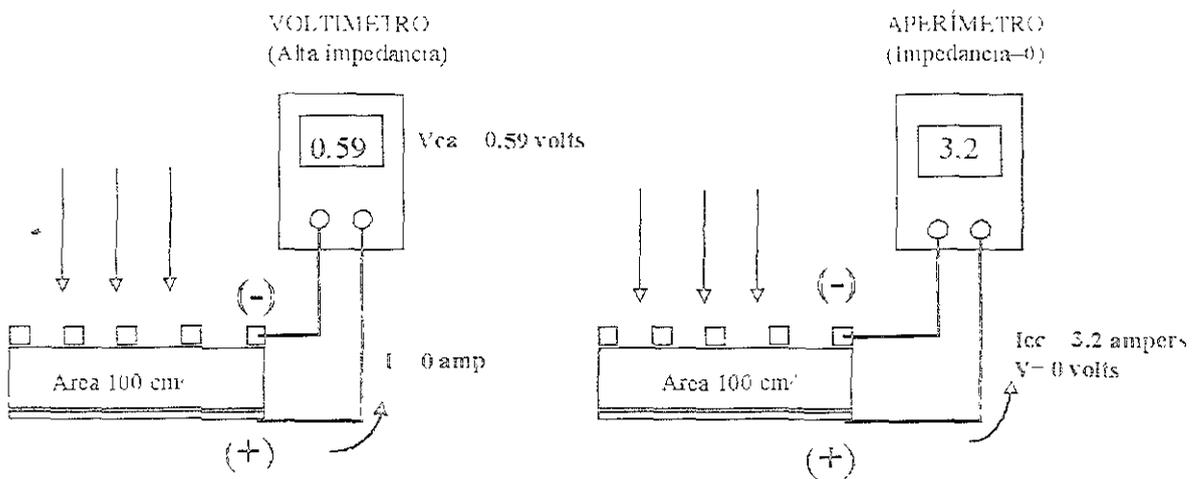


Fig II 4 Representación esquemática de la manera en que se miden los parámetros  $V_{ca}$  y  $I_{cc}$  de una celda solar

Cualquier elemento resistivo  $R$  (cualquier aparato eléctrico) conectado a la celda solar definirá un voltaje de operación  $V_{op}$  y una corriente de consumo o de operación  $I_{op}$  que dependerá del valor de  $R$ . Es claro que para cada  $R$  existirá un voltaje de operación  $V$  y una corriente de consumo  $i$ ; lo que significa parejas de valores  $(V, i)$ , cuyo producto nos proporciona la potencia de operación del elemento resistivo (aparato eléctrico). Existe un

valor de R para el cuál el producto de V con I es máximo. Este valor define el punto de la máxima generación de potencia eléctrica generada por la celda solar. Los valores del voltaje y corriente en el punto de máxima generación de potencia se acostumbra a simbolizarlos por  $V_m$ ,  $I_m$ . Estos valores no son los valores máximos si no que el producto de ellos, proporcionan, la potencia máxima de generación,  $P_m$

La eficiencia de conversión,  $\eta$ , de una celda solar se define como el cociente entre la máxima potencia generada por ésta y la potencia de iluminación que incide sobre ella, y se acostumbra en presentarla como un porcentaje. De esta manera, si  $A_e$  es el área activa de una celda solar que esta expuesta a una radiación luminosa con una potencia de iluminación  $P_i$ , entonces, la eficiencia de conversión estará dada por

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_i A_e} \times 100$$

En la Fig II.5 se muestra una representación esquemática de los diferentes valores para los puntos de operación de cargas eléctricas acopladas a una celda solar.

## DIAGRAMA PARA MEDIR $I_{OP}$ y $V_{OP}$ DE UNA CARGA

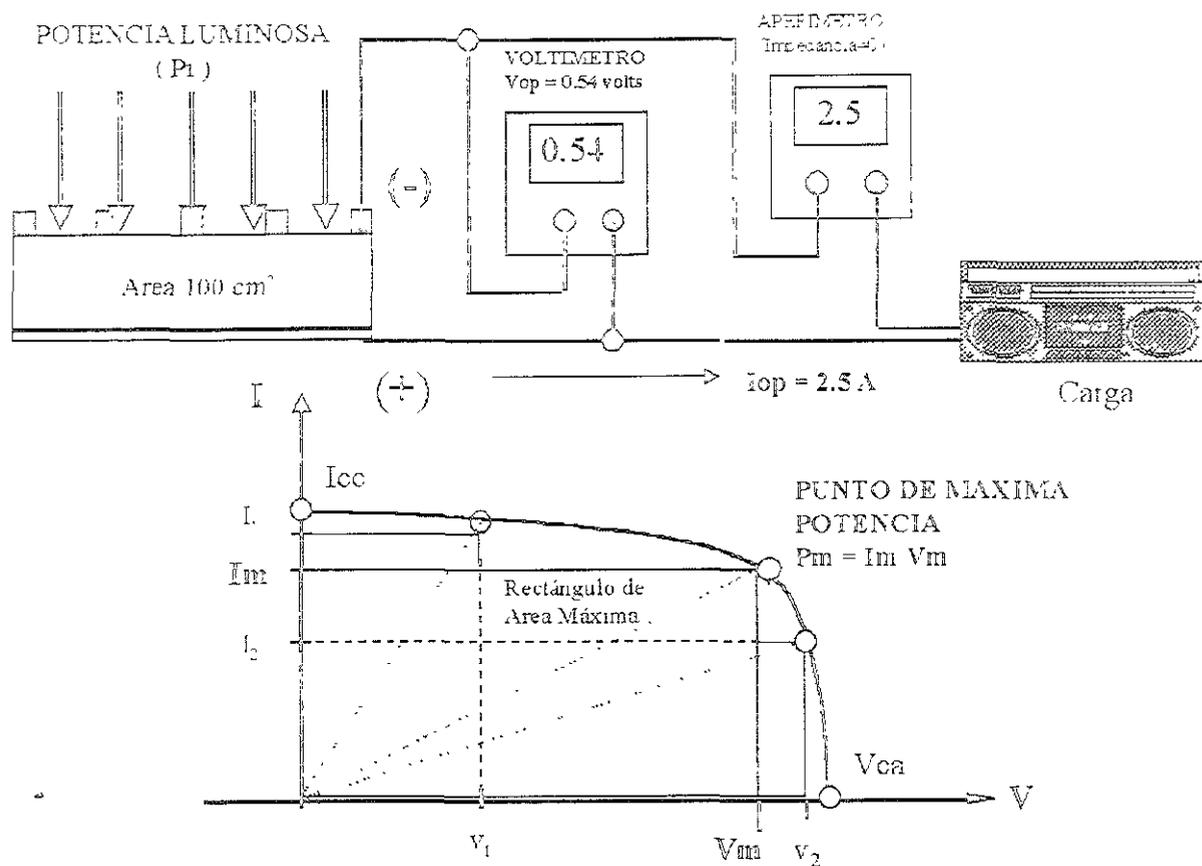


Fig II.5 Representación esquemática de una curva  $I$  vs  $V$  de una celda solar en iluminación con diferentes cargas eléctricas acopladas

En la tabla II.3 se muestran los valores típicos de una celda solar de silicio monocristalino disponibles comercialmente

Tabla II.3 Parámetros eléctricos típicos de una celda solar de silicio cristalino de  $100 \text{ cm}^2$  de área activa.[5]

Material Silicio monocristalino	Voltaje a circuito abierto $V_{ca} = 0.59$ volts
Temperatura de Celda $25^\circ\text{C}$	Corriente a corto circuito $I_{cc} = 3.2$ ampare
Intensidad luminosa 100%	Voltaje para máxima potencia $V_m = 0.49$ volts
Area de la celda $100 \text{ cm}^2$	Corriente para máxima potencia $I_m = 2.94$ ampare
	Potencia máxima $P_m = 1.44$ Watt

### El efecto de la temperatura:

Para generar energía eléctrica las celdas tienen que ser expuestas a la luz solar. Debido a esto las celdas se calientan. El aumento en la temperatura que experimentan las celdas solares cuando están en operación, se ve reflejado en sus parámetros eléctricos.

Se ha encontrado empíricamente que, por cada grado centígrado que aumente la temperatura de la celda, el voltaje se reduce, mientras que la corriente se incrementa ligeramente. Los factores son:

$V_{ca}$ : Reducción del orden de 2.1 mV por cada grado centígrado.

$I_{cc}$ : Aumento del 0.1% de su valor, a temperatura ambiente, por cada grado centígrado.

### El efecto de intensidad luminosa:

La corriente fotogenerada es directamente proporcional a la intensidad luminosa, es decir, si se tiene una intensidad luminosa del 100%, entonces, si una celda de 100 cm<sup>2</sup> de área genera una corriente a corto circuito,  $I_{cc}$ , de 3.2 amper, al 50% de intensidad luminosa, la celda generará la mitad de ese valor, o sea  $I_{cc} = 1.6$  amper.

El comportamiento casi lineal de  $I_{cc}$  con respecto a la intensidad luminosa ha permitido usar a las celdas solares como sensores adecuados para medir la intensidad de la radiación luminosa.

### La conexión entre celdas:

Una conexión en serie entre celdas se construye conectando la terminal positiva de una de ellas con la terminal negativa de la siguiente celda, y así sucesivamente. El voltaje de salida de la estructura construida está dado por la suma del voltaje de cada una de las celdas que participan en la conexión, es decir, celdas conectadas en serie incrementan el voltaje de la estructura. Por ejemplo, el voltaje de salida de 10 celdas conectadas en serie, cada una con un  $V_{ca}$  de 0.59 Volts y con el mismo valor de  $I_{cc}$ , será de 5.9 Volts (la suma de los 10  $V_{ca}$ ), sin afectar el valor de  $I_{cc}$ .

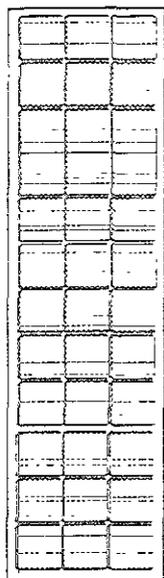
Una conexión en paralelo entre celdas se construye conectando entre sí, todas las terminales positivas de las celdas para formar la terminal positiva de la estructura, y también, todas las terminales negativas de las celdas para formar la terminal negativa de la estructura. El voltaje de la estructura será el de una sola celda, sin embargo, la corriente de salida estará dada por la suma de cada una de las corrientes de cada celda que participa en la estructura. Por ejemplo, la corriente de salida  $I_{cc}$  de 10 celdas conectadas en paralelo, cada una con

un  $V_{ca}$  de 0.59 Volts y una  $I_{cc}$  de 3.2 amper, será de 3.2 amper (la suma de las  $I_{cc}$ ) manteniendo el mismo voltaje  $V_{ca}$ .

## II.5 El Módulos fotovoltaicos y sus parámetros eléctricos

Comercialmente, las celdas solares se conectan en serie, se agrupan, se enlaminan y empaquetan entre hojas de plástico y vidrio, formando una unidad llamada módulo solar o módulo fotovoltaico. Este módulo tiene un marco, usualmente de aluminio, que le da rigidez y facilidad en el manejo y transportación. Además en él se encuentran las cajas de conexiones eléctricas para conectar el cableado exterior. El número de celdas que contienen los módulos depende de la aplicación de éste. Es costumbre configurar el número de celdas conectadas en serie para tener módulos que sirvan para cargar acumuladores (baterías) de 12 Volts nominales. Se pueden encontrar comercialmente módulos de 30, 33, y 36 celdas conectadas en serie. Estos módulos proporcionan un voltaje de salida que sirve para cargar baterías de 12 Volts, incluyendo las pérdidas de voltaje en los circuitos eléctricos así como en los sistemas de control y manejo de energía. En la Fig. II.6 se muestra un esquema de un módulo fotovoltaico así como los valores típicos de corriente y voltaje de operación.

## CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO



### CARACTERÍSTICAS MÓDULO SIEMENS SM55

Potencia luminosa: 100%  
AM1  
Temperatura módulo: 25°C

$V_{ca} = 21.7 \text{ V}$   
 $I_{cc} = 3.45 \text{ A}$

$V_m = 17.4 \text{ V}$   
 $I_m = 3.15 \text{ A}$

Largo: 129.3 cm  
Ancho: 52.9 cm  
Espesor: 3.4 cm

No. Celdas: 36

Peso 5.5 kg

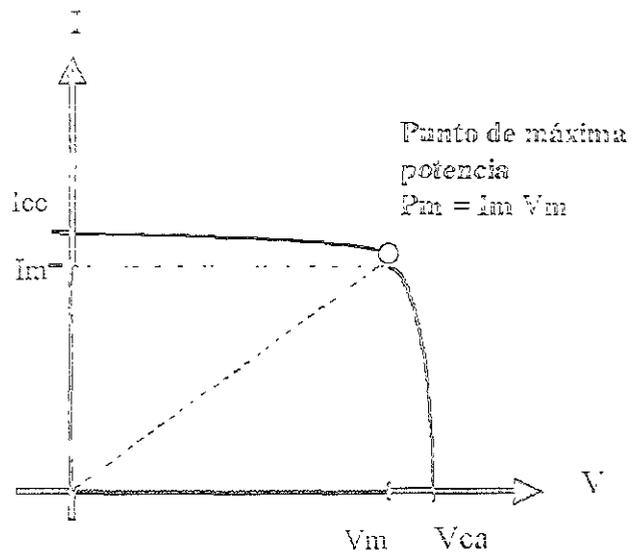


Fig 11.6 Características físicas y eléctricas de un módulo solar de silicio monocristalino

Los parámetros eléctrico de un módulo fotovoltaico:

La curva corriente-voltaje de un módulo, provista por el fabricante, muestra todas las características de generación de electricidad. Los parámetros eléctrico importantes son:

**Voltaje a circuito abierto ( $V_{ca}$ ):** Es el voltaje medido en las terminales positivas (+) y negativas (-) del módulo cuando no existe un circuito externo conectado a las terminales. Bajo esa condición, no hay circulación de corriente y la potencia de generación es cero ( $i=0$ , entonces  $P = 0 \text{ W}$ ).

**Corriente a corto circuito ( $I_{cc}$ ):** Es la corriente que circula cuando se unen las terminales (+) y negativa (-) con un conductor de resistencia nula. En esta condición, el voltaje de salida es cero y en consecuencia, la potencia de generación es cero (ya que  $V=0$ , entonces  $P = 0 \text{ W}$ ).

**Corriente y voltaje en el punto de operación ( $I_{op}$ ,  $V_{op}$ ):** Teniendo conectado un aparato eléctrico (una carga) a las terminales (+) y (-) del módulo, entonces ella determinará el

voltaje de trabajo u operación ( $V_{op}$ ) y su corriente de consumo ( $I_{op}$ ). Estos valores definen la potencia extraída o de operación de la carga ( $P_{op}$ ), dada por el producto  $I_{op}$  con  $V_{op}$ .

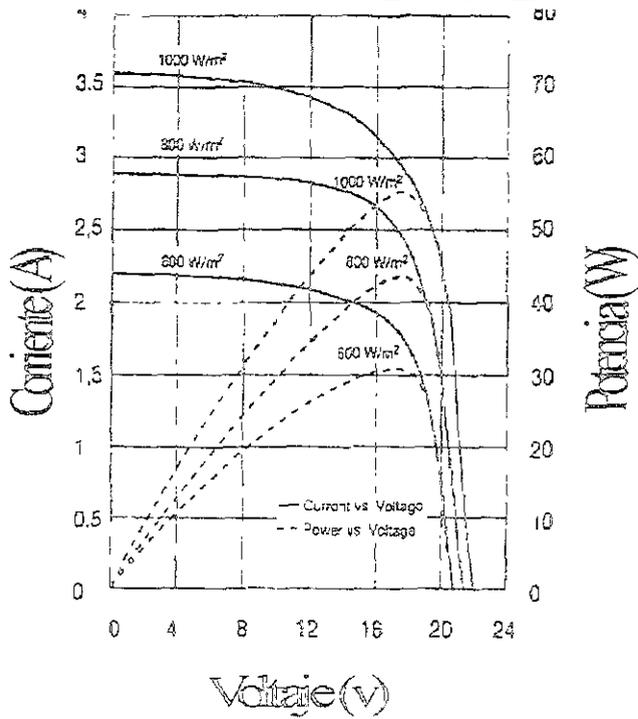
Corriente y voltaje para máxima generación de potencia ( $I_m, V_m$ ): Ya que diferentes cargas conectadas a un módulo definirán diferentes puntos de operación, existe un valor de  $V$  y un valor de  $I$  para los cuales su producto es máximo. A estos valores se les acostumbra a simbolizar por  $I_m, V_m$ . El producto de  $I_m$  con  $V_m$  proporciona la potencia máxima que se puede extraer del módulo.

#### Características eléctricas de un módulo fotovoltaico:

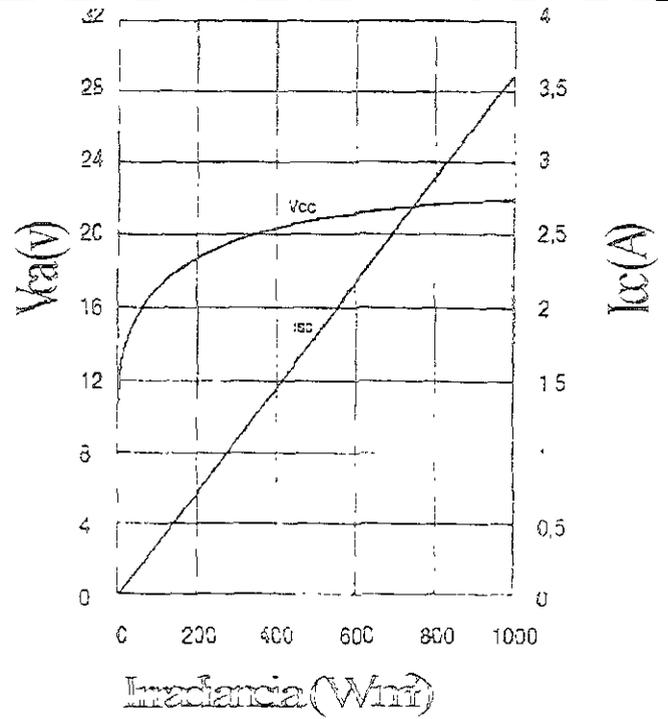
El comportamiento eléctrico de los módulos FV, independientemente de su tipo, se puede expresar a través de curvas de corriente contra voltaje -(curva  $I$  vs  $V$ )-, o potencia contra voltaje -(curva  $P$  vs  $V$ - (ver Fig. II.5 y II.6). Nótese que estas curvas de corriente y potencia contra voltaje están dadas a una irradiancia de  $1 \text{ kWatt/m}^2$  y una temperatura ambiental de  $25^\circ\text{C}$ , que se conoce como condiciones estándar de prueba. Bajo estas condiciones cada módulo tiene asignada una potencia nominal o potencia máxima ( $P_{mp}$ ) que corresponde a la potencia máxima que se puede obtener.

### II.6 Efecto de la intensidad luminosa y de la temperatura

La corriente generada por un módulo depende de la intensidad luminosa. Su comportamiento es idéntico al de una celda solar, es decir, la corriente fotogenerada es directamente proporcional a la intensidad luminosa. La Fig. II.7 muestra un diagrama típico corriente-voltaje para un módulo de silicio cristalino.



(a)



(b)

Fig II.7 Características corriente-voltaje para un módulo de silicio cristalino. En (a) se observa el efecto de la intensidad luminosa en las características eléctricas I vs V; en (b) se pone de manifiesto que la corriente a corto circuito tiene un comportamiento lineal con la intensidad luminosa

La misma figura muestra el comportamiento de la corriente a corto circuito y del voltaje a circuito abierto en función de la intensidad luminosa, para el mismo módulo. En ella se observa el comportamiento de línea recta de  $I_{cc}$ .

La temperatura de las celdas en un módulo fotovoltaico, o más bien dicho, la temperatura de un módulo expuesto al Sol, es del orden de 20°C a 25°C más alta que la temperatura ambiente. Este aumento en la temperatura afecta las características eléctricas del módulo, tal y como ha sido expuesto anteriormente para una celda solar. Existe una relación empírica que proporciona la temperatura del módulo,  $T_m$ , en función de la temperatura ambiente,  $T_a$ . Relación empírica:  $T_m = 20.4 + 1.2 T_a$

Ejemplo: Si  $T_a = 30^\circ\text{C}$ , entonces la temperatura del módulo será:  $T_m = 56.4^\circ\text{C}$

El voltaje generado por el módulo disminuye con los aumentos de temperatura, y en consecuencia, la potencia generada también disminuye. La Fig II.8 muestra los valores normalizados para  $I_{cc}$ ,  $V_{ca}$ ,  $P_m$ , en función de la temperatura del módulo. En ella podemos observar que, si el módulo alcanza una temperatura de 75°C, el  $V_{ca}$  se reducirá por un factor del orden del 18%, de su valor a una  $T_a = 25^\circ\text{C}$ !!!

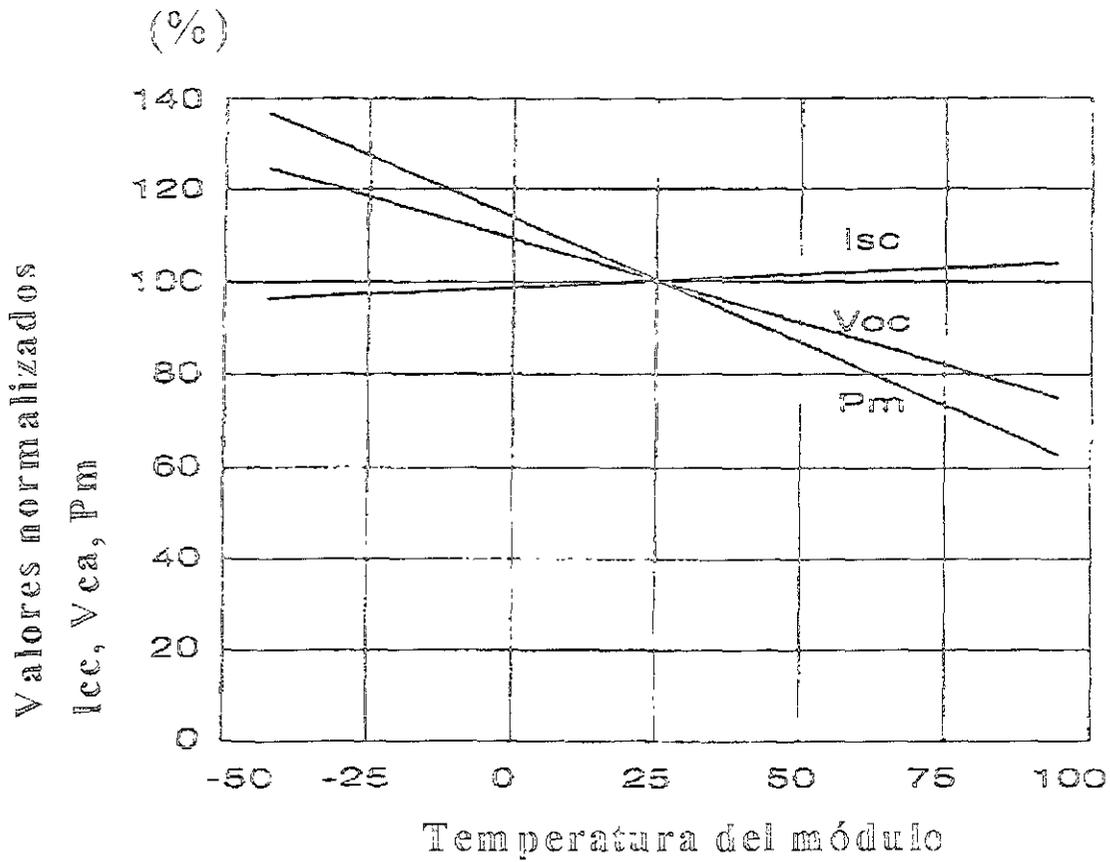


Fig II 8 Efecto de la temperatura sobre las características eléctricas de un módulo fotovoltaico

## 11.7 El arreglo fotovoltaico

Un arreglo fotovoltaico es un conjunto de módulos FV conectados eléctricamente en serie y en paralelo. Las características del arreglo son análogas a las de los módulos individuales, con la corriente y voltaje modificado de acuerdo con el número de módulos conectados en serie o paralelo.

