

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

ESTUDIO DE PERSPECTIVAS DEL USO DE CELDAS  
FOTOVOLTAICAS EN ZONAS RURALES DEL ECUADOR

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD  
ESPECIALIZACION POTENCIA

PRESENTADA POR:

FREDDY X. MOYANO CACERES

GUAYAQUIL - ECUADOR

1988

## A G R A D E C I M I E N T O

AI ING JORGE FLORES MACIAS, DIRECTOR DE TESIS  
QUIEN CON LA PARTICIPACION DE SUS CONOCIMIENTOS;  
ASI COMO DE SUS CRITICAS Y SUGESTIONES Y  
LA PACIENCIA PARA CON EL DESARROLLO DE ESTA,  
HAN SIDO DE GRAN VALOR PARA LA REALIZACION DE  
ESTE TRABAJO.

## D E D I C A T O R I A

### A MIS PADRES

Porque orientaron, encaminaron y formaron mi vida con cariño y con indestructibles bases morales y porque me dieron la herencia más valiosa que es la educación.

### A MIS HERMANOS

Porque sus ejemplos me sirvieron de luz y guía.

### A MI ESPOSA

Le dedico este sencillo trabajo porque sin su estímulo, sin su compañía no hubiera sido posible realizarlo.

### A MIS HIJOS

Porque todo cuanto emprendo en la vida, siempre lo hago pensando en sus nombres.

DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTAS EN ESTA TESIS; ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL:

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL).



FREDDY XAVIER MOYANO CACERES

*C. Villafuerte*

Ing. Carlos Villafuerte  
SUBDECANO DE LA FIE

*Jorge Flores Ríos*

Ing. Jorge Flores  
DIRECTOR DE TESIS

*Norman Chotong*

Ing. Norman Chotong  
MIEMBRO SUPLENTE DEL TRIBUNAL

*Carlos Jordan*

Ing. Carlos Jordan  
MIEMBRO SUPLENTE DEL TRIBUNAL

## RESUMEN

El presente trabajo realiza un análisis de posibilidades de uso de paneles fotovoltaicos para la electrificación de viviendas en zonas rurales para lo cual se muestran investigaciones que se constituyen necesarias para considerar esta alternativa y que son:

- a) Situación solar de nuestro país, considerando radiación solar disponible.
- b) Valores óptimos de inclinación de paneles para mayor obtención de energía eléctrica convertida.
- c) Necesidades eléctricas de viviendas básicas rurales.
- d) Estudio económico de esta alternativa fotovoltaica.

En el primer capítulo se menciona la importancia creciente que sucede en esta época con la radiación solar como nueva fuente de energía; la forma como incide esta radiación en nuestra superficie y como interviene en la conversión a energía eléctrica.

El segundo capítulo muestra un estudio estadístico de los valores de radiación global diaria en diferentes zonas del país, lo cual es importante para conocer las mejores regiones en que la cantidad obtenida de energía eléctrica sea mayor, así como los periodos mensuales más apropiados para dicha conversión.

En el tercer capítulo se estudia la célula solar fotovoltaica, forma de funcionamiento en la conversión de energía solar a energía eléctrica y los componentes de un sistema solar fotovoltaico, así como la conveniencia y controles a tomar con cada uno de ellos.

También se muestra un programa para computadores, en el cual en base a los valores conocidos de radiación solar permite escoger mejores ángulos de inclinación del panel para una mayor recepción de la radiación solar (ejemplo desarrollado).

En el capítulo cuatro se señalan posibles zonas no alimentadas con energía eléctrica en el litoral Ecuatoriano determinadas en base al conocimiento de las áreas alimentadas por el Sistema Nacional Interconectado, de igual manera se muestran algunos diseños fotovoltaicos para viviendas rurales con consumos de carga diferentes.

En el quinto capítulo se realiza un estudio económico de la alternativa fotovoltaica frente a la alternativa convencional de alimentación por red, desde el punto de vista de rentabilidad y economía, así como la conveniencia de esta; también se menciona el creciente mercado que en otras partes del mundo han permitido seleccionar como más rentable esta alternativa fotovoltaica.

En el sexto capítulo se muestra resultados de experiencia práctica realizada con paneles solares fotovoltaicos para determinar las consi-

deraciones que influyen en el número seleccionado de baterías que almacenarán energía eléctrica convertida para un diseño fotovoltaico donde el consumo de carga es frecuente y no frecuente (consumo continuo o no continuo).



## INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN.....	6
INDICE GENERAL.....	9
INDICE DE FIGURAS.....	13
INDICE DE TABLAS.....	17
INTRODUCCION.....	18
 CAPITULO 1	
1.0 La radiacion Solar.....	22
1.1. Energia solar :Una respuesta razonable como fuente de energia	22
1.2 Modos de tratamiento de la radiación solar.....	26
1.3 Radiación solar sobre la superficie terrestre.....	28
1.4 Radiación extraterrestre.....	30
1.5 Atenuacion y dispersion de la radiacion atmosferica.....	31
1.5.1 Componente directa.....	37
1.5.2 Componente difusa.....	39
1.6 El albedo de la superficie terrestre.....	39
1.7 Importancia de la radiacion solar en la obtencion de energia electrica.....	40
 CAPITULO 2	
2.0 Tratamiento estadístico de la radiación solar global en el litoral ecuatoriano.....	44
2.1 Estudio del potencial solar en el Ecuador con énfasis en el li- toral ecuatoriano según el Instituto Nacional de Energia....	45
2.1.1. Estado actual del conocimiento del potencial solar..	46

2.1.2.	Radiación solar global en el litoral Ecuatoriano....	48
2.1.3.	Heliofanía.....	60
2.1.4.	interpretación de los resultados.....	62
<b>CAPITULO 3</b>		
3.0	La célula solar fotovoltaica en la obtención de energía eléctrica.....	65
3.1	Estudio de la célula solar y conocimiento del proceso de conversión directa de energía solar en energía eléctrica (problemas y realidades).....	66
3.1.1	Concentración fotovoltaica: Teoría y tecnología para electrificación solar.....	87
3.2	La célula solar como generador.....	92
3.2.1	Módulos fotovoltaicos.....	95
3.2.2	Array fotovoltaico.....	96
3.3	Componentes básicos de un generador fotovoltaico autónomo....	96
3.3.1	Panel fotovoltaico: Generalidades.....	99
3.3.2	Reguladores.....	104
3.3.3	Acumulación de energía eléctrica fotovoltaicos, acumuladores electroquímicos: recomendaciones.....	110
3.3.4	Convertidores DC -AC.....	124
3.3.5	Cargas eléctricas.....	125
3.4	Condiciones necesarias para un buen aprovechamiento de las células fotovoltaicas en la obtención de energía eléctrica..	128
3.4.1	Generalidades.....	129
3.4.2	Características V -I ideal de un módulo.....	129

- F. Numero de paneles.
- G. Eleccion de angulo de inclinacion del panel.
- H. Determinacion del tamaño de la batería que almacenará la energía recolectada por la celda

## CAPITULO 5

5.0 Analisis del costo de un sistema fotovoltaico.....	201
5.1 Elementos que intervienen en el análisis del costo y rentabilidad.....	201
5.2 Criterios economicos para determinar la rentabilidad de una alternativa energética.....	204
5.3 Analisis prospectivo para la producción de energía fotovoltaica (recalcar usos a corto, mediano y largo plazo e importancia futura como alternativa de electrificación primaria).....	207
5.4 Estudio económico para viviendas unifamiliares (autónomas) con instalaciones fotovoltaicas (ejemplos con datos recogidos en zonas rurales).....	213

## CAPITULO 6

6.0 Resultados de experiencia práctica realizada en ESPII.....	222
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	233
ANEXO.....	237

## INTRODUCCION

La reciente demanda de energía en todo el mundo ha suscitado un gran interés hacia el estudio de nuevas fuentes de energía; de entre todas las que se conocen, la energía solar es la más prometedora. Las bases científicas de la utilización de la energía solar por el hombre fueron establecidas hace ya bastantes años, pero su utilización a gran escala no fue tecnológicamente viable hasta hace muy poco. No obstante, el congreso internacional "el sol al servicio de la humanidad" (UNESCO, Julio de 1973) concentro la atención en los recientes avances técnicos de la energía solar, que tienen como perspectiva el abastecimiento de una manera eficaz y económica de una parte importante de la energía que el hombre necesitará antes de finales de siglo, aplicaciones a pequeña escala ya están funcionando y ganando constantemente nuevos mercados.

Junto a los progresos científicos y tecnológicos de estos últimos años, que han acelerado el uso de la energía solar a gran escala, se ha experimentado un cambio en los aspectos económicos de producción de energía mediante procesos convencionales y un mayor conocimiento de sus efectos sobre el ambiente. Además existe una necesidad social, especialmente en los países en desarrollo, de utilizar técnicas que permitan descentralizar la producción de energía en pequeñas y dispersas comunidades; la energía solar puede garantizar sin problemas la producción a pequeña escala en zonas apartadas, y se pueden ver bon-

bas solares trabajando con eficacia en muchos países en vías de desarrollo.

La conferencia general de la UNESCO, en su decimoctava sesión, aconsejó que se apoyara una acción internacional en el campo de los problemas científicos fundamentales de la energía, su producción, conversión y transporte, dando énfasis a la localización de zonas donde se necesitan las investigaciones científicas para generar y utilizar energía con más rendimiento a partir de fuentes existentes y hacer factible la producción de la misma a gran escala desde fuentes renovables y limpias, tales como la fusión nuclear, energía solar, viento, marea y fuentes geotérmicas. Siguiendo esta recomendación se decidió repasar métodos modernos y posibilidades prácticas de varias tecnologías para el uso de la energía solar.

La transformación de la energía solar a gran escala parece el sueño de un ecólogo, incompatible con las necesidades de la ecología moderna. Hasta hace muy poco el hombre confiaba totalmente en el sol para satisfacer sus necesidades de energía. En el siglo XIX como resultado del gran crecimiento de la industria en el oeste de Europa y en los EEUU, la extracción de combustibles fósiles se convirtió en algo muy importante. Hoy el hombre ve claramente el peligro de la polución y el límite de las actuales fuentes de energía. La llamada crisis de energía de 1973-1974 aplanó la curva de crecimiento de la economía en varios países, pero la fiebre del petróleo sólo disminuyó, no fue

carada. No cabe duda que este petroleo será caro y escaso hasta fin de siglo; hecho que loqiramente se debería aprovechar en este periodo de tiempo para desarrollar sistemas de energia solar a un nivel económico que puedan hacer frente a la demanda de energia del mundo.

La energia solar no se encuentra lista para su uso en la naturaleza. Para obtener esta nueva forma de energia, el hombre debio inventar y diseñar elementos de conversión adecuados, así pues en lo referente a la electricidad la situación es diferente del calentamiento solar o fotosíntesis. La radiación del sol es transformada en calor, si el agua está disponible, en materia orgánica mediante procesos que la misma naturaleza ofrece. El hombre adapta el calor a sus necesidades: Esto es particularmente cierto en el alojamiento; desde que el hombre empezó a edificar casas, ha aprovechado habilmente el efecto del calentamiento del sol para alcanzar una temperatura confortable en su hogar.

Durante el periodo industrial, el potencial de la energia solar ha sido enormemente descuidado en la arquitectura. El reciente interés por el desarrollo de casas solares es el repercute de una antigua preocupación humana, aunque la nueva realización es más técnica, ya que incluye colectores de calor y unidades climáticas de control. Sin embargo continua siendo verdad que el uso de la energia solar en la casa es esencialmente un problema arquitectural.

Como contraste, la conversión de la energía solar en electricidad es una nueva oportunidad y hacia ella se enfoca precisamente este estudio. La conversión mediante células solares solo hace unos años que se conoce, el impacto de esta nueva tecnología solo se puede apreciar si uno piensa que todas las demás invenciones para la conversión de la energía solar fueron hechas en el último siglo o quizás antes.

El desarrollo de las aplicaciones de la energía solar no significa el comienzo de un nuevo mundo económico; por el contrario los nuevos sistemas de energía deben primero ganar su puesto en la totalidad del mercado de energía. Deben ser competitivos con el petróleo, carbón o energía nuclear ya sea por el agotamiento de las fuentes convencionales, térmicas o bien por la contaminación química del medio ambiente, por la mayor independencia de los abastecimientos extranjeros o simplemente por sus costos más bajos. Así pues para situar las economías de la energía solar fuera de aquellas técnicas convencionales, el presente estudio trata de enfocar la conveniencia presente de utilización de paneles solares fotovoltaicos en zonas rurales del Ecuador haciendo para ello un levantamiento de información en cuanto a niveles de insolación (Radiación), diseño y costos en una vivienda rural.

## CAPITULO 1

### 1.0 RADIACION SOLAR

El sol es una potentísima fuente de energía con un flujo radiante de  $3.8 \times 10^{26}$  Vatios equivalente a una densidad de 62.5 MW por cada metro cuadrado de superficie solar. sin embargo de esta emisión solar la tierra en su superficie apenas llega a captar 1KW/M<sup>2</sup>, debido a la distancia a la que se encuentra del sol.

Esta limitación es una de las características que distinguen a la energía solar de otras fuentes energéticas cuyo suministro puede variarse, en los sistemas solares la máxima energía disponible solo puede modificarse a costa de un cambio de tamaño de la superficie receptora. otra propiedad específica de la energía solar a nivel terrestre es su versatilidad dentro de un límite impuesto. esta variación a menudo es aleatoria, como consecuencia de los efectos de dispersión, difusión y absorción introducidos por la atmosfera y sus componentes. en particular aquellos de carácter variable (solución y nubosidad sobretodo).

### 1.1 ENERGIA SOLAR: UNA RESPUESTA RAZONABLE COMO FUENTE DE ENERGIA.



La energía solar fotovoltaica es una valiosa alternativa a la crisis energética, sin embargo las inversiones se rigen por leyes económicas y en la actualidad el tiempo de recuperación de la inversión es mayor para el caso de la energía solar fotovoltaica que en el caso de la energía de origen nuclear, térmica o hidráulica, no obstante el problema a medio y largo plazo no va a ser...no lo está siendo ya...el costo de la energía, sino la disponibilidad de la misma.

La crisis de la energía está ante nosotros y será una crisis aguda, El aumento de la demanda de petróleo es tan enorme que no puede continuar al ritmo presente por 2 razones:

- 1.- Su multiplicación por 10 en países desarrollados y considerable en países subdesarrollado como el nuestro, los cuales no tienen muchos yacimientos de explotación de petróleo.
- 2.- La dependencia de energía se ha hecho demasiado grande (caso petróleo). Esta dependencia, así como su opuesto que es la acumulación de riqueza en un reducido número de países que poseen yacimientos de petróleo, dan fragilidad a todo el sistema.

Así pues, algo tiene que ocurrir para romper el curso de los acontecimientos, y este algo es la crisis energética, todos los datos recopi-

idos por la MAES (grupo internacional para otras fuentes de energía) predijeron esta crisis para el año 1990 o 2000, pero parece que la crisis ya está empezando.

Los recursos de energía pueden dividirse en renovables y no renovables. Hay 2 maneras de consumir energía:

- 1.- Sin racionar, que consiste en gastar la acumulación de recursos fósiles sin política de planificación energética.
- 2.- La racionable que consiste en invertir en los mismos recursos energéticos renovables.

Una de las primeras fuentes de energía que se desarrollaron fue la hidroelectricidad; en los últimos años se ha desarrollado la ENERGIA SOLAR y es imperativamente necesaria en los países desarrollados que son las únicas fuentes que no son estrictamente renovables sino casi infinitas.

Sin embargo las inversiones están gobernadas por leyes económicas. Hay un límite para el desarrollo racional de una nueva fuente de energía y que depende de la posición relativa de las técnicas que puedan competir con ellas: esta idea puede expresarse en función del tiempo de recuperación de la inversión.

Es cierto que esta idea de tiempo de recuperación de la inversión excluye muchas distinciones importantes que atacan a la validez de las distintas formas de energía y a los diferentes componentes de los costos. Un primer acercamiento válido es el de considerar el contenido de energía de las distintas fuentes o su tiempo de recuperación. Este tiempo es inferior a un año para la energía nuclear, alrededor de un año para calentadores solares de agua, de 2 a 4 años para centrales solares de energía térmica, de 12 años para centrales solares fotovoltaicas con las técnicas actuales, pero probablemente solo un año con las nuevas técnicas que se están desarrollando como las células de silicio de grado solar.

Los recursos de energía solar dependen básicamente de los valores de radiación solar total y difusa del lugar en el cual se trate de aprovechar esta alternativa para sustituir otras fuentes de producción de energía (energía eléctrica para el caso de este estudio) y tiene singular importancia en los sistemas fotovoltaicos (células fotovoltaicas) los cuales necesitarán de concentradores de energía solar para obtener mayores valores de radiación solar, dependiendo de la ubicación del país en el globo terráqueo que necesita utilizar esta alternativa, concentrando esta energía en la célula y obtener mayor valor de electricidad.

Si que la energía solar llegue a ser uno de los principales contribuyentes al equilibrio de la energía, necesitará por lo menos dos deca-

tas, igual que para todas las fuentes de energía, pero si comenzamos ahora, el gran esfuerzo requerido para ello, no hay razón para que falte. La posibilidad de conversión de la energía solar ya ha sido demostrada. Sus posibilidades de adaptación a distintas situaciones, especialmente como una fuente descentralizada de energía, son evidentes. Los costos disminuirán rápidamente, la mayor disminución será la de los fotovoltaicos.

### 1.3. MODOS DE TRATAMIENTO DE LA RADIACION SOLAR.

Aunque el sol radia una gran cantidad de energía, su densidad de energía sobre la superficie terrestre es baja como consecuencia de la distancia que los separa.

Debido a los fenómenos de difusión y dispersión, su calor se hace aleatorio y precisa por tanto de un tratamiento estadístico. Por esta razón para el diseño de sistemas de energía solar se hace imprescindible una caracterización de la radiación disponible bajo diferentes condiciones atmosféricas, lo cual no constituye un problema sencillo, por lo cual para la caracterización de la radiación solar se hace preciso de modelos previamente elaborados a partir de estudios teóricos y contrastados con resultados experimentales obtenidos en lugares donde se hayan efectuado medidas simultáneas de radiación solar y del mayor número de parámetros atmosféricos. La aplicación de estos modelos se de hacerse con frecuencia en lugares donde se dispone de un

escaso número de esos datos atmosféricos, para, a partir de ellos, hacer no solo una estimación de rendimientos instantáneos del sistema, sino una previsión de rendimientos futuros y resultados globales durante determinados intervalos de tiempo.

Gracias al enorme esfuerzo realizado en todo el mundo en los últimos años en las mediciones, actualmente existen modelos para casi cualquier tipo de colecciones de datos atmosféricos que con mayor o menor fortuna, permiten estimaciones de la radiación solar adaptándose a la información de que se disponga.

Otra característica de la radiación solar es su propia complejidad interna. Siendo la radiación una manifestación electromagnética de la energía, la energía solar presenta una amplia distribución espectral (es decir una gran variedad de componentes elementales de distintas longitudes de onda).

Los sistemas de conversión directa de la energía solar (si por directa entendemos la posibilidad de utilización inmediata de la energía convertida) pueden ser de dos tipos; térmicos y fotovoltaicos. Los térmicos son muy pocos sensibles al detalle de la distribución espectral, por el contrario la conversión fotovoltaica si es sensible a la distribución espectral hasta el punto de cada material fotovoltaico se caracteriza por una banda típica de radiaciones que pueden ser parcialmente convertidas con mayor o menor rendimiento, pero fuera de

la cual el rendimiento es nulo, por ello en aplicaciones fotovoltaicas, es esencial la utilización de modelos de radiación solar que describan también su composición espectral y diferencien los efectos atmosféricos sobre cada componente.

Ciertos conceptos son necesarios dentro del estudio de radiaciones y ellos son:

**IRRADIANCIA (G)** Cantidad de energía que incide o atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo; se expresa en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) o ( $mW/cm^2$ ).

**RADIANCIA O LUMINANCIA (L)** Irradiancia por unidad de ángulo sólido debido a una fuente extensa, se expresa en  $W/M^2.SR$ .

**IRRADIACION (H)** Cantidad total de energía recibida por unidad de superficie durante el tiempo considerado (horaria, diaria, mensual, etc) se expresa en  $J/M^2$  (o  $WH/M^2$  o  $KWH/M^2$ ) cuando estas magnitudes se refieren a componentes espectrales se utiliza un subíndice  $\lambda$  (llamada, lo cual se entiende por intervalo de longitud de onda).

### 1.3. RADIACION SOLAR SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE.

Al nivel terrestre tanto la irradiación solar total como su distribución espectral varían de manera complicada y a veces aleatoria. Las causas son evidentes. Al atravesar la atmósfera los rayos solares son parcialmente absorbidos y dispersados. El espesor efectivo de atmósfera que los rayos solares deben atravesar varía en función del movimiento aparente del sol sobre la bóveda celeste. También varía la composición de la atmósfera de unos días a otros e incluso de unos instantes a otros. Añadiendo por último la aleatoriedad en la existencia o no de las nubes y en las características de estas, por ello cualquier estudio de la radiación a nivel terrestre debe tomar como referencia las características que tendría la radiación sino existiera la atmósfera, para, a partir de allí, analizar los distintos efectos que la atmósfera introduce y puesto que el espesor de la atmósfera terrestre puede considerarse despreciable frente a la distancia sol-tierra, las características de la radiación en ausencia de atmósfera corresponden a las que pueden efectivamente medirse en el espacio exterior inmediatamente próximo a la tierra.

La radiación recibida por la unidad de superficie procedente de un foco puntual de flujo constante (el sol para este efecto puede considerarse así) varía en razón inversa al cuadrado de la distancia entre el foco y el receptor. Por ello los datos de referencia de la radiación solar suelen establecerse para las condiciones de distancia media sol-Tierra.

#### 1.4. RADIACION EXTRATERRESTRE.

Las variaciones en la radiación total emitida por el sol son inferiores al  $\pm 1.5\%$ . La radiación fuera de la atmósfera depende de la distancia entre el sol y la tierra que puede aproximarse por:

$$R = R_0 [1 - 0.0167 \cos(360 \cdot N/365)] \text{ Km.}$$

Siendo  $R_0 = 1.495 \times 10^8$  Km, la distancia astronómica unidad.

$N$  = Número de día en el año.