### Conexión en serie

Incrementando el voltaje. Los módulos solares se conectan en serie para obtener voltajes de salida grandes. El voltaje de salida,  $V_s$ , de módulos conectados en serie está dado por la suma de los voltajes generados por cada módulo

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + \text{Módulos en serie.}$$

Al conjunto de módulos conectados en serie se le denomina panel solar o fotovoltaico. La corriente de un panel solar es la misma que la de un módulo ya que, al estar conectados en serie, la corriente que sale de un módulo pasa necesariamente por los demás. Lo usual es

tener módulos para cargar baterías de 12 volts. Al ponerlos en serie, se tendrán voltajes para cargar baterías de 24,36,48 volts, etc

Si por un momento Hacemos una analogía entre el sistema eléctrico y un sistema hidráulico donde la presión corresponde al voltaje, y la corriente corresponde al flujo, el efecto de las conexiones en serie y paralelo en el arreglo fotovoltaico se pueden entender más fácilmente

### **Conexión en paralelo**

Los módulos solares o paneles se conectan en paralelo para obtener corrientes generadas más grandes. El voltaje del conjunto es el mismo que el de un módulo (o panel), pero la corriente de salida, es  $I_s$ , la suma de cada unidad conectada en paralelo.

$$I_s = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \dots \dots \text{Módulos o paneles en paralelo}$$

### **Diodos de protección**

Con el objeto de garantizar un funcionamiento óptimo en el arreglo fotovoltaico y proporcionar una instalación segura, es necesario el usar dispositivos eléctricos tales como diodos, interruptores o desconectores, fusibles. Los diodos o elementos rectificadores pueden colocarse en diferentes sitios en un arreglo fotovoltaico. Dependiendo del sitio en donde se instalen estos se clasifican en diodos de paso y diodos de bloqueo.

Un diodo de bloqueo evita la descarga de las baterías hacia los módulos durante las noches. En el caso de conexión directa módulos-carga, se recomienda que la carga tenga un voltaje de operación a la  $T_m$ , que sea múltiplo de voltajes para máxima generación de potencia.

Un diodo de paso proporcionan un "camino de alivio" para evitar que circule corriente por un panel o un módulo sombreado (sombra de nubes o de objetos). Un módulo sombreado no genera energía, por lo cual, si pertenece a una estructura, los demás lo verán como un punto de baja resistencia, en consecuencia, fluirá corriente hacia él convirtiéndose en "un punto caliente" del arreglo. Aumentará su temperatura y se descargará.

La Fig. 11.8 muestra un esquema típico de un arreglo fotovoltaico así como las posiciones de los diodos de paso y de bloqueo.

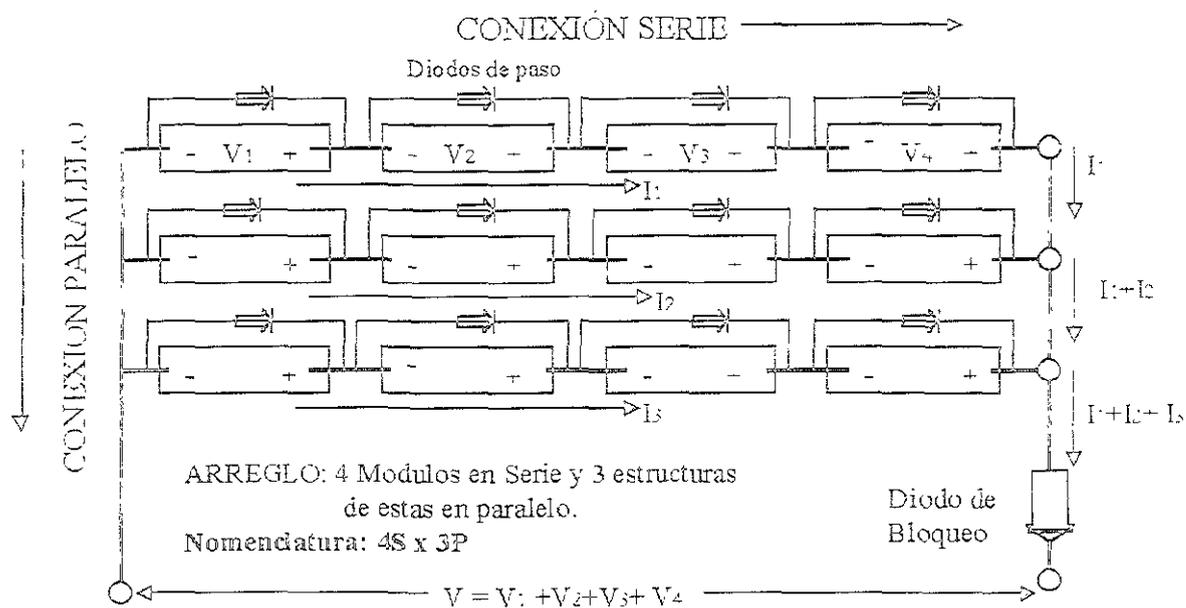


Fig.II 9 Diagrama esquemático de conexión entre módulos para formar un arreglo FV

## II.8 Energía generada por un arreglo fotovoltaico

Para estimar la energía útil que se pueda obtener de un arreglo fotovoltaico (en kWatt-h/día) de cierta potencia nominal, es necesario multiplicar la potencia nominal del arreglo (en kW) por la insolación (en kW-h/día). Hay que tomar en consideración que la energía FV generada varía de acuerdo a los cambios en los niveles de insolación y temperatura del módulo. Por ejemplo, un módulo de 50 W-p nominales, expuesto al Sol, proporciona una potencia efectiva de 40 Watt (80% de la potencia nominal a una temperatura de módulo de 60°C, según gráfica de la Fig.7 ). En un lugar con una insolación diaria promedio de 6 horas-pico, el módulo generará una energía de 240 W-h al día, energía suficiente para encender, durante 12 horas aproximadamente, una lámpara fluorescente de 20 W con balasto electrónico con 100% de eficiencia

### Inclinación del captador

Los paneles fotovoltaicos deberán ser inclinados de tal manera que generen la más energía. La máxima energía se obtiene cuando los rayos solares llegan perpendicularmente a la superficie del captador

En el caso de arreglos fotovoltaicos la perpendicularidad entre la superficie de los módulos y los rayos solares sólo se conseguirá si las estructuras de montaje del arreglo se mueven siguiendo al Sol, por lo cual, se requerirán de seguidores solares con dos movimientos

### **Arreglos fotovoltaicos fijos.**

En el caso de que no se tenga un seguidor solar, el arreglo se montará en una estructura fija. Un arreglo fijo es aquél que no se mueve. Presenta la ventaja de ser simple y de fácil montaje. Ya que el ángulo de elevación del Sol cambia durante el año, se deberá de tener un criterio de selección para determinar el ángulo óptimo del arreglo que garantice la máxima producción de energía eléctrica.

Durante su trayectoria anual, el Sol se declina en promedio hacia el Sur, por lo cual se sugiere que los arreglos fijos se coloquen inclinados (respecto de la horizontal) viendo hacia el Sur. Este criterio favorece la captación de Energía Solar en Invierno a costa de desfavorecer la captación en Verano. Por lo cual, se tiene el compromiso entre mejorar la captación en una época desfavoreciéndola en otra. La experiencia ha proporcionado reglas de mano que permiten optimizar la captación de energía solar y por consecuencia, la generación de electricidad mediante los arreglos FV. Estas son:

- 1) La inclinación del arreglo se selecciona para aumentar la captación del mes menos insolado y disminuir la del mes con mayor insolación.
- 2) Si se desea generar la máxima energía al año, la inclinación del arreglo deberá de ser igual al valor de la latitud del lugar.

En la Fig. II 10 se muestra la insolación relativa recibida en un captador con diferentes inclinaciones. Si el captador es un arreglo fotovoltaico, la energía generada por éste durante el año, depende de su inclinación (ver Tabla I 1)

Para el caso de abrevaderos de ganado, se recomienda fijar al arreglo FV a un ángulo que garantice la perpendicularidad de los rayos solares durante la temporada de estiaje o de sequía

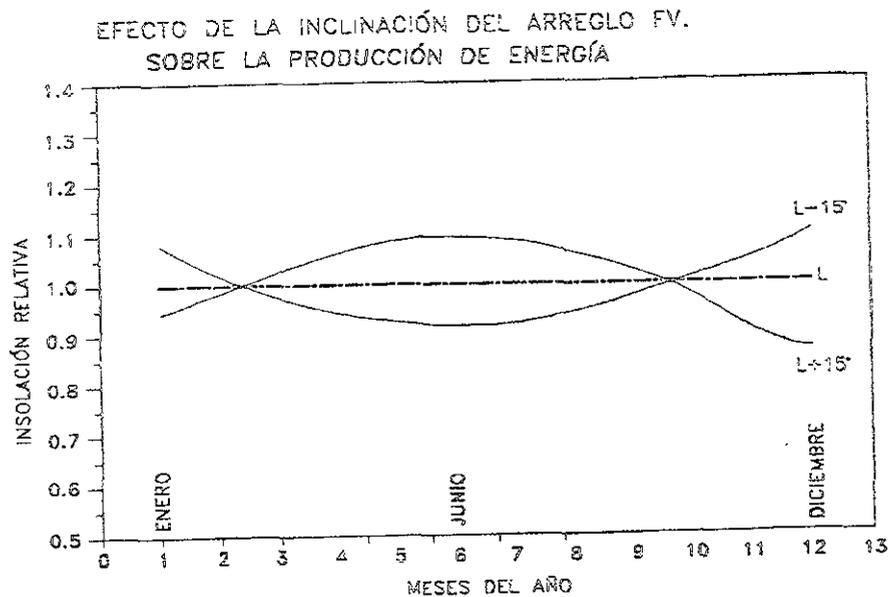


Fig II 10 Variación anual de la insolación como función de la inclinación del captador

#### Arreglo fotovoltaico con seguimiento.

a) **Ángulo polar variable.** Esta estructura se recomienda para aumentar la captación de radiación directa. El captador sigue el recorrido del Sol diariamente girando de Este a Oeste sobre el eje de giro Norte-Sur. Presenta algo de simplicidad y su ganancia relativa puede ser hasta del 40% más de energía por día comparada con un captador fijo.

Desventajas: Alto costo y el bajo rendimiento cuando los días están nublados

b) **Ángulo polar y azimutal variable.** Los captadores se mueven en dos ejes de tal manera que obligan al captador a presentar su superficie siempre perpendicular a los rayos solares, en cualquier hora del día y cualquier época del año. La ganancia de captación es grande del orden del 60% más que un captador fijo. Desventajas: Alto costo y mayor complejidad del sistema. Mantenimiento frecuente. Bajo rendimiento en días nublados.

## Capítulo III: Sistemas de bombeo fotovoltaico (SBFV)

### Introducción

La extracción de agua para su uso en granjas, ranchos, etc (irrigación en pequeñas parcelas, huertos familiares, abrevaderos para ganado, consumo humano) en las zonas alejadas de la red eléctrica convencional, ha presentado un problema fundamental para el desarrollo de zonas agrícolas en el país. La manera tradicional en la que se ha estado resolviendo el problema es la extracción de agua mediante el uso de molinos de viento con bombas tipo guimbaleta, siempre y cuando el recurso eólico sea aceptable, o bien, mediante el uso de motores a gasolina o diesel con costos de operación y mantenimiento muy altos.

Una alternativa que puede ser competitivamente económica y con un buen rendimiento, se basa en la tecnología fotovoltaica para generar electricidad a través del Sol y suministrarla a las bombas eléctricas que se usan comúnmente para extracción de agua. La energía fotovoltaica es la energía eléctrica proveniente del Sol que ha sido convertido por medio de un módulo fotovoltaico (un tablero de cristales de silicio o celdas solares). El término módulo implica que éstos pueden conectarse en cantidades que satisfagan los requerimientos de energía de una bomba, implicando con ello un sistema energéticamente eficiente. La energía generada es directamente proporcional al número de módulos, depende del recurso solar y del número de módulos del sistema.

El objetivo del diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico es proporcionar la configuración de módulos para un acoplamiento eficiente entre ellos y una bomba de agua. Este tipo de proyecto se ha desarrollado principalmente en las áreas donde el recurso de agua es limitado, o bien, en zonas productoras que cuentan con alguna fuente de suministro hidráulico, pero su distribución es deficiente, como es el caso de los estados de Sonora, Chihuahua y Baja California Sur, pero que no se cuenta con energía eléctrica en el sitio. Las ventajas de utilizar los Sistemas de Bombeo Fotovoltaico son: bajo mantenimiento, fácil instalación, alta rentabilidad, no contaminan y la capacidad de adaptarse a las demandas y cargas de agua requerida en el sistema.

En este capítulo se realiza una descripción de los conceptos relacionados con la tecnología fotovoltaica (FV), el tipo de bombas usadas comúnmente para extracción de agua y un criterio simple de dimensionamiento para un sistema de bombeo fotovoltaico.

Un sistema de bombeo fotovoltaico puede estar integrado por las siguientes componentes una fuente de agua, un arreglo fotovoltaico, un sistema electrónico de control, un sistema de conducción hidráulica y de almacenamiento, y un sistema de bombeo (motor y bomba). La elección de cada uno de estos componentes depende directamente de las necesidades de agua por día demandadas. La Fig. 1.6 muestra un diagrama esquemático de un SBFV.

En forma general, un SBFV se especifica por: Gasto o flujo diario de agua, fuente de agua, el tipo de bomba (Tabla 1.2, Cap. 1), la potencia de la bomba, la energía requerida para la bomba, el tipo de acoplamiento bomba-arreglo FV, tipo de estructura para el arreglo FV, y la electrónica asociada.

### III.1 Gasto Diario

El gasto diario a extraer es igual a volumen de agua requerido. Este depende de la demanda diaria, la cual, está determinada por su aplicación. Si la aplicación es para abrevaderos, consumo humano o irrigación, se deberá de tomar en cuenta el tipo de animal y la cantidad de estos, el número de personas; el tipo de cultivo y área de irrigación, así el consumo de agua para un cultivo o huerto familiar, la demanda máxima será igual a 0.8 del tanque de evaporación estándar. La Tabla III.1 muestra los consumos de agua típicos tanto para diferentes animales como consumo humano.

### III.2 Fuente de agua

Los ríos, presas, pozos, norias, aljibes pueden ser considerados como fuentes de abastecimiento de agua.

En muchos casos, la fuente de agua disponible no abastece los requerimientos de agua, por lo que una de las razones para determinar la demanda diaria de agua es el establecer si la fuente de agua proporciona los requerimientos diarios establecidos. Al proceso de registro de producción de agua de una fuente se le llama aforo. De esta manera, si se tiene una demanda de 5000 litros por día y la fuente es un pozo artesanal, es necesario llevar a cabo un proceso de aforo con el objeto de conocer la producción de agua del pozo.

Tabla III.1. Consumos de agua típicos para diferentes especies [ 6 ]

Animales	
Caballos, reses y vacas de engorda	50 lts/día
Vaca lechera	120 lts/día
Cerdo	15 lts/día
Ovejas	7 lts/día
Pollos (100)	15 lts/día
Consumo humano por persona	
Bebida y aseo personal	50-75 lts/día
Baños y regaderas	100 lts/día
Riego: Se recomienda sólo para pequeñas extensiones	
Arbol frutal tropical (riego directo al árbol)	20-50 lts/día
Hortalizas (típico)	50 lts/día/tarea

### III.3 Motor

En teoría se puede adquirir una bomba y motor comercial común y corriente e instalarse en un sistema fotovoltaico. Después de todo, la energía proveniente del arreglo fotovoltaico es solamente electricidad. Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos pueden hacerse más eficientes con el uso de motores y bombas especialmente diseñadas. Este subsistema trabaja un poco diferente a los motores convencionales ya que la energía proveniente del sol cambia constantemente durante el día. Los motores convencionales están diseñados para trabajar eficientemente bajo condiciones relativamente constantes de corriente y voltaje. Si una de estas características cambia entonces su eficiencia se reduce drásticamente. En los sistemas activados por el sol la eficiencia debe mantenerse constante aun cuando las condiciones de corriente y voltaje cambien durante el día. Aunque estos motores especiales puedan costar más que los convencionales, su precio se compensa con los ahorros en los módulos fotovoltaicos necesarios para su operación.

El rendimiento de un motor se mide de acuerdo a su eficiencia energética, es decir, la proporción de energía hidráulica producida con energía eléctrica. Aunque esta es una medición instantánea, en la práctica conviene más expresarla como eficiencia diaria obtenida de la eficiencia promedio durante el día de operación.

Todos los motores requieren de cierta cantidad mínima de potencia para arrancar y empezar a operar. Las bombas tienen diferentes parámetros de arranque dependiendo del tipo de operación. Este umbral de arranque y paro es importante ya que nos indica que proporción de la energía del Sol se está utilizando para bombear agua. Por ejemplo, una bomba de desplazamiento positivo puede requerir de un mínimo de  $400 \text{ W/m}^2$  de irradiancia. En días nublados es posible que este nivel no se alcance.

En el mercado hay tres tipos de motores comunes con usos en sistemas fotovoltaicos, cada uno tiene sus ventajas y desventajas, las cuales mostramos en la Tabla No. III.2. Los tres tipos de motores son: motores con escobilla de corriente continua de imán permanente, motores sin escobilla de corriente continua de imán permanente, y los motores de corriente alterna.

Tabla III.2 Ventajas y desventajas de diferentes motores usados en sistemas de bombeo fotovoltaico [ 6]

Tipo de motor	Ventajas	Desventajas
C C con escobillas	Es sencillo y eficiente en aplicaciones pequeñas. No necesita circuitos complejos de control	Las escobillas deben reemplazarse con cierta frecuencia. Muy inconveniente en bombas sumergibles
C C sin escobillas	Eficiente No requieren mantenimiento	Requieren de un complejo y caro conmutador electrónico Riesgos de descompostura
Corriente alterna	Gran variedad de motores para todo tipo de cargas Menor precio que los de C C	Menos eficientes que los de C C Requieren una inversor incrementando el presión y el riesgo de descompostura

## III.4 Control de la energía

La gran mayoría de los sistemas solares requieren el uso de un controlador electrónico para mejorar el acoplamiento entre la bomba y el arreglo fotovoltaico. Los controladores permiten el suministro de máxima corriente para el arranque del motor y mantienen el arreglo funcionando cerca de su punto de máxima potencia. Algunos controladores también incorporan funciones como encendido y apagado de la bomba, rastreo de punto de potencia máxima, protección contra daños a la bomba por operación en seco o con la descarga obstruida, y prevención de bombeo más allá de la capacidad de almacenamiento de agua. Las últimas dos funciones se implementan con electroneveles instalados en el pozo o en el tanque de almacenamiento.

Los controles pueden ser de diversos tipos:

- Inversores que convierten la corriente alterna en corriente continua
- Dispositivos que aproximan las impedancias del arreglo y el motor de la bomba
- Interruptores, protectores y arrancadores
- Baterías o banco de baterías

### i) Inversores

Los inversores tienen eficiencia bastante altas que pueden llegar hasta 97% aunque también tienden a ser relativamente costosos, y por tanto en sistemas muy pequeños tal vez no se compense el precio más bajo de un motor de corriente alterna. Por otra parte, los inversores han demostrado que pueden fallar.

En la actualidad algunos fabricantes de bombas incorporan sus propios inversores especialmente optimados para sus bombas. Estos inversores ya han sido mejorados y se han corregido los problemas iniciales.

### ii) Dispositivos que aproximan las impedancias

Estos dispositivos mantienen similares las características eléctricas del arreglo y la bomba para que ambos trabajen a su máxima capacidad y eficiencia en un rango de condiciones que puede variar durante el día. Por ejemplo, permiten que el motor arranque cuando se ha detenido por alguna razón como una nube pasajera que causa una baja irradiancia. Esto especialmente es importante en bombas que requieren un alto par de arranque como las bombas de desplazamiento positivo que tiene que iniciar su operación con toda la carga empleada.

Por otra parte, estos dispositivos incluyen un rastreador de máxima potencia en forma de un microprocesador. La potencia se monitorea con muestras muy frecuentes (20 a 50 milisegundos) y hace comparaciones con la muestra anterior, de esta manera si la potencia se incrementa o disminuye, el voltaje se mueve en la misma dirección para mantenerlo siempre operando al punto de máxima potencia. El precio de este rastreo se paga en consumo de energía ya que estos dispositivos utilizan entre 4 y 7% de la energía del arreglo para operar.

Existen alternativas más baratas aunque no siempre son recomendables. Una de estas alternativas es el uso de un controlador que mantiene constante el voltaje del arreglo. Por lo general se debe hacer manualmente el ajuste de este voltaje para que sea aproximado al voltaje de máxima potencia del arreglo. El voltaje del arreglo casi no cambia durante el día, aunque sí cambia la corriente producida. Esto causa que a veces la bomba no pueda arrancar después que una nube ha interrumpido momentáneamente la irradiancia.

### iii) Interruptores, Protectores y Arrancadores

Estos dispositivos protegen los componentes del sistema contra sobrecorrientes o conexiones incorrectas accidentales. Todos estos componentes deben ser listados con UL, NÓM, u otra norma conocida. Es importante que los sistemas cumplan con los requerimientos del código nacional eléctrica.

Si una bomba trabaja en seco es posible que la bomba se DESBOQUE y pueda sobrecalentarse y dañarse severamente. En los lugares donde es posible que el nivel del agua baje drásticamente es necesario instalar detectores de nivel u otros dispositivos de protección.

## III.5 Tipos de acoplamiento

Desde un punto de vista eléctrico, la bomba y el arreglo FV pueden estar acoplados de diferentes maneras, las que se muestran en la Fig III.1. Cada una de ellas tiene un fin específico presentando ventajas y desventajas respecto de las otras. Dentro de éstas, el más simple y sencillo es el de acoplamiento directo: no existen dispositivos electrónicos entre el arreglo FV y la bomba, ni tampoco sistemas de almacenamiento, por lo cual, si hay Sol, hay bombeo de agua.

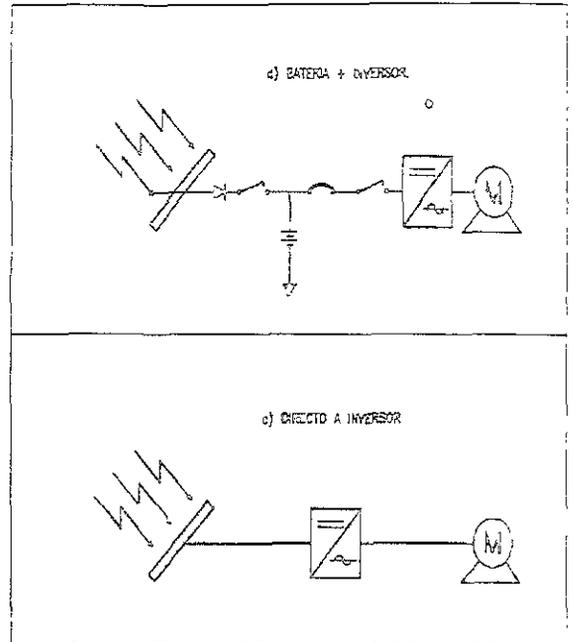
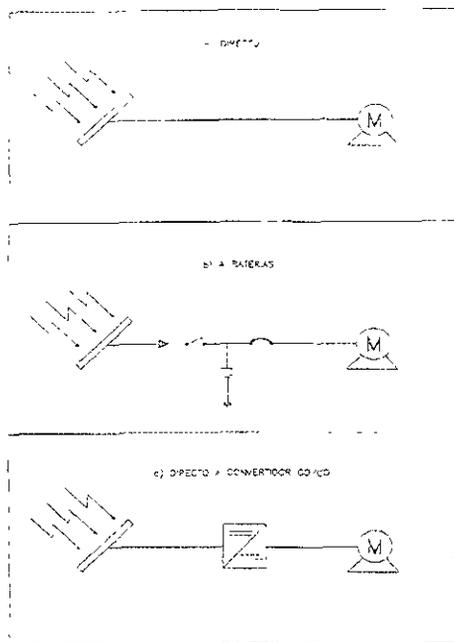


Fig III 1 Diagramas esquemáticos de los diferentes acoplamientos en los sistemas de bombeo fotovoltaia

Por otra parte, si se quiere maximizar el tiempo de bombeo durante el día, es necesario usar un acoplador electrónico de impedancias o convertidor CD/CD que permita que el módulo siempre entregue a la bomba su máxima potencia. De esta manera es posible tener bombeo al comienzo y atardecer del día, y también, en los días nublados.