Para establecer el valor de la radiación extraterrestre se definen o se necesitan dos informaciones importantes: la constante solar y su distribución espectral.

CONSTANTE SOLAR.- es la irradiancia sobre una superficie orientada normalmente a la dirección de los rayos solares y situada fuera de la atmósfera terrestre a la distancia astronómica unidad y su valor obtenido por mediciones y adoptado por la NASA para criterios diseño de vehículos espaciales y como standar por la ASTM (AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS) es de :

$$G_{sc} = 1353 \text{ W/M}^2 \text{ o } 135.3 \text{ mW/cm}^2$$

Con un error de  $\pm 1.5\%$ . Este valor de la constante solar es el resultado de mediciones efectuadas a una altura de 11.6 Km sobre la super-



ficie terrestre, y corregidas por los efectos atmosféricos de las capas superiores.

**DISTRIBUCION ESPECTRAL.** La distribución espectral de la constante solar también según el standard NASA/ASTM se representa gráficamente en la figura 1.1, aquí podemos apreciar la existencia de un máximo para longitudes de onda en torno a los 460 nm y que en el intervalo 0-1.1  $\mu\text{m}$  (que corresponde a las radiaciones que pueden ser convertidas por el silicio) la irradiancia integrada representa aproximadamente el 75% del total.

Como información adicional podemos decir que la irradiancia extratmosférica para un día cualquiera puede deducirse de la siguiente expresión:

$$G_{e,N} = G_{sc} \left( 1 + 0.016 \cos(360 \cdot n/365) \right)^2$$

que despreciando los términos de segundo orden queda en su forma definitiva.

$$G_{e,N} = G_{sc} \left( 1 + 0.034 \cos(360 \cdot N/365) \right)$$

### 1.5.- ATENUACION Y DISPERSION DE LA RADIACION ATMOSFERICA.

La radiación incidente sobre un receptor extratmosférico, proviene exclusivamente de la emitida en línea recta por el sol, ya que al estar el espacio exterior desprovisto de materia dispersa, la esfera

cielo aparece negra (sin radiación) con pequeñas singularidades correspondientes a las estrellas, de importancia despreciable a estos efectos, y una singularidad notable, por su proximidad correspondiente al sol, añadiendo pequeñas contribuciones debidas al ALBEDO (radiación retrodispersada), de los planetas, de la luna y especialmente de la tierra.

La situación es distinta al nivel de la superficie terrestre pues la radiación emitida por el sol es absorbida por los componentes atmosféricos los cuales habituales u ocasionales, en proporción fija o variable se encuentran presentes en la atmosfera y son: el ozono, oxígeno, anhídrido carbónico, vapor de agua, etc, así como también es dispersada por otros componentes atmosféricos tales como moléculas, gotas de agua microscópicas, vapor de agua, etc. El resultado de estos efectos es la descomposición de la radiación solar sobre un receptor horizontal en 2 componentes principales: componente directa y componente difusa.

Antes de entrar con la descripción de estas dos dispersiones de la radiación solar creo conveniente conocer ciertas definiciones que tienen que ver con la posición del sol respecto a la tierra y son:

**SEMIT.** - Considerando como plano fundamental la horizontal \*(tangente a la superficie terrestre), la perpendicular a este plano, en dirección

La semiesfera celeste superior define la posición del CENIT del lugar (figura 1.2).

**NADIR.** - Se sitúa en posición opuesta atravesando la tierra.

**ALTURA ALFA.** - Angulo de elevación del sol sobre el horizonte, positivo (0 a 90 grados) del horizonte HACIA el cenit.

**DISTANCIA CENITAL  $\theta$ ,** complementario del anterior (90-alfa).

**ACIMUT** — Angulo que forma la proyección del sol sobre el plano del horizonte con la dirección Sur.

**NUMERO DE MASA DE AIRE** Para caracterizar de algún modo el efecto que tiene sobre la radiación solar el hecho de tener que atravesar la atmósfera terrestre desde distintas distancias cenitales se utiliza el parámetro  $M$  o su número de masa de aire. El valor unitario de este parámetro corresponde a la posición cenital del sol para un punto al nivel del mar y condiciones de presión atmosférica standard (760 mm de Hg). Otros valores corresponden al número de veces que esta atmósfera standard debe ser atravesada por los rayos solares en función de la posición relativa del sol. Estas condiciones suelen designarse por las letras AM (air mass) seguida del número  $m$ . Así la indicación  $AM_0$  corresponde a condiciones extraatmosféricas  $AM_1$ ,  $AM_2$ , etc a condiciones de masa de aire 1, 2, etc.

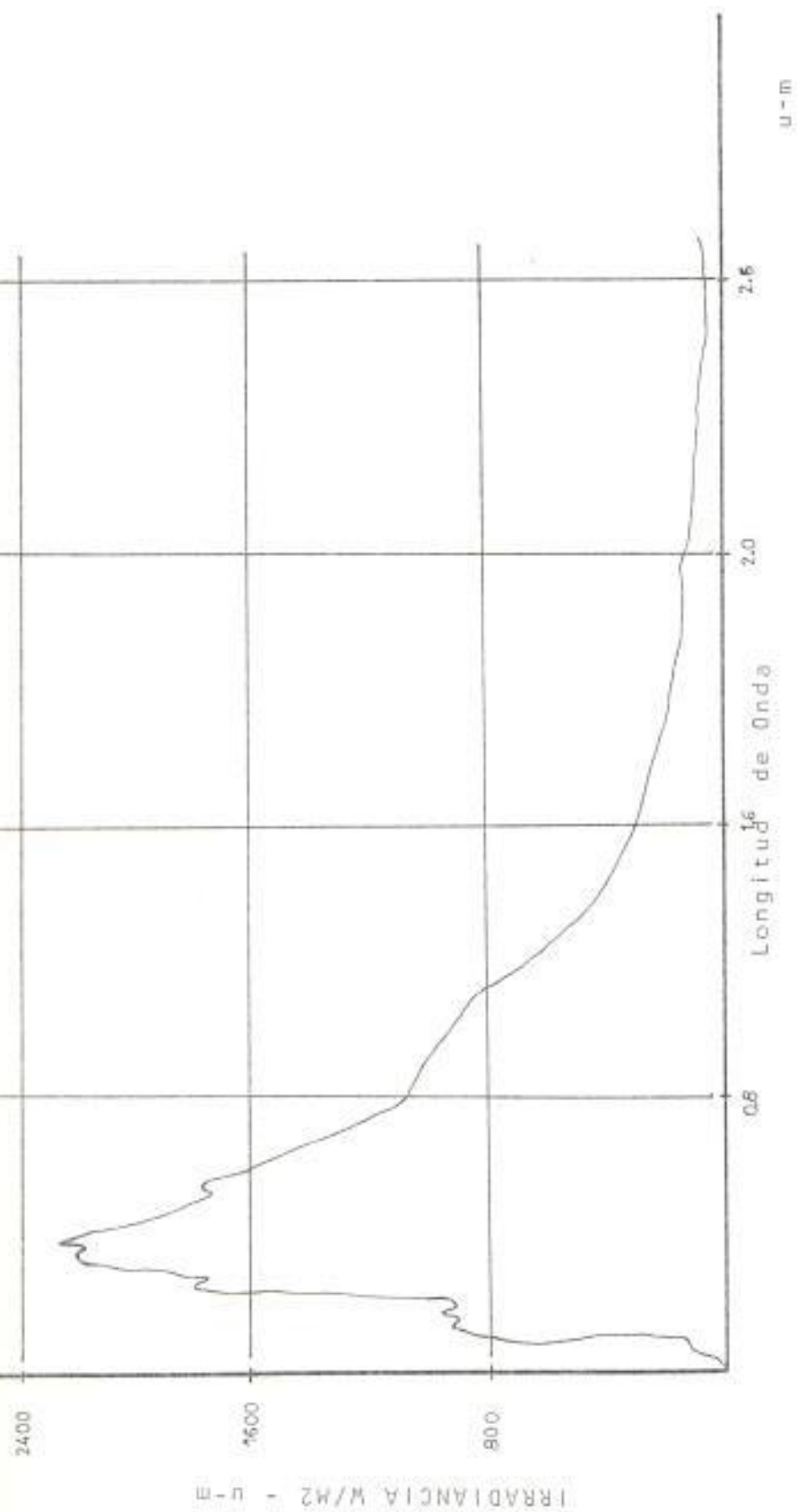


FIGURA 1.1 DISTRIBUCION ESPECTRAL DE LA CONSTANTE SOLAR

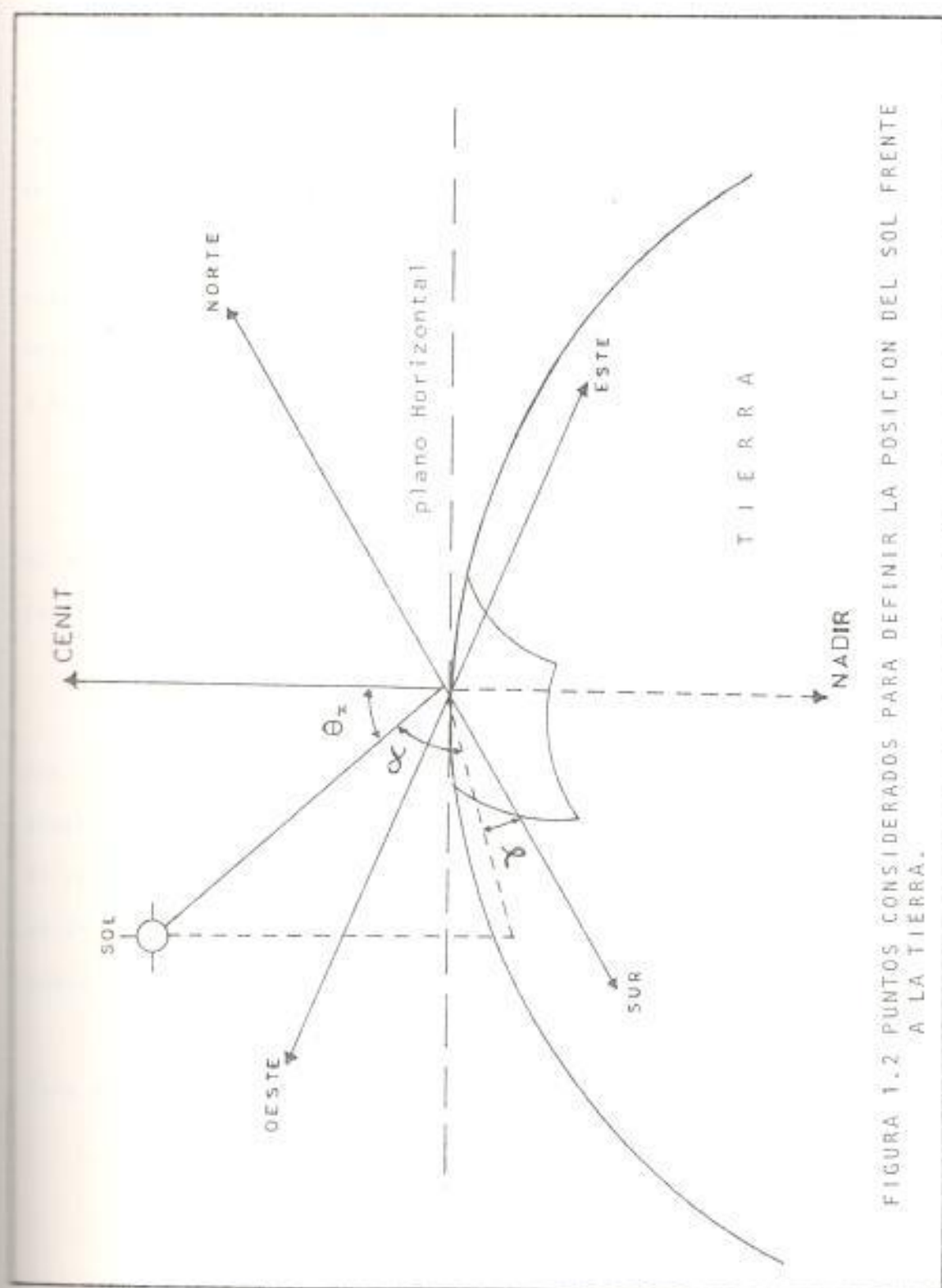


FIGURA 1.2 PUNTOS CONSIDERADOS PARA DEFINIR LA POSICION DEL SOL FRENTE A LA TIERRA.

Para expresar la relación entre el número  $n$  y la distancia cenital se utilizan diversos modelos según la precisión requerida. común a casi todos ellos es la aproximación de considerar la atmósfera reducida a su equivalente homogéneo (densidad de aire constante), el espesor  $H_0$  de esta atmósfera en dirección vertical para un punto al nivel del mar (condiciones de presión Standard  $P_0 = 760$  mm hg, densidad de aire  $\rho_0 = 1.293$  kg/m<sup>3</sup>, aceleración de la gravedad  $g = 9.806$  m/seg<sup>2</sup> es:

$$H_0 = P_0 / G \rho_0 = 7980 \text{ m} = 8 \text{ Km}$$

El modelo más sencillo considera una atmósfera plana (figura 1.3) dando como resultado:

$$M_p = H/H_0 = 1/\cos\theta_0$$

Sin embargo este modelo pierde validez cuando  $\theta_0$  se aproxima a 90 grados (sol en el horizonte) porque hace tender el número  $n$  hacia el infinito, lo que significaría una transmisión nula de la radiación solar. Para obviar esta dificultad debe considerarse la finitud del radio terrestre (figura 1.4).

Tras algunas operaciones geométricas se obtiene:

$$M_r = \sqrt{(R \cos \theta_z / H_0)^2 + 1 + 2R/H_0 - r/H_0 \cos \theta_z}$$

### 1.5.1 COMPONENTE DIRECTA

Es la constituida por haces de rayos transmitidos y mas o menos atenuados que se reciben en linea recta del sol o en otras palabras es la radiación solar recibida en la superficie terrestre, sin cambio de dirección.

La trayectoria de los rayos solares es en todo rigor ligeramente curva debido a la refracción por las sucesivas capas de aire de densidad e índice de refracción progresivamente crecientes hacia la superficie terrestre.

La atenuación por la atmosfera de los rayos directos del sol es debida a los efectos de absorción (por ozono  $O_3$  y oxígeno  $O_2$ , anhídrido carbónico  $CO_2$ , Metano  $CH_4$ , vapor de agua  $H_2O$ , partículas de suspensión, Etc) y dispersión (moléculas de los componentes fijos de la atmosfera, gotas microscópicas de agua, partículas de polvo, etc).

Por la absorción la radiación se pierde totalmente y por la dispersión isotrópica (por ejemplo la molecular) la mitad de la radiación dispersada contribuye a la componente difusa siendo la otra mitad devuelta al espacio y contribuyendo por lo tanto al albedo de la tierra

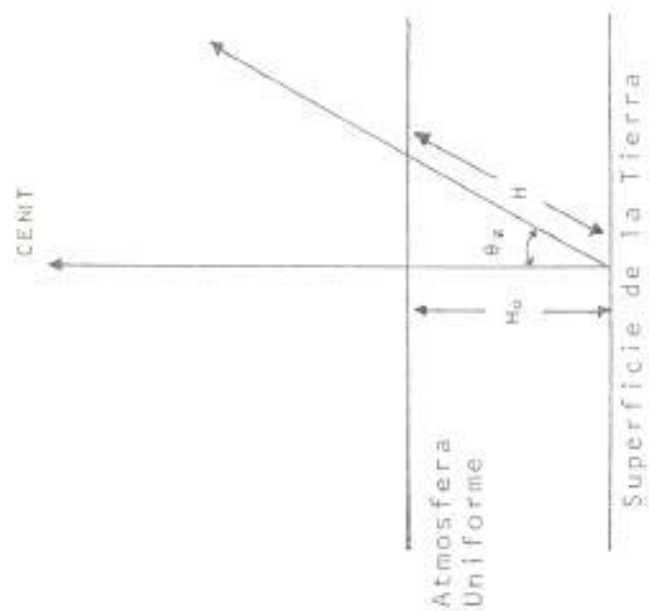


FIGURA 1.3 MODELO DE UNA ATMOSFERA PLANA

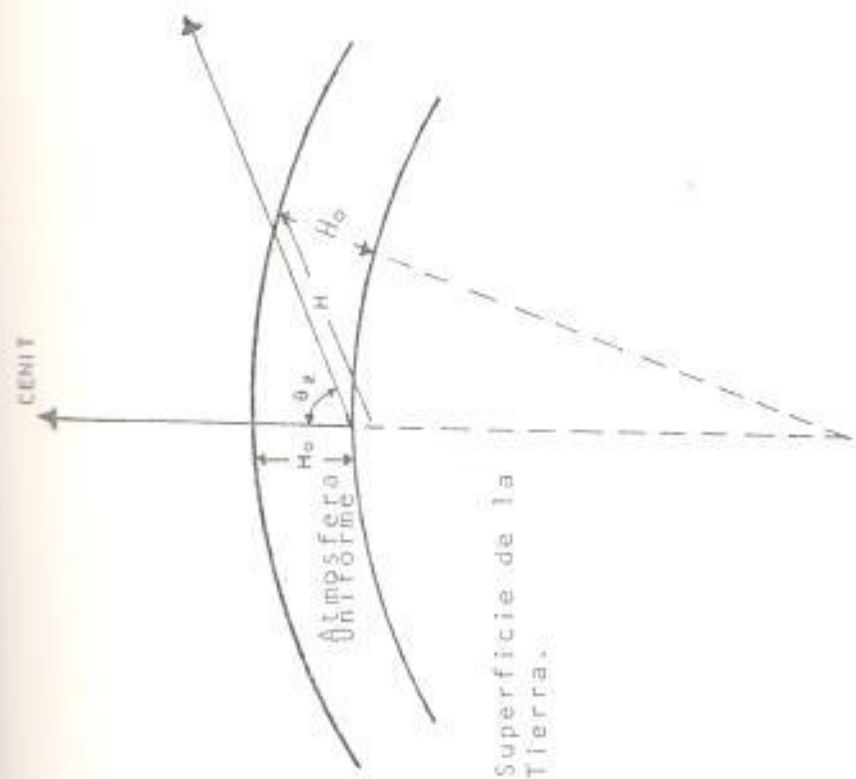


FIGURA 1.4 MODELO DE UNA ATMOSFERA CON-CENTRICA RESPECTO DE LA TIERRA.



### 1.5.2 COMPONENTE DIFUSA:

Es la procedente de todo el hemisferio cenital, excluido el disco solar y debido a la luminosidad del cielo producido por todos los rayos no directos dispersados por la atmósfera en la dirección del receptor. En otras palabras la componente difusa es la radiación solar recibida después que la reflexión y la difusión atmosférica hayan cambiado su dirección.

El análisis de la radiación difusa y su distribución espectral constituye un problema tremendamente complicado desde el punto de vista teórico, debe tenerse en cuenta que el cielo es una fuente extensa sin luz propia que únicamente re-envía la radiación dispersada previamente una o mas veces, y que por tanto, la radiación recibida por un colector procede de todas las direcciones, habiendo atravesado cada una de ellas distintas capas de aire.

Luego la componente difusa deberá estar constituida por aquellas radiaciones que no hayan sido ni absorbidas, ni transmitidas en los rayos directos; ni dispersados hacia atrás.

### 2.4 EL ALBEDO DE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Otra de las componentes que producen la atenuación y la dispersión de la radiación atmosférica es el ALBEDO que se define como la componente devuelta por retrodispersión al espacio exterior.

La reflectancia de los materiales de las superficies terrestres, en especial en las proximidades del receptor, supone una contribución a la irradiancia total, en el caso de colocación no horizontal de este, que en ocasiones puede ser importante.

El albedo es difícil tratar, sobre todo en cuanto a su distribución espectral, por la diversidad de elementos que pueden componer la zona adyacente al receptor (vegetación, tierra, arena, nieve, edificios, etc) y por la desigual reflectancia de estos no solo para distintas posiciones del sol, sino para distintas radiaciones. El albedo suele caracterizarse por un coeficiente que representa la reflectancia media hemisférica del suelo ( $\rho$ ), es decir  $\rho$  indica la fracción que el suelo re-envía en todas las direcciones, de la irradiancia global (directa mas difusa) que recibe.

La tabla 1 a continuación indica coeficientes de albedo de suelos homogéneamente constituidos por algunos materiales:

1.7 IMPORTANCIA DE LA RADIACION SOLAR EN LA OBTENCION DE ENERGIA ELECTERICA.

PINTURA NEGRA LISA	0.06 - 0.08
TIERRA LABRADA HUMEDA O SECA	0.08 - 0.20
AGUA	0.05 - 0.20
PAVIMENTO DE ASFALTO - HORMIGON	0.13 - 0.25
CARBOLES	0.15 - 0.25
ADOBE - MADERA	0.25 - 0.30
ROCA	0.10 - 0.45
PARED DE PIEDRA FRIS - BLANCA	0.18 - 0.40
PARED DE LADRILLO ROJO AMARILLO CLARO	0.20 - 0.40
CESPED CEGADO	0.28 - 0.35
PINTURA GRIS	0.35
NUBES	0.10 - 0.80
PINTURAS CLARAS VERDE - CREMA	0.60 - 0.75
PLANCHAS, PINTURAS METALICAS NUEVAS	0.65 - 0.80
NEVE FRESCA	0.65 - 0.80
PINTURA BLANCA	0.80 - 0.88

TABLA 1. REFLECTANCIA HEMISFERICA DE ALGUNOS MATERIALES

Las componentes espectrales de la irradiancia directa, difusa o global, al ser integradas para todo el espectro solar, proporcionan las correspondientes componentes de irradiancia total que solo dan información sobre el flujo energético recibido por una superficie. Para ciertas aplicaciones (térmicas por ejemplo), esta información puede ser suficiente. Para aplicaciones fotovoltaicas aunque la información no sea completa dada la fuerte dependencia espectral de la conversión, en muchos casos se admite como válida conociendo previamente que solo una fracción de ese flujo energético es convertido en electricidad.

Por lo tanto dado que la energía solar puede ser transformada directamente en corriente eléctrica mediante el uso de dispositivos denominados "celdas fotoeléctricas o fotovoltaicas" un conocimiento de la radiación solar es necesaria en las zonas donde se desea instalar estas celdas fotovoltaicas, así como también un conocimiento cabal de las variaciones de la radiación solar durante las horas del día y durante el año para así tener el conocimiento de la radiación solar global de la zona en estudio y poder tener más cercanía a un buen diseño en los componentes fotovoltaicos (reguladores, baterías, etc) así como también poder estar preparado para aquellos lapsos del año en los cuales la radiación solar es menor, en los cuales las baterías bien cargadas regularán la falta de radiación solar.