Cuando la bomba seleccionada tiene un motor de corriente alterna, entonces es necesario el uso de un inversor CD/CA.

### III.6 Dimensionamiento preliminar

El objetivo de tener un dimensionamiento preliminar en cualquier sistema de bombeo es el de establecer, con mucha claridad, las características y parámetros del sistema y, el estimar de una manera aproximada su tamaño. No se pretende el tener una fórmula universal o absoluta que se aplique a todos los sistemas de bombeo fotovoltaico por la sencilla razón de que no se tiene igualdad de parámetros. Cada uno de ellos debe ser tratado de una manera independiente, pero la metodología que se expondrá a continuación, puede ser aplicable a todos los casos.

El tamaño de un sistema de bombeo fotovoltaico depende de la selección de la bomba, controlador y módulos fotovoltaicos; teniéndose en el mercado, para cada componente, diferentes alternativas de selección. Por lo general, cuando se está dimensionando cualquier sistema, la elección del tipo de marca o producto para cada componente, depende de la información que el diseñador tenga con respecto a estos productos. Por otra parte, es importante el saber que comercialmente, hay programas computarizados que se distribuyen de manera ilimitada para el cálculo de sistemas de bombeo, pero desafortunadamente, están hechos para optimizar una línea de marcas exclusivas. Por consecuencia, se recomienda hacer varios diseños alternativos y elegir, en base a factores de economía, mantenimiento y confiabilidad del producto, el que ofrezca mejores bondades.

Los siguientes 8 pasos proporcionan la metodología para el diseño de un sistema fotovoltaico.

### III.6.1 Cálculo de carga dinámica total

El término carga aparece en cualquier diseño de bombeo de agua y es muy importante entender su significado claramente. Podemos considerar que la carga tiene dos partes: La carga estática y la carga dinámica. La carga estática puede medirse fácilmente y consiste en la distancia vertical que el agua viaja. La carga dinámica consiste en incremento de presión debido a la fricción y obstáculos en las tuberías. Esta carga dinámica puede expresarse en su equivalente en el incremento de la presión causada por una columna de agua vertical medida en metros. La fricción depende del diámetro, la distancia y material de las tuberías. Las tuberías estrechas producen una mayor fricción que las amplias. La suma de estas dos cargas nos da la carga dinámica total y es un parámetro muy importante para un buen diseño de un sistema de bombeo. El resultado inmediato es que resulta más caro bombear agua con mayores cargas.

Si se encuentra en el campo y no tiene a la mano estas tablas o fórmulas, se puede utilizar los valores por omisión dado que el porcentaje de 3 a 5. Es decir, utilice un valor de 3 o 5 por ciento de la distancia de la tubería. Por ejemplo, para agregar un 5% de distancia multiplique 0.05 el recorrido total de la tubería instalada para obtener el agregado total.

El cálculo de la fricción puede hacerse de manera muy sencilla utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach [7].

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

hf = pérdida por fricción, en m

f = Coeficiente de fricción. sin dimensiones ( del diagrama de Moody)

ε = tamaño de la rugosidad en mm.

g = aceleración de la gravedad m/s<sup>2</sup>

D = diámetro, en mm

V = velocidad media, en m/s

L = longitud de la tubería, en m

ε / D = Rugosidad relativa, mm

R = Número de Reynolds =  $\frac{V D}{\nu}$

ν = Viscosidad cinemática m<sup>2</sup>/s ( para el agua a 15<sup>0</sup>C , ν = 1 145\*10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s)

### III.6.2 Cálculo de la potencia hidráulica

La potencia hidráulica es un valor necesario para conocer la potencia eléctrica requerida de un sistema fotovoltaico. Esta potencia hidráulica es un valor teórico obtenido sin considerar otros factores como pérdidas de eficiencia debido a resistencias, fricciones y demás limitantes de un sistema de bombeo. Se obtiene del producto directo del flujo de agua, la carga dinámica total, la densidad del agua y la constante gravitacional. Si se utiliza el sistema métrico, la unidad obtenida es el watt. De manera que, la potencia hidráulica se calcula con la fórmula y unidades:

$$PH = Q \cdot CDT \cdot \rho \cdot g$$

Donde,

PH = Potencia hidráulica, en watt

Q = gasto o flujo en litros /s

CDT = carga dinámica total en m

ρ = densidad del agua en kilogramos / litro

g = aceleración de la gravedad en m / s<sup>2</sup>

El producto ρ g puede simplificarse a 9 81 kg / m<sup>3</sup> s<sup>2</sup> ya que la densidad del agua es kg / l

### III.6.3 Selección de la bomba y determinación de su eficiencia

Si se cuenta con un catálogo de bombas o se posee información de la bomba que se desea utilizar, es muy probable que se obtenga el valor de la eficiencia de la bomba directamente del fabricante. Este paso es muy importante ya que la selección adecuada de la bomba nos permite aprovechar al máximo las características de ella en situaciones específicas. Esto es, hay bombas adecuadas para cierto rango de cargas y volúmenes. Una bomba pequeña podría resultar insuficiente mientras que una grande desperdicia su potencial. La bomba debe ser del tamaño adecuado y de la mayor eficiencia posible. Algunos fabricantes de bombas incluye información sobre la eficiencia de sus bombas bajo diferentes características de trabajo. Otros fabricantes sencillamente no incluyen esta información y se tendrá que depender de otros métodos para calcular su eficiencia. Una alternativa es utilizar la información de la Tabla II, en donde se ha categorizado algunas bombas por su tecnología y eficiencia. Esta tabla es relativamente buena cuando no se cuenta con información más precisa.

Tabla III.3 Valores por omisión de bombas y tecnología de bombeo [3]

Altura(m)	Sistema o tipo de bomba	Eficiencia
5	Centrifuga de superficie	0.25
20	Centrifuga de superficie	0.15
20	Centrifuga sumergible	0.25
> 30	Centrifuga sumergible	0.35
	Superficiales, de diafragma	
100	Desplazamiento positivo sumergible	0.35
Más de 100	Desplazamiento positivo de superficie	0.40

Por último, el proceso de selección de la bomba puede ser repetitivo. Una vez terminados todos los pasos del dimensionamiento, es recomendable regresar a este paso y seleccionar otra bomba, en cada paso hay pérdidas de eficiencia inherentes e inevitables.

### III.6.4 Eficiencia del sistema

La eficiencia del sistema se puede determinar siempre y cuando se conozca la eficiencia de cada una de sus componentes. A continuación se expresa la manera en que ésta puede ser determinada.

a) **La bomba:** La eficiencia de la bomba proviene del paso anterior.

b) **El arreglo FV:** Un arreglo fotovoltaico puede tener algunas pérdidas de eficiencia que deben considerarse en el diseño. Estas incluyen: desbalance entre celdas que causan una resistencia eléctrica, desbalance entre el arreglo y operación de la bomba; desbalance de voltaje en el cableado y las conexiones. La explicación detallada de estas pérdidas está fuera del alcance de esta sección, pero solamente se mencionará su origen.

Los arreglos y módulos fotovoltaicos tienen pérdidas de eficiencia debido a los períodos en que aunque hay luz solar, la energía no es suficiente como para arrancar la bomba. Los controladores tienen una perilla donde se ajusta los requerimientos mínimos y máximos de energía para el funcionamiento de la bomba. Por ejemplo, al amanecer hay luz solar pero sin la suficiente intensidad para hacer funcionar el sistema de bombeo. También se debe tomar en cuenta los tiempos muertos debido a las nubes o sombras temporales que causan que el sistema se detenga. Aunque hay varios métodos para calcular la eficiencia del arreglo, recomendamos aquí que se utilice el valor fijo de 0.90, ya que la experiencia muestra que este valor no es muy alejado de la realidad.

c) **El controlador:** Todo dispositivo que de alguna manera manipule la energía que tiene inherentemente algunas pérdidas. En este caso también recomendamos utilizar el valor fijo de 0.90. Los controladores tienen diversas eficiencias dependiendo de su tecnología. Por ejemplo, los inversores que convierten la corriente continua en corriente alterna son significativamente más eficientes que un banco de baterías que se utiliza como un controlador de voltaje. Los bancos de baterías permiten el uso de bombas de 12v o 24v de corriente continua, bombas más baratas pero que deben trabajar a un voltaje constante. Un banco de baterías almacena la energía proveniente de los arreglos a voltajes variables, mientras que proporcionan la energía a la bomba a un voltaje constante. Un banco de baterías puede tener eficiencia hasta de un 0.7 mientras que el inversor puede llegar a más de 0.90.

d) Factor térmico: Los módulos y cables sufren pérdidas de eficiencia a medida que su temperatura de operación aumenta. Los módulos pueden llegar a trabajar a más de 30° C por encima de la temperatura ambiente. Los cables se calientan cuando se hace pasar una corriente. Esto causa que en algunos sitios donde se presentan temperaturas extremas la eficiencia puede verse reducida significativamente. Aquí se propone utilizar un método aproximado con la siguiente fórmula

$$FT = 1 - (0.004(T_{am} - 25)),$$

donde FT= factor térmico expresado en decimales; Tam = temperatura ambiente máximo promedio. El componente Tam es de consideración. La temperatura máxima del lugar se puede obtener de registros pero también puede utilizarse el conocimiento común de la localidad. Si se conoce el área se hace uso de la experiencia y se aproxima el valor estimado.

e) Eficiencia total del sistema: El producto de los cuatro valores anteriores permiten obtener la eficiencia total del sistema de bombeo. Este valor será útil para obtener la potencia eléctrica necesaria que se calcula en el paso siguiente.

### III.6.5 Cálculo de la potencia del arreglo FV

La potencia fotovoltaica mínima para el sistema de bombeo se obtiene del producto de la potencia hidráulica por la eficiencia total del sistema, es decir

$$P_{av} = HP * E_s,$$

donde, Pav = Potencia del arreglo FV, PH = Potencia hidráulica, Es = Eficiencia del sistema completo. Nótese que todavía este valor no indica el tamaño resultante del arreglo para el sistema de bombeo. Solo indica la potencia mínima necesaria para la operación del sistema de bombeo.

### III.6.6 Cálculo del número mínimo de módulos FV

El número mínimo de módulos fotovoltaicos nos indica la cantidad mínima necesaria de módulos fotovoltaicos para el sistema de bombeo. Por supuesto, este número dependerá de la capacidad del módulo seleccionado, ya que hay muchas marcas de módulos con diferentes capacidades, teniéndose en el mercado módulos de 10 W hasta 120W. Este paso es de vital importancia en el diseño, ya que se debe seleccionar entre ellos, aquel que se aproxime lo más posible a un número entero al hacer la división de potencia del arreglo entre la capacidad del módulo en watt. Es decir:

$$\text{No de módulos} = P_{av} / P_{am}$$

donde  $P_{av}$  = potencia del arreglo fotovoltaico,  $P_{am}$  = capacidad del módulo

Este número debe ser entero. Si el resultado es un número no entero, entonces debe redondearse o incrementarse al número entero inmediatamente mayor al obtenido.

### III.6.7 Configuración posible del arreglo

Ya habiendo determinado el número de módulos que satisfacen los requerimientos de potencia establecidos por los requerimientos de bombeo, es importante el establecer cuál será la configuración de conexión entre ellos, ya que se pueden conectar en configuración serie o paralelo.

a) **Módulos en serie:** Para obtener el número de módulos que se conectarán en serie, se divide el voltaje de operación del sistema de bombeo entre el voltaje de operación del módulo. Se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\text{No. en serie} = V_{op} / V_{mp}$$

donde:  $V_{op}$  = voltaje de operación del sistema,  $V_{mp}$  = voltaje de operación del módulo. En los sistemas de bombeo que no tendrán acopladas baterías,  $V_{mp} = 15 \text{ V}$ .

El voltaje de operación del sistema lo determina por lo general el controlador o la bomba. Por ejemplo, el voltaje de operación de las bombas de corriente continua determinan el voltaje de operación del sistema completo. Por otra parte, hay sistema que su voltaje de operación es determinado por el controlador o acondicionador de energía. Por ejemplo hay

bombas de corriente alterna que utilizan un inversor con un voltaje de alimentación fijo. En este caso, el voltaje de operación del sistema es el voltaje de operación del inversor

El voltaje de operación de los módulos es característico de cada módulo. Aquí recomendamos utilizar 15 volts como voltaje de operación, aunque es posible que en la literatura de módulos se encuentre un valor diferente. Utilizando este valor se hace una buena aproximación.

b) Módulos en paralelo: Una vez obtenido el número de módulos en serie, podemos obtener el número de módulos en paralelo dividiendo el número total de módulos entre el número total de módulos en serie.

$$\text{No módulos en paralelo} = \text{No. total de módulos} / \text{No módulos en serie}$$

En este caso también es necesario incrementar el resultado de la división al número entero superior más cercano.

### III.6.8 Tamaño resultante del arreglo

El tamaño final del arreglo se obtiene del producto del número de módulos en serie multiplicado por el número de módulos en paralelo y por la potencia de los módulos. En general, se encontrará que el tamaño del arreglo dimensionado no es igual al tamaño del arreglo requerido, de hecho, debido a la metodología del diseño, siempre resulta ser mayor. Lo que se recomienda es seleccionar los módulos de tal manera que el tamaño del arreglo dimensionado sea casi igual al tamaño del requerido. Con esto, se garantizaría un sistema económico (se compra la energía que se requiere) y eficiente (se consume toda la energía que se produce).

En los sistemas de bombeo fotovoltaico la configuración de módulos para un acoplamiento entre los módulos y la bomba mediante un controlador electrónico es muy importante para una mejor eficiencia, estos sistemas tienen la ventaja de que tienen un bajo mantenimiento, fácil de instalar, no contaminan, etc.

### III.7 Criterios de diseño y selección del sistema fotovoltaico

Todos los sistemas fotovoltaicos pueden dividirse en tres componentes principales o subsistemas (ver Fig. III.2)

- a) - El arreglo fotovoltaico que convierte la luz del sol en energía eléctrica en forma de corriente directa, también conocida como corriente continua.
- b) - Un dispositivo de “ acondicionamiento” de la energía eléctrica
- c) - Una carga de trabajo como un motor eléctrico acoplado a una bomba.

En el caso de los sistemas de bombeo, también debe incluirse un componente adicional un tanque o pila de almacenamiento donde se pueda acumular el agua. Esto incluye un sistema de distribución y un dispositivo para el agua se desborde. Cada uno de estos componentes debe ser tan eficiente como sea posible ya que las pérdidas se traducen en un inmediato incremento en el costo del sistema completo. En ocasiones hay que agregar el costo de la perforación del pozo que puede llegar a ser tan alto como el sistema mismo.

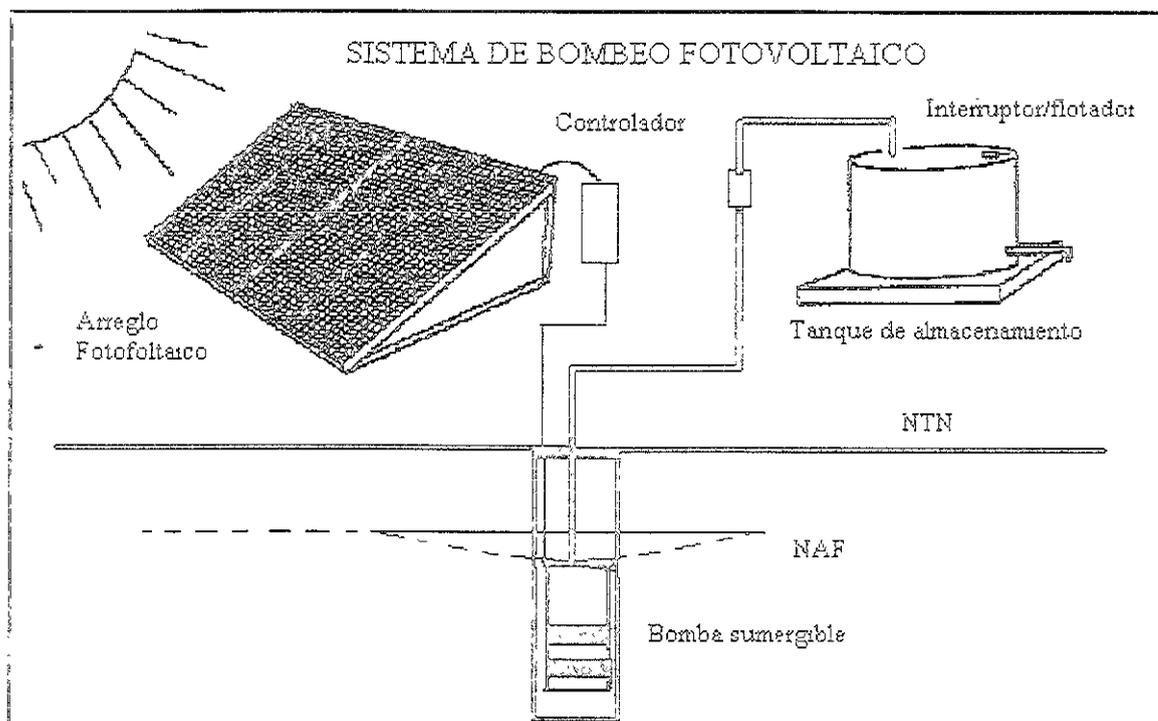


Fig III 2 Diagrama esquemático de un sistema de bombeo fotovoltaico

En un sistema convencional de bombeo de gasolina o diesel, el almacenamiento no es tan crítico ya que la energía se encuentra almacenada en el combustible mismo, y la bomba puede hacerse funcionar cuando se necesite (si la bomba está en condiciones de trabajar y si hay disponibilidad de combustible). Sin embargo, con el bombeo solar, el agua podría no estar disponible cuando se necesite. El bombeo solar trabaja en condiciones que pueden

variar de un día a otro y por tanto es prudente almacenar agua para aquellos días nublados o de lluvia

De lo anterior, el criterio de diseño y selección estará basada en:

a) Cálculo de la carga hidráulica. El promedio de carga diaria de energía en kilowatt-hora se calcula para el mes crítico de cada estación, tomando en consideración que la carga hidráulica es directamente proporcional al producto diario del volumen /carga de agua

b) Pérdidas en el sistema. Se deben de considerar las pérdidas en los controles, en la bomba, en el motor y los efectos de mal empate en alambres

c) La insolación local, es decir la cantidad de radiación solar (insolación) que podría recibir el sistema fotovoltaico en el sitio de aplicación, con varios ángulos de inclinación

d) Definir el período crítico para el diseño ya que la insolación varía con el cambio de estación que también afecta la demanda de agua o el nivel de agua en el pozo.

e) Cálculo de la potencia del conjunto. Generalmente los conjuntos fotovoltaicos se clasifican por producción de potencia eléctrica bajo condiciones estándar de medición, es decir,  $100 \text{ mW/cm}^2$  de insolación con masa de aire AM1.5 y temperatura de módulo a  $25^\circ\text{C}$

Ejemplo teórico del diseño de un sistema de bombeo

1.- Para una demanda de 2.4 GPM  $= (2.4 * 3.7856) / 60 = 0.15 \text{ lps}$

2.- La carga dinámica total se consideró en 65 m. Este dato lo tendremos que convertir a pies y así poder usar las curvas de funcionamiento de la bomba.  $65 \text{ m} = 65 / 0.3048 = 213 \text{ feet}$

3.- Proponemos una bomba GRUNDFOS, Modelo 7S03-8, de las que existen en el mercado, y usando las curvas de funcionamiento de la bomba, nos encontramos que esta bomba cumple con los requerimientos de razón de bombeo, ver figura III 3

4 - Usando las curvas de bombeo, para una demanda de 2.4 GPM y una carga dinámica total de 65 m, se cae dentro del rango donde una bomba de 1/3 HP es suficiente para cubrir las necesidades de la razón de bombeo anterior, dando un poco más de dicha razón de bombeo o sea 2.8 GPM, el cual, es un poco mayor de 2.4 GPM

5.- Características de la bomba Modelo = 7S03 8, HP = 1/3 , Longitud = 23 ½ pulgadas Ancho, 3 ¾ pulgadas y Peso = 27 lb

6.- Voltaje de operación de la bomba. 120 volts ( las bombas de baja presión tienen este voltaje)

Voltaje nominal = 120 volts

Voltaje mínimo = 100 volts

Voltaje máximo = 140 volts

7.- Selección de los módulos

#### MODELO DE LOS MÓDULOS

Modelo SI – PC4JF (Siemens)

Modelo MSX – 60 (Solarex)

Fig III 4 Características del módulo usado en este ejemplo, modelo SI-PC4JF, 75 Watts

módulo MSX-60, 60 Watts

Potencia pico del panel; 75 Watts

Potencia pico del panel; 60 Watts

Corriente de operación del módulo; 4.4 amp

Corriente de operación del módulo; 3.5 amp

Voltaje de operación del módulo 17 volts

Voltaje de operación del módulo, 17.1 volts

Inversor Solartronic SA 1500 DC / AC Inverter voltaje nominal = 120 volts

#### CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA

8.- Para una bomba de 1 / 3 HP se tienen  $= 746 \cdot (1/3) = 248.67$  Watts ( mecánicos)

Para este caso se tomará los Watts mecánicos como Watts eléctricos

9.- La eficiencia mecánica es de un 80%

10.- La eficiencia del inversor = 0.95%

10.- La potencia nominal es  $= 248.67 / 0.85 \cdot 0.95 = 345$  Watts

11.- Corriente de consumo = Potencia nominal / voltaje de operación de la bomba  
 $= 345 / 120 = 2.875$  amperes

12.- La potencia pico del panel acoplado directamente a la bomba ( de las especificaciones del manual para el modelo seleccionado)

#### PARA LOS MODELO

SI - PC4JF

MSX - 60

75 Watts

60 Watts

13.- Número de módulos en serie = voltaje de operación de la bomba / voltaje de operación del módulo

$$120 / 17 = 7$$

$$120 / 17.1 = 7.017 = 7$$

14.- Número de módulos en paralelo = corriente de consumo(amp) / corriente de operación.(amp)

$$2.875 / 4.4 = 0.653 = 1$$

$$2.875 / 3.5 = 0.821 = 1$$

15.- Arreglo = (# módulos en serie) \* (# de módulos en paralelo) = 7 \* 1 = 7

16.- La potencia pico del sistema fotovoltaico = Arreglo \* potencia pico del panel

$$7 * 75 = 525 \text{ Watts.}$$

$$7 * 60 = 420 \text{ Watts}$$

17.- El costo por watt.

El costo de un módulo de 75 Watts es de \$ 625.0 USA lo que implica un costo por watt de energía generada de \$8.33 USA, mientras que el módulo de 60 Watts tiene un costo de \$539 USA dando un costo por watt de \$ 8.98 USA. Se observa que el módulo de menor potencia tiene un costo por Watt más caro y la diferencia radica en que el costo del encapsulado, en un proceso de producción es más caro para áreas más pequeñas

18.- Costo del arreglo fotovoltaico.

Ese se calcula al multiplicar el costo por watt con la potencia del arreglo.

para 75 Watts

Para 60 Watts

$$525 * 8.33 = \$4373.25 \text{ USA}$$

$$420 * 8.98 = \$ 3771.60 \text{ USA}$$

Fig III 4 Características del módulo usado en el ejemplo. modelo SI-PC4JF, 75 Watts

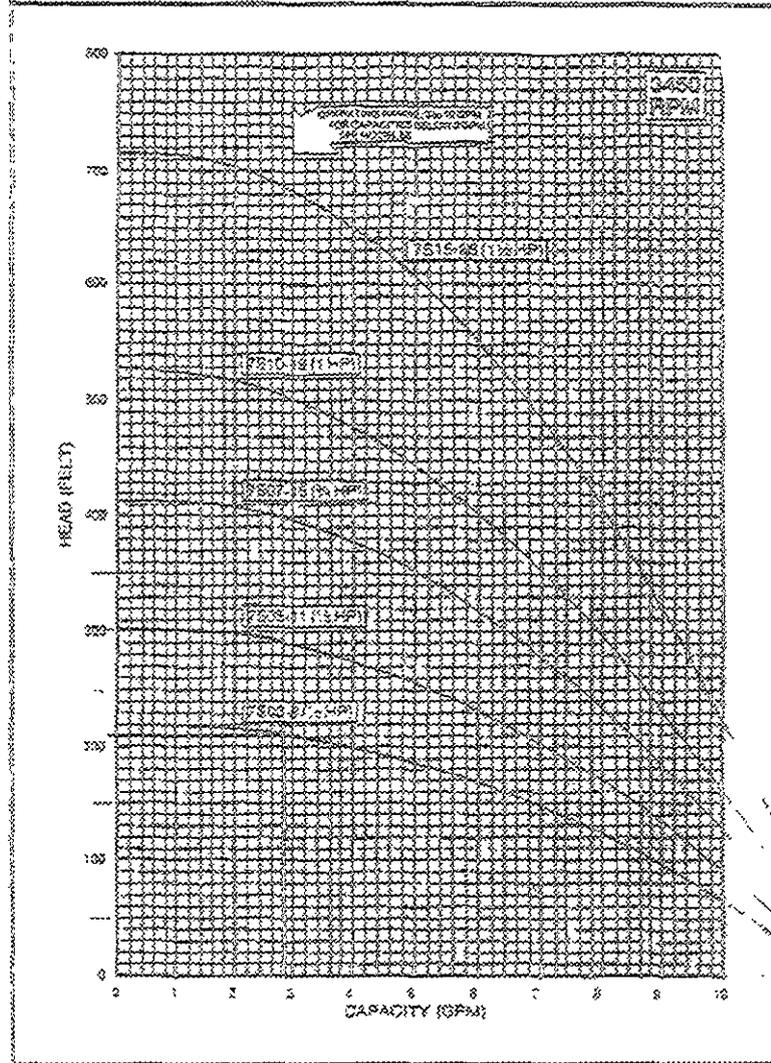
Módulo MSX-50 /60 [ 8 ].

Catalogo	Solarex MSX - 60	Solarex MSX - 50	Siemens SI - PC 4 JF
Potencia pico	60 Watts	50 Watts	75 Watts
Potencia mín. garantizada	58	47.5	
Corriente pico de operación	3.5 amp	2.92 amp.	4.4 amp
Corriente a 15 volts. 50°C	3.74	3.12	4.4 amp (45°C)
Voltaje pico de operación	17.1	17.1	17.0
Dimensiones en pulgadas	44*20*2	37*20*2	47.3*20.8*2.5
Peso	16 Lbs.	14 Lbs.	24 Lbs
Peso empacado	30 Lbs	30 Lbs	
Precio unitario	398.0 US	347.0 US	476.0 US
Precio de mayorco	359.0 US	333.0 US	457.0 US

# 7 GPM GRUNDECS

FLOW RANGE  
3 to 10 GPM  
PUMP OUTLET  
1" NPT

## PERFORMANCE CURVES



## DIMENSIONS AND WEIGHTS

MODEL NO.	HP	LENGTH (INCHES)	WIDTH (INCHES)	APPROX. UNIT SHIPPING WT. (LBS.)
7300-8	1/2	23 1/2	3 3/4	27
7505-11	3/4	28 1/2	3 3/4	30
7507-15	3/4	30 3/4	3 3/4	33
7810-19	1	34 3/4	3 3/4	36
7815-25	1 1/2	42	3 3/4	48

Specifications are subject to change without notice.

Fig. III 3 Curvas de bombeo para el ejemplo planteado [8]

## Capítulo IV: Dispositivo auto-operante para controlar la abertura y cierre de un Tanque de Descarga de Fondo.

### Introducción

Entre 1992 y 1997 el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con apoyo de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), desarrolló un dispositivo auto operante denominado Tanque de Descarga de Fondo (TDF). Este dispositivo es una alternativa tecnológica, de bajo costo, que permite realizar el riego intermitente con caudales pequeños; el cual, se logra por medio de la automatización del llenado y vaciado de un tanque de almacenamiento, que esta conectado a una tubería de compuertas, con lo que se generan las descargas cíclicas o impulsos que este tipo de riego requiere. Este dispositivo ya se está aplicando en México con excelentes resultados, así por ejemplo, en el estado de Zacatecas se ha instalado en más de 20 parcelas productivas de una a cuatro hectáreas, utilizando caudales que varían desde 0.7 hasta 3 l/s, por otra parte, en los estados de Sinaloa y Michoacán, se han habilitado más de 30 huertos familiares utilizando caudales inferiores a 0.05 l/s. Desafortunadamente, la abertura y cierre del TDF no se realizaba adecuadamente con los dispositivos diseñados para tal fin, presentándose problemas de funcionamiento. Bajo estas expectativas se ha diseñado e implementado un nuevo sistema de abertura y cierre. En este capítulo se analiza, usando un modelo matemático así como el prototipo real, el nuevo sistema de abertura y cierre para un TDF. Se presenta además la manera en que este dispositivo opera en el campo.

### IV.1 Antecedentes

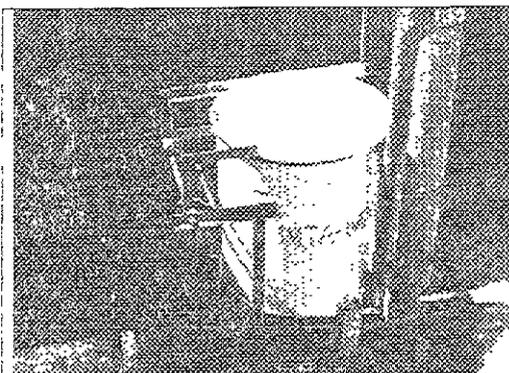
El elemento central del TDF es su sistema de abertura y cierre, que consiste en un dispositivo auto-operante que funciona por automatización fluidica y que, por consecuencia, no consume energía externa para su operación. Este sistema esta constituido por un flotador y una compuerta los que se sugieren que sean de bajo costo, de fácil construcción y de mínimo mantenimiento. En la medida en que el TDF se llena o se vacía, el sistema de abertura y cierre opera, automáticamente, una compuerta generando de esta manera descargas intermitentes (cíclicas) sobre la parcela bajo riego. De hecho, el funcionamiento hidráulico relacionado con el cierre y abertura del TDF se asemeja bastante

al del tanque de un WC, con la diferencia de que la abertura en el TDF se hace sin la intervención de un operador

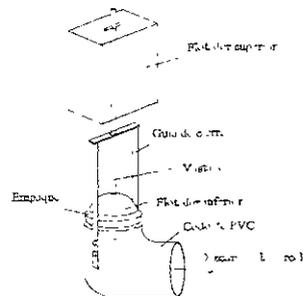
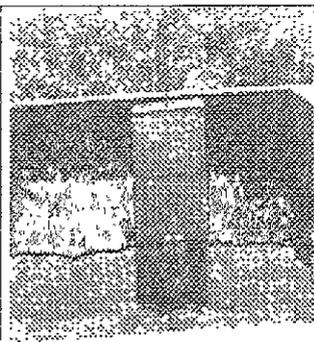
Desde 1992 en que se originó la idea del TDF, el sistema de abertura y cierre ha tenido varios cambios, ya que a medida que se experimentaba con ellos, se identificaban nuevas alternativas para solucionar las desventajas y limitaciones de las diversas propuestas bajo estudio. De esta manera en 1994 se diseñó y se construyó el primer TDF en un campo experimental de la Escuela de Veterinaria de la Universidad Autónoma de Zacatecas

En esta ocasión, el sistema de abertura y cierre utilizado consistía en una estructura metálica, compleja tanto en su diseño como en su construcción y operación (foto 1, Fig III 1). Si bien este sistema de abertura y cierre tenía un funcionamiento aceptable, no satisfacía los requisitos de simplicidad que se han impuesto como una meta del proyecto; y por esta razón durante 1995, se trabajó con una nueva propuesta basada en un flotador de unicel que producía la abertura al deslizarse por un eje vertical ligado a una compuerta de fondo (foto 2, Fig III 1). Este diseño resultó económico pero poco resistente y muy sensible en su calibración y operación, lo que se traducía en la necesidad de mantener una supervisión constante para evitar y corregir posibles fallos.

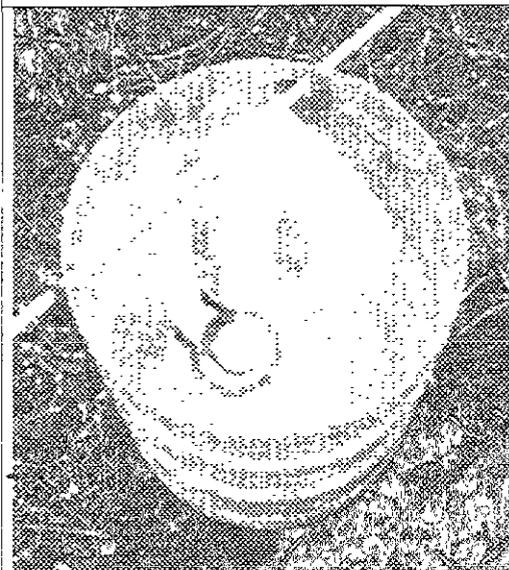
En 1996 y con la experiencia acumulada durante 1994 y 1995, se desarrolló a nivel experimental y de manera empírica el sistema de abertura y cierre (foto 3, Fig. III 1) al que aquí se hace referencia y que se ha instalado en los TDFs que se han construido tanto en huertos familiares como en parcelas productivas (fotos 4 y 5, fig. III 1).



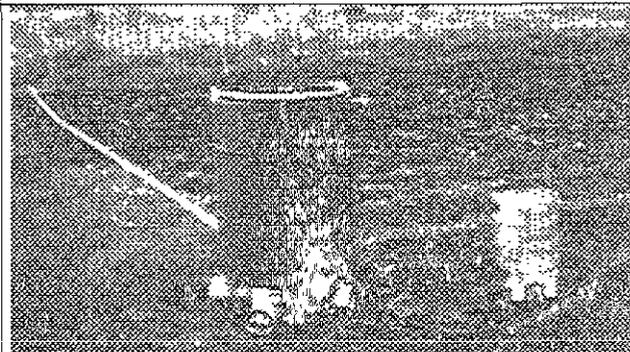
Fotografía 1 Imagen del dispositivo de abertura y cierre, versión 1994.



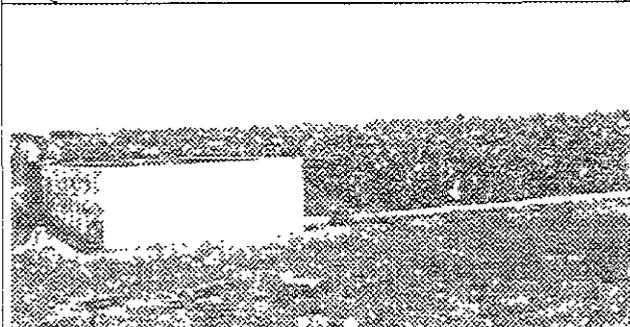
Fotografía 2 Dispositivo su de abertura y cierre, en versión 1995



Fotografía 3 Dispositivo de abertura y cierre, versión 1997, instalado dentro un TDF construido con fines demostrativos. Obsérvese que esta compuesto por un flotador (bastón), una tapa de fondo, un soporte horizontal, un sistema de aireación (tubería vertical), y un cable que conecta el flotador con la tapa



Fotografía 4 TDF instalado en un huerto familiar. Se aprecia también el pequeño TDF para demostración (mismo de la fotografía 3).



Fotografía 5 TDF en parcela productiva de una hectárea, ubicada en el Estado de Zacatecas, Méx

Fig. IV.1 Se muestran tres versiones del dispositivo de abertura y cierre así como dos tanques de almacenamiento

Como ya se comentó, el sistema de abertura y cierre se desarrolló con base en la experiencia obtenida y su dimensionamiento se logró de una manera empírica a través de pruebas experimentales tanto a nivel de laboratorio como de campo. Si bien este diseño, bajo las condiciones estudiadas, garantiza el buen funcionamiento del sistema de abertura y cierre, por otro lado, surge la duda de su funcionamiento bajo otras condiciones de

operación; por esta razón, se identificó la necesidad de establecer los criterios y bases para fundamentar su diseño por medio de un modelo fisicomatemático. En este trabajo se presentan los resultados teóricos del modelo analizado así como su validez real

## IV.2 Descripción del sistema de abertura y cierre

Dicho sistema esta formado por 5 elementos a saber sistema de flotación, eje de giro, argolla de conexión, compuerta de fondo (tapón de fondo tipo WC) y cordón de transmisión. De todos ellos, el más importante es el sistema de flotación que a continuación se describe:

El sistema de flotación (ver Fig IV.2) es el elemento mediante el cual que se realiza la abertura de la compuerta de fondo, este dispositivo tiene forma de bastón y esta fabricado con tubería y elementos especiales de PVC sanitario, las partes que lo componen se ilustran en la Fig.IV 2.

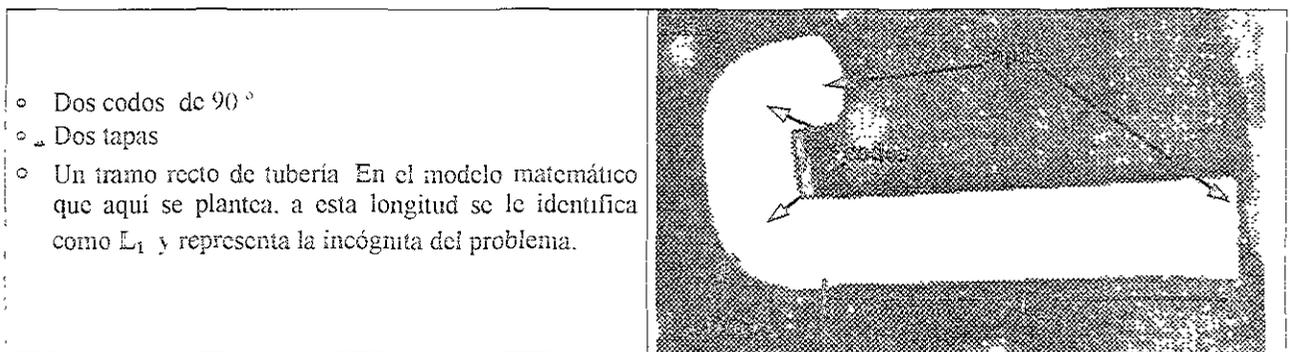


Fig. IV 2 Partes del sistema de flotación

Como se puede observar en la foto de la Fig.IV 2, los codos se unen con el tramo de tubería  $L_1$  formando la parte superior del bastón, una de las tapas se coloca en el extremo libre de uno de estos codos mientras que la otra tapa se instala en el extremo inferior del citado tramo de tubería, todas las piezas se sellan con pegamento especial para PVC. En el codo que une al tramo  $L_1$  se realiza un orificio (normalmente de 1/2 pulgada de diámetro) en la parte curva exterior, para generar un eje de giro. Este orificio sirve tanto para sostener el sistema de flotación mediante un tubo o varilla cuyo diámetro es ligeramente inferior que el del orificio y permitir su movimiento en torno al eje de giro formado (estos detalles se

pueden observar en la foto3, fig.IV.1) El eje de giro se apoya en las paredes del TDF y se encuentra a una altura ligeramente superior (3 a 4 cm) que la del nivel máximo de abertura

El segundo codo, o sea, aquel en que se a colocado la otra tapa, lleva cerca de su extremo una abrazadera y una pequeña argolla de la que se sujeta el cordón de transmisión (usualmente de nylon) que une el sistema de flotación con la tapa de fondo. La longitud libre de dicho cordón es tal que al tensarse permite que el tramo recto del bastón forme un ángulo de entre  $45^{\circ}$  y  $60^{\circ}$  con respecto a la vertical.

La tapa de fondo es de forma cónica, semejante a la del sistema de cierre del WC, y tiene por función cerrar (para obstruir) o abrir (para permitir) la descarga del agua hacia la tubería de compuertas que es la que distribuye el agua en los surcos. Dicha tapa de fondo se acciona a través del desplazamiento automático del bastón, que se dispara por efecto de un desequilibrio entre las fuerzas hidrostáticas y dinámicas que actúan sobre él en el momento, en que el nivel del agua, alcanza el nivel de abertura, tensando de esta manera el cordón para producir su abertura y dando de esta manera inicio al proceso de vaciado del tanque. Ya que el sistema está diseñado para que el gasto descargado siempre sea mayor que el gasto de entrada, entonces el nivel del agua desciende continuamente hasta que baja a una altura tal que la tapa de fondo, por efecto de la succión y de su peso propio, cierra y sella el orificio obstruyendo de esta manera el paso del agua hacia la tubería de compuertas. Una vez cerrada la compuerta de fondo se inicia de nuevo el llenado del TDF. Así se cierra un ciclo, consistente en el llenado y vaciado del TDF, el cual será repetido en el número requerido de veces que sean necesarias para suministrar la lámina de riego.

Es importante hacer notar que para definir el número de descargas se toma en cuenta la lámina de riego neta, la eficiencia del sistema de riego (superior al 80%), las características físicas y químicas del suelo, así como las dimensiones de la parcela y las de los surcos entre otros factores.

## IV.3 Bases para el diseño del sistema de abertura y cierre

Su diseño tiene su origen en el conocimiento empírico que se generó a través de la experiencia derivada de una serie de propuestas tecnológicas, de una diversidad de experimentos, así como de una activa campaña de validación, seguimiento y corrección que se realizó tanto a nivel de laboratorio como de campo en dispositivos experimentales y en parcelas piloto respectivamente (García y Barrios, 1994, Lara, 1994; Dzul, 1998) [9]

Con el fin de establecer y generalizar sus bases conceptuales y las condiciones que garantizan su correcta operación, en este apartado se aborda el problema de su diseño desde el punto de vista teórico

### IV.3.1 Modelo matemático

Se asume, como hipótesis de partida, que el funcionamiento hidráulico del sistema obedece al equilibrio hidrodinámico de las fuerzas actuantes tanto en el momento de la abertura como en el del cierre. En particular resulta más interesante, por la novedad que esto implica, el estudio del equilibrio de dichas fuerzas en el momento de la abertura el cual da origen al diseño de las dimensiones del flotador (bastón) tal y como se describe a continuación.

### IV.3.2 Fuerzas actuantes sobre el sistema

De acuerdo con la Fig. IV.3 y considerando como hipótesis simplificatoria que la velocidad de giro del bastón, en el momento de la abertura, es conocida (obtenida experimentalmente) las principales fuerzas actuantes resultan ser:

- o Empuje de Arquímedes ejercido sobre el tramo recto  $L_1$

$$E1 = \gamma_0 \frac{1}{4} \pi D_1^2 L_1$$

- o Peso propio del tramo  $L_1$

$$W1 = \gamma_m \left( \frac{1}{4} \pi D_1^2 - \frac{1}{4} \pi (D_1 - e)^2 \right) = \frac{\gamma_m L_1}{4} [2D_1 e - e^2]$$

Peso propio de los dos codos

$$W2 = 2 W_{\text{codo}}$$

- o Empuje de Arquímedes sobre la parte superior del bastón.

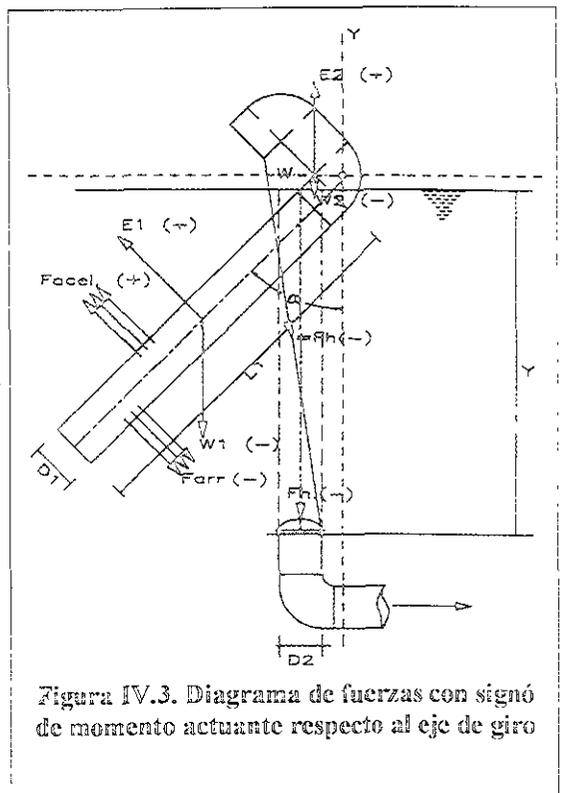
$$E2 = \gamma_0 V_2 \text{ codos} = 0.5 \left( \frac{L_{\text{ext}} + L_{\text{int}}}{2} \right) \left( \frac{\pi D_1^2 \gamma_0}{4} \right)$$

- o Fuerza de arrastre sobre el tramo  $L_1$

$$F_{\text{arr}} = C_d A \frac{1}{2g} \gamma_0 V^2 L_1 = C_d D_1 L_1 \frac{1}{2g} \gamma_0 V^2$$

Empuje hidrostático sobre la tapa de fondo

$$F_h = \gamma_0 y A S = \gamma_0 \frac{1}{4} \pi D_2^2 y$$



### Fuerza aceleradora

De la 2ª. Ley de Newton se debe cumplir la relación  $\Sigma F = m a$ , en donde  $\Sigma F$  representa la suma de fuerzas actuantes,  $m$  la masa del sistema en movimiento y  $a$  la aceleración que experimenta la masa  $m$  en el momento de la abertura

De acuerdo con Daily y Harleman [10], la masa de un cuerpo en movimiento se puede expresar como la suma de la masa del propio cuerpo más la del fluido en movimiento, de esta manera se puede ver a  $m$  como una masa virtual dada por la relación

$$m = M + KM'$$

en donde

$M$  = masa del cuerpo

$M'$  = masa del fluido desplazado

De aquí que la segunda ley de Newton se exprese para este caso de la siguiente manera:

$$\Sigma F = (M + KM') a$$

En este caso  $M$  corresponde a la masa del cilindro de longitud  $L_1$  y esta dada por

$$M = \frac{\gamma_m}{g} V_m = \frac{\gamma_m}{g} \pi D e L$$

en donde  $\gamma_m$  corresponde al peso específico del material,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $V_m$  el volumen del mismo material ( $V_m = \pi D e L$ ),  $D$  el diámetro del tubo,  $e$  el espesor del mismo y  $L$  su longitud.

El coeficiente de masa adicionada "K", depende de la forma del cuerpo y de la naturaleza del movimiento y puede calcularse para movimientos irrotacionales. Para un cilindro moviéndose transversalmente,  $K = 1.00$  [11].