En resumen es conveniente tener como primera parte de un diseño fotovoltaico, un resumen estadístico de la variación aleatoria de la radiación solar global en el año para la zona determinada donde se desea hacer el diseño.

## CAPITULO 2

### EL TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL EN EL LITORAL ECUATORIANO.

Ante la posibilidad de instalar aparatos de energía solar, plantas de aire acondicionado, calentador de agua, destiladores, secadores, y en otros domésticos, utilizando la conversión fotovoltaica para producir directamente electricidad se hace necesario conocer datos confiables sobre la radiación solar.

En Ecuador solo recientemente se está enfocando un interés científico en los problemas de radiación solar por lo cual existen instituciones ya dedicadas a brindar información de radiaciones solares y de la misma medida en diferentes partes del Ecuador, ellas son el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) y la Escuela Superior Politécnica del litoral en su área de Energía Solar.

En este estudio se recolectado información de ambas instituciones para analizar la situación de la zona del litoral y poder en base a análisis determinar cuáles serían las mejores zonas rurales donde se podría mejor aprovechar la conversión fotovoltaica.

## 2.1 ESTUDIO DEL POTENCIAL SOLAR EN EL ECUADOR CON ENFASIS EN EL LITORAL ECUATORIANO SEGUN EL INSTITUTO DE ENERGIA

La red de estaciones meteorológicas del instituto nacional de meteorología e hidrología (INAMHI) donde se registra actualmente la radiación solar global registra actualmente las siguientes estaciones.

Región litoral: Portoviejo, Pichilingue, Isabel María

Región Andina: Ixobamba, Ingaicho

Región Oriental: Puyo, Nuevo Rocafuerte

Región Insular: San Cristóbal, Charles Darwin

La ubicación geográfica de estas zonas se muestra en la figura 2.1

Se puede pensar que en la región oriental se desarrollara en el futuro el uso de aparatos de aire acondicionado, destiladores y usos domésticos con el uso de energía solar. Para eso la red de información de la radiación solar debería ser más distribuida. Sin olvidar que los valores más precisos de radiación solar se obtienen con mediciones directas, para evaluar la radiación solar en lugares que hasta ahora no han sido objeto de esas mediciones, se pueden considerar los valores obtenidos en una estación de latitud elevación, estaciones, hora del día, contaminación atmosférica similares a los del sitio cuyos valores se está intentando evaluar, la aplicación de este método resulta difícil utilizando las estaciones disponibles actualmente, porque son pocas y casi siempre en sitios preferentemente agrícolas.

### 2.1.1 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL POTENCIAL SOLAR

Las estaciones meteorológicas hacen 2 tipos de mediciones

- 1.- La energía solar global (radiación difusa y directa) diaria, a nivel del suelo, expresada en unidad práctica watio-hora metro cuadrado-día (Wh-día/M<sup>2</sup>) también puede darse en Btu-día, mes/Pie<sup>2</sup> o Calorías/Cm<sup>2</sup>
- 2.- La duración diaria o mensual (de acuerdo a si la estación es de primer o segundo orden) de la insolación (Radiación directa) expresado en horas en porcentaje de la duración total del día (también llamado Heliofania).

La energía solar es medida diariamente en alrededor de 10 sitios, sin embargo no existen los datos de ambas mediciones, ni todos los años, ni en todos los lugares del Ecuador según se observa en la figura 2.1, pues si observamos la figura nos daremos cuenta de falta de información en las siguientes zonas:

- 1.- Enclave costanero (provincia de Esmeraldas)
- 2.- Región costanera sur (Provincia del Oro)
- 3.- Región serrana septentrional (Provincia del Chimborazo, Bolívar, Tungurahua y Cotopaxi).
- 4.- Región Serrana central (provincia del Azuay y Cañar)



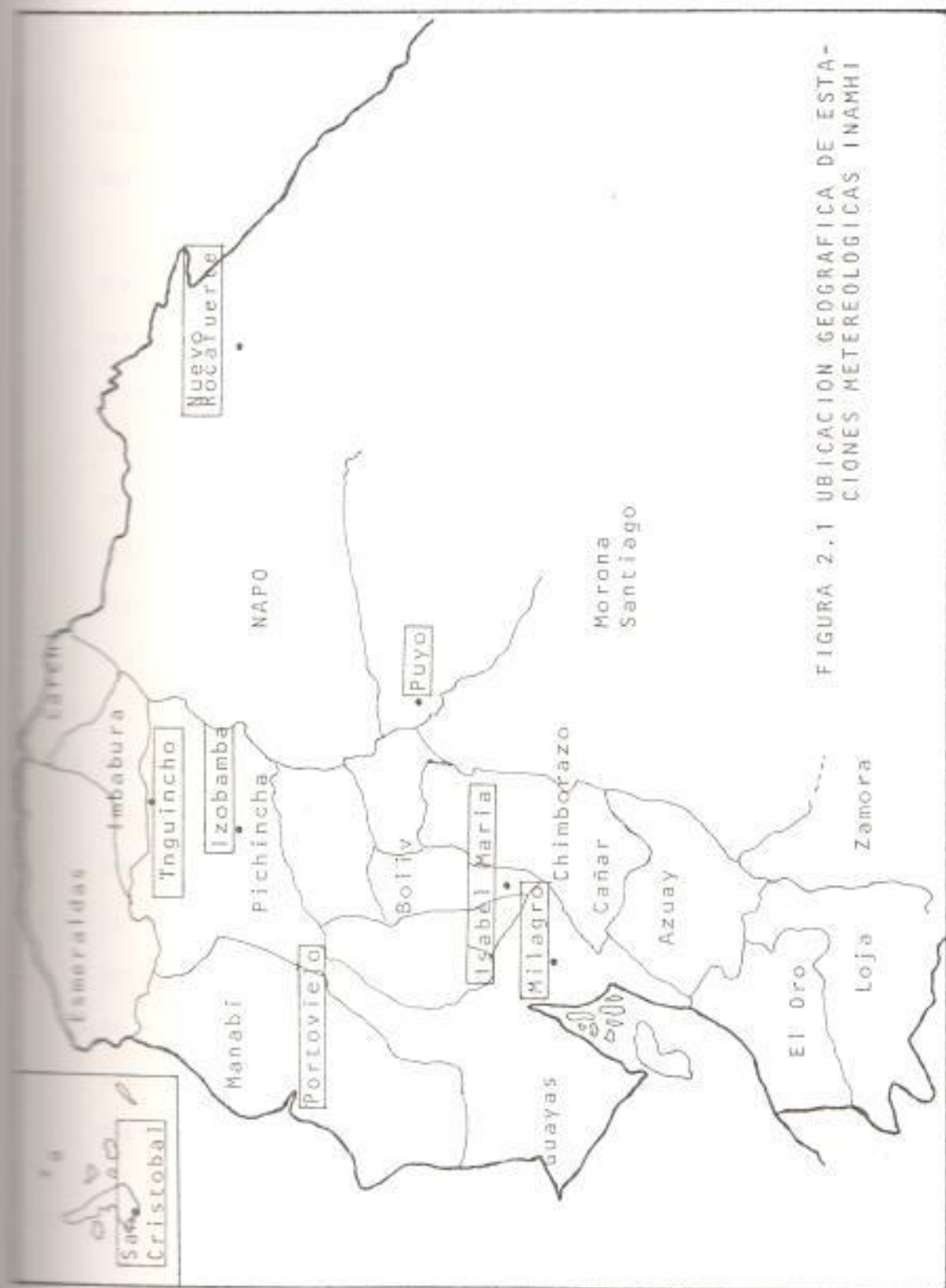


FIGURA 2.1 UBICACION GEOGRAFICA DE ESTACIONES METEOROLOGICAS INAMHI

5.-Serranía Meridional (provincia de Loja)

Existe escasa información para zonas de las estribaciones orientales y para la cuenca Amazonica (provincia Napo, Pastaza Morona Santiago y Zamora Chinchipe)

Sin embargo como habiamos mencionado anteriormente en base a características similares de latitud, elevaciones, estaciones, horas del día, condiciones meteorológicas del lugar donde si se tienen mediciones se puede aceptar como mediciones del lugar que se desea. Por ello nuestro a continuación las características de los lugares donde se tienen mediciones que podrían servir como puntos de partida para otras regiones del litoral. (fig 2.7)

### 2.3.2 RADIACION SOLAR GLOBAL EN EL LITORAL ECUATORIANO

Como dije anteriormente no se tiene datos estadísticos de la radiación solar global de todos los lugares y de todos los años en el Ecuador, especialmente de la zona del litoral objeto de este estudio. Sin embargo se tiene información de ciertas zonas cuyos cuadros se muestra a continuación como datos válidos y comparativos para algunas zonas del litoral.

Del Guayas ciudad de Guayaquil se tienen los datos obtenidos por mediciones del área solar de la Escuela Superior

ZONA GEOGRAFICA	PROVINCIA	NOMBRE DE LA ESTACION	ALTITUD ALTURA (m)	LATITUD	LONGITUD	AÑO PRIMEROS DATOS
FRANJA LITORAL DEL PACIFICO	MANABI	PORTOVIEJO	44	1,04 S	180,26 W	1962
ENCLAVE COSTANERO	LOS RIOS	PICHILINGUE	73	1,06 S	179,29 W	1962
	GUAYAS	MILAGRO	13	2,09 S	179,36 W	1962
	LOS RIOS	ISABEL MARIA	7	1,48 S	179,32 W	1962
SIERRA SEPTENTRIONAL	IMBABURA	INGUINCHO	3389	10,15 N	178,24 W	1977
	PICHINCHA	IZOBAMBA	3056	10,22 S	178,33 W	1862
SIENCA AMAZONICA	NAPO	NUEVO ROCAFUERT	265	10,55 S	177,24 W	1977
PIE MONTE ANDINO AMAZONICO	PASTAZA	PUYO	950	1,35 S	177,54 W	1962
REGION INSULAR	SALAPAGOS	SAN CRISTOBAL	6	10,54 S	189,37 W	1978
		CHARLES DARWIN	6	10,44 S	190,18 W	1978

FIGURA 2.2 CARACTERISTICAS GEOGRAFICAS DE ALGUNAS ZONAS DEL PAIS

Politecnica del Litoral y se Muestran en la figura 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 donde se muestra la radiación global diaria en  $\text{Stu-dia/pie}^2$  para los años 1980, 1981, 1982, 1983. En la figura 2.7 se muestra la radiación global mensual, y en la figura 2.8 se muestra la misma radiación global mensual pero en unidad práctica de  $\text{W/m}^2$  y por mes.

Del instituto nacional de meteorología e hidrología en Quito obtuve algunos datos sobre la radiación global diaria expresada en  $\text{calorias-dia/cm}^2$  para Portoviejo y Pillinque para los años 1979 y 1980 que aunque incompletos sirven como datos comparativos para analizar esta zona y se muestran en las figuras 2.9 y 2.10. Así mismo como información referencial y partiendo de información del mismo instituto de meteorología se ha graficado valores de radiación mensual de Milagro e Isabel María, los cuales pertenecen a años anteriores puesto que no se dispone de información de estas zonas para los últimos años y como no son tan exactos se prefirió graficarse y se observa en la figura 2.11.

Sin embargo también para efectos referenciales existe un mapa diseñado por el instituto de meteorología y el INE ( instituto Nacional de Energía ) en el cual se muestra referencialmente un mapa de insolación del Ecuador, el cual también puede considerarse para efectos de radiación. (figura 2.12)

	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
		1370	1180	1420		940	620	1200	1730		1320
	500	1780	1520	800	900	1240	690	1710	890		890
	980	920	1960	1220	780	1140	1560	1520	770		820
	790	1800	1560	1100	1120	1670	1660	850	1320		860
	1680	1040	900	1580	730	1040	1520	1450	1570	1240	1240
	1440	1370	1200	1220	1650	860	860	1510	770	1240	980
	1160	1280	1420	1180	630	1700	600	1890	1070	740	800
	1640	1680	1560	1760	1000	1580	1060	1240	1050	1520	1000
	540	1440	1520	1760	1330	860	1300	1300		840	1260
	1800	1780	1220	1570	720	1320	980	1380		1000	1160
		1800	1200	1700	900	780	1660	1620		1280	480
	1280	1820	1140	1220	1010	1390	1260	1800		1200	1560
	1060	1600	1780		11270	1200	1580	1440	1090	1380	
	930	1300	1740	1780	970	1520	1680	1210	1540	820	600
	760	940	1700	1600	610	750	1780	1540	1460	1080	1680
		590	1420		1160	1660	840	1720	1960	1480	760
	1910		760	1160	1380	1670		1890	700	880	780
	780		1400	1520	1620	1640		800	1540	970	780
	1890	1620	1260	690	610	1440	1200	1640	1140	1670	1840
	1620			960	1640	680	830	2010	1380		
	1900		1480	820	890		1620	1880	1920	1490	
	1880		1260	960	720		1220	1010	1620	1650	1080
	1640		980	1340	960		1140	1050		1640	1740
	1900		1420		1080		1580	1730		1860	1360
	1670		1780	1600	760	1620	1380	1960	820	1460	1590
					700	1440	1810	1430	1780	850	730
		1120	1440	1620	1120	1720	1820	1050	1560	1320	1500
	1240	1640	1480	920	1170	1440	1840	1520	1300	1620	580
	780	1800	1560	900	1010	1360	1510	1610	1540	1460	1310
		1700	1680	1230	740	540	520	1690	1760	1340	1860
		1660		1270		1600	1470		840		1780
				*****						*****	
	12670	32050	39520	34900	29210	34800	37790	95150	33071	32030	33390
	1280,2	1456,8	1411,4	1292,6	1007,2	1288,9	1303,1	1505	1322,1	1281,2	1192,3
	1980	1820	1960	1760	1650	1720	1840	2010	1960	1860	1860
	380	590	760	690	610	540	520	800	700	740	560
	24	22	28	27	29	27	29	30	25	25	28

MEDIA DIARIA EN BTU/PIE2-DIA PARA BUAYAGUIL 1980

	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	980	2040	1700		1220	800	1480	920	1460		1280
	1400	1400	1660		1660	1180	1560	1120	1920		1620
	600		1800		1260	720	1480	1720			920
	1360	740			760	1120	1080	1460		1620	1620
	1220				900	1000	1280	1000	1160	940	1600
	1100	1620	1060		560	1040	1460	860	1000	1620	800
	1520	1300	1320		1260	1520	1260	1600	1680		1580
	980	1220	1620		1260	1540	1140	1900	1780		1580
	1240	740	1620		1540	1180	1180	1800	780	1160	1120
	1780	1200	880		720	720	1560	1800	1660	1880	1200
	1360	1040	1340		1020	1000	1660	1100	1860	1100	1540
	1380	1260	1120		1400	1700	1800	1640	1840	1120	1120
	1600	1400			1280	1620	1120	1860	1100	1520	1100
	1560		1800		1080	1260	1280	1580	1440	1240	1520
	1080		1380		1580	580	1120		1460	740	1500
	940	2020	1240		1500	600	1580	1000	1620	1120	1560
	640		1320		1460	700	1420	2020	1740	1440	920
	840	1000	1700		660	840	1440	1760	580	1200	1720
	1300	1480	900		1580	1080	1640	1040	1660	1480	960
	1560	1040	960	1360	420	1280	1040	1460	1960	900	960
	980	1160	1500	1640	1480	1920	1560	1480	1900	740	1120
	1060	1380	620	1740	1500	1720	1160	1000	1520	1200	
	700	1000	1260		1020	880	680	1300	1060	1680	600
	910	1860	1020		1120		840	1140	1340	1660	
	880	1140		1520	1280	1600		1440	1400	1400	1560
	1500	1380	1120	460	560	720	640	1540	920	860	
	1400	1800	1540	1140	960	1080	880	1120	1200	1520	
	1720	2020		860	1540	1240	1300	1400	860	1780	900
		1580		1140	1320	940	1320	1680	780	1480	1400
		1900		560	1260	880	1840	1460	960	1420	800
		1780		720		980	1280				1640
	33720	36500	30480	11140	34700	33400	39080	41160	38600	32720	34240
	1294,3	1403,8	1325,2	1114	1156,7	1113,3	1302,7	1419,3	1378,6	1308,8	1268,1
	1780	2040	1800	1740	1660	1920	1840	2020	1960	1880	1720
	600	740	620	460	420	580	640	860	580	740	600
	29	26	23	10	30	30	30	29	28	25	27

GLOBAL MEDIA DIARIA EN BTU/PIEZ-DIA PARA BUAYADUIL 1981

	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1122	1108	1678	1346	1326	1356	1671	1799	904	922	1001	
1480	2001	1392	1818	1641	684	1394	1757	1390	1486	1636	
1864	1378		1548	1490	1142	1333	1535	914	788	789	
982	1056		1514	1160	900	1241	1680	1802	1228	1177	
1640	1336		979		1556	1671	1827	1558	1226	869	
972	1152		1156		752	1184	1762	1630	1172	958	
1566	1656	1936	1442	1400	1340	816	1715	936	1895	1230	
1600	1532		1364	1040	958	1546	1605	1190	846	1138	
1748	1590	740		680	1348	1338	1763		1314	987	
928	688	1458	826	1572		1089	1743	1160	1038	747	
1799	1058	1428	1300	612		1499	1675	1156	1229	765	
1474	1378	1786	986	838	1098	1487	1505		672	1180	
1484	1302	1852	734	1478	1030	1515	1723	1204		1377	
890	1598	2002	832	3224	782	1547	1034	1526	816	1311	
852	1652	1482	968	1576	1236	1550	1535	1812	1552	1391	
1664	1476	1636	1618	978	1110	1426	125	1390	610	1100	
1975	1482	1680	1414	650	802	1505	1629	794	1328	930	
1484	1396	1568	914	1334	934	1194	1004	792	1004	1744	
1630	1022	1020	846	1502		1378	1609	1280	839	1157	
1406	1936	996	1420		1058	1224	1707	1278	1412	653	
1514	1794	1263	756	708	1608	1354	1723	1028	1624	688	
1184	1442	1124	1284	1210	1094		1300	930	1174	991	
	1674	1486		1586	1416	1410	1412	1388	1160	1416	
1432	1226	1778		1118	1598	1464	1150	862	1286	1295	
1775	1857	544	950	874	1552	1508	942	1540	1212	1146	
1154	1674	1476	1562	926	1368	1486		870	1064	1026	
1079	1844	1536	1336	650	1260	1058	850	1732	1039	550	
982		770	1210	577	956	1798	1416	826	1452	883	
	650	1360	1460	824	1426	1632	1268	1072	1693	1267	
	1468	1224		1132	1404	1373	996		1572	1686	
			1646		1516	1509				1750	
37671	41426	35200	33224	30106	33284	42243	43289	32914	34638	34733	
1295,2	1428,5	1408	1230,5	1115	1188,7	1408,1	1492,7	1219	1194,4	1120,4	
1975	2001	2002	1818	1641	1608	1878	1827	1812	1895	1750	
852	650	544	734	577	684	816	850	742	610	550	
27	29	25	27	27	28	30	29	27	29	31	

REGISTRO GLOBAL MEDIA DIARIA EN BTU/PIE2-DIA PARA GUAYAQUIL 1982

F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1398	1033	1015	770	1336	1266	804	641	1034	891	
500	1078	712		1008	472	832	1144	776	899	
1681	724	1447		1248	882	1083	896	662	780	
1474	1461	645		894	676	850	921	1006	572	
	683	1233		850	1300	1182	924	719	396	
	513	779		1246	612	965	676	922	592	
	1307	991		1140		638	731	1334	776	
992	918	1195		1158	1362	555	668	643	648	
1196	1231	1179	991	1078	888	802	854	809	942	
804	921	982	753	1026	678	895	1028	622	1452	
1160	863	758	959	1370	790	752	829	690	1200	
1192	1197	458	1217	100	564	982	751	704	336	
581	1056	1214	932	980	482	542	671	526	1022	
350	1135	1054	1261	622	1202	710	520	1527	510	
1296	1558		1119	1026	890	646	1124	1263	1050	
	1279		460	1144	1118	740	555	702	1122	
	1093	1015	1062	1086	596	595	526	878	1317	
1641	1429	894	1188	1052	624	785	757	896	1236	
		1128	816	510	510	661	1310	1108	544	
	1305	1250	1074	986	667	906	1053	1129	884	
1188		1232	868	706	852	1091	616	1331	1040	
1565	1124	1288	818	716	1333	1090	859	1082	913	
934	1093	934	1166	1421	797	255	1126	607	1270	
651	1519		1297	1212	1182	992	1011	1015	508	
891	497		1186	1202	1031	939	1068	926	1062	
994	1403	1214	872	462	839	696	854	1351	850	
1028	1159	528	1290	520	1277	523	433	1174	850	
1137	793	1298			1060	632	841	761	1248	
569	1233	1166	696	560	527	706	1289	807	826	
1283	639	1174	600	600	720	960	1279	565	749	
1431		1284		1292	1304		388		1256	
25886	29120	28067	20795	29451	26451	23759	26343	27569	27840	
1078,6	1078,5	1039,5	990,2	981,7	916,7	792	849,8	919	898,1	
1681	1558	1447	1297	1421	1362	1182	1310	1527	1452	
350	497	458	460	510	472	255	388	526	336	
24	27	27	21	30	30	30	31	30	31	

MEDIA DIARIA EN BTU/PIE2-DIA PARA GUAYAQUIL 1983.