La masa del fluido desplazado se puede evaluar a través de la siguiente relación

$$M' = \frac{\gamma_0}{g} \frac{\pi}{4} D^2 L$$

Por otra parte la aceleración se puede expresar en función del cambio de velocidad que adquiere el sistema a través del tiempo, de donde resulta

$$a = \frac{dv}{dt}$$

dado que el movimiento es sumamente rápido y que en forma casi inmediata alcanza la velocidad terminal ( $v_f$ ), por simplificación la aceleración se puede expresar en forma discreta de la siguiente manera:

$$a = \frac{v_f - v_i}{\Delta t}$$

en donde  $v_f$  representa la velocidad del sistema en el momento de la abertura (que para fines prácticos coincide con la velocidad terminal que alcanza el sistema),  $v_i$  corresponde a la velocidad inicial que es nula ya que el sistema parte del reposo, y  $\Delta t$  representa el incremento de tiempo que tarda el sistema en alcanzar la posición de abertura (para fines prácticos se puede adoptar un intervalo de tiempo de un segundo)

De pruebas experimentales se ha obtenido un valor promedio representativo de  $v_f = 0.5$  m/s, por lo que adoptando este valor y las hipótesis simplificadoras ya consideradas anteriormente, se obtiene:

$$a = \frac{0.5 - 0}{1} = 0.5 \text{ m/seg}^2$$

De lo anterior resulta que la fuerza derivada de la aceleración de la masa virtual en movimiento esta dada por

$$F_{\text{acel}} = (M - KM^*)a = \left( \frac{\gamma_m}{g} V_m + \frac{\gamma_0}{g} \frac{\pi}{4} D_1^2 L_1 \right) 0.5 = \left( \frac{\gamma_m}{g} \pi D_1 e L_1 + \frac{\gamma_0}{g} \frac{\pi}{4} D_1^2 L_1 \right) 0.5$$

en donde

$\gamma_m$  = Peso específico del material  
 $D$  = Diámetro del cilindro (bastón)  
 $D_2$  = Diámetro externo del orificio de fondo  
 $E$  = Espesor del material (bastón)  
 $L_1$  = Longitud del tramo recto (bastón)

$\gamma_0$  = Peso específico del agua  
 $C_d$  = Coeficiente de arrastre  
 $A$  = Área proyectada del cuerpo  
 $V$  = Velocidad adquirida por el cuerpo  
 $h$  = Distancia al centro de gravedad (tirante de abertura)

#### IV.4 Equilibrio de momentos actuantes en el sistema

Para que el flotador tenga la capacidad de abrir la compuerta de fondo es necesario que la resultante de la suma de los momentos actuantes con respecto al eje de giro en dirección de las manecillas del reloj (figura IV 3); momentos resultante de las fuerzas que contribuyen con el movimiento ascendente del bastón, supere al momento que ejerce la fuerza hidrostática que actúa sobre la tapa de fondo más los resultantes del peso propio y de la fuerza de arrastre, momentos actuantes en el sentido opuesto a las manecillas del reloj

La ecuación que representa el equilibrio de momentos, en el instante inmediatamente anterior a la abertura (momento en que se tensa el cordón y el tramo recto  $L_1$  forma un ángulo de inclinación  $\alpha$  con respecto a la vertical), se puede expresar de la siguiente manera

$$E_1 L_1 \left( \frac{L_1}{2} - 1.5D \right) \text{sen}\alpha + E_2 \left( \frac{D_1}{2} \right) \text{cos}\alpha - F_{\text{acel}} \left( \frac{L_1}{2} + 1.5D_1 \right) =$$

$$W_1 \left( \frac{L_1}{2} + 1.5D_1 \right) \text{sen}\alpha + W_2 \left( \frac{D_1}{2} \right) \text{cos}\alpha - F_{\text{arr}} \left( \frac{L_1}{2} - 1.5D \right) - F_h (1.5D_1),$$

donde  $E_1$  y  $E_2$  es el empuje de Arquímedes,  $W_1$  y  $W_2$  son los pesos propios correspondientes del bastón separados por el eje de giro,  $F_{\text{acel}}$  y  $F_{\text{arr}}$  son las fuerzas aceleradoras y de arrastre, respectivamente, y  $F_h$  la fuerza hidrostática sobre la tapa de fondo

De la Fig IV 3 se tiene que

$$\begin{aligned} & \gamma \frac{\pi D_1^2}{4} L_1 \left( \frac{L_1}{2} - 1.5 D_1 \right) \sin \alpha - 0.5 \left( \frac{L_{ca} + L_{ca}}{2} \right) \frac{\gamma_0 \pi D_1^2}{4} \left( \frac{D_1}{2} \right) \cos \alpha - \left( \frac{\gamma_m}{g} \pi D_1 e L_1 \right. \\ & \left. - \frac{\gamma_0}{g} \frac{\pi}{4} D_1^2 L_1 \right) 0.5 \left( \frac{L_1}{2} + 1.5 D_1 \right) = \frac{\gamma_m L_1}{4} [2D_1 e - e^2] \left( \frac{L_1}{2} - 1.5 D_1 \right) \sin \alpha + 2W_{codo} \left( \frac{D_1}{2} \right) \cos \alpha \\ & - \frac{CdD_1 \gamma_0 V^2}{2g} \left( \frac{L_1}{2} + 1.5 D_1 \right) + \frac{\gamma_0 \gamma \pi D_1^2}{4} (1.5 D_1) \end{aligned}$$

Aquí es importante hacer notar que para seleccionar las distancias de los brazos de palanca, o sea, las distancias del eje de giro al punto de aplicación de las fuerzas actuantes, no se usaron criterios exactos, pero, por otro lado, se cuidó que el efecto de este error se refleje en una sobre estimación pequeña de la resultante de los momentos que se oponen a la abertura de la compuerta de fondo. De esta manera se garantiza que al solucionar la ecuación resultante, que tiene como incógnita a  $L_1$ , se tendrá un dimensionamiento del bastón, lo que contribuye a garantizar que se logrará la abertura.

Esta simplificación también trata de absorber los errores derivados al no tomar algunas fuerzas menores, como por ejemplo, la resultante de los efectos de fricción entre el bastón y el eje de giro, entre otras.

Realizando las sustituciones correspondientes y ordenando términos, se obtiene

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma_0 \pi D_1^2 L_1^2}{8} \sin \alpha + \frac{1.5 \gamma_0 \pi D_1^3 L_1 \sin \alpha}{4} + \frac{1}{32} (L_{ca} + L_{ca}) \pi D_1^3 \gamma_0 \cos \alpha + \\ & \frac{0.5 \gamma_m \pi D_1 e L_1^2}{2g} + \frac{0.5 \gamma_0 \pi D_1^2 L^2}{8g} - \frac{0.75 \gamma_m \pi D_1^2 e L_1}{g} + \frac{0.75 \gamma_0 \pi D_1^3 L_1}{4g} = \\ & \frac{\gamma_m \sin \alpha D_1 e L_1^2}{4} + \frac{1.5 \gamma_m \sin \alpha D_1^2 e L_1}{2} - \frac{\gamma_m \sin \alpha e^2 L^2}{8} - \frac{1.5 \gamma_m \sin \alpha D_1 e^2 L_1}{4} - W_{codo} D_1 \cos \alpha \\ & + \frac{CdD_1 \gamma_0 V^2 L^2}{4g} - \frac{1.5 CdD_1^2 \gamma_0 V^2 L_1}{2g} - \frac{1.5 \gamma_0 \gamma \pi D_1 D_1^2}{4} \end{aligned}$$

Asociando y ordenando términos cuyos factores comunes son  $L_1^2$  y  $L_1$ , resulta:

$$\left( \frac{\gamma_0 \pi D_1^2 \sin \alpha}{8} + \frac{0.5 \gamma_0 \pi D_1 e}{2g} + \frac{0.5 \gamma_0 \pi D_1^2}{8g} - \frac{\gamma_m \sin \alpha D_1 e}{4} - \frac{\gamma_m \sin \alpha e^2}{8} - \frac{CdD_1 \gamma_0 V^2}{4g} \right) L_1^2 -$$

$$+ \left( \frac{1.5\gamma_0\pi D_1^3 \sin \alpha}{4} + \frac{0.75\gamma_m\pi D_1^2 e}{g} + \frac{0.75\gamma_0\pi D_1^3}{4g} - \frac{1.5\gamma_m \sin \alpha D_1^2 e}{2} - \frac{1.5\gamma_m \sin \alpha D_1 e^2}{4} - \frac{1.5CdD_1^2\gamma_0 V^2}{2g} \right) L_1 - \frac{1}{32} (L_{ext} + L_{int}) \pi D_1^3 \gamma_0 \cos \alpha - W_{codo} D_1 \cos \alpha - \frac{1.5\gamma_0 y \pi D_1 D_2^2}{4} = 0$$

Como se puede apreciarse trata de una ecuación de segundo grado del tipo

$$AL_1^2 + BL_1 + C = 0$$

en donde

$$A = \frac{\gamma_0\pi D_1^2 \sin \alpha}{8} + \frac{0.5\gamma_m\pi D_1 e}{2g} + \frac{0.5\gamma_0\pi D_1^2}{8g} - \frac{\gamma_m \sin \alpha D_1 e}{4} + \frac{\gamma_m \sin \alpha e^2}{8} - \frac{CdD_1\gamma_0 V^2}{4g}$$

$$B = \frac{1.5\gamma_0\pi D_1^3 \sin \alpha}{4} + \frac{0.75\gamma_m\pi D_1^2 e}{g} - \frac{0.75\gamma_0\pi D_1^3}{4g} - \frac{1.5\gamma_m \sin \alpha D_1^2 e}{2} + \frac{1.5\gamma_m \sin \alpha D_1 e^2}{4} - \frac{1.5CdD_1^2\gamma_0 V^2}{2g}$$

$$C = \left\{ \frac{1}{32} (L_{ext} + L_{int}) \pi D_1^3 \gamma_0 \cos \alpha \right\} - W_{codo} D_1 \cos \alpha - \frac{1.5\gamma_0 y \pi D_1 D_2^2}{4} = - W_{codo} D_1 \cos \alpha - \frac{1.5\gamma_0 y \pi D_1 D_2^2}{4}$$

Una vez establecida la ecuación de segundo grado como  $AL_1^2 + BL_1 + C = 0$ , la solución para determinar la incógnita  $L_1$ , que es la longitud recta del bastón, objetivo de nuestro análisis tomando el valor positivo el cual tendrá sentido físico, quedará determinada mediante la ecuación de la escuadría, de la siguiente forma

$$L_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

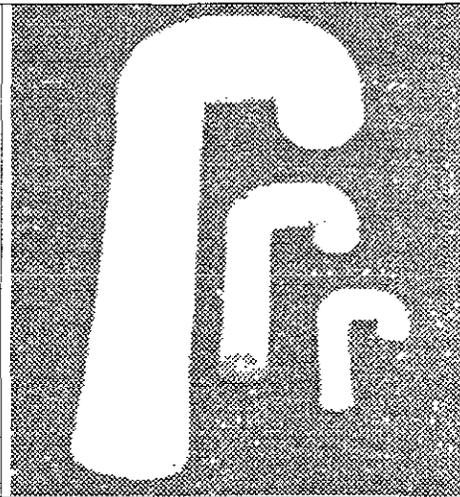
## IV.5 Validación del modelo de diseño

Finalmente después de realizar las operaciones correspondientes de acuerdo al modelo matemático y realizando pruebas tanto en el laboratorio como en campo en diferentes tanques de descarga de fondo, se observó que los resultados obedecían a las condiciones establecidas por el modelo matemático

En la Fig IV 4 se presentan los datos utilizados en cada caso y los resultados del diseño. La fotografía que se incluye en la figura muestran tres de los diferentes sistemas ya construidos, dos de ellos, los menores, se instalaron en el TDF para fines demostrativos mostrado en la foto3 Fig IV 1, en el TDF para el huerto familiar que se presenta en la foto 4 Fig IV 1, y el mayor de ellos, se colocó en diversos sistemas para riego a nivel parcelario con superficies de entre 1 y 4 hectáreas como el que se muestra en la foto 5 Fig IV 1

Fig. IV.4. Cálculo de  $L_1$  para varios diámetros del bastón del sistema de apertura y cierre y del orificio de descarga de un TDF

Datos generales								
$\gamma_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$	[Peso específico del agua]							
$\gamma_m = 1.397 \text{ kg/m}^3$	[Peso específico del material]							
$V = 0.5 \text{ m/s}$	[Velocidad de desplazamiento]							
$C_d = 0.68$ (adimensional)	[Coeficiente de arrastre]							
$\pi = 3.1416$								
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	[Aceleración de la gravedad]							
Datos particulares								Resultados
D (m)	$D_2$ (m)	c (m)	y	$\alpha$	w (gr)	$C_d$	V(m/s)	$L_1$ (m)
0.0508 (2")	0.033	0.0019	0.27	45°	75	0.68	0.50	0.13
0.0762 (3")	0.0508	0.0026	0.69	"	146	0.68	0.50	0.25
0.1016 (4")	0.0508	0.0026	0.69	"	320	0.68	0.50	0.19
0.1524 (6")	0.1600	0.0032	1.27	"	661	0.68	0.50	0.77



Esto no permite que se presenten tres tamaños de sistemas de flotación que han sido debidamente probados en los respectivos tanque de prueba. Comprobando debidamente su funcionalidad plenamente confiable.

# Capítulo V: Criterios de planeación y diseño para un huerto familiar y un sistema integral TDF-SBFV

## Introducción

El agua es y ha sido el elemento esencial en la vida y desarrollo de toda especie existente en la naturaleza. La historia del hombre ha estado condicionada a una incesante lucha por conseguirla cuando le falta y protegerse de ella cuando abunda sin control. En nuestro país, las civilizaciones primigenias tuvieron que batallar incansablemente por dotarse del vital líquido. Con técnicas autóctonas, los habitantes de nuestro territorio trataron de convertir el agua en su aliado. Ya que requerían agua para su subsistencia, la mayoría de sus migraciones pueden explicarse por la necesidad de satisfacer esta condición de vida, al agotarse o disminuir las fuentes de abastecimiento. El hombre con el afán de mejorar y satisfacer sus necesidades primarias de sustento, trató de mejorar la tierra al desmontar zonas, acondicionar las áreas para la agricultura tratando de aprovechar al máximo el agua almacenándola en depósitos llamados "Tlaquilacaxtli" (precursores de las presas), la conducían por gravedad en acequias llamadas apantles, de este modo surgieron los primeros sistemas de riego en nuestro México prehispánico. Por otra parte, también existían obras hidráulicas prehispánicas, las cuales, sólo se cuenta con los datos que proporcionan los antiguos códices o bien las tradiciones recogidas por los primeros historiadores del siglo XVI. Dentro de éstas están las Norias, Jagüeyes y Aljibes.

**Norias:** Palabra que proviene del Árabe *na'ura*. Pertenecen al grupo de construcciones cuya función básica es la de pasar el agua de un nivel más bajo a otro más alto (pozo).

**Jagüeyes:** Es una construcción para captar y almacenar agua de lluvia. Su cometido específico es para usos de riego o abrevadero de animales, lo cual implica establecer las relaciones entre su utilidad y la manera de construirlos.

**Aljibes:** En las definiciones y documentos consultados no existe una diferencia entre aljibe y cisterna. Etimológicamente Aljibe proviene del Árabe, al *Yibb* designándolo como pozo, mientras que la segunda proviene de la palabra *cesta* que quiere decir recipiente. El Aljibe es pues, un depósito para almacenar agua de fuentes diversas conteniéndola y que la pueda conservar para usos domésticos preferentemente.

## V.1 Criterios de diseño de un huerto familiar dotado con un TDF-SB

Para la implementación de un SBFV es necesario conocer todas las características físicas del proyecto agrícola. Dentro de estas están las siguientes:

### a) Sitio en donde se realizará el cultivo

Características de la parcela ( huerto familiar) y Dimensiones del TDF para huerto familiar

El terreno debe estar libre de árboles, arbustos, hierba y/o zacate, con una pendiente suave entre 02% y 07%, y de dimensiones no mayor de 12 m por 12m.

### b) Tipo de suelo

Se debe tener una clara clasificación del suelo: Arcilloso, franco o arenoso

### c) Ubicación del TDF y dirección de los surcos

Se selecciona la parte más alta del terreno para ubicar el TDF

Se selecciona la dirección de mayor pendiente para el trazo de los surcos (valle entre dos crestas)

### d) Cultivos

Para una buena planificación del riego es necesario tener una lista de los cultivos por sembrar de modo que estén en función del suelo y clima del lugar.

### e) Planeación para riego

La planificación del riego, cuando y cuánto regar. Una vez que se ha cumplido con los requisitos básicos, relacionados con la disponibilidad de terreno y agua para riego, se procede a diseñar la parcela. A continuación se presentan los pasos para llevar a cabo esta actividad:

- Número de surcos en que se debe dividir la parcela: El sistema está preparado para regar surcos de 75 cm. de separación entre uno y otro, el número de surcos se obtiene de dividir la longitud de la cabecera por la separación indicada, o sea, 75 cm. El TDF para el huerto familiar está diseñado para regar un grupo de 4 surcos a la vez, esto nos da la pauta de que el número de surcos sea un múltiplo de cuatro. Para nuestro caso, la parcela tuvo una dimensión de cabecera de 12 m. por lo que resultaron 16 surcos dando un número de cuatro grupos.
- La cantidad de agua disponible debe ser suficiente para que en un día se logre regar 4 surcos de acuerdo a un calendario de riego, tipo de cultivo y suelo. Las expresiones que se

presentan a continuación permiten determinar, en función del tipo de suelo y longitud de la parcela, el número mínimo de tanques requeridos por día para regar un grupo de cuatro surcos

- Suelo arenoso: Número de tanques requeridos por día =  $0.65 * \text{longitud del surco}$
  - Suelo franco: Número de tanques requeridos por día =  $1.5 * \text{longitud del surco}$
  - Suelo arcilloso. Número de tanques requeridos por día =  $2 * \text{longitud del surco}$  (Nota: cuando resulta fracción, se toma el valor entero inmediato superior)
- Es importante tener en cuenta que si el número de tanques disponibles para riego, es menor al número mínimo requerido para regar la parcela, entonces se debe reducir la longitud de la parcela de tal manera que sean a lo menos iguales.
  - En lo que respecta al mantenimiento del TD, se limita a un proceso de limpieza

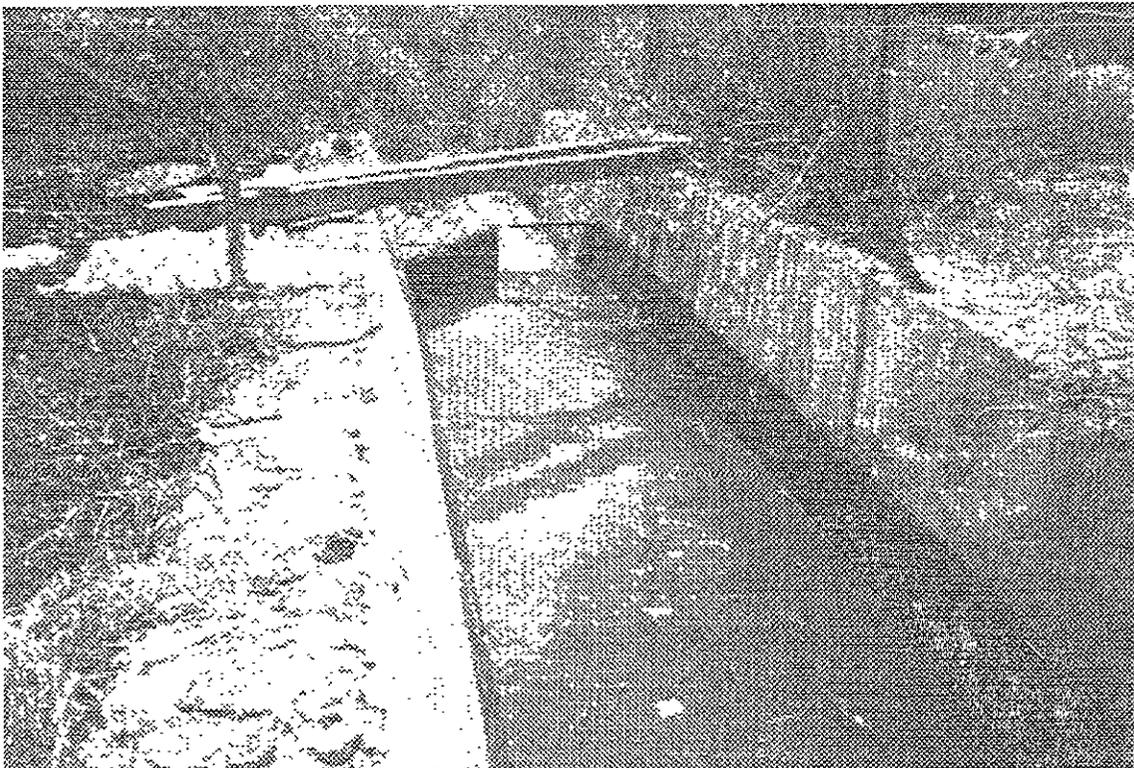


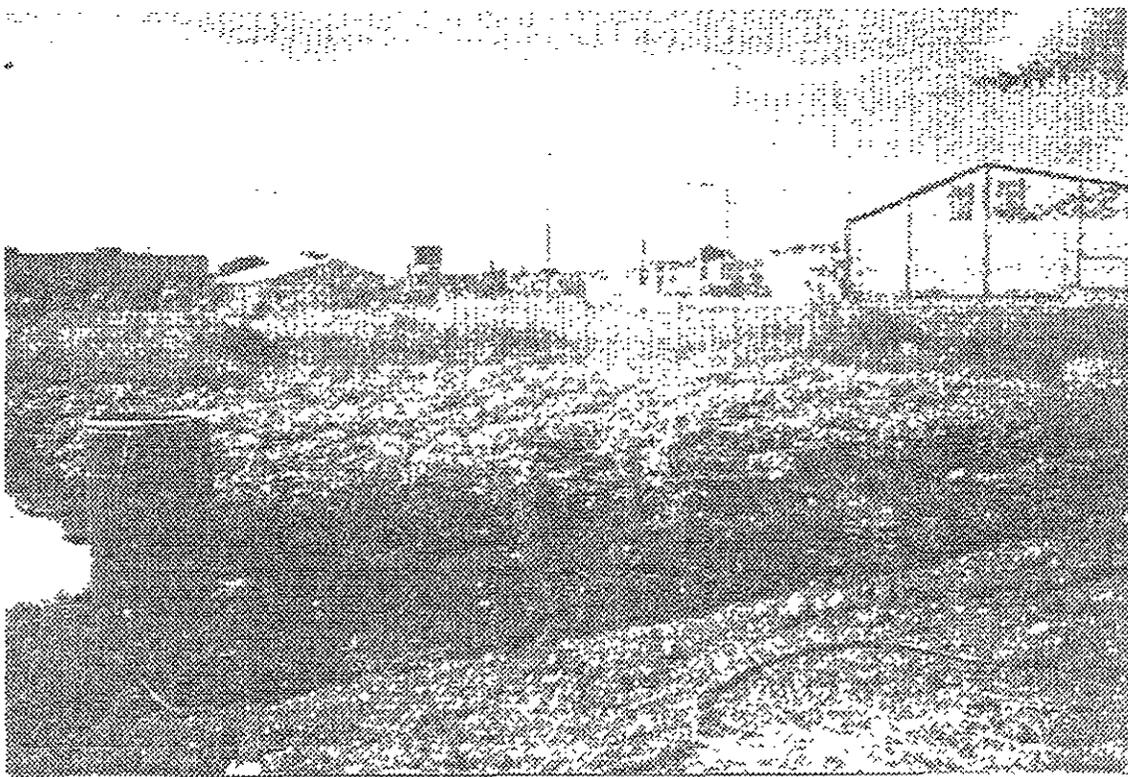
Fig. V.1 Fuente de captación del agua para riego de la parcela

## V.2 Tanque de descarga : TDF

Descripción de los componentes de un TDF Para llevar a cabo el dimensionamiento del TDF para nuestro trabajo se tomó en cuenta los estudios que se han llevado a cabo con anterioridad, tanto en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua con en la Universidad Autónoma de Zacatecas [ 2 ]

- El tanque de descarga de fondo está constituido principalmente por Un tanque de almacenamiento, un dispositivo de abertura / cierre y una tubería de compuertas
- Siendo las consideraciones para el diseño del tanque de descarga de fondo las siguientes  
El tanque puede ser fijo o portátil, cuando se considera el primer caso debe contemplarse un tanque permanente para una parcela que será construido con materiales recomendables como el tabique, un tanque portátil puede ser construido de lamina o plástico En el caso del TDF para huertos familiares se trata de un tanque prefabricado de 200 lts
- Por lo robusto de su diseño y tipo de materiales que lo componen, podemos mencionar que los trabajos de mantenimiento se pueden limitar a un simple proceso de limpieza, estos materiales con los que se construyen se encuentran comúnmente en el mercado nacional, razón por la cual podemos asegurar que son de fácil reposición Este diseño se llevó a cabo tomando en cuenta los niveles culturales y educativos de las poblaciones rurales de México, razón por la cual, no existen problemas en cuanto a la operación y mantenimiento de los mismos
- El tanque para un huerto familiar es de un costo relativamente económico, como se dijo anteriormente, consta de un tanque de almacenamiento de 200 lts un sistema de abertura y cierre y, 12m de tubería de conducción de 2 pulgadas de diámetro
- El TDF, tiene una eficiencia de aplicación y distribución superiores al 75 % Aspecto que ha sido comprobado en campo Este dispositivo tiene ventajas como tecnología novedosa, permitiendo aprovechamientos con pequeños caudales para riego desde 0.2 lps en adelante
- Fácil construcción, bajo costo, mínimos requerimientos de mantenimiento y operación

- Es aplicable a la cultura agrícola predominante del país
- Evita la dependencia tecnológica del exterior.
- Su funcionamiento no requiere de energía adicional! (opera con automatización fluidica)
- Minimiza los trabajos de un operador al regar una parcela, así como disminuye los tiempos de riego respecto al riego tradicional por gravedad
- No hay también otro aspecto, las limitaciones:
- No es recomendable para regar surcos con longitudes mayores de 15m
- Para garantizar una adecuada eficiencia de riego, como todo un sistema de riego por gravedad, se requiere que la parcela tenga una adecuada nivelación
- El tanque de almacenamiento llevará un bordo libre de uno 15 cm, puesto que en este espacio, en las paredes de dicho tanque se le harán dos perforaciones en los cuales se alojará un tubo de 1/2" de diámetro del cual se sostendrá el sistema de flotación, parte importante en el funcionamiento para las descargas intermitentes
- A su vez el tanque, tendrá otro orificio, por el cual tendrá su caudal de entrada



ESTO TAMBIÉN DEBE  
SER EN LA PRÁCTICA

Fig. N° 2 El TDF típico para un huerto familiar

### V.3 Tuberías de descarga con compuertas

Se trata de una tubería que tiene una serie de compuertas (orificios) que van perforadas de acuerdo con el ancho del surco, que para nuestro caso de estudio se colocaron las perforaciones a cada 75 cm con un diámetro de 2 cm. Esta tubería es de PVC hidráulico de 2 pulgadas para agua potable, con una longitud de 12 m acorde a la longitud de la cabecera de la parcela.