	ANO	1980	ANO	1981	ANO	1982	ANO	1983
MES	RADIACION	DIAS	RADIACION	DIAS	RADIACION	DIAS	RADIACION	DIAS
ENERO	711,2	7	33214	27	32534	27	30999	30
FEBRERO	21890,6	21	33240	28	35012	27	26421	26
MARZO	26858,1	21	34328	16	35382	28	22746	24
ABRIL	33709,3	26	22058	18	31937	25	29743	27
MAYO	23676,2	26	9596	10	33325	27	28506	27
JUNIO	23611,5	28	27649	28	29841	27	21586	21
JULIO	30341	27	30060	30	37599	29	30801	30
AGOSTO	31832	28	33620	29	44802	30	28377	30
SEPTIEMBRE	38515	30	37614	29	46899	29	23759	30
OCTUBRE	24978	23	35630	28	32774	28	26342	31
NOVIEMBRE	28768	23	31889	25	34451	29	27569	30
DICIEMBRE	30831	27	29937	25	32580	31	28513	29
TOTAL	328945	287	357840	303	427178	337	325366	335
PROMEDIO	1146		1180		1267		971	

## RADIACION GLOBAL MENSUAL EN BTU-MES/PIEZ

	ANO	1980	ANO	1981	ANO	1982	ANO	1983	PROM. MES
MES	RADIACION	DIAS	RADIACION	DIAS	RADIACION	DIAS	RADIACION	DIAS	
ENERO	266	7	323	27	334	27	272	30	299
FEBRERO	274	21	302	28	367	27	277	26	305
MARZO	336	21	346	16	363	28	249	24	323
ABRIL	360	26	322	18	357	25	290	27	332
MAYO	290	26	252	10	315	27	278	27	284
JUNIO	221	28	259	28	284	27	270	21	259
JULIO	295	27	263	30	300	29	270	30	282
AGOSTO	298	26	304	29	356	30	249	30	302
SEPTIEMBRE	335	30	340	29	375	29	208	30	315
OCTUBRE	285	23	334	28	295	28	223	31	284
NOVIEMBRE	328	23	335	25	292	29	241	30	299
DICIEMBRE	300	27	314	25	279	31	258	29	288
TOTAL	3588	287	2456	303	3917	337	3085	335	3572
PROMEDIO	299		308		326		257		

## RADIACION GLOBAL MENSUAL EN UNIDAD PRACTICA MH-DIA/M2

	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	271,8	365,1	441,9	159,1	370,6	182,4	444,7	384,3	452,9	123,5	356,8
	233,3	255,3	466,6	329,1	417,2	334,1	274,5	354,1	269	444,7	120,8
	192,7	447,4	128,1	120,6	250,3	340,4	241,6	422,7	104,3	326,6	203,1
	481,6	438,2	120,7	108,4	101,2	320,4	186,7	222,3	450,2	373,3	420
	247	463,8	386,3	184,8	387	164,7	334,8	178,4	225,1	323,8	214,1
	329,4	208,6	403,5	244,3	172,9	302	381,6	436,5	381,6	296,5	376,1
	271,8	269	282,7	365,1	151	365,1	398	406,3	411,8	304,7	376,1
	360,1	444,7	392,5	227,8	126,3	346,8	389,8	255,3	406,3	334,9	348,6
	181,2	507,8	238,8	385,1	211,1	241,6	422,7	100	172,9	233,3	282,7
	467,4	214,1	173	280	133,7	367	370,6	356,8	409	321,2	291
	174,9	170,2	337,6	274,5	200,4	285,5	406,3	356,8	455,7	277,2	151
	123,5	395,3	216,8	395,3	156,5	348,6	345,9	398	222,3	384,3	373,3
	174,5	356,8	238,8	345,9	148,2	332,1	367,8	186,7	208,6	439,2	170,2
	461,9	214,1	400,8	348,6	205,9	365,1	409	406,3	181,2	428,2	134,5
	262,3	255,3	420	351,4	186,7	263,4	310,2	491,3	356,8	318,4	159,2
	212,4	302	291	381,6	203,1	181,2	312,8	170,2	340,4	332,1	252,5
	292,7	223,7	332	329,4	200,4	141,2	362	422,7	175,7	156,8	370,6
	382	222,3	102,4	236,1	334,1	232,1	255,3	269	192,2	367,8	236,1
	342,9	337,5	218,8	200,4	129	313,3	153,7	348,6	450,2	384,3	329,4
	342,1	381,6	765,3	274,5	258	113,2	356,8	162	16,2	340,4	376,1
	362,8	318,4	132	299,2	282,7	142,3	433,7	376,1	200,4	233,3	356,8
	291	323,9	158,3	227,8	340,4	328,2	277,2	370,6	447,4	431	428,2
	382	158,5	388,3	332,1	200,4	334,9	280	167,4	354,1	334	244,3
	342,9	340,4	291	387	131,8	332,1	389,8	164,7	351,4	417,2	400,8
	342,9	406,3	315,7	173,5	192,5	310,2		461,2	395,3	381,6	406,3
	342,9	309,8	271,8	255,3	345,9	395,3		348,6	432,7	359,6	480,4
	342,9	428,2	291	194	197,6	387		411,8	425,5	336,1	359,6
	247	323,9	425,5	277,2	362,3	304,7	293,7	247	304,7	302	348,6
	342,9	219,6	343,1	249,8	236,1	271,8	293,7	461,2	406,3	302	356,8
	342,9	323,9	148,2	406,3	961,2	282,7	406,3	447,4	450,2	400,8	433,7
	342,9	296,5		346,6		238,8	417,2		474,9		444,7
		9216	9401,4	9132,6	7200,2	9171	9516,9	9791,2	10272,1	9909,5	9802,4
		322,3	313,4	294,6	240	295,3	339,9	326,3	331,4	330,3	316,2
		502,3	466,6	406,3	461,2	395,3	444,7	491,3	474,9	444,7	480,4
		156,5	148,2	123,5	126,3	142,7	153,7	107	104,3	123,5	120,8
		30	30	31	30	31	28	30	31	30	31

	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	216	398	301,6	233,3	230,8	260,8	186,7	258	395,3	329,4	222,3
	164,2	376,1	326,6	398	120,8	395,3	400,8	398,6	216,8	362,3	334,9
	381,6	222,3	417,2	247	115,3	312,9	472,1	362,3	312,9	431	312,9
	112,5	384,3	444,7	167,4	241,6	334,9	398	367,8	299,2	312,2	359,6
	463,9	463,9	436,4	318,4	126,3	334,9	417,2	400,8	302	384,3	258
	194,9	387	332,1	302	461,2	194,9	194,9	450,2	356,8	148,2	208,6
	230,6	280	315,7	345,9	164,7	334,9	142,7	400,8	255,3	216,8	167,4
	417,2	422,7	505,1	466,6	302	356,8	280	334,9	227,8	365,1	
	175,7	351,4	376,1	428,2	355,8	274,5	222,3	411,8	120,8	269	200,4
	334,9	474,9	409	455,7	318,4	356,8	359,6	499,6	249,8	274,5	194,9
	285,5	461,2	472,1	392,5	269	356,8	450,2	384,3	200,4	362,3	227,8
	258	282,7	447,4	307,4	332,1	389,8	395,3	203,1	291	389,8	340,4
	216,8	370,6	417,2	304,7	145,5	343,1	340,4	263,5	291	403,8	211,4
	258	205,9	491,4	400,4	142,7	367,8	395,3	291	356,8	192,4	384,3
	370,6	167,4	409	450,2	296,5	285,5	370	411,8	455,7	367,8	392,5
	417,2	223,4	309	291	406,3	398	200,4	159,2	411,8	496,8	356,8
	433,7	225,1	115,3	400,8	414,5	381,6	345,9	444,7	241,6	329,4	260,8
	291	167,4	323,9	365,1	406,3	411,8	288,2	167,4	222,3	293,7	126,3
	230,6	417,2	337,6	181,2	203,1	348,6	362,3	540,8	277,2	433,7	370,6
	321,2	348,6	274,5	236,1	398	134,5	230,6	461,2	274,5	115,3	420
	409	247	288,2	203,1	186,7	420	236,1	466,6	455,7	247	343,1
	414,5	277,2	225,1	307,4	469,4	414,5	197,6	219,6	378,8	370,6	307,4
	484,3	463,9	312,9	428,2	285,5	395,3	227,8	263,5	197,6	378,8	329,4
	496,8	222,3	321,2	189,4	140	398	312,9	387	269	472,1	285,5
	381,6	274,5	441,9	178,4	170,2	315,7	466,6	474,9	318,4	255,3	326,6
	309,4	241,6	302	472,1	254,1	233,3	496,8	439,2	477,6	148,2	148,2
	309,1	203,1	281,6	387	304,7	291	403,5		428,2	351,4	258
	308,4	400,8	354,1	167,4	321,2	452,2	420		359,6	362,3	315,7
	365,1	280	439,2	142,7	431	222,3	452,9	170,2	483,1	340,4	337,6
		406,3	472,1	197,6	170,2	249,8	129	398	356,8	351,4	351,4
		293,7		302		444,7	395,3		403,5		411,8
	9940,8	9940,5	11080,2	9747,2	8292,9	10411,7	10279,8	10030,2	9887,3	9763,8	8764,6
	124,8	320,7	369,3	314,3	276,4	335,9	331,6	358,2	318	325,5	292,1
	124,8	474,9	505,1	480,4	469,4	452,9	496,8	540,4	483,1	46,8	420
	112,5	167,4	115,3	142,7	115,3	134,5	129	159,2	120,8	115,3	126,3
	29	31	30	31	30	31	31	28	31	30	30

GLOBAL PORTOVIEJO GRANOS-CALORIAS/Ce2 -DIA 1981

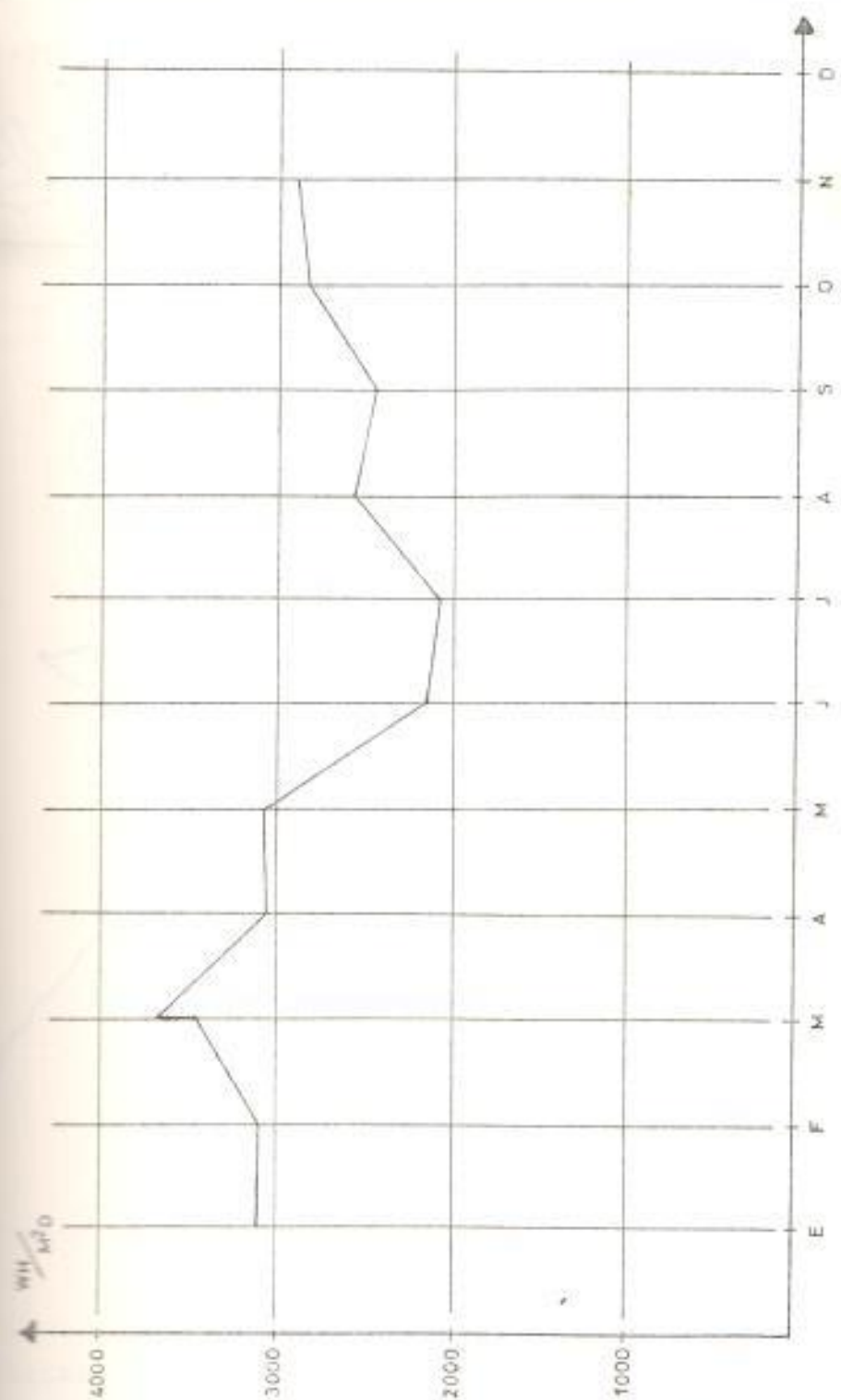
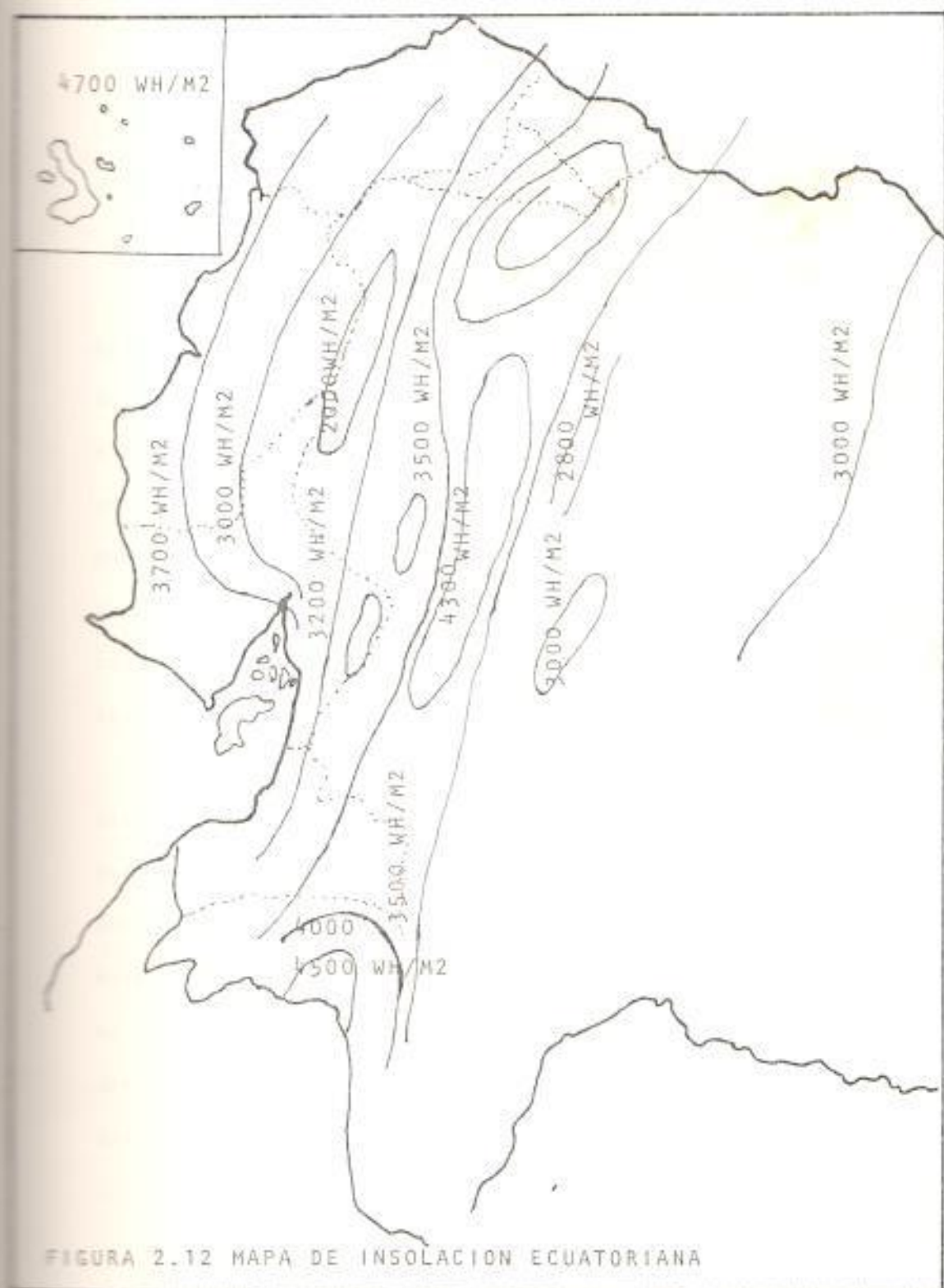


FIGURA 2.11 RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MENSUAL - MILAGRO



### 2.1.1 HELIOFANIA

La insolación diaria o mensual de la insolación expresada en horas o en porcentaje de la duración total del día es lo que se llama HELIOFANIA:

La información que se tenga en un lugar determinado es también de importancia en el diseño de un sistema fotovoltaico pues ello indicara o dara una pauta importante para saber si el lugar escogido es apropiado para el sistema a diseñarse, puesto que si existe mas horas de insolación diaria los modulos serán alimentados mas tiempo y por ende las baterias podrán cargarse lo suficiente para mantener su nivel de carga constante y poder suplir las necesidades en días de no insolación.

Desde el punto de vista estadístico, si bien es cierto que se dispone de una suficiente información de la radiación en el Ecuador (intensidad de la insolación) el instituto meteorológico dispone de información considerable sobre datos de Heliofania de muchos lugares y a partir de los cuales la Escuela Superior Politecnica del Litoral ha desarrollado un modelo computarizado para obtener la radiación global de la zona a partir de la Heliofania. \*

### MODELO EMPLEADO

La radiación solar global puede considerarse una función de la Heliopenia según la fórmula de PAGE (J.K. PAGE libro "the estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surface from sunshine records")

$$H_h = H_0 (a + bS/S)$$

Siendo  $H_0$  la radiación total en una superficie  $\alpha =$  horas del sol diarias, promedio real  $S =$  horas del sol diarias, promedio máximo posible

fuera de la atmósfera, para la misma ubicación y periodo de tiempo de  $H_h$  (constante solar =  $H_0$ ) y que vale:

$$H_0 = 24 \text{ Isc } \{ [1 + 0.033 \cos(360n/365)]$$

$$[\cos \delta \cos S \sin W_s + 2 \text{PI} W_s \sin \delta / 360 \sin S] \} / \text{PI}$$

Isc = constante solar (cal. dia/cm<sup>2</sup>)

$n$  = número del día a calcular, sin unidad

$\delta$  =

$S$  = ángulo de inclinación positiva hacia el norte (

$W_s$  = ángulo horario en relación a la salida del sol, positiva hacia mañana (grados).

$$S = 23.45 \text{ sen } (360 \cdot [284 + n] / 365) \text{ relación de Cooper}$$

La duración teórica del día (S) en función del ángulo horario solar  $W_s$ :

$$S = 2 W_s / 15 = 2 \cos^{-1}(-\text{Tg} \gamma \text{Tg} \delta) / 15$$

$\gamma$  = latitud positiva al norte (grados)

Las constantes a y b están relacionados con las condiciones climáticas del lugar considerado, y en el estudio de PAGE se ha calculado a partir del método de los mínimos cuadrados según las formulas:

$$a = \frac{\sum \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - \left[\sum \left(\frac{S}{S_0}\right) \cdot \sum \left(\frac{S}{S_0}\right) \cdot \frac{H_m}{H_0}\right]}{n \sum \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - \left[\sum \left(\frac{S}{S_0}\right)\right]^2}$$

$$b = \frac{n \sum \left(\frac{S}{S_0} \cdot \frac{H_m}{H_0}\right) - \left[\sum \left(\frac{S}{S_0}\right) \cdot \sum \left(\frac{H_m}{H_0}\right)\right]}{\sum \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - \left[\sum \left(\frac{S}{S_0}\right)\right]^2}$$

#### 2.2.4 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

El uso racional de la energía solar puede representar para el país una perspectiva muy interesante en lo que se refiere al



ahorro y conservación energética, además de protección ambiental, ante esto es lógico pensar que para establecer un adecuado sistema de aprovechamiento de la energía solar, se necesita contar con una adecuada evaluación del recurso, en otras palabras la necesidad de un buen conocimiento del potencial solar en el país es evidente.

En vista de las limitaciones que en el campo de la radiación solar tiene el país, es claro que se debería de implementar de una mejor manera una red de medición. Hay que anotar que aun contando con una adecuada red de estaciones de medición se hace necesario el desarrollo posterior de relaciones matemáticas que permitan evaluar el potencial solar para cualquier lugar en el que se planea establecer un equipo de utilización de la energía solar aun cuando este sitio no cuente con una estación de medición.

Es necesario considerar que para el caso de conversiones fotovoltaicas de energía solar a eléctrica existe una relación entre ellas la cual lo da la tabla 7.

En cuanto a los datos de radiación recogidos la mayoría de las mediciones son registros puntuales en lugar de continuos, pues el pequeño número de estaciones de medición en un país como

Ecuador que tiene una variedad de climas, no permite realizar una interpretación segura.

Las mejores partes del litoral del país en cuanto a una posible utilización de la energía eólica parecen ser: a lo largo de la costa especialmente en las cercanías de Esmeraldas, Pedernales y Salinas.

ENERGÍA	WH-día/M <sup>2</sup>					
global		2.000	3.000	4.000	5.000	6.000
ENERGÍA	WH-día/M <sup>2</sup>					
util		130	190	260	320	380

TABLA 2. RELACION DE ENERGIA UTIL VS ENERGIA RECIBIDA. INE

## CAPITULO 3

### 3.0.- LA CELULA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA OBTENCION DE LA ENERGIA ELECTRICA .

La conversión de la energía de las radiaciones ópticas en energía eléctrica es un fenómeno físico conocido con el nombre de efecto fotovoltaico. La célula solar es sin duda en la actualidad el dispositivo fotovoltaico más importante diseñado para la conversión de la energía solar en energía eléctrica, con este fin han sido ampliamente utilizadas en aplicaciones espaciales, como generadores casi permanentes de energía casi sin ningún costo de funcionamiento y con una alta relación energía / peso en comparación con otras fuentes de energía.

Actualmente la energía solar aparece cada vez más como una alternativa potencial de primer orden a tener en consideración con la puesta a punto de nuevas fuentes de energía. Se trata de una energía inextinguible, disponible en todo lugar y cuyo aprovechamiento no es causa de contaminación. En esta perspectiva, las aplicaciones terrestres de la célula solar para la generación fotovoltaica de energía eléctrica están mereciendo una atención creciente totalmente justificada.

La viabilidad técnica de utilizar también la conversión fotovoltaica en las aplicaciones terrestres está ya bien establecida, lo que falta es alcanzar la viabilidad económica para la utilización terrestre en gran escala, esto significa reducir los costos de los sistemas fotovoltaicos hasta hacerlos competitivos con los obtenidos en otras fuentes alternativas de energía y al hablar de sistemas fotovoltaicos hay que considerar no solo la célula solar, sino también otras características importantes como son: almacenamiento de energía, energía auxiliar, conexión con la línea, etc.

El objeto de este capítulo es la descripción del sistema directo de conversión de la energía eléctrica con ayuda de los dispositivos fotovoltaicos conocidos con el nombre de células solares. El esquema de la figura 3.1 recoge los elementos fundamentales del proceso que serán analizados posteriormente.

### 3.1.- ESTUDIO DE LA CELULA SOLAR Y CONOCIMIENTO DEL PROCESO DE CONVERSION DIRECTA DE ENERGIA SOLAR EN ENERGIA ELECTRICA (PROBLEMAS Y REALIDADES).

La célula solar fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir directamente energía luminosa en energía eléctrica sin que medie ningún ciclo o proceso térmico ni mecánico.

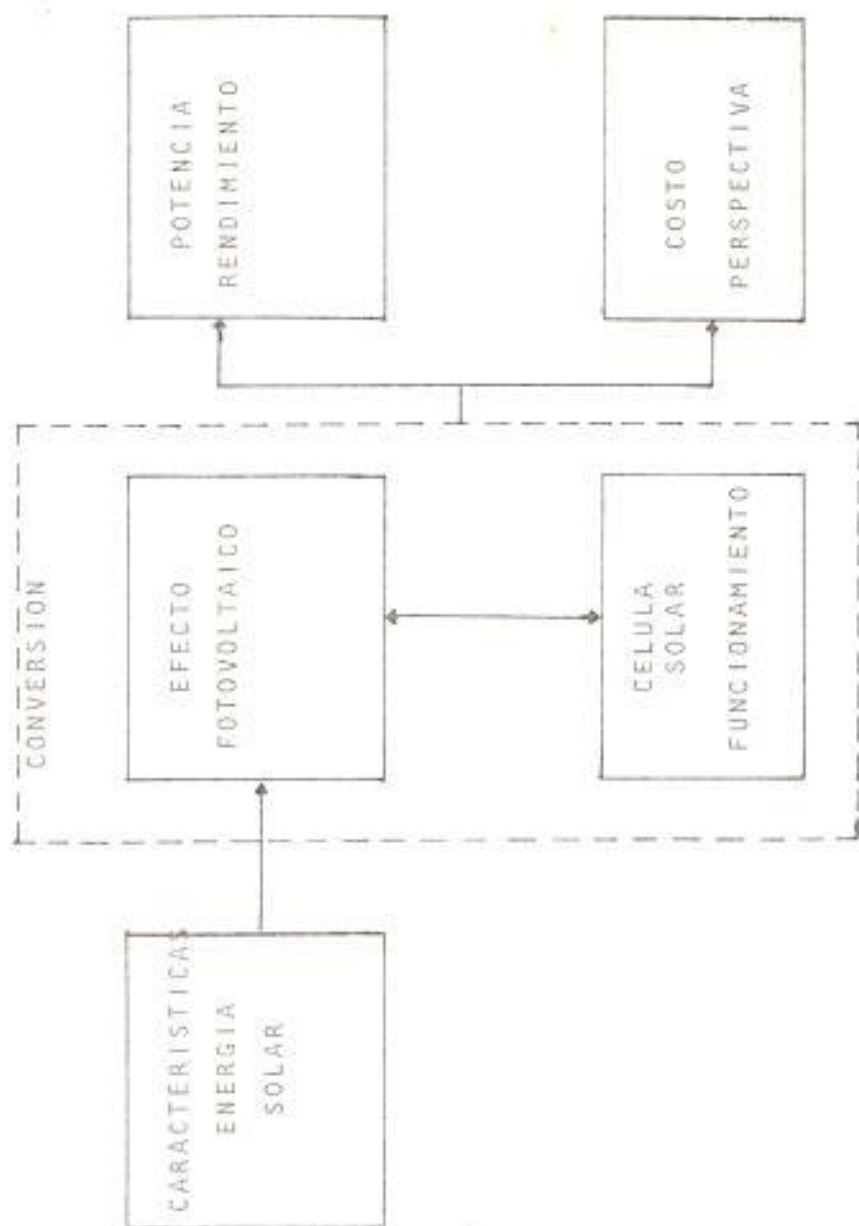


FIGURA 3.1 CONVERSION DIRECTA DE LA ENERGIA SOLAR

El efecto fotovoltaico en células electrolíticas fue descubierta por BECQUEREL en 1839 y fotoconductividad en Selenio por WILLONGHBY en 1873. En 1883 descubrió la primera célula fotovoltaica de selenio, un paso importante intermedio en este desarrollo histórico que está ligado al desarrollo del rectificador de cobre/óxido de cobre hacia 1920 y su aplicación como dispositivo fotovoltaico, pero en 1954 CHAPIN, FUELLER Y PEARSON desarrollan la primera célula solar en silicio monocristalino capaz de convertir energía con una cierta eficiencia. A partir de ahí las células solares se utilizan como fuentes de energía en vehículos espaciales y para usos especiales en la superficie de tierra.

Una cronología de los hechos más relevante en el desarrollo teórico y experimental de las células solares hasta 1967 se ha resumido en la tabla 3.

Para conocer un poco acerca de la estructura y su forma de trabajar es necesario conocer lo siguiente:

Prácticamente todas las células solares actuales disponibles a nivel comercial (células de silicio) son diodos de material semiconductor (pastilla semiconductor de silicio) formadas por una unión P-N en una oblea de silicio por difusión (figura 3.2).

DESCUBRIMIENTO DEL SELENIO (BERZELIUS)	1817
EFEECTO FOTOVOLTAICO (BECQUEREL)	1839
EFEECTO FOTOCONDUCTIVO EN Se (W. SMITH)	1873
EFEECTO FOTOCONDUCTIVO EN Se (ADAMS DAY)	1876
CELULAS FOTOVOLTAICAS Se (FRITTS/ULJANIN)	1883
FOTOSENSIBILIDAD DEL Cu (HALWATCH)	1904
SE RELACIONA EFECTO FOTOVOLTAICO CON BARRERA DE POTENCIAL (GOLDMAN Y BRODSKY)	1917
RECTIFICADOR DE Cu/Cu <sub>2</sub> O (GRONDAHL)	1920
CELULA FOTOVOLTAICA DE Cu/Cu <sub>2</sub> O (GRONDAHL Y GEIBER)	1927
PRIMERAS TEORIAS. CIRCUITO EQUIVALENTE (SCHOTT Y OTROS)	1928
APLICACIONES FOTOMETRICAS (LAUSE)	1930
CELULAS DEL 1% DE Si (NIX Y TREPTOW)	1941
CELULA DE SILICIO DE UNION CRECIDA (ORZ)	1942
TEORIA UNION P - N (SCHUFLY)	1949
CELULA DE Si 6% (CHAPIN, FULLER Y PEARSON)	1954
CELULA DE Se <sub>2</sub> (REINOLDS)	
TEORIA AVANZADA DE UNION P - N (SAR, LINDYSE, SHOCKLEY), TEORIA CELULA SOLAR (PFFANN Y ROUSSECK)	1955
CELULA RESISTENTE A LAS RADIACIONES (MANDELKORN Y KELPERS)	1960
CONTACTOS DE Ti - Au EVAPORADOS	1961
MODELO DE CELULA SiO <sub>2</sub> - SiC (SHIOZAMA)	1967

TABLA 3 HECHOS RELEVANTES EN EL DESARROLLO DE CELULAS

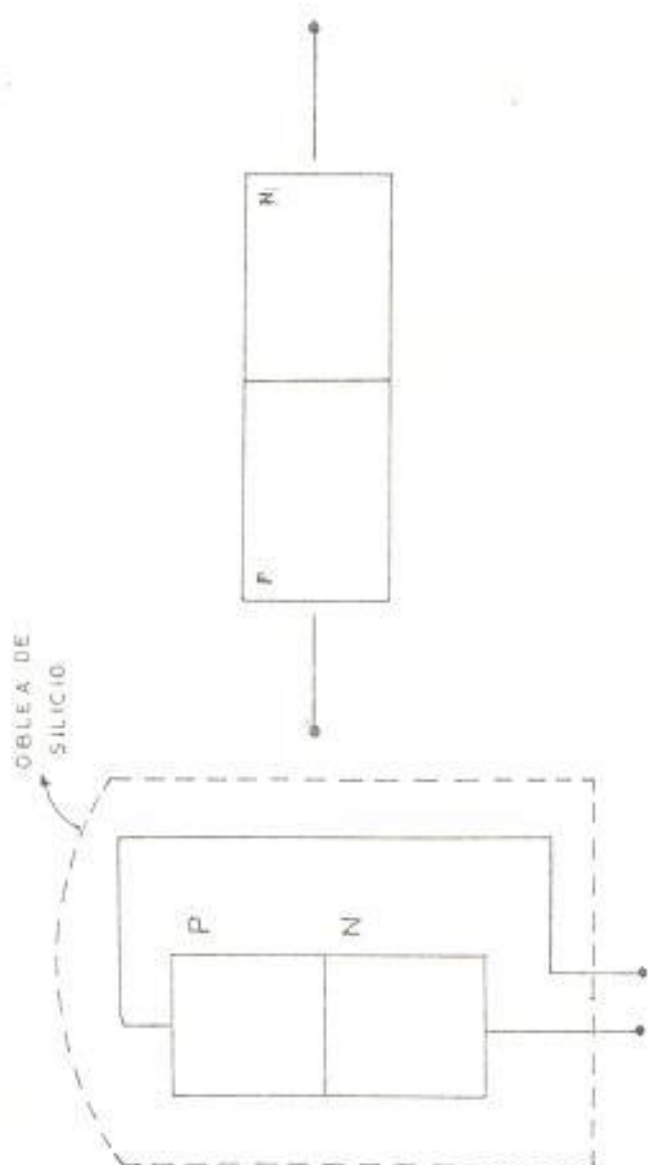


FIGURA 3.2 COMPOSICION ESTRUCTURAL DE UNA CELULA SOLAR



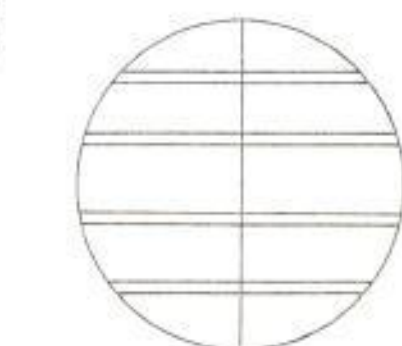
La unión es superficial con valores típicos de anchura de la capa difundida de 0.2 - 0.5  $\mu\text{m}$ . Como la incidencia de luz debe ser óptima y eficiente la forma geométrica de las células de silicio cambia pero generalmente son de la forma de la figura 3.1.

Si en el interior del semiconductor se crea de algún modo un campo eléctrico, estos electrones se ponen en movimiento acelerados por este campo y constituyen una corriente eléctrica que puede recogerse en el exterior. También los enlaces rotos crean unas carencias de carga eléctrica denominadas huecos capaces de moverse de átomo en átomo y que por consiguiente son también portadores de corriente con carga eléctrica positiva.

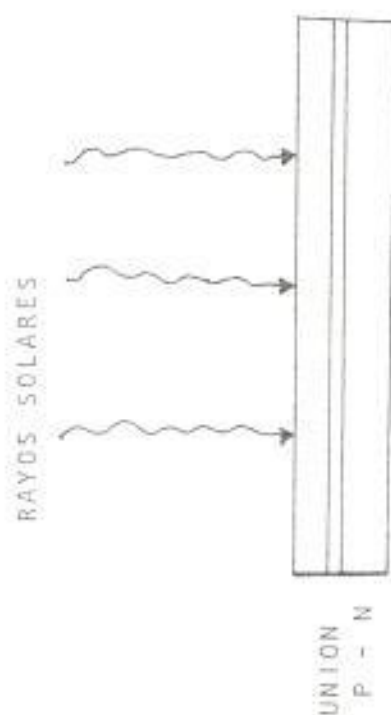
Típicamente el material semiconductor empleado es el silicio y la formación del campo eléctrico mencionado se realiza mediante una difusión de átomos de Boro o de Fósforo cerca de la superficie, de manera que el campo eléctrico se produce en la frontera entre la región superficial y la región contaminada con los átomos mencionados, y perpendicular a ella.

De esta manera al llegar la luz solar al diodo P-N se produce la generación de corriente eléctrica.

Red Eléctrica  
Que produce  
Cada Celula



VISTA FRONTAL



VISTA TRANSVERSAL

FIGURA 3.3 VISTA TRANSVERSAL Y FRONTAL DE UNA CELULA SOLAR

Para efectos de explicación de la generación de corriente en el diodo representamos gráficamente un diodo P-N (figura 3.4).

Donde el material P contiene átomos con impurezas de la III columna (3 electrones libres en la última capa de la órbita del átomo que sirven para enlazarse con otros electrones de la última capa de otro átomo de silicio) y el material N contiene átomos con impurezas de la V columna introducidas por el fabricante (5 electrones en la última capa de la órbita del átomo).

Ahora bien, si cada átomo debe aportar con 4 electrones (IV columna para enlazar covalentemente con el átomo vecino (figura 3.5). Entonces si un átomo de V columna tiene un electrón libre para enlazar originando los electrones libres que producen una continuidad (densidad electrónica), y si es de III columna en el enlace con otro átomo, se enlaza solo con un electrón (enlace vacío o hueco) produciendo también conductividad pues estos enlaces vacíos dan cabida a que otros electrones de valencia ocupen espacio y se muevan.

Luego cuando las impurezas son de III columna (tipo P) el átomo se comporta como ion aceptor, y si las impurezas son de V columna (tipo N) el átomo se comporta como ion donante. Debido a la



$n$  = DENSIDAD DE ELECTRONES LIBRES POR  $\text{cm}^2$   
 $p$  = DENSIDAD DE ENLACES VACIOS (HUECOS) POR  $\text{cm}^2$

FIGURA 3.4 DISTRIBUCION ELECTRONICA EN UN DIODO P - N

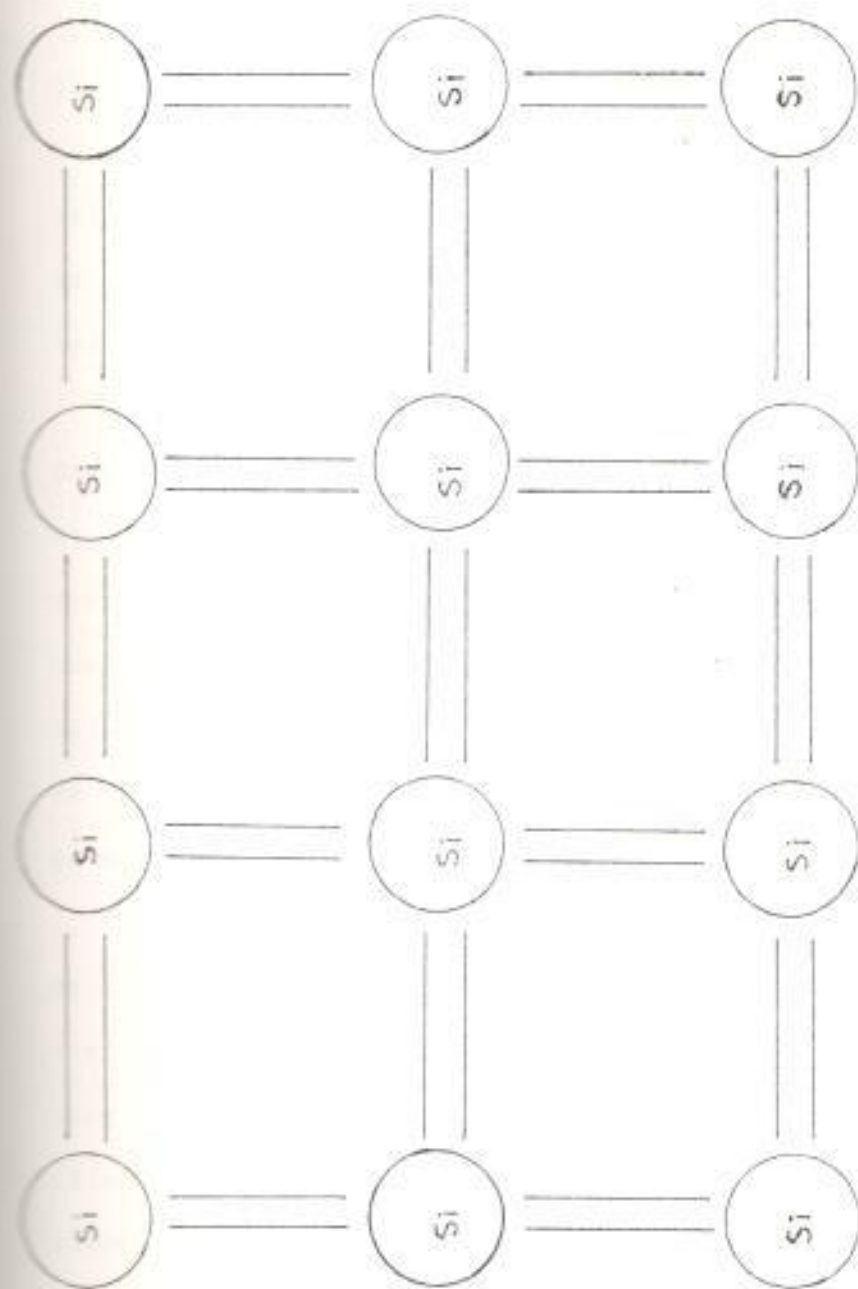


FIGURA 3.5 ELECTRONES DE ULTIMA CAPA QUE SE COMPARTEN CON ELECTRONES DE ULTIMA CAPA DE OTRO ATOMO DE SILICIO.

migración de electrones y de huecos en un diodo P-N aparece un fenómeno de unión llamado POTENCIAL DE BARRERA (figura 3.6).

La luz solar con sus portadores de carga al incidir sobre la cara N hacen que mayor cantidad de electrones libres rompan los enlaces de sus órbitas produciendo una mayor cantidad de flujo de electrones libres y por ende un mayor flujo electrónico (electricidad directa).

Cuando una célula solar es iluminada y se aplica una diferencia de potencial entre sus terminales, suministra una densidad de corriente  $J$ . Existe un rango de funcionamiento en el cual la corriente sale al circuito exterior de la célula por el terminal positivo y vuelve a la célula por el negativo; es el rango de funcionamiento de la célula como generador, y por tanto el de mayor interés, desde nuestro punto de vista.

En las condiciones de funcionamiento señaladas, la célula solar está sometida a dos tipos de excitaciones externas: la iluminación y el voltaje aplicados; y es admittivo para empezar que la célula responde linealmente a estas excitaciones (hipótesis cierta en gran número de células prácticas y aproximadas en otro). La corriente generada (respuesta a las excitaciones) vendrá dada, entonces por la suma algebraica de las dos siguientes:

Potencial de Barrera  
o de Polarización

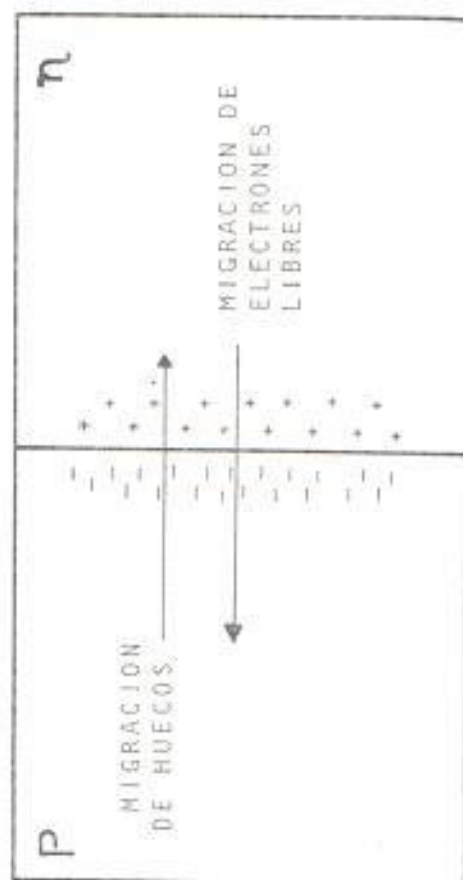


FIGURA 3.6 POTENCIAL DE BARRERA DE UN DIODO P - N

$J_1$  = Corriente fotogenerada o fotocorriente producida por la iluminación en ausencia de excitación externa (coincide generalmente con  $V=0$ , condición de cortocircuito).

$J_2$  = Corriente de oscuridad o corriente del diodo, producida por la polarización con un voltaje externo en ausencia de iluminación.

En la región de funcionamiento de la célula como generador estas 2 componentes se oponen en forma que tomando como positivas las corrientes de generación, se puede escribir:

$$J = J_1 - J_2$$

Que es la ecuación fundamental de una célula solar, válida en todos sus rangos de funcionamiento si se admite el convenio habitual de signos para las corrientes y tensiones de un diodo (polarización directa,  $J_1$  positiva; polarización inversa,  $J_2$  negativa).