#### TUBO PERFORADO DE PVC HIDRÁULICO

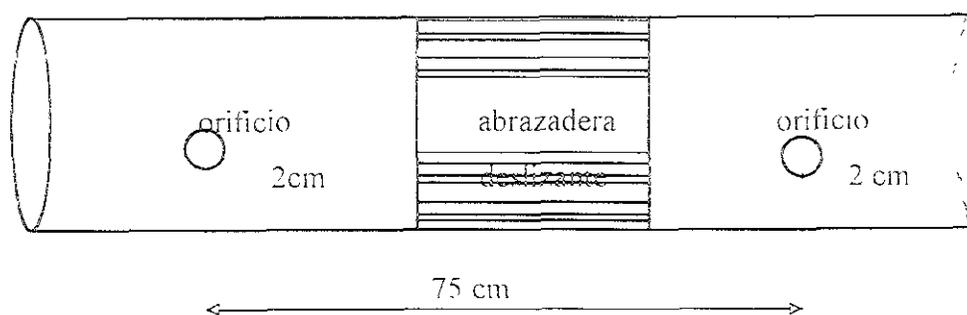


fig. V.3 Tubería con las perforaciones respectivas

Esta tubería lleva una serie de abrazaderas de un material plástico, más flexible que el Tubo de PVC hidráulico y de un diámetro un poco mayor de modo que quede un poco justo para un desplazamiento longitudinal y poder manipularlos de acuerdo a nuestras necesidades de riego, obstruyendo unos y dejando libre otros de acuerdo al calendario de riego y tipo de cultivo.

Esta tubería, tiene una obstrucción al final de ella y será colocada de modo horizontal siguiendo la pendiente de la cabecera de la parcela por regar.

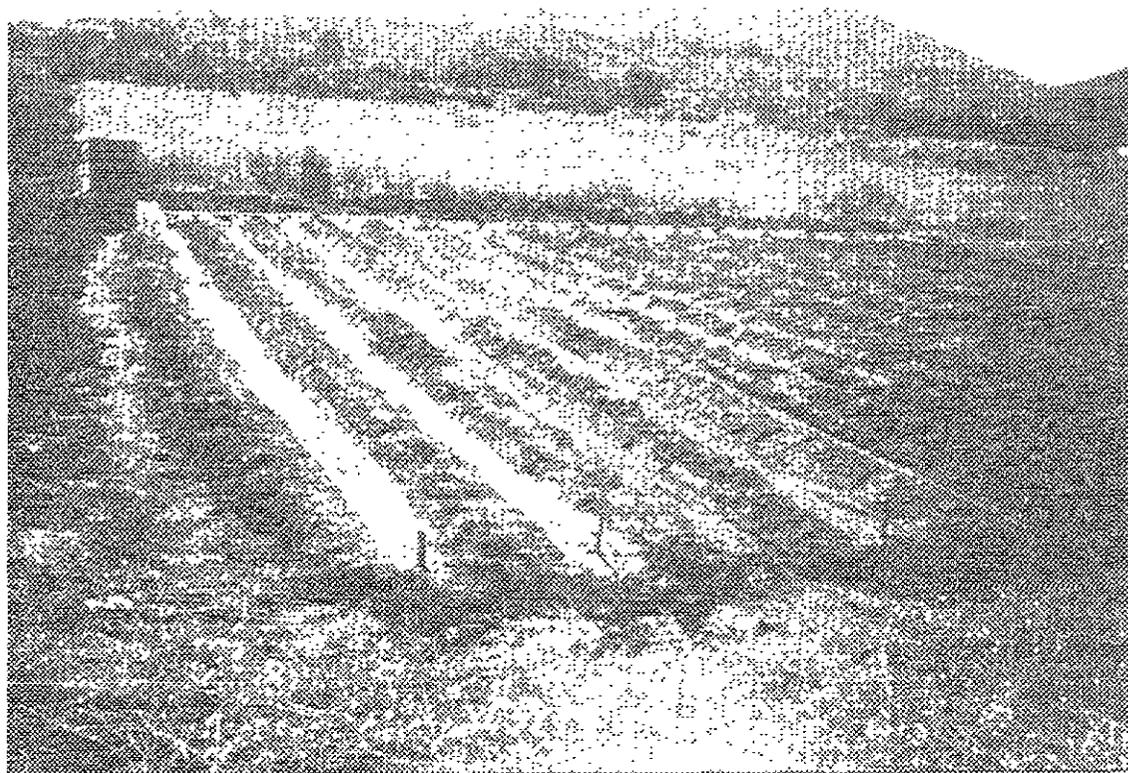


fig V.→ El TDF y tuberías perforadas descargando en un grupo de cuatro surcos.

Este tubo y sus perforaciones son de tal manera que deben tener un gasto de salida mayor que el gasto de entrada al tanque de almacenamiento, ya que el nivel de el agua dentro del tanque deberá ir bajando de tal modo que llegado a un tirante mínimo en el interior del tanque, el sistema de apertura y cierre cumplirá con su función de obturar el paso del agua al cerrarse por gravedad y succión, completándose un ciclo al terminar el vaciado del tanque del agua.

La forma tradicional del riego por gravedad en huertos familiares se realiza, por medio de regaderas o directamente con una manguera. Este proceso tiene el inconveniente de que hace muy ineficiente el riego, ocasionando grandes pérdidas por infiltración y la necesidad de nivelar las regadera y un requerimiento constante de mano de obra.

Para aplicar el riego por gravedad de manera eficiente, existe la necesidad de contar con un sistema de conducción a la parcela que limite las pérdidas, que aplique el gasto deseado y que sea fácil de operar.

En el país se está popularizando el uso de tuberías de compuertas para riego (PVC) el cual tiene características atractivas que los hacen aplicables al riego intermitente. Existen diferentes diámetros en el mercado. La equidistancia de los orificios al descargar el gasto pueden ser regulados manualmente, abriendo y cerrando las compuertas. Son de un material ligero comparado con otros como el aluminio y el acero. Debido a la flexibilidad del material permite un mejor acomodamiento y comportamiento a sobrepresiones momentáneas o cargas externas. Dicha flexibilidad y poco peso facilita su transporte, colocación y manejo.

Las compuertas deben tenderse a lo largo de la cabecera de la parcela, desde el tanque de almacenamiento hasta el extremo de la parcela. Al acoplar los tubos se debe tener cuidado de revisar el interior de cada una de ellos y asegurar que no hay obstrucciones para el paso del agua al funcionar el sistema. El acoplamiento de los tubos se debe hacer de tal manera que la unión se colocará de tal modo que, una vez sellado, no debe existir fugas. El tubo perforado trabaja a presión interna, teniendo un extremo cerrado conviene colocar un atraque para evitar que los empujes producidos en cada descarga muevan la tubería y se afecten los orificios. Cuando no se aplique el riego es conveniente cerrar las compuertas para evitar la entrada de tierra u otros objetos a animales se introduzcan en la tubería e interfieran en el funcionamiento del sistema, debiéndose abrir cuando se vaya a regar los surcos seleccionados. Para evitar la erosión por el impacto de la descarga, es conveniente colocar a lo largo de la cabecera poliestireno.

#### V.4 Sistema de abertura y cierre

Este dispositivo funciona hidráulicamente por el principio de flotación y un desequilibrio de fuerzas actuantes en el sistema el cual, está compuesto de las siguientes partes de tubo PVC sanitario de un diámetro común.

Dos codos a 90°

Dos tapones

Un tramo de tubo

Pegamento para PVC

El sistema adopta la forma de un bastón acoplando los codos con un tramo de tubo pegándolos, en una de los extremos de un codo se le coloca un tapon, mientras que en el

otro extremo se le inserta un tramo de tubo de una longitud producto de un cálculo y que denominamos  $L_1$ , dicho tubo también se le pondrá un tapón, sellados con el pegamento para tal fin

El codo intermedio, entre el codo exterior y el tubo, llevará una perforación un poco mayor de  $1/2''$ , en el cual se alojara un tubo de  $1/2''$  diámetro de modo que tenga y pueda adquirir un movimiento giratorio al ser motivado por el agua cuando dicho baston quede suspendido

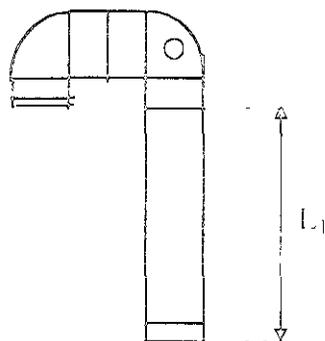


Fig. V.5 Esta es la forma que adopta el sistema de flotacion para el sistema de abertura y cierre.

Este sistema, junto con el tanque de almacenamiento se completa con una compuerta de fondo, similar a los de los tanques de descarga de un WC de casa habitación. Su funcionamiento se describe a continuación.

El método de riego está basado en el principio de descarga intermitente, o sea, que está diseñado para realizar, en forma automática y de manera cíclica, un número determinado de descargas hacia los surcos, las descargas o impulsos cíclicos de riego se producen por medio de automatización fluidica de llenado y vaciado del tanque de almacenamiento, llevandose a cabo dicho fenómeno de manera siguiente

Con el tanque de almacenamiento inicialmente vacío, y con el sistema de abertura y cierre en posición cerrada, se le dota un caudal de entrada para riego, con el cual el nivel dentro del tanque inicia su ascenso de manera gradual, hasta alcanzar un nivel máximo de apertura (ha), momento en el cual el flotador comienza a girar, motivado por un desequilibrio de fuerzas hidrostática que actúan en la parte inferior del bastón y el empuje de Arquímedes que actúa en su parte superior, hasta adoptar una posición vertical, para que por medio del desequilibrio de fuerzas para cuerpos sumergidos en un líquido en reposo,

actúen y se dispare de modo repentino levantando la tapa de fondo que esta unida con un cordón al codo externo del bastón.(cálculo del No. de ciclos por día)

Con esta acción se inicia el vaciado del tanque, descargando el caudal hacia los tubos perforados para dotar a los surcos e iniciar el riego

Tabla V I Cantidad mínima de agua que se requiere para regar cuatro surcos en un día [ 12]

Largo de la parcela en metros	Numero de tanques requeridos por día		
	Arenoso	Franco	Arcilloso
5	4	8	10
6	4	9	12
7	5	11	14
8	6	12	16
9	6	14	18
10	7	15	20
11	8	17	22
12	8	18	24
13	9	20	26
14	10	21	28
15	10	23	30

Debido a que el caudal de descarga  $Q_d$  es mayor que el caudal de entrada  $Q_e$  al tanque, el nivel del agua desciende de manera rápida hasta quedar prácticamente vacío, en ese momento por efecto de la succión y peso de la tapa de fondo, el sistema se cierra impidiendo el paso a la entrada de la tubería perforada, con esto se termina un ciclo, mismo que se repite las veces que sean necesarias para proporcionar la lámina de riego requerida en la parcela ( Nahun H. Garcia y Natividad Barrios, 1994)

## V.5 Sistema de bombeo fotovoltaico

A continuación se presenta el diseño práctico para un pequeño sistema de bombeo fotovoltaico para un aprovechamiento de bajo caudal para un sistema de riego por gravedad mediante automatización fluidica

El sitio del proyecto se llevo a cabo en la localidad de Jiutepec Morelos

Las condiciones ambientales de la zona están consideradas como cálida con una temperatura media anual de 26°C

## V.6 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico aplicado

### V.6.1 Cálculo de la carga dinámica total

Esta parte del cálculo toma en cuenta la distancia que debe recorrer el agua desde la fuente de abastecimiento hasta el sitio requerido más, el incremento de presión debido a la fricción y obstáculos en el sistema de conducción

La demanda de agua expresada como un volumen,  $V = 3 \text{ m}^3$

El cálculo de la pérdida por fricción se obtiene mediante la aplicación de la fórmula de Darcy – Weisbach [7].

$$H_f = f * \frac{LV}{D2g}$$

$L$  = longitud del conducto = 40 m

$D$  = diámetro del conducto = 3/4" = 0.01905 m

$V$  = velocidad media del líquido en conducto = 0.5 m/s

$\epsilon$  = espesor de la rugosidad del conducto en mm, para manguera = 0.0015 mm.

$\epsilon/D$  = Es la rugosidad relativa = 0.0015/19.05 = 0.0000787

El número de Reynolds =  $\frac{DV}{\nu} = 7.8 * E+3$

$\nu$  = viscosidad cinemática del agua a 15°C = 1.1462E-6 m<sup>2</sup>/s

De la gráfica de Moody, (ver figura V.6) con la rugosidad relativa y el número de Reynolds obtenemos una "f", que para nuestro caso resultó ser:  $f = 0.033$

$h_f = 0.33 * 40 * 0.5^2 / (0.01905 * 2 * 9.81) = 0.88 \text{ m}$

$CDT$  = carga estática +  $h_f = 2.0 + 0.88 = 2.88 \text{ m}$

### V.6.2 Cálculo de la eficiencia del sistema completo

En un sistema fotovoltaico su eficiencia está determinada por el producto de transferencia de energía, cableado, líneas de transmisión, la eficiencia del control o acondicionador de energía y la eficiencia de la bomba misma. Las regulaciones para las líneas de transmisión en un sistema fotovoltaico exigen mantener las pérdidas de energía a no más del 10% de la

energía total, es decir, que se recomiendan líneas de transmisión con una eficiencia del 90%. Los acondicionadores de energía presentan eficiencias no menores del 90% ya que se pretende mantener dispositivos de alta eficiencia. Para el caso de las bombas su eficiencia está especificada por el tipo de bomba, ver tabla II 5 pag 53.

Estos valores generalmente son proporcionados por el fabricante de los elementos que compondrán el arreglo fotovoltaico

Eficiencia del arreglo fotovoltaico = 0.90

Eficiencia de la bomba = 0.35%

Eficiencia del contralor de energía = 0.90

La eficiencia del sistema completo o total,  $\eta_{sc} = \eta_l \cdot \eta_c \cdot \eta_b = 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.35 = 0.2835$

### V.6.3 Cálculo de la potencia hidráulica

Este valor es importante de conocer puesto que con él podemos conocer la potencia eléctrica necesaria en un arreglo fotovoltaico, siendo sus unidades los Watts

La carga dinámica total, CDT en m = 2.88 m

Horas sol en horas pico en Watts/m<sup>2</sup>, donde 1 hora pico = 1 Watts – horas /m<sup>2</sup>

Potencia hidráulica = demanda \* CDT / ( 0.367\* Horas Sol) = 3\*2.88 / (0.367\*5) =4.708 Watts

Potencia del arreglo = potencia hidráulica / eficiencia del sistema = 4.708/0.2835 = 16.606 Watts

$$P_h (\text{Watts}) = \frac{CDT * Demanda(V)}{367 * Hsol} \quad (\text{Potencia hidráulica})$$

$$P_p = \frac{P_h}{\eta_{sc}} \quad (\text{Potencia pico}), \quad \eta_{sc} = \text{Eficiencia del sistema completo}$$

### V.6.4 Cálculo del número mínimo de módulos PV

Son la cantidad de módulos que tendrá el arreglo fotovoltaico

$$\text{Número mínimo de módulos} = P_{av} / P_{mp}$$

$P_{va}$  = potencia del arreglo fotovoltaico = 16.606 Watts. Como esta potencia es muy pequeña, se busco la disponibilidad en el mercado de módulos de baja potencia

encontrándose que hay módulos de 5, 10 y 21 Watts de silicio amorfo, de estos tres se eligió el de 21 Watts para determinar el número de módulos requeridos. La razón de elección fue el de evitar conexiones entre módulos.

$P_{mp} = \text{Capacidad del módulo} = 21 \text{ Watts. por lo tanto,}$

$\text{Numero de módulos} = P_{av} / P_{mp} = 16.606/21 = 0.79 = 1 \text{ módulo}$

## V.6.5 Selección de la bomba y determinación de su eficiencia

El decidir por una bomba con características determinadas, es, con un poco de experiencia tomando en cuenta la CDT, la posible demanda de agua y las horas pico del lugar.

Marca, Solarjack

Modelo = SDS-Q-128

Fig. IV.7 Cuadro de características de la bomba usada en nuestro ejemplo, Modelo SDS-Q-128

Tipo de bombeo = sumergible de diafragma

Voltaje de operación = 30 V

Eficiencia = 25%

**Configuración posible del arreglo**

Es la forma de cómo deben conectarse los módulos para su buen funcionamiento.

**Módulos en serie**

$\text{Número de módulos en serie} = V_{opB}/V_{opM}$

$V_{opB} = \text{voltaje de operación del sistema está dado por el voltaje de la bomba} = 30 \text{ v}$

$V_{opM} = \text{voltaje de operación del módulo} = 16.5 \text{ v}$

$\text{Número de módulos en serie} = \text{Voltaje de la bomba} / \text{voltaje de operación del módulo} = 30/16.5 = 1.81 = 2 \text{ módulo}$

**Módulos en paralelo**

$\text{Numero de módulos en paralelo} = \text{Número de módulos FV} / \text{Número de módulos en serie} = 1/2 = 0.5 = 1 \text{ módulo}$

**Tamaño resultante del arreglo**

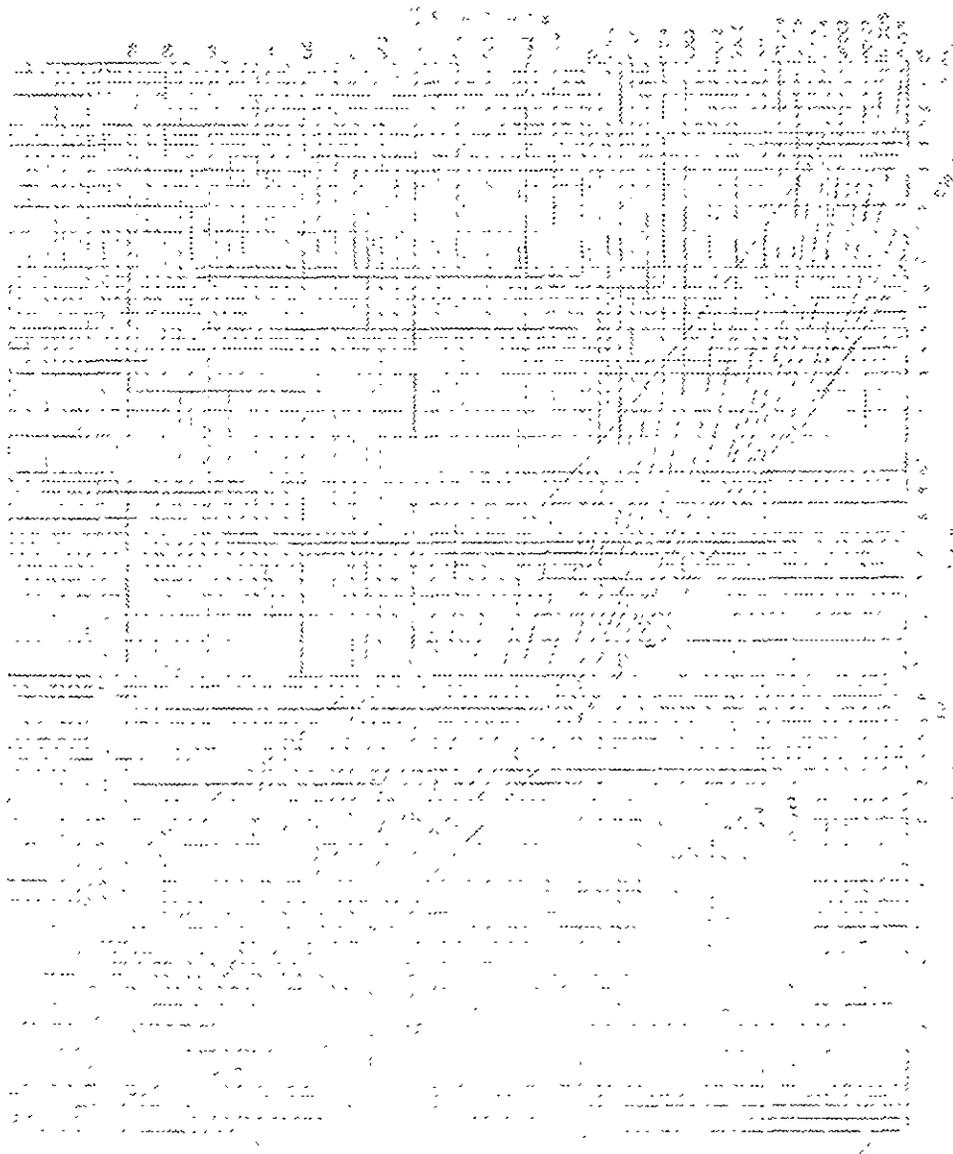
Es la dimensión final que debe tener el arreglo fotovoltaico para hacer funcionar de modo interactuante del sistema de bombeo fotovoltaico.