Para entender la generación de la fotocorriente consideremos la célula iluminada y en cortocircuito como se indica en la figura 3.7 y 3.8 una parte de la radiación incidente se reflejará en la superficie y el resto penetrará en el volumen del semiconductor, donde los fotones de energía superior al ancho



$$J = J_L - J_D(V)$$

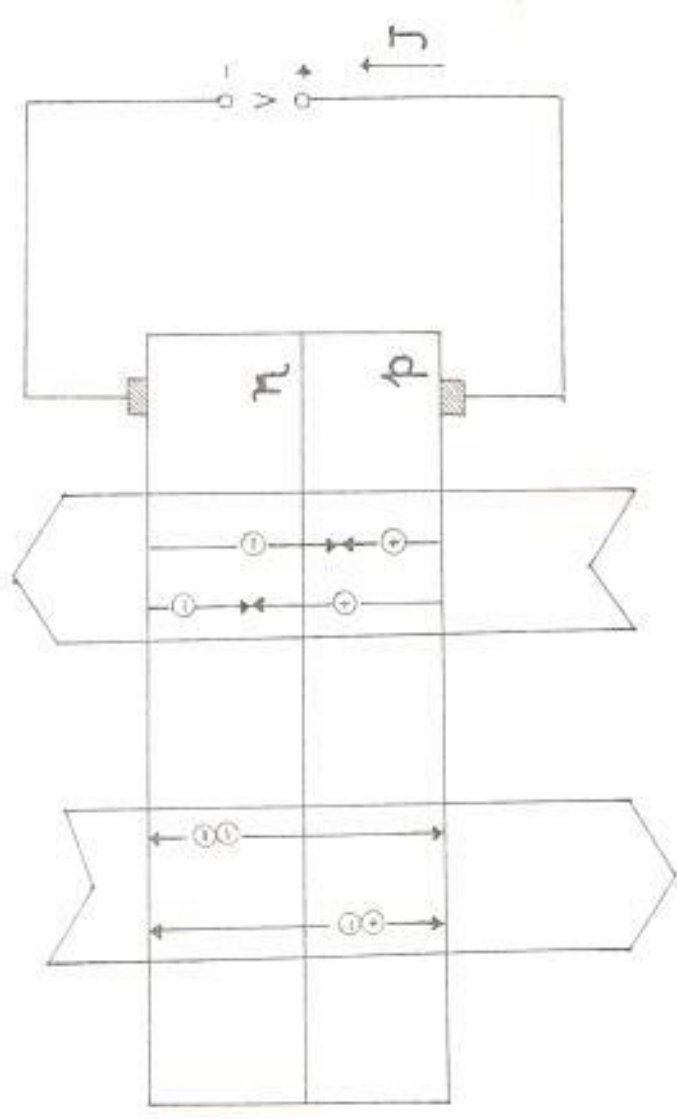


FIGURA 3.7 COMPONENTES DE CORRIENTE EN UNA CELULA SOLAR DEBIDAS A ILUMINACION Y A LA POLARIZACION.

Perdidas por Reflexion:  $N_{fr}$

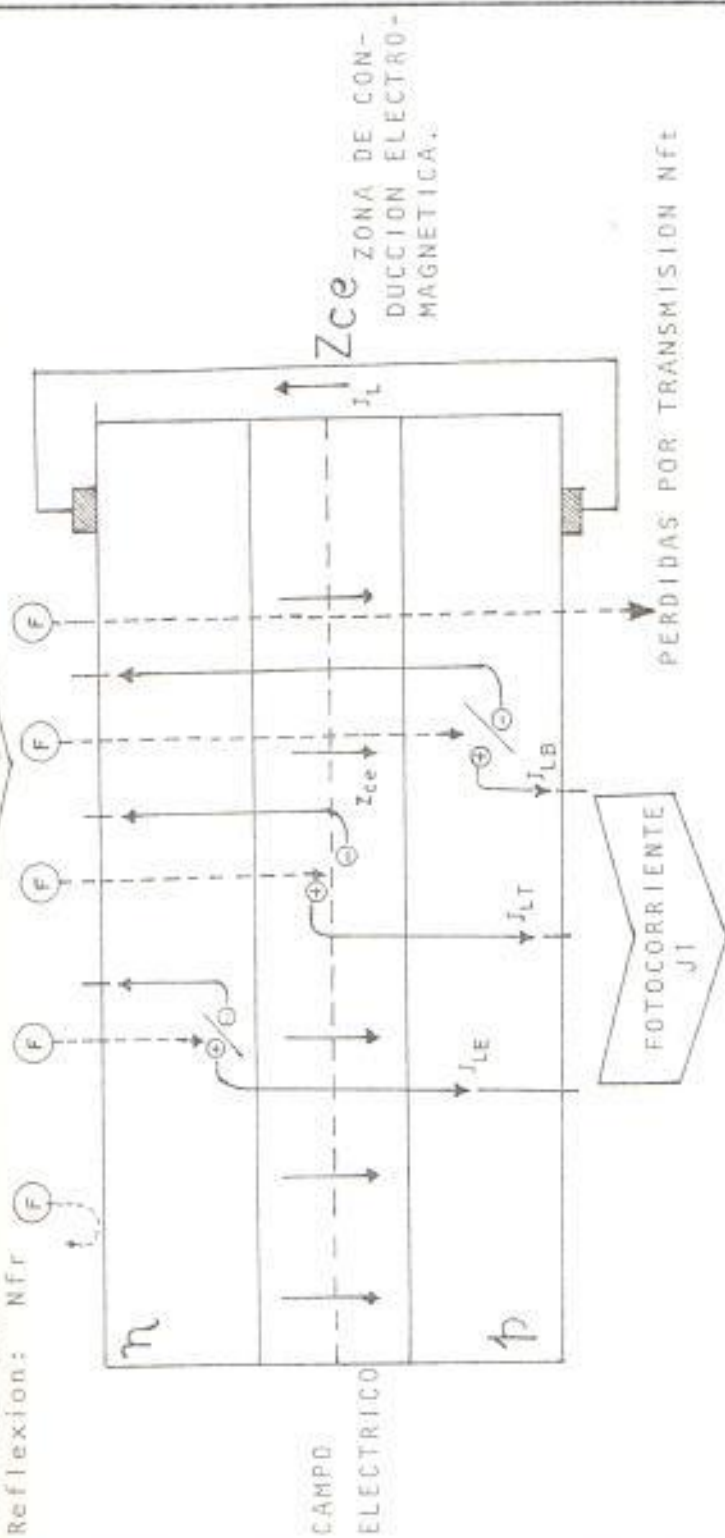


FIGURA 3.8 FORMA DE GENERACION DE LA FOTOCORRIENTE EN UNA CELULA SOLAR

de la banda prohibida del semiconductor, podrán ser absorbidos por electrones de la banda de valencia que pasaran a la banda de conducción, generandose así un par electron hueco. Los fotones no absorbidos saldrán nuevamente al exterior por la cara no iluminada y al igual que los reflejados, no son útiles para la fotogeneración.

Los electrones y huecos generados en la zona de carga de espacio (Zce) o zona de transición, son separados y arrastrados por el campo eléctrico de esta zona, como se puede apreciar en la figura anterior para ser inyectados en la zonas N y P respectivamente. se trata de una inyección de mayoritarios que se redistribuirán en dichas zonas y avanzaran hacia los contactos por arrastre fundamentalmente, el campo eléctrico ha actuado, por tanto de separador de los electrones y huecos generados, impidiendo su recombinación y originando la componente de la fotocorriente que denominaremos  $I_{1+}$ .

Los huecos y los electrones generados en la zona neutra tipo N (zona difundida y emisor de la célula en este caso) se difundirán hacia la Zce y hacia el contacto. los electrones repelidos por el campo de la Zce, no pueden atravesar dicha zona; pero si pueden circular como mayoritarios hacia el contacto. por el contrario los huecos que llegan al borde de la Zce son colectados y arrastrados por el campo e inyectados en la zona

P, en la que son mayoritarios y en la que se redistribuirán y avanzarán por arrastre. El campo de la zona dipolar actúa de nuevo como separador de ambos tipos de portadores, originándose otra componente de fotocorriente que se denomina  $J_{LK}$ ; una explicación totalmente similar puede darse naturalmente para los huecos y electrones generados en la zona neutra tipo P (sustrato y base de la célula en este caso) que dan lugar a la componente de fotocorriente  $J_{w}$ .

La suma de las tres componentes de la fotocorriente constituye la corriente de fotogeneración  $J_L$ :

$$J_L = J_{LW} + J_{LK} + J_{LP}$$

Que circulará por el circuito externo en el sentido de P a N como se ve en la figura anterior.

Naturalmente en una célula real no todos los portadores fotogenerados son separados por el campo eléctrico y se incorporan a la fotocorriente, una parte de ellos (que en correcto diseño deben minimizar) vuelven a recombinarse en el propio volumen y en los contactos del dispositivo generando calor y resultando inútiles para la generación de corriente. Es decir si  $N_e$  es el número total de fotones incidentes sobre la célula, por unidad de tiempo y superficie, y si  $c/\text{fotón}$  crea un

por electrón hueco, la máxima corriente que podría ser generada es:

$$J_{00} = eN_0 \quad e = \text{campo eléctrico}$$

Y evidentemente:

$$J_{00} = -J_{00}$$

Con el signo igual únicamente para un dispositivo ideal donde la recombinación de portadores fuese nula.

Existe una corriente la cual es necesario conocerla y es la corriente de POLARIZACIÓN .

La cual en ausencia de iluminación, la polarización de la célula solar da lugar a las corrientes habituales en un diodo de unión PN. Una tensión de polarización directa (lado P positivo respecto a N) produce una inyección de portadores minoritarios a ambos lados de la zona Zce, como consecuencia de la barrera de potencial de la unión: los electrones del lado N se inyectan en el lado P, donde son minoritarios y desaparecen por recombinación con electrones bien en el volumen, bien en la superficie de la región tipo P. esta circulación de portadores se ilustra en la figura 3.9 y constituye una de las componentes de las corrientes del diodo que llamare  $J_{db}$ , de forma análoga se origina la componente de corriente  $J_{nb}$ , por la recombinación de los huecos inyectados en el emisor y la compo-

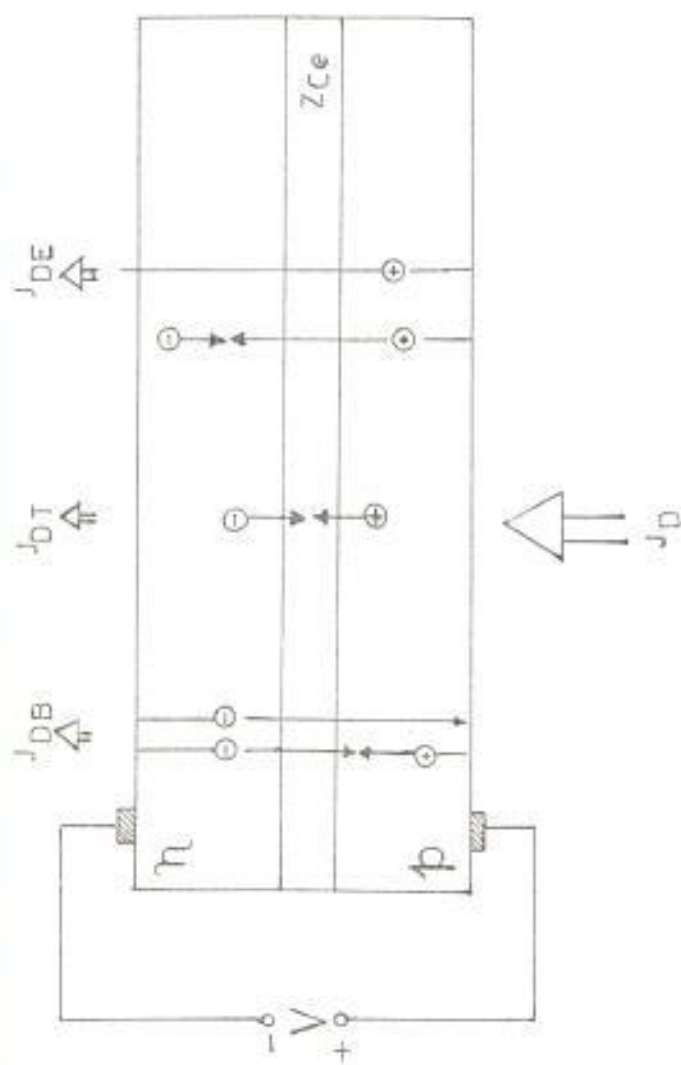


FIGURA 3.9 CORRIENTE DE POLARIZACION EN OSCURIDAD CON POLARIZACION DIRECTA

mente  $J_{Dr}$  por la recombinación de los electrones y huecos atrapados en la zona. Luego la suma de las tres componentes constituye la corriente del diodo, o de la oscuridad  $J_0$ .

$$J_n(V) = J_{Dr} + J_{Dp} + J_{D0}$$

Que circulará por el circuito externo en el sentido de N a P y se opondrá a la fotocorriente, caso de haberla si la tensión V es de polarización inversa, se produce entonces una disminución de la concentración de portadores minoritarios a ambos lados de la ZC, como consecuencia del aumento del potencial de la barrera de la unión dando lugar a una generación térmica de pares electrón hueco. Los portadores así generados son extraídos y separados por el campo de la unión de forma análoga a los portadores generados por la luz en el caso de la fotocorriente. La corriente de polarización inversa circulará por el circuito de P a N y se sumará a la fotocorriente cuando exista. Esta corriente de generación térmica por polarización inversa suele ser, sin embargo muy pequeña. (figura 3.10).

En base a lo anteriormente visto podemos concluir como circuito equivalente de una célula solar el siguiente (figura 3.11).

Otra característica importante a considerar en una célula solar es el rendimiento energético de la misma, la cual es función

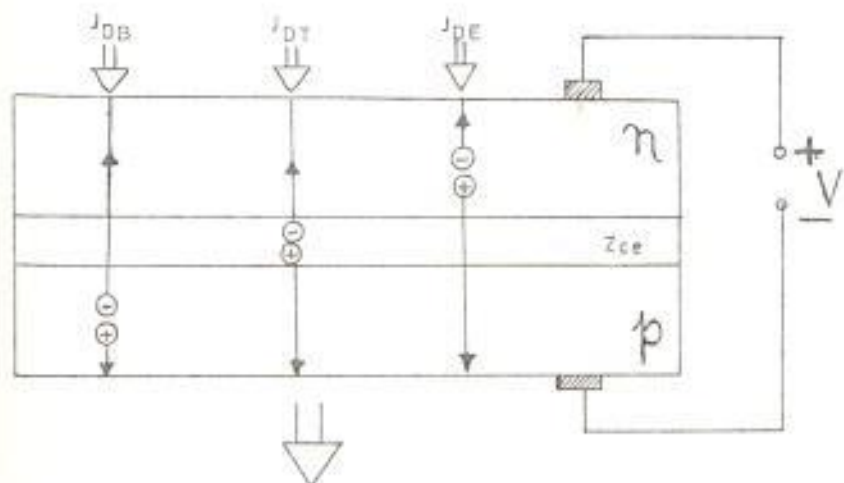


FIGURA 3.10 CORRIENTE DE POLARIZACIÓN EN OSCURIDAD CON POLARIZACIÓN INVERSA.

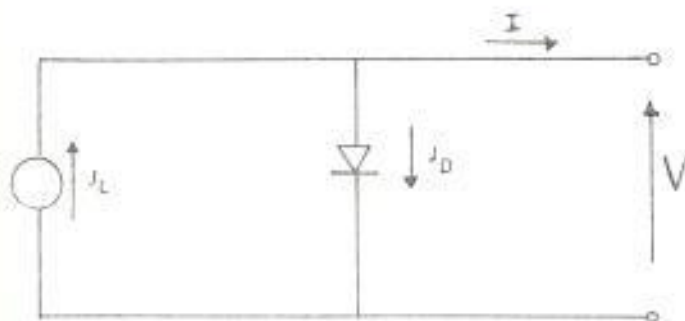


FIGURA 3.11 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA CELULA SOLAR.



del reparto espectral de los fotones que inciden sobre la célula, lo que equivale a decir que la célula proporciona más energía eléctrica con determinadas radiaciones luminosas que con otras, por lo que la potencia eléctrica dada depende de la longitud de onda de los componentes de luz aplicada. (Esto habrá que tenerse en cuenta para cuando haya que substituir la luz del sol por la de otra fuente).

### 3.1.1 CONCENTRACION FOTOVOLTAICA: TEORIA Y TECNOLOGIA PARA ELECTRIFICACION SOLAR.

El corazón de un generador de electricidad a partir de la energía solar, basado en el efecto fotovoltaico es la célula solar, el cual es un elemento sin órganos móviles de ningún tipo que, por este motivo, es de gran simplicidad de funcionamiento y de muy larga duración.

Una célula solar está hecha de un material semiconductor, es decir de un material en el que los enlaces de los electrones en sus átomos no son ni excesivamente fuertes, ni excesivamente débiles, teniendo en cuenta la energía apropiada entre 0.8 y 1.0 electro-voltios para que estos enlaces puedan ser rotos al chocar con ellos los fotones de la luz solar, de energía promedio 1.4 electron-voltios aproximadamente.

En la figura 3.12 puede verse la pastilla de silicio, la frontera o unión de las dos regiones antes mencionadas y por último unos electrodos metálicos depositados en la superficie y a los que se sueldan unos hilos que serán los conductores de la corriente eléctrica producida. En la figura se observa que el electrodo superior tiene forma de peine, ello se debe a la imposibilidad de que la luz penetre en el semiconductor a través de una placa de metal continua de espesor apropiado.

El rendimiento típico de una célula solar es del orden del 12%, esta cantidad aparentemente baja es elevada si se compara con cualquier otro medio natural o artificial de aprovechar la energía solar.

Las células solares son muy caras la razón para ello es de que el semiconductor que se emplea es el Silicio (afortunadamente este es un material abundante (constituye el 28% de la corteza terrestre) y el grado de pureza hoy utilizado es innecesario de manera que todo hace esperar que los costos disminuyan con los años y así su uso energético en gran escala sea rentable. Otra vía sin embargo constituyen el uso de nuevos materiales que cuesten menos aunque se requerirá esfuerzo considerable de trabajo científico.

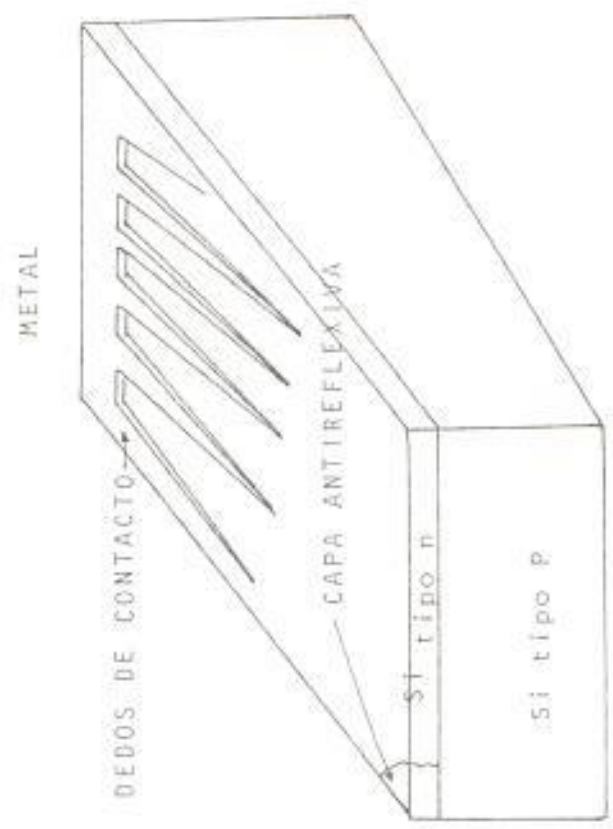


FIGURA 3.12 ESQUEMA DE UNA CELULA SOLAR

Inv. No. \_\_\_\_\_

Pero existe otro camino del que se habla menos, pero que es mucho mas viable a corto plazo y cuyo potencial será grande, este camino es conceptualmente muy simple, consiste en concentrar la luz solar que se recoge por espejos o lentes de grandes dimensiones sobre células de pequeñas dimensiones. De este modo el área de las células solares que hay que emplear se reduce de 40 a 100 veces típicamente y como consecuencia el precio del sistema puede ser sensiblemente mas económico. En la base de este razonamiento esta el hecho de que si sobre una célula solar incide una cantidad energía elevada, el rendimiento no se altera sustancialmente y por consiguiente permite obtener una energía también elevada.

Uno de los metodos más empleados es el panel de RAMON ARECES el cual es de unos 25 m<sup>2</sup> de área proporcionando una potencia pico de 1.8 KW, consta de 36 módulos, c/u con 4 células solares y 4 lentes de FRESNEL, de modo que las zonas focales de estas se sitúan sobre aquellas (figura 3.13).

Las células solares diseñadas para trabajar en alta concentración presentan fuertes pérdidas de tipo resistivo debido a las fuertes corrientes generadas en su seno. Para obviarlo es preciso un diseño muy cuidadoso de la malla de metalización (malla densa).

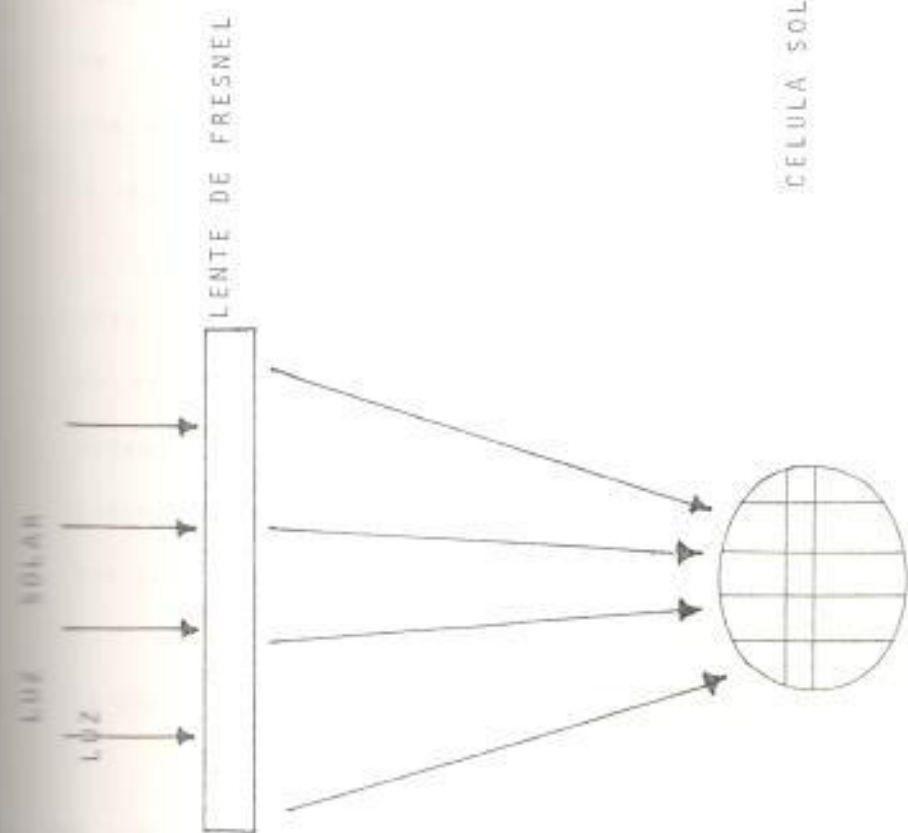


FIGURA 3.13 MODO DE CONCENTRACION DE LUZ SOLAR. LENTE DE FRESNEL

Sin embargo si bien los lentes concentradores como las vigas que los soportan no pueden ser muy caros se necesitan de seguidores solares en el conjunto lo cual eleva el costo del sistema.

Otro método utilizado para la concentración de la energía solar es el método del farol de carro (Silvin), el cual hace que la energía solar se concentre en la célula por reflexión (figura 3.14).

Existen otros métodos de concentración que sin embargo siguen en estudio e investigación para efectos de reducir costos y obtener mayor concentración tales como concentradores luminiscente, y de concentración espectral, los cuales no pueden aun ser muy explotados por motivos de costos.

### 3.2.- LA CELULA SOLAR COMO GENERADOR.

Una vez conocido el elemento básico de la conversión fotovoltaica. La célula solar. Es necesario conocer la función del panel o generador fotovoltaico en el marco de un sistema fotovoltaico.

Se entiende por sistema fotovoltaico el conjunto de elementos capaces de convertir la energía radiante solar en energía UTILIZABLE por el usuario mediante el empleo de células solares fotovoltaicas.

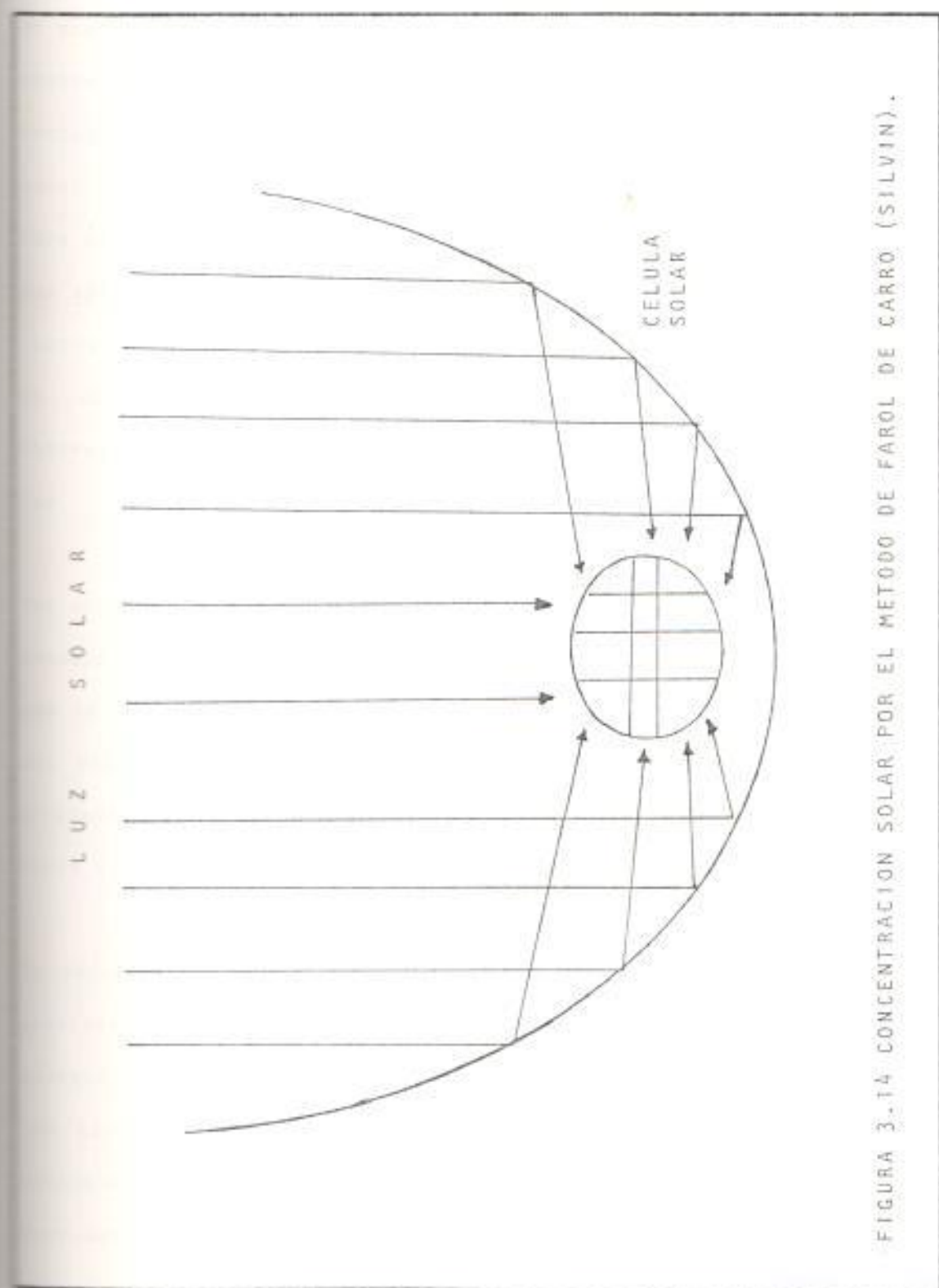


FIGURA 3.14 CONCENTRACION SOLAR POR EL METODO DE FAROL DE CARRO (SILVIN).

Un sistema comprende un elemento conversor que recibe generalmente el nombre de "PANEL FOTOVOLTAICO" mas otros aparatos relativamente convencionales que transforman o almacenan la energia eléctrica para que pueda ser utilizada facilmente por el usuario. El tamaño y la estructura del sistema fotovoltaico de uso terrestre son tan variados como sus aplicaciones y están además ligados a la localización de la estación y a las características de radiación de esta última. Sin embargo, en casi todos los casos el elemento más importante, el panel fotovoltaico, es bastante independiente de la aplicación y del usuario.

Por otra parte el costo de la energia fotovoltaica se debe casi exclusivamente al costo de adquisición del equipo y su instalación, puesto que la materia prima, la luz solar es gratuita. Parte muy importante del costo del sistema lo constituyen el generador y por ello los primeros intentos de reducir el costo de esta energia se dirigen hacia el abaratamiento de los paneles.

Se entiende por generador fotovoltaico al conjunto de elementos que permitan alimentar permanentemente una carga eléctrica a partir de la energia solar incidente. Dentro de este conjunto de elementos tenemos las células solares las cuales están conectadas entre sí en forma conveniente (serie o paralelo) en orden a incrementar capacidades de corriente, voltaje y potencia.



### 3.2.1 MODULOS FOTOVOLTAICOS.

Se entiende por módulos fotovoltaicos al arreglo de células solares en una sola plancha o panel. Estas células están entre dos placas transparentes que actúan como barrera encapsulante para protegerlas de los agentes atmosféricos.

Todas las células de un panel o módulo suelen ser del mismo tamaño, y suelen venir en número aproximado de 30 por panel (dados por el fabricante).

El panel suele presentar dos bornes de salida, positiva y negativa, aisladas ambas del marco metálico que le confiere rigidez mecánica y puntos de sujeción.

La salida de voltaje de un panel o módulo FV está normalmente fijado para obtener un voltaje directo de 12 ó 24 voltios.

Tras el desarrollo de células bifaciales, capaces de recibir luz por ambas caras, se ha desarrollado y evaluado el llamado "panel plano colector de albedo" en el cual las células bifaciales están encerradas necesariamente entre 2 placas transparentes. Estos paneles planos son capaces de coleccionar 1.5 veces más energía que los convencionales equipados con células

monodireccionales en cualquier hora del día, con la única exigencia de pintar de blanco el suelo donde se instala el panel.

### 3.1.1 ARRAY FOTOVOLTAICO.

Se entiende por ARRAY FOTOVOLTAICO al conjunto de módulos o paneles fotovoltaicos conectados en serie o paralelo según la necesidad de voltaje, corriente y potencia.

Los array fotovoltaicos constituyen siempre los generadores fotovoltaicos pues la única manera de poder satisfacer necesidades de importancia en los campos de aplicación, pues solamente con un módulo no se alcanzarán los voltajes y potencias deseadas, (figura 3.15).

### 3.2.- COMPONENTES BASICOS DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO AUTONOMO.

Entendiendo por generador fotovoltaico al conjunto de elementos que permiten alimentar permanentemente una carga eléctrica a partir de la energía solar incidente, veamos ahora la estructura básica de estos sistemas justificando la necesidad de cada elemento y estudiando sus características principales desde el punto de vista energético orientándolo hacia el dimensionado.

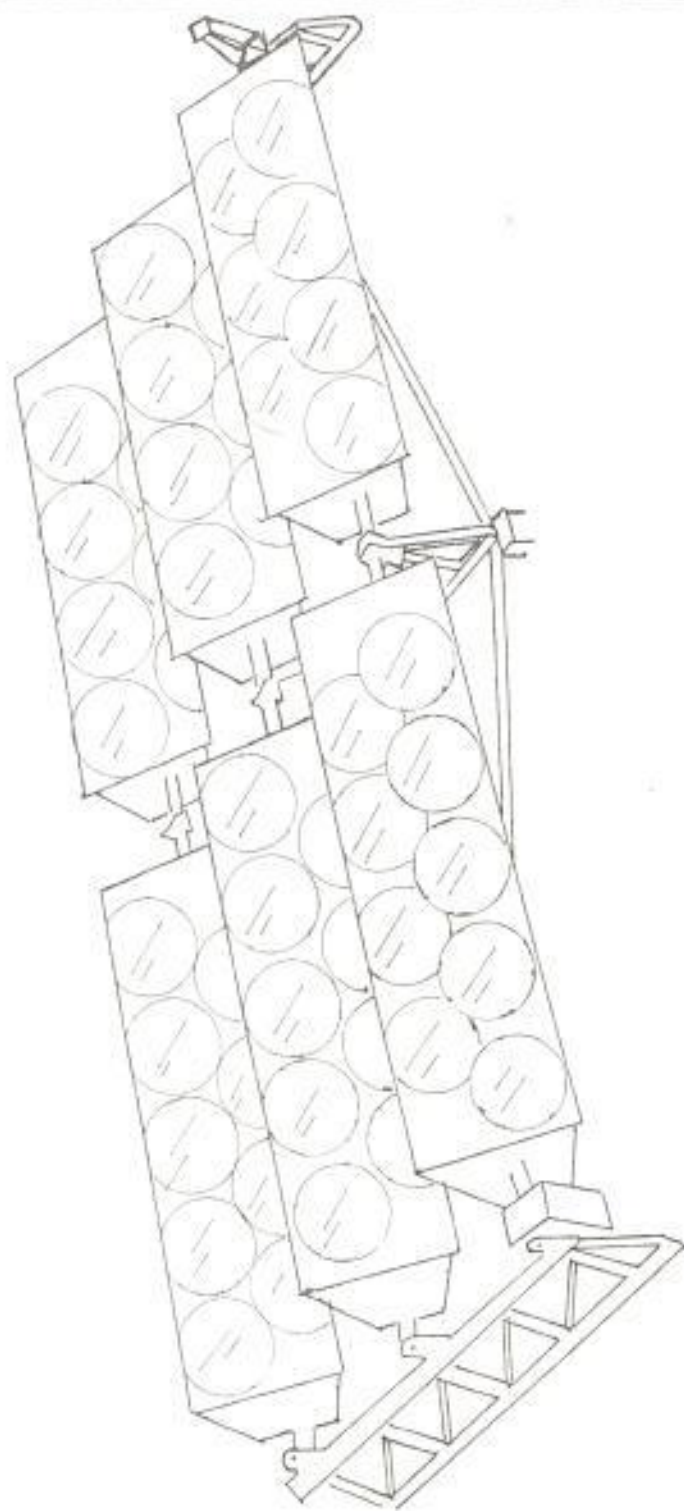


FIGURA 3.15 EJEMPLO DE DISPOSICION DE PANELES FOTOVOLTAICOS PARA RECEPCION DE ENERGIA SOLAR, PARA CONVERTIRLA DIRECTAMENTE A ENERGIA ELECTRICA.

Los elementos fundamentales que caracterizan a todo generador fotovoltaico son la propia carga y el panel solar. En general un sistema tan simple sólo permitiría consumos proporcionales a la radiación solar, esto es durante las horas del día y especialmente en días claros.

Por regla general es necesario dotar al conjunto de un sistema de acumulación que permita liberar el consumo de la generación, tales sistemas pueden adoptar muchas y variadas formas aunque suele ser frecuente la acumulación en baterías secundarias.

Para conseguir una buena adaptación entre las características de la batería y las del panel, incrementando el rendimiento del conjunto y prolongando la vida de la primera es conveniente intercalar entre ambos elementos un sistema electrónico de regulación que evite sobrecarga o descargas en el acumulador.

En ocasiones será necesario adaptar las características de la corriente entregada por el conjunto panel/batería a las de la carga, siendo frecuente el uso de inversores estáticos cuyas pérdidas deberán ser tenidas en consideración.

Por último para aumentar la fiabilidad y continuidad del suministro, puede resultar conveniente el uso de algún tipo de generador auxiliar

(grupos electrógenos, etc), aunque por regla general su costo no lo hace viable en pequeñas instalaciones.

La figura 3.16 muestra el diagrama de bloques resultante.

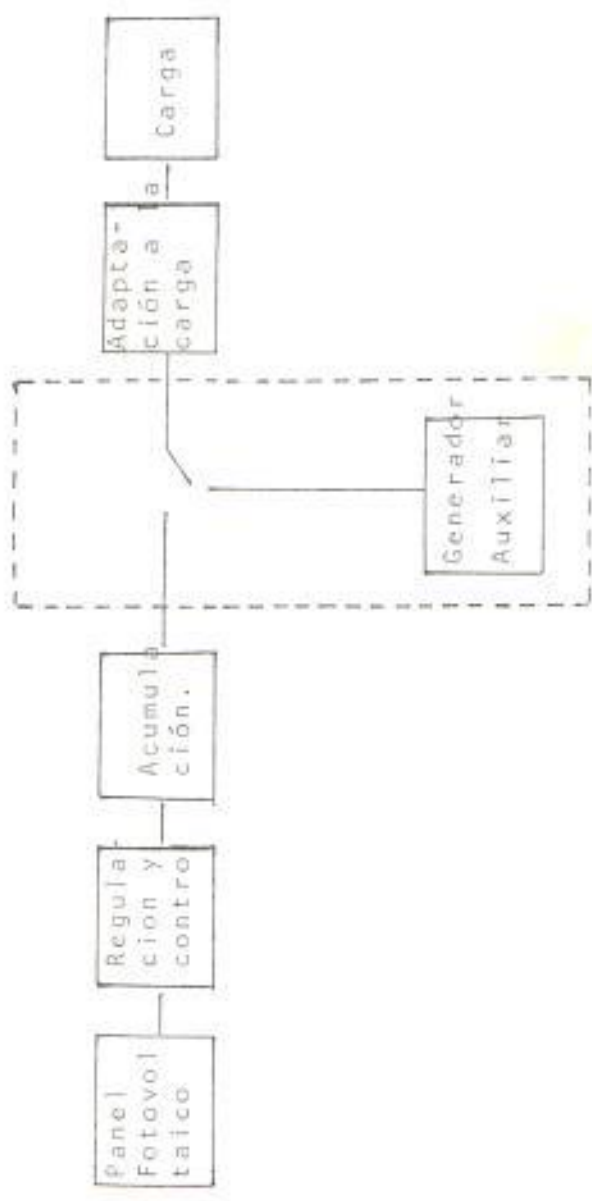
La figura 3.17 representa un caso más general de un sistema de almacenamiento con baterías, a fin de utilizar la electricidad durante las 24 horas del día.

### 3.3.1 PANEL FOTOVOLTAICO. GENERALIDADES

Un panel fotovoltaico permite convertir directamente la energía solar que incide sobre la superficie en energía eléctrica, es pues, el único elemento activo de un generador solar autónomo.

A lo largo de este capítulo haremos referencia a paneles planos los cuales para efectos de diseño son considerados como una caja negra del cual partiendo de sus características funcionales en condiciones ideales, se podrá establecer un modelo de comportamiento en condiciones reales de trabajo.

Para nuestros propósitos se denomina PANEL FOTOVOLTAICO o ARRAY FOTOVOLTAICO a un conjunto de módulos conectados en serie o en paralelo para lograr la tensión y la potencia pico deseadas.



3.16 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO.

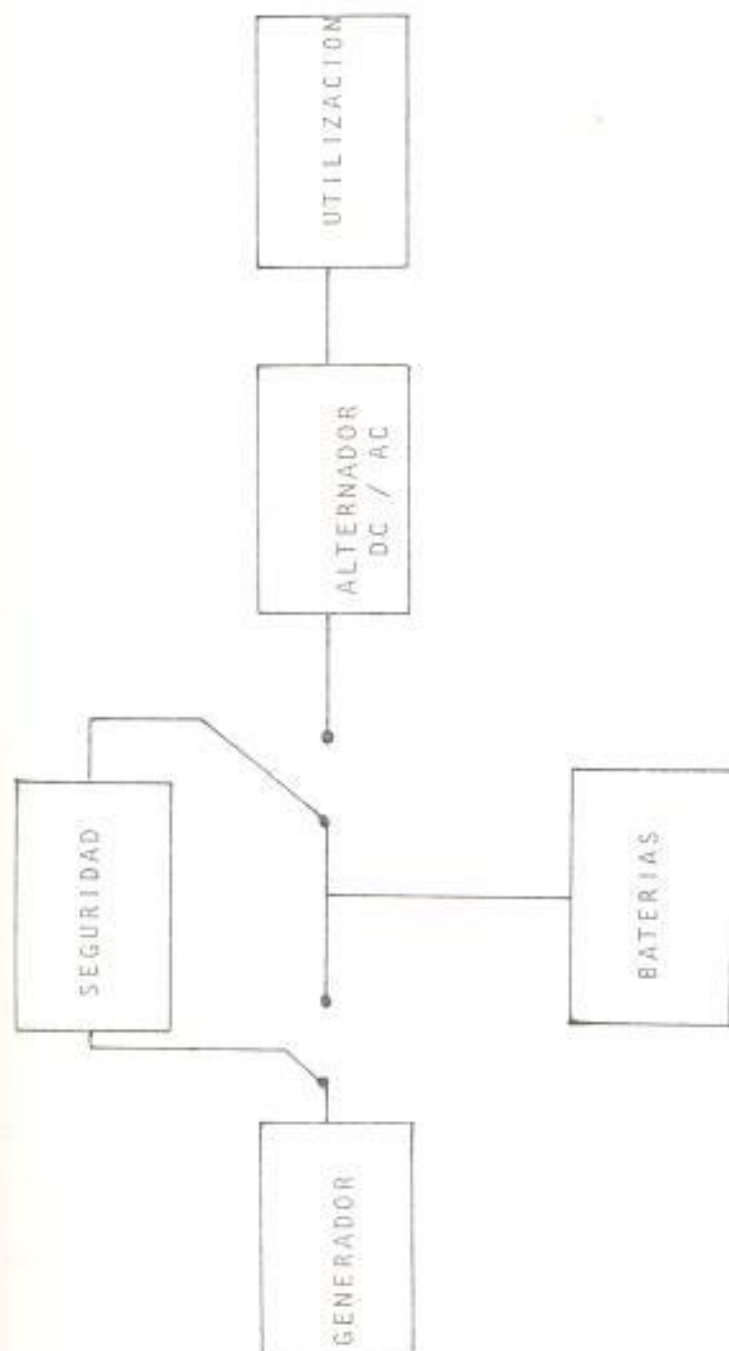


FIGURA 3.17 SISTEMA GENERAL DEL ALMACENAMIENTO DE BATERIAS DE UN GENERADOR

FOTOVOLTAICO  
GO

Las interconexiones electricas mas corrientes en un panel son la conexi3n serie y la conexi3n serie-paralelo. Las conexiones series vienen forxadas por la necesidad de alcanzar ciertos valores de tension que son com3nmente empleados en las estaciones aisladas: 6,12,24,36,48 voltios que a su vez provienen de las tensiones propias de la baterias de plomo normalmente utilizadas.

Una vez realizada la conexi3n serie para de alcanzar el voltaje deseado, se conectar3n en paralelo el numero de series necesario para tener la corriente deseada, en caso de que se necesite una corriente pequena se usaran c3lulas de silicio hechas con medias obleas o cuartos de oblea conectadas en serie en numero suficiente para alcanzar la tension precisa.

Las caracteristicas tension-corriente de los m3dulos que conforman el panel vienen determinadas por las caracteristicas y la disposici3n de las c3lulas que lo forman. Es bien conocido punto de maxima potencia es del orden de los 0.45 voltios (25 grados centigrados) independientemente de su area, mientras que la corriente es del orden de los 30mA/cm<sup>2</sup> en condiciones standard para c3lulas monofasicas.

La conexi3n de  $n$  c3lulas en serie y  $m$  series en paralelo dar3 como resultado un panel cuyas caracteristicas de maxima



potencia: serán  $V_a = 0.45n$  Voltios (25 grados centígrados) ;  $I_a$  ( $\mu A/cm^2$ ) =  $30n$  (sobre la superficie de la célula). en la práctica estos valores son menores debido a una cierta inhomogeneidad en las características de la célula y a una pérdida de eficiencia en el encapsulado debido a absorciones y reflexiones de la luz incidente.

La mayor parte de los módulos comerciales se diseñan para trabajar en conexión a una batería de plomo ácido de 12 voltios de tensión nominal. Para asegurar la carga completa de la batería son necesarios al menos 14 voltios en bornes de la misma. Considerando las caídas de tensión en el regulador y en el cableado y las producidas por efectos de calentamiento de las células (aproximadamente 10 grados centígrados sobre el ambiente) se justifica la necesidad de conectar al menos 30 células en serie (típicamente 36).

Para las células de silicio actusien, el número de células en serie para conocer las tensiones más típicas son:

6 voltios.....	18 células en serie
12 voltios.....	36 células en serie
24 voltios.....	72 células en serie
36 voltios.....	108 células en serie
48 voltios.....	144 células en serie

Estas agrupaciones series a seguirán que a un para temperaturas de trabajo elevadas (60-70 grados c.) el panel sería capaz de cargar una batería de plomo de la tensión nominal indicada.