$\text{Potencia total (Watts)} = \text{numero de módulos en serie} * \text{numero de módulos en paralelo} * \text{potencia del módulo} = 2 * 1 * 21 = 42 \text{ Watts}$

Costo del arreglo fotovoltaico =  $42 \cdot 10 = 420 \text{ U S A} = 4200 \text{ M N}$  ( Tomando en cuenta el tipo de cambio actual 05-04-99 es de \$ 10 0 M N )

Observaciones En nuestro caso se utilizó una bomba tipo sumergible de diafragma marca Solarjack con un voltaje de operación de 30 volts El arreglo fotovoltaico utilizado está formado por módulos de 50 Watts que eran los que estaban disponibles. Se usaron dos de estos para proporcionar el voltaje de operación de la bomba Es importante aclarar que este sistema está sobredimensionado ya que el análisis arrojó un arreglo fotovoltaico de 42 Watts a 30 volts

*resistencia al flujo en conductos a presión*



Coeficiente de fricción para cualquier tipo y tamaño de tubo; diagrama inverso de Moody

Fig V 6 Diagrama de Moody para la determinación del coeficiente "f" para el cálculo de la pérdida por fricción [ 7 ]

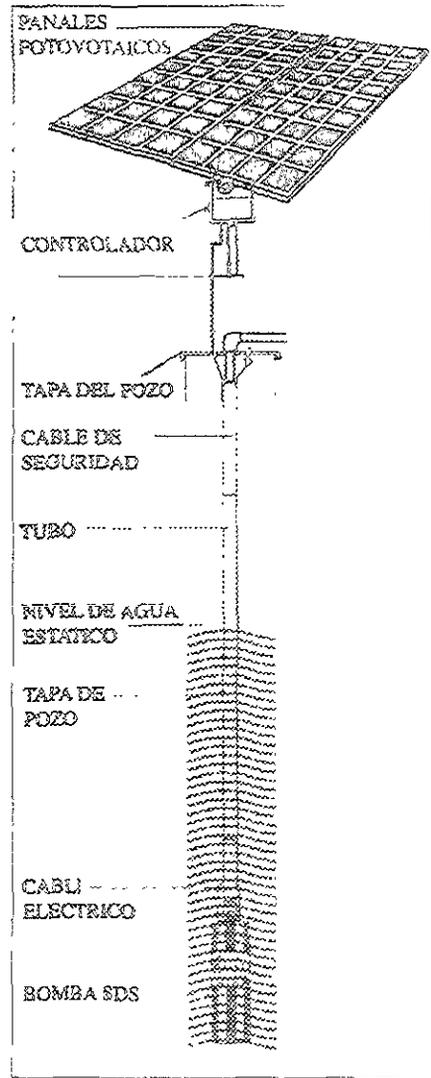
DUPLIX		SDS-D-128								
Número de Cables por Módulo		Rango de Flujo		Caudal		Caudal en un Módulo Pie		Caudal en un Inversor		
PIES	METROS	GPM	LPM	AMPS	GPD	LPD	GPD	LPD	GPD	LPD
0	0.0	2.05	7.70	1.63	738	2793	984	37	1230	4656
10	3.0	1.97	7.48	1.75	709	2684	946	3579	1182	4474
20	6.1	1.90	7.19	1.87	682	2589	912	3432	1140	4315
	9.1	1.83	6.93	1.99	655		878	3325	1098	4156
		1.78	6.74	2.12	641		854	3234	1058	4042
		1.73	6.53	2.24	632		830	3143	1018	3929
		1.69	6.40	2.37	608			3070	1014	3838
		1.65	6.23	2.51	594	2248	792	2998	990	3747
		1.62	6.13	2.64	583		778	2943		
80	24.4	1.60	6.08	2.78	578	2387	768	2897	980	3684
100	30.5	1.58	5.98	2.92	569	2323	758	2851	948	3598
120	35.4	1.57	5.94	3.05	565	2294	754	2843	942	3568
140	40.6	1.55	5.87	3.18	558	2272	744	2818	930	3530

DUPLIX		SDS-D-225								
Número de Cables por Módulo		Rango de Flujo		Caudal		Caudal en un Módulo Pie		Caudal en un Inversor		
PIES	METROS	GPM	LPM	AMPS	GPD	LPD	GPD	LPD	GPD	LPD
0	0.0	2.27	8.59	1.17	504	1867	678	189	222	2111
10	3.0	2.18	8.31	1.31	477	1741	640	2301	262	2684
20	6.1	2.10	8.06	1.45	452	1631	602	2412	214	2507
30	9.1	2.03	7.83	1.60	427	1533	563	2523	166	2356
40	12.2	1.97	7.61	1.75	403	1443	524	2634	118	2224
50	15.2	1.92	7.40	1.90	380	1360	485	2745	70	2107
60	18.3	1.88	7.20	2.05	358	1283	446	2856	22	2004
70	21.3	1.85	7.01	2.20	337	1212	407	2967		1914
80	24.4	1.83	6.83	2.35	317	1147	368	3078		1828
90	27.4	1.81	6.66	2.50	298	1087	329	3189		1746
100	30.5	1.79	6.50	2.65	280	1032	290	3300		1668
110	33.5	1.77	6.35	2.80	263	981	251	3411		1594
120	36.6	1.75	6.20	2.95	248	933	212	3522		1524
130	39.6	1.73	6.06	3.10	234	888	173	3633		1458
140	42.7	1.71	5.93	3.25	221	845	134	3744		1396
150	45.7	1.69	5.81	3.40	209	804	95	3855		1338
160	48.8	1.67	5.70	3.55	198	765	56	3966		1284
170	51.8	1.65	5.60	3.70	188	727	17	4077		1234
180	54.9	1.63	5.50	3.85	179	691		4188		1188
190	57.9	1.61	5.41	4.00	171	656		4300		1146
200	61.0	1.59	5.32	4.15	164	622		4412		1108
220	67.1	1.55	5.15	4.40	148	543		4634		1024
240	73.2	1.51	5.00	4.65	133	469		4856		944

QUAD		SDS-Q-128								
Número de Cables por Módulo		Rango de Flujo		Caudal		Caudal en un Módulo Pie		Caudal en un Inversor		
PIES	METROS	GPM	LPM	AMPS	GPD	LPD	GPD	LPD	GPD	LPD
0	0.0	3.70	14.00	1.6	1332	5042	1776	6722	2220	8403
		3.55	13.44	1.68	1278	4837	1704	6450		
		3.40	12.87	1.75	1224	4633	1632	6177		
		3.28	12.43	2.15	1181	4469	1574	5959		
				2.36		4306	1517	5741		
				2.59		4197	1478	5596		
60	18.3	3.00	11.30	2.85	1000	3808	1480	5490	1800	6818
70	21.3	2.90	10.98	3.15	944	3632	1400	5260	1740	6586
80	24.4	2.80	10.66	3.45	888	3456	1320	5030	1680	6354
90	27.4	2.70	10.34	3.75	832	3280	1240	4800	1620	6122
100	30.5	2.60	10.02	4.05	776	3104	1160	4570	1560	5890
110	33.5	2.50	9.70	4.35	720	2928	1080	4340	1500	5658
120	36.6	2.40	9.38	4.65	664	2752	1000	4110	1440	5426
130	39.6	2.30	9.06	4.95	608	2576	920	3880	1380	5194
140	42.7	2.20	8.74	5.25	552	2400	840	3650	1320	4962
150	45.7	2.10	8.42	5.55	496	2224	760	3420	1260	4730
160	48.8	2.00	8.10	5.85	440	2048	680	3190	1200	4498
170	51.8	1.90	7.78	6.15	384	1872	600	2960	1140	4266
180	54.9	1.80	7.46	6.45	328	1696	520	2730	1080	4034
190	57.9	1.70	7.14	6.75	272	1520	440	2500	1020	3802
200	61.0	1.60	6.82	7.05	216	1344	360	2270	960	3570

GPM = U.S. GALONES POR MINUTO      LPM = LITROS POR MINUTO      RECOMENDACION MINIMA PARA LOS TAMAÑOS DE LOS MODULOS SOLARES  
 GPD = U.S. GALONES POR DIA      LPD = LITROS POR DIA      Areas sin sombra. Los dos módulos de 48 o 53 vatios alimentados en serie.

Nota: Los requerimientos varían según la instalación del SD en la area, tambien en la cantidad de los módulos solares y en el voltaje del sistema.  
 Usando como fuente de poder los módulos solares está basado esta tabla.  
 Para un suministro de un módulo con batería de 12 voltios, o sistemas híbridos consulte a su distribuidor siguiente.  
 Areas con sombras con dos módulos solares de 60 o 70 vatios alimentados en serie.  
 Areas con sombras con dos módulos solares de 70 o 80 vatios alimentados en serie.



**PHOTOCOMM, INC.**  
 La Compañía de Energía sin Cables

R.O. Box 14230      Phone: 1.802.951.6330  
 Scottsdale, Arizona      Fax: 1.802.951.6329  
 85267-4230 USA      Toll Free: 1.800.544.6466

E-Mail: solar@goodnet.com  
 Web Site: www.photocomm.com

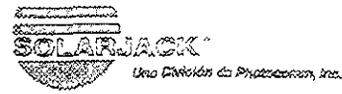


Fig V 7 Cuadro de características de la bomba usada en nuestro ejemplo. Modelo SDS-Q-128 [ 8 ]

## V.7 Operación del TDF – SB

Una vez instalado los módulos fotovoltaicos, se recomiendan que estos queden protegidos mediante una cerca de malla ciclónica con una altura tal que permanezcan seguros contra cualquier curioso que pueda moverlos de su posición correcta, modificando su orientación y por consecuencia tendrían menor incidencia solar con lo cual bajaría el rendimiento al producir los Watts necesarios para hacer funcionar el motor de la bomba, que bajaría la demanda de agua durante el día.

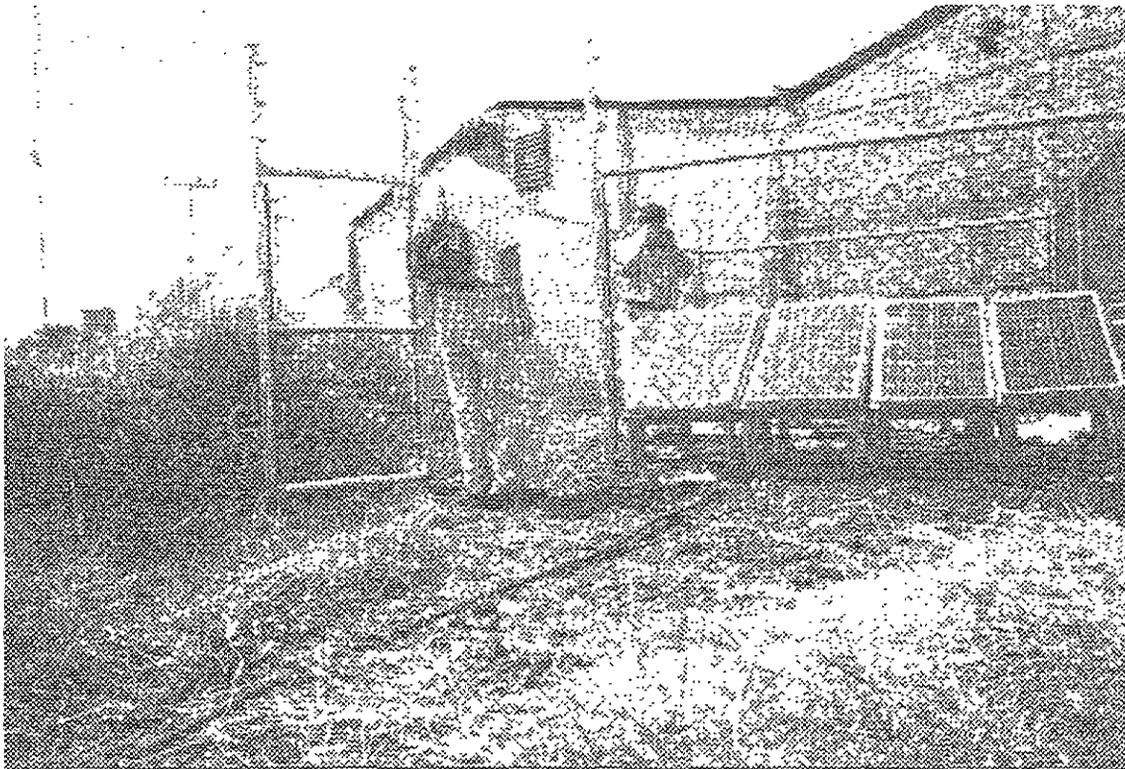


Fig V 8 Módulos solares con protección de malla-lac y estructura tubular

Los módulos, que en nuestro estudio son dos, una bomba de 1/3 HP, una manguera de  $\frac{3}{4}$  de pulgada de diámetro y 40 m de longitud.

Al canal se le construyó una compuerta fija metálica para obstruir el paso del agua formando un remanso con una profundidad aproximada de 1.10m. Esta profundidad es más que suficiente para sumergir la bomba para su operación.

La conducción del agua hasta el tanque de descarga de fondo TDF, como se mencionó está colocado en una esquina de la parcela, considerando este punto el más alto, se colocó el

tanque de almacenamiento donde se recibirá el gasto de entrada proveniente del canal bombeado mediante energía solar

Mediante un monitoreo y dependiendo de la estación del año, por ejemplo en un registro de agosto a medio verano, específicamente el 15 de Agosto de 1997, desde que aparece el sol en el horizonte y hasta que los módulos dejan de recibir los rayos solares, tiempo en el cual deja de funcionar el sistema. En el instante que los rayos inciden sobre los paneles adquieren una temperatura para empezar a generar y comenzar a funcionar la bomba

Se tomaron datos de gasto y con un radiómetro los niveles de insolación, graficándose dichos datos que nos mostraron el comportamiento del flujo y la variación de la radiación durante el día

Comenzando el monitoreo a las 8:00 AM, tomando lecturas a cada 30 minutos, se observó que a media mañana el flujo toma un valor constante aproximadamente desde 10:00 AM hasta las 16:00 PM, no así las lecturas del radiómetro que adquiere una forma parabólica, teniendo su máximo a medio día ( 12 00 hrs )

Como el gasto de entrada al tanque de almacenamiento está en función de la radiación solar y del funcionamiento de la bomba, y dar un número máximo de tanques llenos y efectuar el riego para satisfacer la demanda de agua al cultivo correspondiente, esto lo podemos explicar de la siguiente manera, un día nublado habrá poca luz solar y por consiguiente la extracción de agua será poca o nula

La planificación del riego se aplicará una vez concluido con los requisitos de disponibilidad del terreno, del agua para el riego y del diseño de la parcela, para esto se lleva a cabo los siguientes pasos. El número de surcos en que se debe dividir la parcela; el sistema está preparado para regar surcos con una separación de 75 cm entre uno y otro; razón por la cual, el número de surcos se obtiene al dividir la longitud de la cabecera entre la separación de surcos

Existen tablas que dan recomendaciones para un riego adecuado, dependiendo de la longitud de la parcela, tipo de suelo, número de surcos, longitud de los mismos y tipo de cultivo, se necesitarán un número determinado de tanques al día para satisfacer las necesidades de la planta para un buen rendimiento en la producción y número de cosechas por efectuar durante la vida productiva de la planta ( Nahum H. García, Tanque de

descarga de fondo IMTA. Natividad Barrios Domínguez ; Universidad Autónoma de Zacatecas) [2]

### Observaciones

Descripción del sistema: Características del sistema El tanque de descarga de fondo tiene las siguientes características.

a.- Realizar un aprovechamiento eficiente de corrientes pequeñas para riego, es decir caudales de 2 lps eventualmente pueden aplicarse también a caudales mayores

b.- Se pretende mejorar el aprovechamiento de corrientes derivadas de plantas de tratamiento, sistemas de bombeo, de arroyos y norias que han dejado de funcionar por azolvamiento o debido al poco gasto que presentan para su extracción y que pudieran aprovecharse en comunidades que cuentan con pequeñas parcelas para riego Este caso se presenta comúnmente en zonas áridas y semiáridas, poblaciones o rancherías situadas en zonas de poca comunicación y servicios donde pudiera aplicares y tecnificarse el sistema de riego a pequeña, mediana y gran escala

c.- Este sistema de riego por medio de automatización fluidica por gravedad puede ser competitivo con sistemas de riego presurizado en el aprovechamiento de pequeños gastos para riego, con operación y mantenimiento sencillo económico pudiendo decir que es casi nulo

d.- Las descargas que se llevan a cabo no requieren de el auxilio de otra fuente de energía externa o de otros sistemas complejos electrónicos, ya que la abertura y cierre está basado en base del principio de flotación

e.- En relación a los aspectos de economía y diseño, es de recomendarse la utilización de éstos tipos de sistemas para suministro de riego en surcos con una longitud no mayor de 200 m y cubrir una superficie de riego no mayor a 2 hectáreas.

f.- El tanque de almacenamiento debe ser alimentado con un gasto de preferencia constante, esta alimentación debe se mediante un sistema de bombeo o por gravedad en nuestro caso se llevo a cabo mediante un sistema fotovoltaico ( energía solar )

## Capítulo VI: Estudio experimental

### Introducción

El presente estudio expone de una manera breve la forma como se planteó y se desarrolla una pequeña parcela experimental para estimar de una forma general el sistema integral para el riego en huertos familiares, constituido por un TDF y un sistema de bombeo FV

### VI.1 Planeación de la parcela experimental

#### VI.1.1 Topografía y suelo

Para poder definir la posición de las cabeceras y por consiguiente la longitud de los surcos, en nuestro caso se definió una parcela de 144 m<sup>2</sup> ( 12 x 12 m)

Topográficamente el terreno debe cumplir con ciertos requisitos, tanto de nivelación como de orientación y dimensión

En el caso de éste estudio, debido a que el terreno presentaba irregularidades tanto de tipo de suelo como de superficie, se tubo la necesidad de hacer un despalme de 0.50 m aproximadamente, esto con el fin de que se le diera un cierto nivel, quitando parte del suelo arcilloso, escombros y materia orgánica (75%), ya que un estudio de exploración en el mes de febrero de 1997, mediante sondeos con pozos a cielo abierto, mostraron que la estratigrafía tenía que modificarse en la parte superficial, tal como se muestra en las gráficas de la figura VI 1

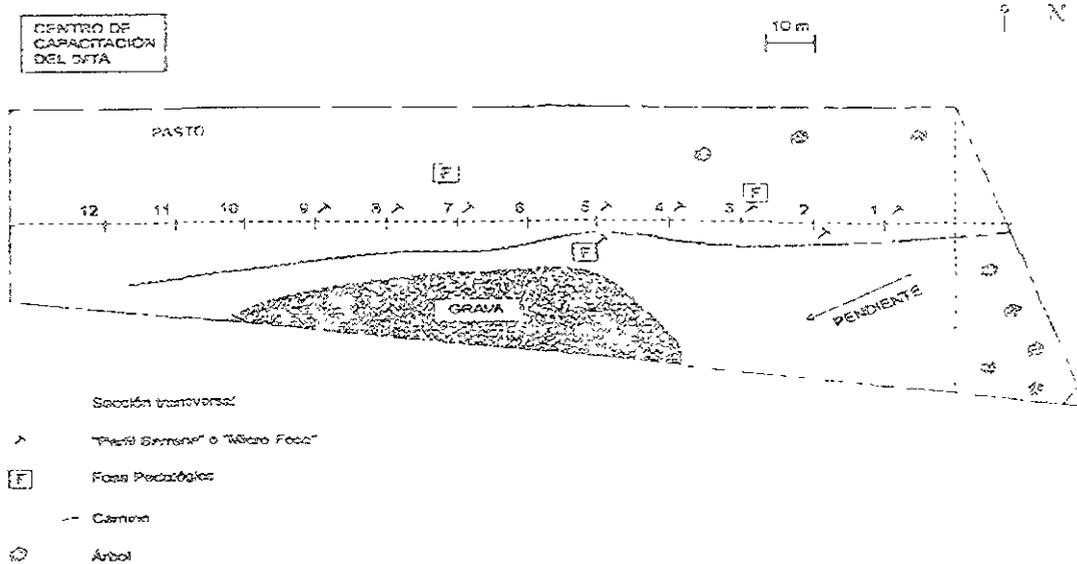


Figura 1. Ubicación de los sondeos (febrero 1997)

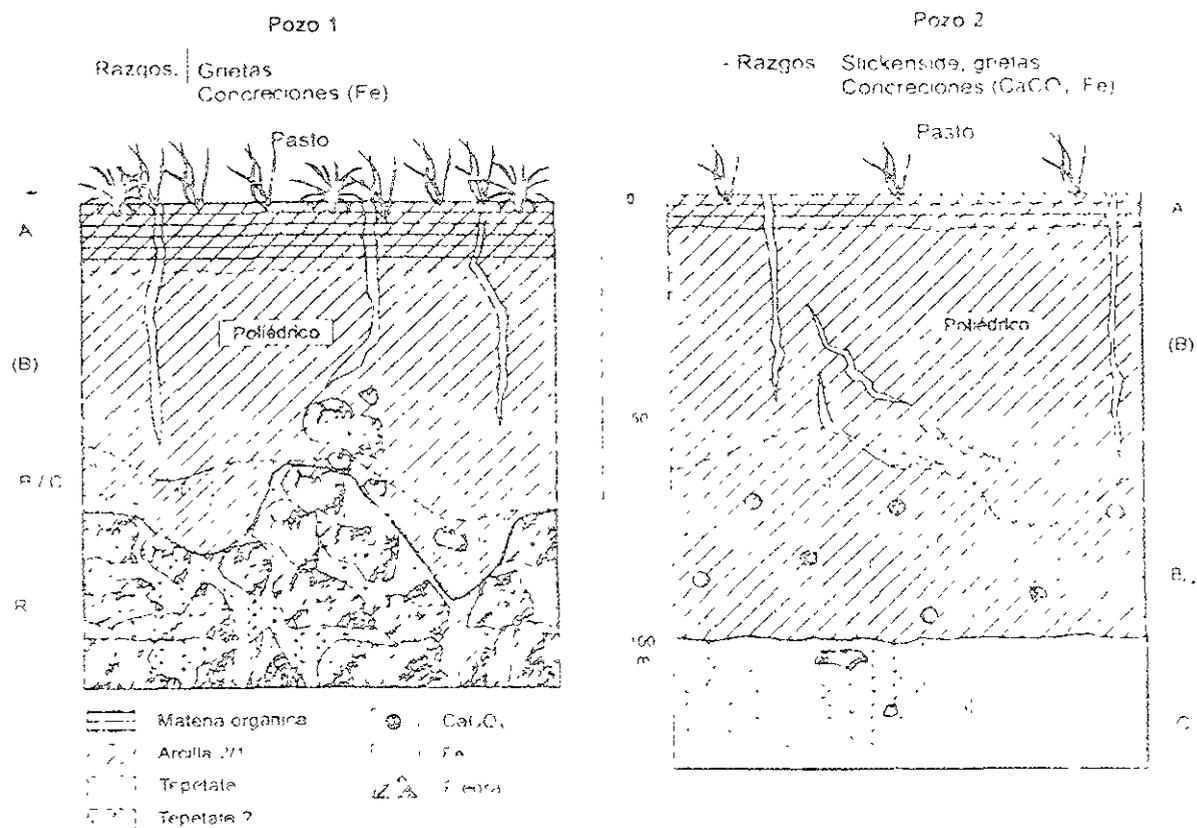


Figura 2

Fig. 1. Vista en sección transversal de los pozos 1 y 2

Una vez limpio el sitio se agregaron 6 camiones de 6 m<sup>3</sup> de suelo vegetal para mejorar la calidad del suelo desde el punto de vista agrícola. Posteriormente se preparó la tierra para darle forma a la cabecera y a los surcos de modo de que se le pudiera dar una pendiente, estos como ya hemos visto deben tener una pendiente suave (en un rango de 0.2% al 0.7% para evitar la erosión que pudiera provocar el agua una vez que se aplique el riego)

La orientación de los surcos fue de Oriente a Poniente con una separación de 0.75 m, una longitud de 12 m, y con una pendiente de 0.2%. Con esta distribución y considerando el tamaño de la parcela, el número de surcos resultó ser de 16.

Posteriormente, y en relación al sitio de ubicación de los paneles solares se procedió a limpiar la periferia del terreno ya que, este lugar deberá estar libre de árboles, matorrales y obstáculos que obstruyan el paso de la luz solar, de esta manera la energía será aprovechada de manera óptima durante el tiempo que dure el ciclo de la plantación en cuestión.

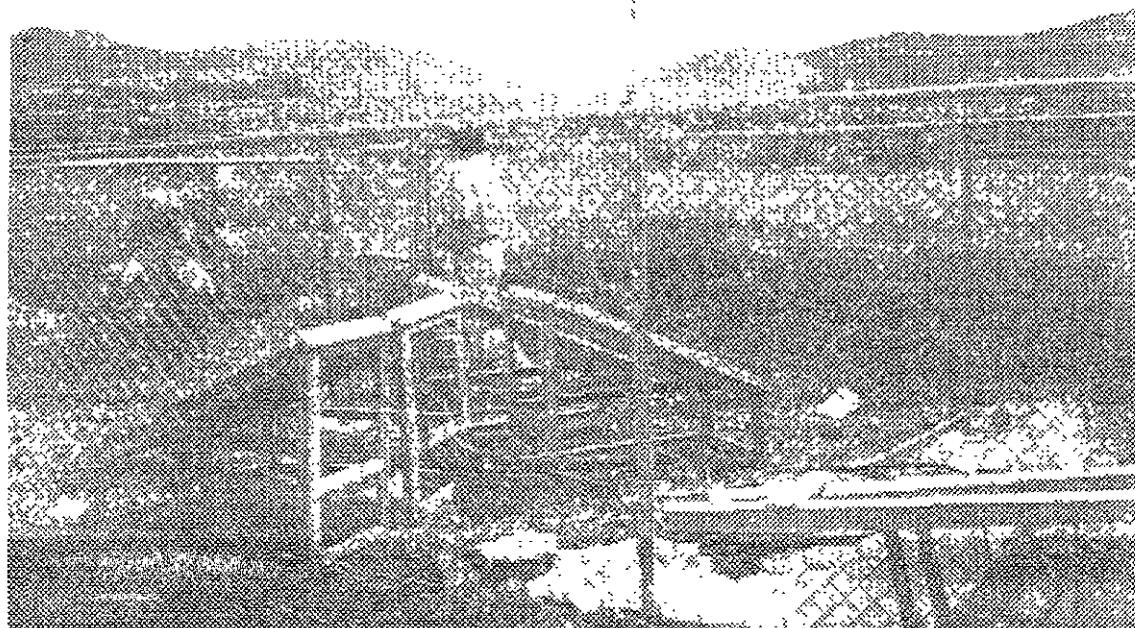


Fig. VI.2 Sistema de bombeo fotovoltaica

## VI.1.2 Posición del Tanque de Descargas de Fondo

El Tanque de Descarga de Fondo, con todas sus componentes, se ubicó de acuerdo a la orientación de la parcela, en la parte Nor-Este, siendo este el punto más alto de las cuatro esquinas

La descarga se efectúo de norte a sur, a lo largo de las cabeceras, para que de esta manera el riego se realizara de oriente a poniente, conforme a la pendiente del terreno previamente establecido

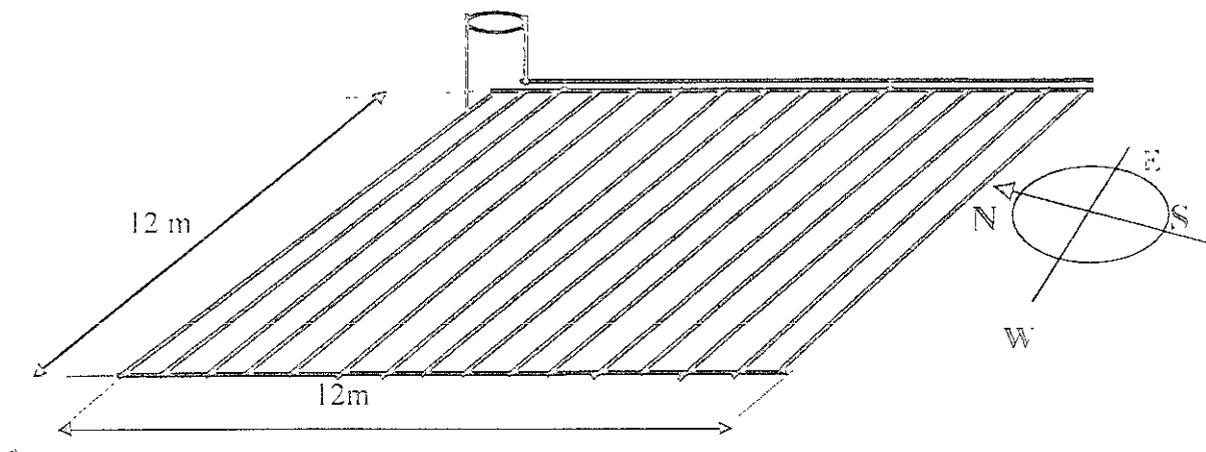


Fig VI 3 Dimensiones del huerto en estudio

## VI.1.3 Captación del agua

La fuente de abastecimiento de agua se tomó de un canal, localizado a 30 m del TDF, con un desnivel de 2.0 m al punto más alto de entrada al tanque (TDF). El gasto aproximado en dicho canal es de 2.5 lps. El agua no es potable, es producto de las descargas de los invernaderos y parcelas de riego localizadas aguas arriba del sitio de captación para nuestro estudio.

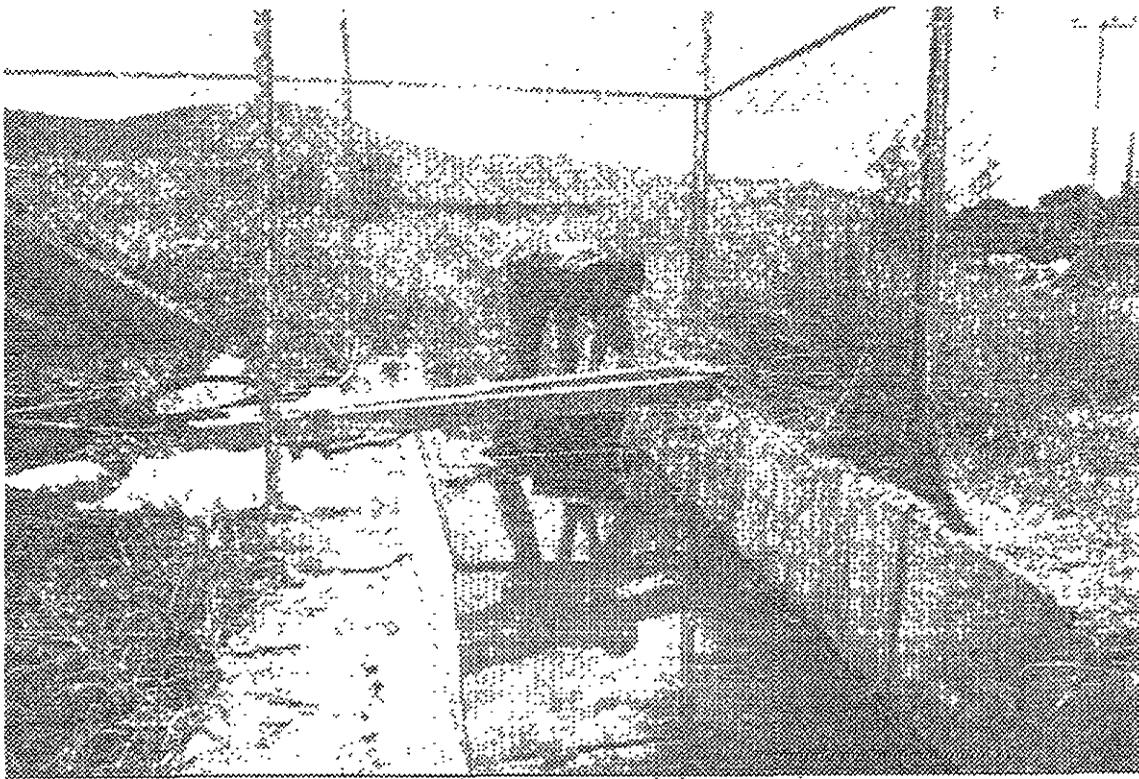


Fig VI.4 Localización del punto de bombero

Para darle sumergencia a la bomba, en el punto de captación se obstruyó el paso del agua en el canal mediante una compuerta metálica deslizante, originándose así, un remanso con una profundidad aproximadamente de 1.0 m junto a la compuerta. De esta manera se logra tener un nivel constante y se garantiza la extracción de agua sin que la bomba trabaje en seco al abatir el nivel del agua por efecto del bombeo durante un período determinado.

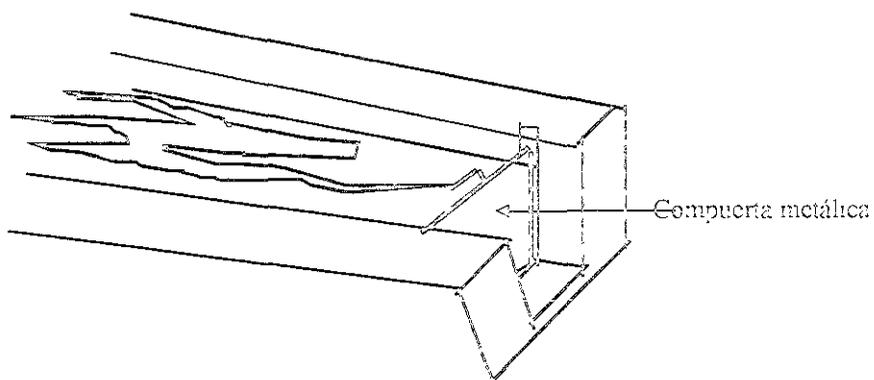


Fig VI.5 Vista transversal del canal en el punto de captación.

## VI.2 Sistema de bombeo

Los paneles solares se localizan a dos metros de la fuente de suministro de agua, en una área de 16 m<sup>2</sup> plenamente circundados con malia-lac, dicha protección se hizo para evitar que se pudiera ocasionar cualquier movimiento al sistema por parte de algún curioso. En éste sentido hay que recordar que el cambiar la orientación de los paneles, se altera su funcionamiento y disminuye la captación solar en la hora pico bajando considerablemente la eficiencia de la bomba en el momento de operar el conjunto.

Así pues el sistema consta de dos paneles en serie P/N15494, LA - 50 Watts, con un voltaje de operación de 16.9 VDC y una de corriente máxima de 3.02 amperes, 5 kg. de peso. Una bomba Solarjack de diafragma de 1/3 HP. Un inversor PCA 10-30 con un voltaje de entrada 12-40V a circuito abierto [8].

La operación del sistema de bombeo se realizó durante todo el día, entre los meses de Julio y agosto de 1997. Se tomaron 5.5 horas pico, de acuerdo a la zona en estudio de radiación solar, llevándose a cabo un monitoreo con radiómetro y un medidor registrando la intensidad de la radiación solar y los gastos por períodos de tiempo, estos registros fueron graficados mostrando el comportamiento de la radiación y el flujo extraído por la bomba, observándose que el bombeo es proporcional a la intensidad de la radiación solar, es decir que a más intensidad de luz solar mayor extracción de agua por bombeo, tal como se muestra en la siguiente gráfica, fig. VI.6. Bajo las condiciones de bombeo, la bomba produce 3500 lts/día, la cual está dentro de los valores aceptables para el cultivo de esta parcela.

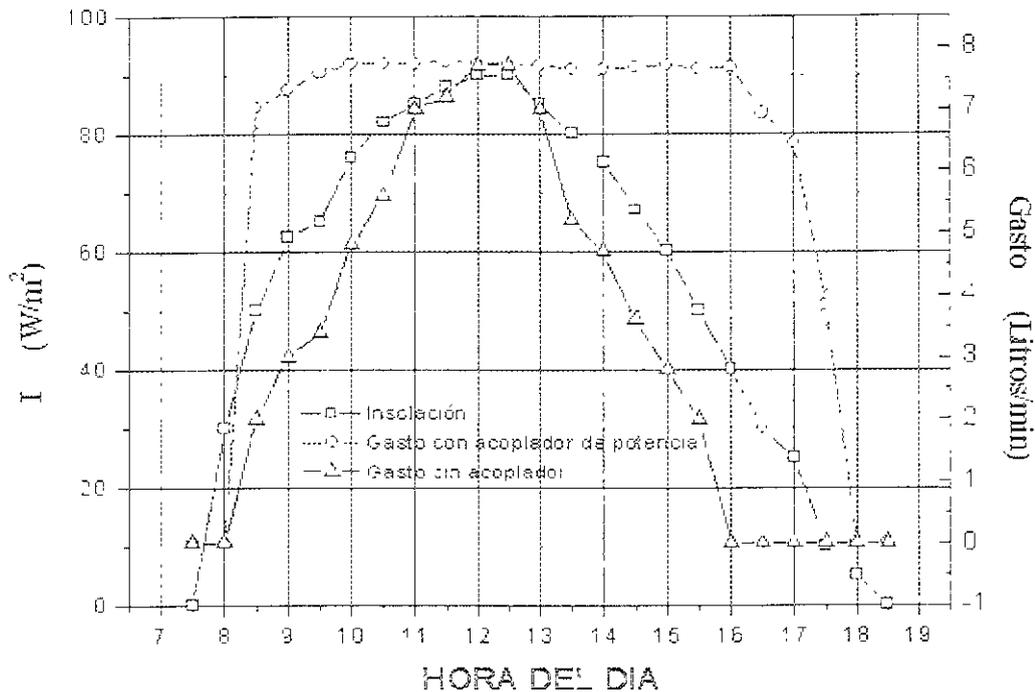


Fig VI 6 Gráfica gasto vs. tiempo e insolación con radiómetro, de un registro tomado el 15 de Agosto de 1997

Como se puede observar en la gráfica anterior, se presenta una demanda de agua mayor cuando se tiene un acoplador, alcanzando en un tiempo menor la eficiencia máxima de la bomba. Cuando no tiene el acoplador la demanda de bombeo de agua es menor retardando en mayor tiempo al alcanzar la eficiencia de la bomba.

### VI.2.1 El riego y tipo de cultivos

Esta actividad se realizó de acuerdo a un calendario de riego, la cantidad de agua que se debe aplicar depende del tipo de suelo, del cultivo y de la longitud de los surcos el cual se efectuó por grupos de surcos, de acuerdo a un estudio previamente diseñado.

Como se indicó con anterioridad, el TDF riega grupos de cuatro surcos simultáneamente, razón por la cual para un riego adecuado y evitar conflictos entre las fechas y las demandas de riego, es necesario que los cultivos que se siembren sean en un grupo de cuatro surcos del mismo tipo de cultivo. Por ejemplo, en un grupo de cuatro surcos se pueden plantar, un surco de alcachofa, dos de tomate y uno de espárrago, esto de acuerdo a la siguiente tabla

VI 1 y VI 2, donde la segunda tabla es una revisión de la factibilidad de riego en la manera en que se planificó

Tabla VI.1 Intervalo de tiempo entre un riego de auxilio y otro [12]

GRUPO DE CULTIVOS	Numero de días entre un riego De auxilio y otro (clima semi-árido)		
	Arenoso	Franco	Arcilloso
I alcachofa, espárrago, Tomate maíz trigo	5	8	10
II berenjena calabaza Cardo chícharo pepino Remolacha, zanahoria Haba soya, melon Nabo, frijol	4	6	8
III col coliflor, espinaca, Fresa, pimiento ejotes, Cacahuete, tabaco	3	4	6
IV Cebolla lechuga puerro papa	2	3	4

Tabla VI.2 Revisión de la planificación del riego [12]

GRUPO DE CULTIVOS	(A) numero de tanques disponibles por día =32			
	(B) grupo de surcos Cultivados	(C) tanques requeridos Por grupo	(D) días requeridos para Regar los grupos (BXC)/A	(E) intervalo De riego A respetar
I alcachofa espárrago Tomate maíz, trigo	2	15	0.94	8
II berenjena calabaza Cardo chícharo pepino Remolacha zanahoria Haba soya melon nabo Frijol	1	11	0.34	6
III col coliflor espinaca, Fresa pimiento ejotes Cacahuete tabaco	1	7	0.22	4
IV cebolla lechuga puerro, Papa				
			(F) suma de días Requeridos =1.5	(G) intervalo de riego min =4

### VI.3 Rendimientos obtenidos

Para un primer ciclo de cultivo, iniciando el sembrado en el mes de julio de 1997, se establecieron los siguientes cultivos

- Cuatro surcos de tomate verde
- Cuatro surcos de tomate rojo
- Ocho surcos de calabaza de mata.

Durante ésta etapa se iniciaron las pruebas del sistema de flotación de apertura y cierre, tanto en el laboratorio del IMTA como en el TDF situado en la parcela experimental. Se observó que el diseño generado a través del modelo matemático trabaja satisfactoriamente de acuerdo a nuestras expectativas. También se llevó a cabo el monitoreo de gastos de extracción, así como la medición de la insolación con un radiómetro desde el momento en que se empezaba a bombear hasta que dejaba de hacerlo, todo esto durante 85 horas aproximadamente, tiempo en el que los paneles captaban la luz solar.

En cuanto a los rendimientos de los cultivos sembrados obtuvimos los siguientes resultados

Tomate rojo, con un ciclo vegetativo de 4 meses De crecimiento indeterminado

Tomate verde, con un ciclo vegetativo de 4.5 meses De crecimiento indeterminado

Calabaza de mata, con un ciclo vegetativo de 3.5 meses

Considerando un ciclo vegetativo desde la siembra hasta la cosecha del producto

### RESULTADOS DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN EL HUERTO FAMILIAR DEL IMTA. (CICLO PRIMAVERA - VERANO, 1998)

Tabla VI.3 Datos de producción en el huerto familiar experimental

Cultivo	Número de Surcos	Separación Entre surcos M	Superficie Cultivada m <sup>2</sup>	Producción kg	Rendimiento Tn/Ha
Calabacita	7	0.75	63	251.5	39.92
Tomate	4	0.75	36	104.2	28.94
Jitomate	1	0.75	36	179.0	49.72

Estos resultados superan la media de producción local bajo condiciones de producción a gran escala y son ligeramente inferiores como se ve a las producciones medias bajo invernadero. Bajo invernadero de acuerdo con datos proporcionados en sitio, fueron los siguientes productos cultivados en Temixco Morelos.

Tabla VI.4 Datos de producción en invernadero, en Temixco Morelos

Cultivo	Producción. Kg./m <sup>2</sup>	Rendimiento Tn/Ha
Jitomate	4.5 – 5.0	47.7
Tomate	2.8 – 3.2	30.0

## VI.4 Experiencias asimiladas

Una de las principales observaciones en este estudio es que el funcionamiento del sistema integral del TDF y SB-FV es confiable, ya que no necesita de un operador que intervenga directamente. El riego se realiza de una manera automática.

En cuanto al volumen de agua bombeada, en ocasiones el número de tanques requeridos son pocos y el bombeo no se aprovecha al máximo pudiendo elevar el agua a una altura mayor, cabe la posibilidad de planear un depósito con una altura mayor y poder almacenar el agua para los mismos uso u otros y que por gravedad se utilice la carga hidráulica disponible.

Al tanque se le puede adaptar un mecanismo para que al mismo tiempo funcione como fertirrigador, minimizando tiempos y horas hombre en la aplicación de fertilizantes que en un momento dado pudiera no ser muy uniforme su aplicación. Cuando el tanque tiene esta función es probable que no toda el agua se utilice, puesto que una vez saturado el suelo existirá un excedente que se derramará al final de los surcos, esta agua como lleva disueltos los fertilizantes pudiera en un momento dado captarse en un depósito y volver a reutilizarla.

Es de suma importancia mantener el huerto libre de maleza, ya que ésta, impide el buen funcionamiento hidráulico de los surcos en el momento de efectuar el riego, siendo esencial darle la pendiente que evite la erosión de los surcos.

En cuanto a los cultivos, es posible escalar el huerto a una parcela de mayor área, así como el sistema integral, dado a que en un huerto se puede cultivar una gran variedad se pueden obtener varias cosechas al año.

## Referencias

- 1.- Dr Nahum Hamed García Villanueva , M. en I Benjamín Lara Ledesma ,  
Estudio hidráulico de un tanque de descarga de fondo  
Proyecto HC - 9505 . Parte I Coordinación de Tecnología Hidráulica  
Subcoordinación de hidráulica Rural y Urbana  
Diciembre 1995
- 2.- Dr Nahum Hamed García Villanueva,  
M en I Natividad Barrios Domínguez y M en I Carlos Patiño Gómez  
Tanque de descarga de fondo.  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Universidad Autónoma de Zacatecas
- 3.- CIE - UNAM Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con  
energía Renovable Vol 1, Mayo, 1998
- 4.- Michel G Thomas La Opción Solar Para el Bombeo de Agua  
Centro e apoyo al diseño de sistemas fotovoltaicos  
Design Assistance Center Sandia National Laboratories Albuquerque,  
- Nuevo México, U S A
- 5.- Sandia National Laboratories, SNL Southwest Technology development  
Institute, Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía  
renovable, Vol 1 Mayo / 1998
- 6.- Sandia National Laboratories - FIRCO  
Reunión de intercambio de experiencias del programa de uso de energía alterna,  
"Aplicaciones de la energía renovable en el campo"  
Cuernavaca Mor México - p 1 - 35 - 26 de Febrero de 1998  
Reunión de Intercambio de Experiencias del Programa de Uso de Energía Alterna Entre los Laboratorios  
Nacionales Sandia y el FIRCO, 26 de Febrero de 1998.
- 7 - Gilberto Sotelo Avila Hidráulica general volumen I, Fundamentos Ed Limusa 1993
- 8 - Manual del fabricante
- 9 -Dzul, G O . Equipos para la medición de sistemas de riego por gravedad, DEPFI, 1998 Tests de  
Maestría

- 10.- Dally, J. y Harleman, D. Dinámica de los fluidos Con aplicación en ingeniería. Editorial Trillas México. 1981. Capítulo 15 : Cuerpos inmersos. Arrastre y sustentación.
- 11.- Stelson, Y. H. y F. T. Mavis. "Virtual Mass and Acceleration in Fluids ". Trans ASCE. 122 (1957). pp. 518- 525
- 12.- Dr. Nahum H. García Villanueva, Natividad Barrios Domínguez y Carlos Patiño Góme Tanque de Descarga de Fondo, Una alternativa para la modernización del riego en huertos familiares. Ingeniería Civil. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1998. Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ).
- 13.- García V. Nahum H. Patiño Gómez Carlos Barrios Domínguez Natividad. Manual de construcción de Tanques de descarga de fondo. 1998
- 14.- Photovoltaic Design Assistance Center, Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nuevo México, Southwest Technology Development Institute Las Cruces, Nuevo México. EE.UU  
Manual de prácticas Recomendadas para Proyectos de Sistemas fotovoltaicos Independientes.  
New Mexico, U. S. A p. 281-332 Abril 1988
- 15.- XX Semana Nacional de Energía Solar Jalapa Ver. Curso de actualización Aplicaciones de Sistemas fotovoltaicos Universidad Veracruzana - Asociación Nacional de Energía Solar Septiembre - Octubre de 1996.
- 16.- Roy Barlow, Bernard Mc Neils and Anthony Derrick Solar Pumping  
An Introduction and Update on the Technology, Performance, Cost and Economics.  
United States of America . First January 1993
- 17.- Photovoltaic Design Assistance Center, Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nuevo México Southwest Technology Development Institute Las Cruces, Nuevo México. EE UU  
Manual de prácticas Recomendadas para Proyectos de Sistemas fotovoltaicos Independientes  
New Mexico, U. S. A p 281-332 Abril 1988
- 18.- SOLARJACK Solar Pumping Systems Water Pumping Selection Guide.  
A division of Photocomm, Inc The Wireless Power Company
- 19.- CONDI MEX Energía Solar Electricidad del sol : Manufactura, Asistencia Técnica, Ventas y Mantenimiento Estado de México México

- 20.- GRUNDFOS. Solar Pumping System, Guide. Solartronic SA 1500 DC/ AC Inverter
- 21.- SOLAREX. Solarex Power Modules, Guide. U.S.A.
- 22.- UNI - SOLAR. United Solar System. Solar Modules. Guide. U.S.A
- 23.- Alan Wyatt. Research Triangle Institute, Research Triangle Park, NC, USA  
 "Seminario sobre el bombeo de agua mediante energía solar y eólica Ciudad de México, México.  
 18 - 20 Mayo, 1992
- 24.- Ing Cesar Herrera Toledo. CNA "Recursos Hídricos en México" Revista Ingeniería Civil  
 CICM No 349, p. 41. 1998
- 25.- Lic Roberto Llanas "Chinampas ; una ingeniería desconocida" Revista Ingeniería Civil, CICM  
 No 284, p. 39. 1992
- 26.- Arq Leonardo Icaza Lomeli "Arquitectura Hidráulica en la Nueva España".  
 Revista Ingeniería Civil, CICM No.300 p 40, No. 301 Pag. 57, No. 302 pag. 30. 1994
- 27.-Alejandro Nolla Ortega y Eduardo Mondragón Toledano, CFE, Unidad de Nuevas Fuentes de  
 Energía "Energías Alternas ; El Poder del Sol", Revista Ingeniería Civil, CICM, No.313 p. 3, 1995
- 28.- Suplemento de Medio Ambiente para América Latina y Caribe. Tierramérica "Comida para  
 Todos" Periódico, "Reforma", Año 2, Número 3, P. 7, Octubre 1996
- 29 - Ven Te Chow. Hidráulica de los canales abiertos. Ed Diana, 1993
- 30 -Ing Jaime Sancho y Servera, El Agua: Propuesta de estrategia hacia el siglo XXI.  
 VIII Congreso Nacional de Hidráulica, Septiembre, 1994. Puebla, Puebla
- 31.-Mundo Molina Martín, Mireles Víctor, Martínez Austria Polioptro, Sistema Computacional para la  
 Distribución Eficiente del Agua en Distritos de Riego, SICODE v2.1 Ingeniería Hidráulica en  
 México, Vol. XII, Núm. 2, Pag. 29-36. Época, Mayo - Agosto 1997
- 32.- Angeles, H J. Desarrollo y Evaluación de un Modelo de Onda Cinemática  
 Aplicado al Riego en Melgas y su Comparación con el Modelo Hidrológico,  
 Mexico, Tesis de Maestría, Colegio de posgraduados, 1992