El conexionamiento anterior es válido para establecer la característica V-I de un panel, resultante del conexionado serie-paralelo de los diversos módulos que lo integran. Se pone de manifiesto la necesidad de seleccionar los módulos previamente a su conexión para evitar pérdidas de eficiencia producidas por inhomogeneidades en su comportamiento eléctrico.

### 3.3.2 REGULADORES

Un regulador en un sistema fotovoltaico sirve para la protección de los paneles fotovoltaicos así como para el control de la carga y descarga de la batería de almacenamiento de energía.

Sentando el nivel de voltaje sobre los bornes de la batería se desconectará el generador fotovoltaico cuando la tensión exceda de un valor predeterminado, el mismo que es calibrado en el interior del regulador.

Del mismo modo, cuando la tensión en bornes de la batería es baja, fuera de los límites calibrados en el regulador se desconecta el circuito de salida del utilizador.

En los dos casos de desconexión, por nivel alto o bajo, la reconexión del generador o de la carga se realiza automáticamente o manualmente, cuando se normalizan los valores dentro del rango normal de la batería.

La presencia de un regulador en un sistema fotovoltaico es de singular importancia pues tiene que ver directamente en la duración de los almacenadores de energía (baterías), pues niveles de baja carga o sobrecarga producen disminución en el tiempo de vida de dichos almacenadores.

un esquema básico de conexión de un regulador en sistema fotovoltaico es el de la figura 3.18.

Existen dos tipos fundamentales de reguladores: serie y paralelo. Los reguladores tipo paralelo mantienen constante la tensión de la batería en el estado final de carga, disipando para ello, a través de un elemento Shunt paralelo, el exceso de energía (figura 3.19).

Este tipo de regulación tiene la ventaja de mantener continuamente la batería en su estado de plena carga siempre que haya un exceso de energía. Su principal inconveniente es que el elemento shunt regulable se encarece fuertemente cuando las potencias involucradas son importantes, por esta razón los

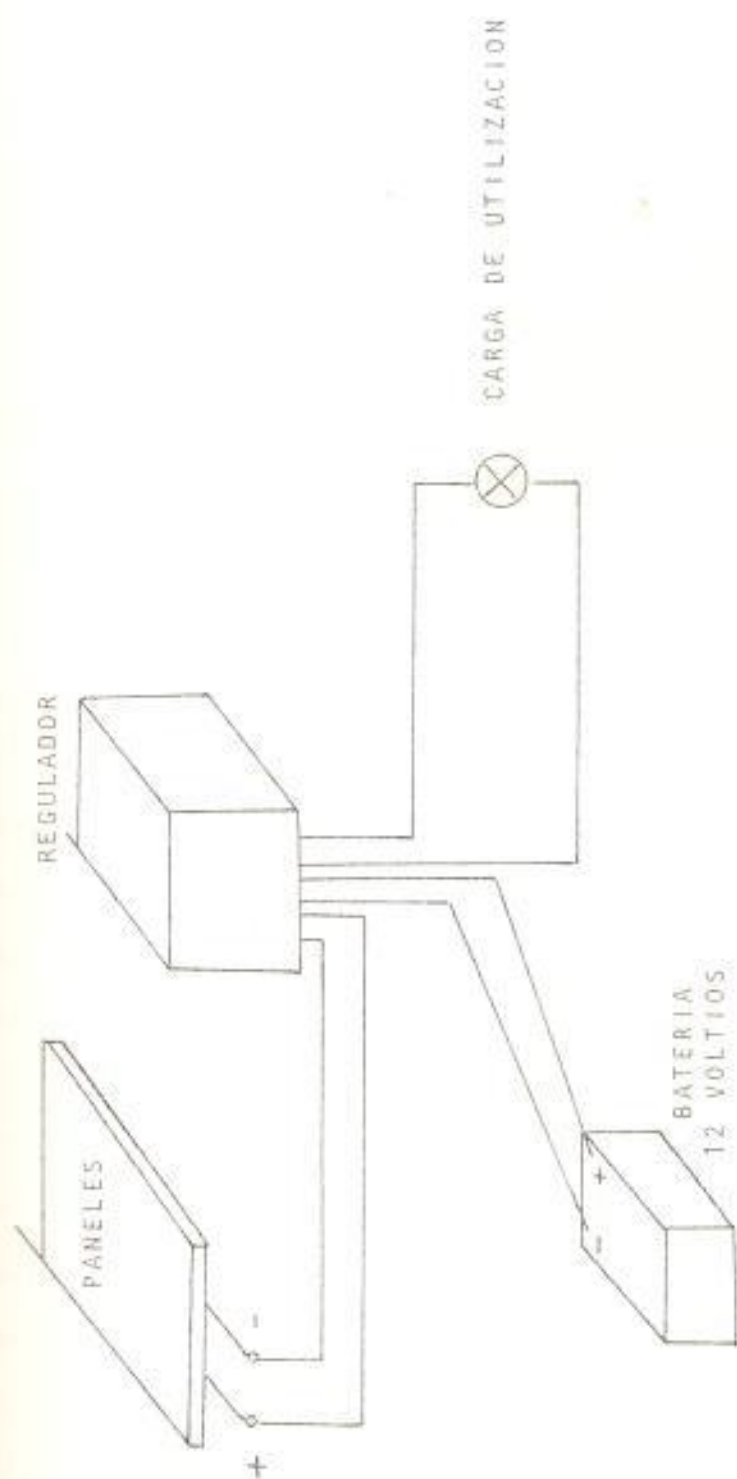


FIGURA 3.18 ESQUEMA BASICO DE CONEXION DE UN GENERADOR EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.

reguladores paralelos se utilizan casi exclusivamente en los pequeños sistemas; una ventaja adicional importante para la fiabilidad es que por regla general una avería en este tipo de reguladores deja el panel directamente conectado con la batería, con lo cual el sistema fotovoltaico sigue en funcionamiento aunque sin regulación.

Los reguladores series basan su principio de funcionamiento en un elemento de control que interrumpe la conexión panel-batería cuando esta llega a su estado de plena carga (figura 3.10); la reposición del elemento de control a su estado de conducción implica la detección de una cierta pérdida de carga en la batería y por tanto de una cierta histeresis en el comportamiento del sistema; la aparición de una avería en este tipo de regulador deja por regla general el panel desconectado de la batería, por lo que tal avería conduce a corto plazo a un fallo del sistema.

Un buen regulador serie debe disipar la menor potencia posible en su estado de conducción; por ello este tipo de regulador es adecuado para sistemas de gran potencia; una solución cada vez más frecuente es utilizar como elemento de regulación un interruptor electromecánico, por su pequeña caída de tensión en conducción (menor que cualquier dispositivo de estado sólido de similar precio); la correcta utilización de este elemento

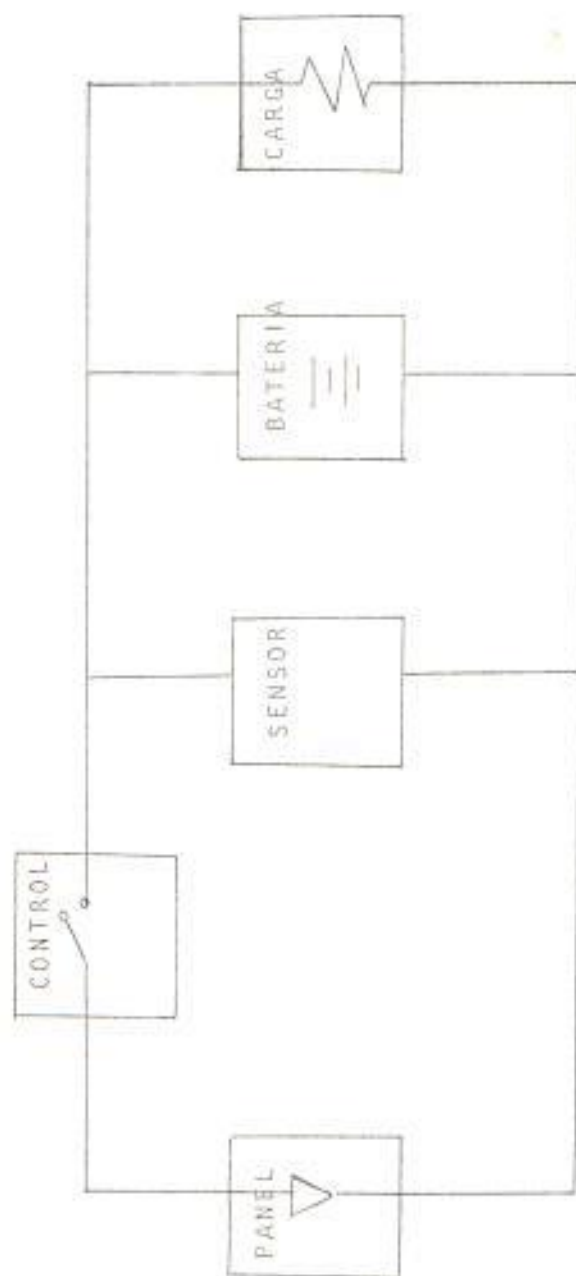


FIGURA 3.19 REGULADOR FOTOVOLTAICO SERIE. CUANDO LA BATERIA ESTA PLENAMENTE CARGADA EL CONTROL DESCONECTA EL PANEL HASTA QUE LA BATERIA PIERDA PARTE DE SU CARGA.

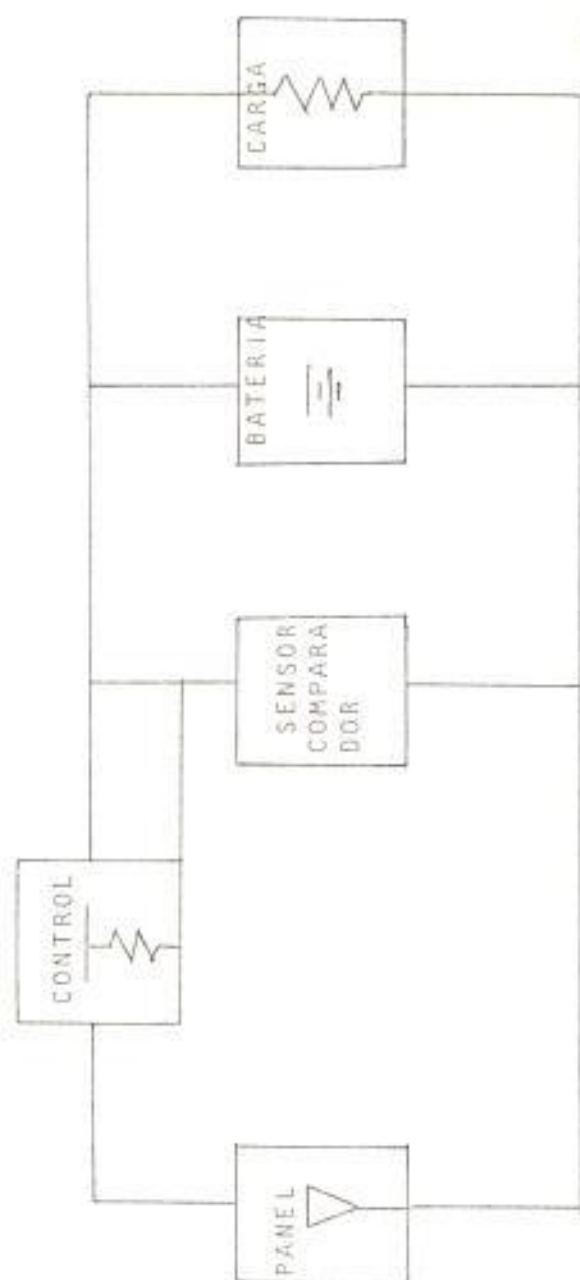


FIGURA 3.20. REGULADOR FOTOVOLTAICO PARALELO. CUANDO LA BATERIA ESTA PLENAMENTE CARGADA EL CONTROL DERIVA LA CORRIENTE NECESARIA PARA EVITAR SU SOBRECARGA, DEJANDO LA NECESARIA PARA ALIMENTAR LA CARGA Y COMPLETAR LA AUTODESCARGA DE LA BATERIA.

hace innecesario la inclusion de un diodo de bloqueo, puesto que el interruptor puede dejarse abierto durante la noche, con el consiguiente ahorro de las perdidas por conduccion directa de dicho diodo.

### 3.3.1 ACUMULADORES DE ENERGIA ELECTRICA FOTOVOLTAICA ACUMULADORES

#### ELECTROQUIMICOS: RECOMENDACIONES:

Hasta fecha reciente, la tecnologia de los acumuladores se reducía a los de plomo acido y a la de niquel-cadmio, sin embargo en los ultimos años se ha venido realizando un gran esfuerzo en el desarrollo de nuevos acumuladores cuyas características aparecen o comparadas en la tabla 4.

Las baterías de plomo acido, son sin duda las que dan mejores prestaciones en aplicaciones fotovoltaicas, existen no obstante diferentes tipos de acumuladores diseñados para fines específicos, tales como:

Acumuladores de arranque, utilizados en arranque de motores de combustión interna para vehículos.

Acumuladores de tracción utilizados en carretillas, elevadores y vehículos eléctricos.



ACUMULADO	DENSIDAD ENERGIA. (WH/Kg)	DENSIDAD POTENCIA (W/Kg)	VIDA (CICLOS)
Pb/PbO <sub>2</sub>	50-60	150-200	1500-2000
Ni/Cd	45-60	150-300	1500-3000
Ni/Fe	45-60	100-120	1500-2500
Ni/Zn	60-70	150-300	300-1000
S/Na	90-250	100-250	200-1500
Zn/Cl <sub>2</sub>	130-150	100-130	200- 900

TABLA 4 COMPARACION ENTRE DIFERENTES TIPOS DE ACUMULADORES ELECTRICOS

TEMPERAT. AMBIENTE (°C)	TENSION DE CARGA (V)	TENSION MODULO MODULO Tcel=25°C	Vn MODULO CONDICION STANDARD Tcel=25°C
10	14,60	15,30	15,65
20	14,25	14,95	16,00
25	14,07	14,77	16,17
30	13,90	14,60	16,35
40	13,55	14,25	16,70

TABLA 5 MINIMA TENSION EN EL PUNTO MAXIMA POTENCIA PARA CARGAR UNA BATERIA

BAJO DIFERENTES TEMPERATURAS

Acumuladores estacionarios utilizados en equipos de continuidad.

Acumuladores especiales para aplicaciones fotovoltaicas, de las cuales existen actualmente en el mercado diferentes tipos de baterias basadas en una placa con aleacion de pb-ca. su caracteristica radica en su alta tension de gases que hace practicamente innecesario su mantenimiento, sin embargo, su baja profundidad de descarga y su corta vida lo hacen desaconsejable para ciertas aplicaciones.

Pocos equipos industriales tienen propiedades que dependen tanto como los acumuladores electricos de las condiciones de explotacion, siendo por ello necesario conocer la influencia de los diferentes factores que se relacionan con la calidad, rendimiento y duracion de la bateria, ellos son:

CAPACIDAD es el termino utilizado para comparar diferentes baterias, se define a traves de una integral, como:

$$\text{capacidad} = \int_{t_1}^{t_2} I(\text{descarga}) dt$$

Segun se muestra en la figura 3.21, sin embargo es frecuente referirse al caso de una descarga constante  $C=I \times T$ , donde T representa la duracion de dicha descarga.

CAPACIDAD %

TEMPERATURA 25°C.

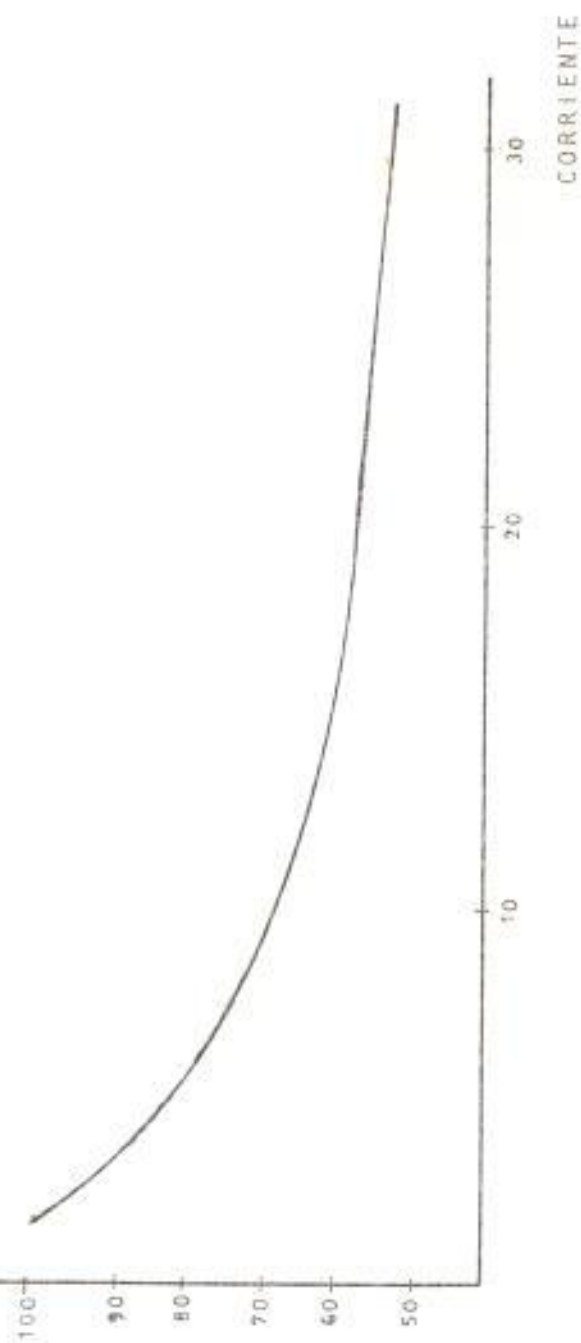


FIGURA 3.21 CAPACIDAD EN FUNCION DEL REGIMEN DE DESCARGA.

La capacidad de un acumulador disminuye al aumentar la intensidad de la descarga.

En todo caso la capacidad de un acumulador viene determinada por:

intensidad de descarga;

tensión final de descarga;

Tiempo en que se alcanzara dicha tensión;

temperatura

edad.

La tensión de corte por elemento depende de la corriente de descarga y debe tener un valor tal que no sobrepase una profundidad de descarga para la que están diseñados tal y como se muestra en la figura 3.22.

La temperatura aumenta la capacidad de la batería a razón de 1% cada grado centígrado aproximadamente según se representa en la figura 3.23.

RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL ACUMULADOR: es un parámetro que representa la caída de tensión que se produce en el acumulador durante la descarga.

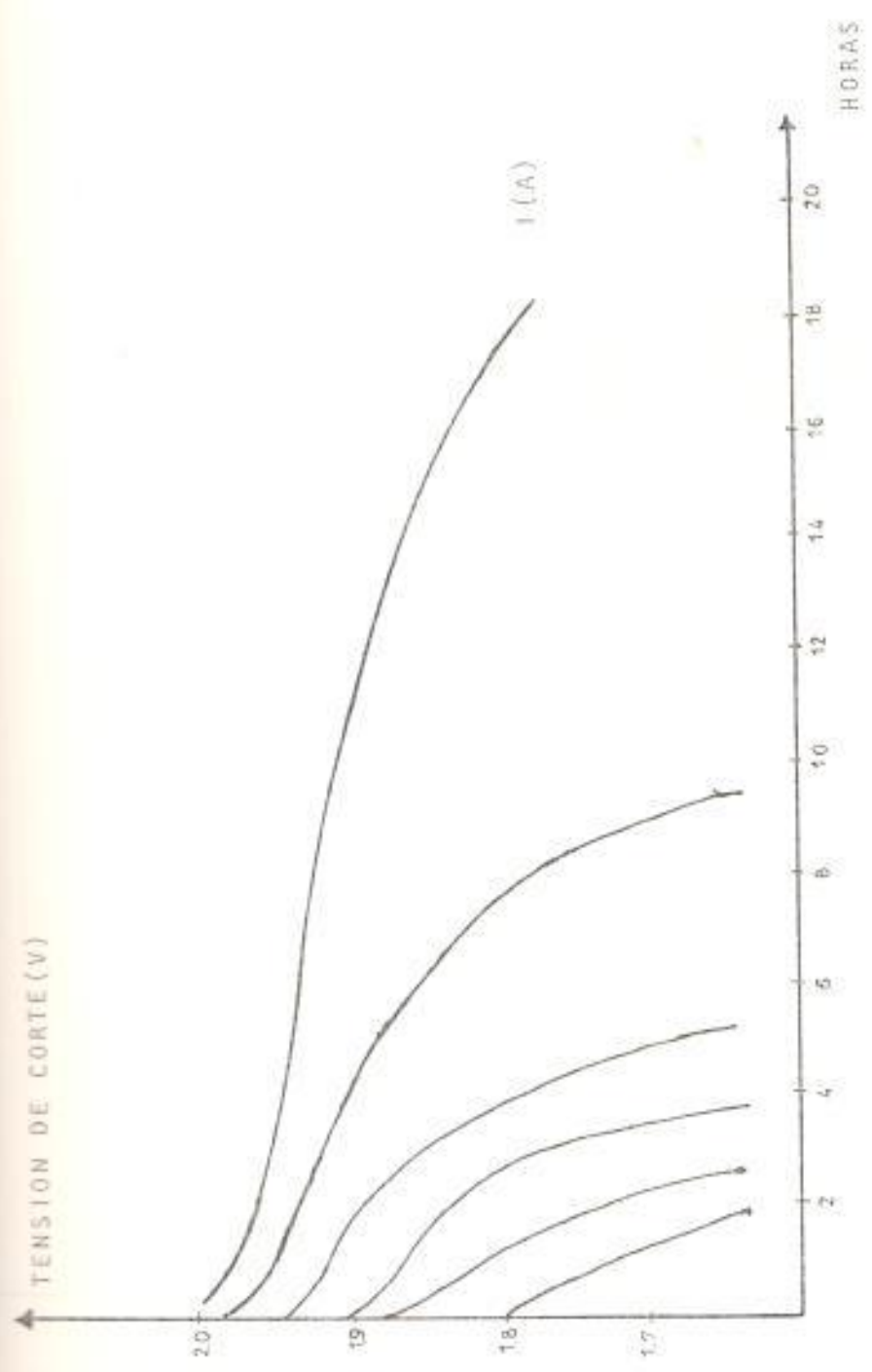


FIGURA 3.22 RELACION ENTRE LA TENSION DE CORTE Y EL REGIMEN DE DESCARGA

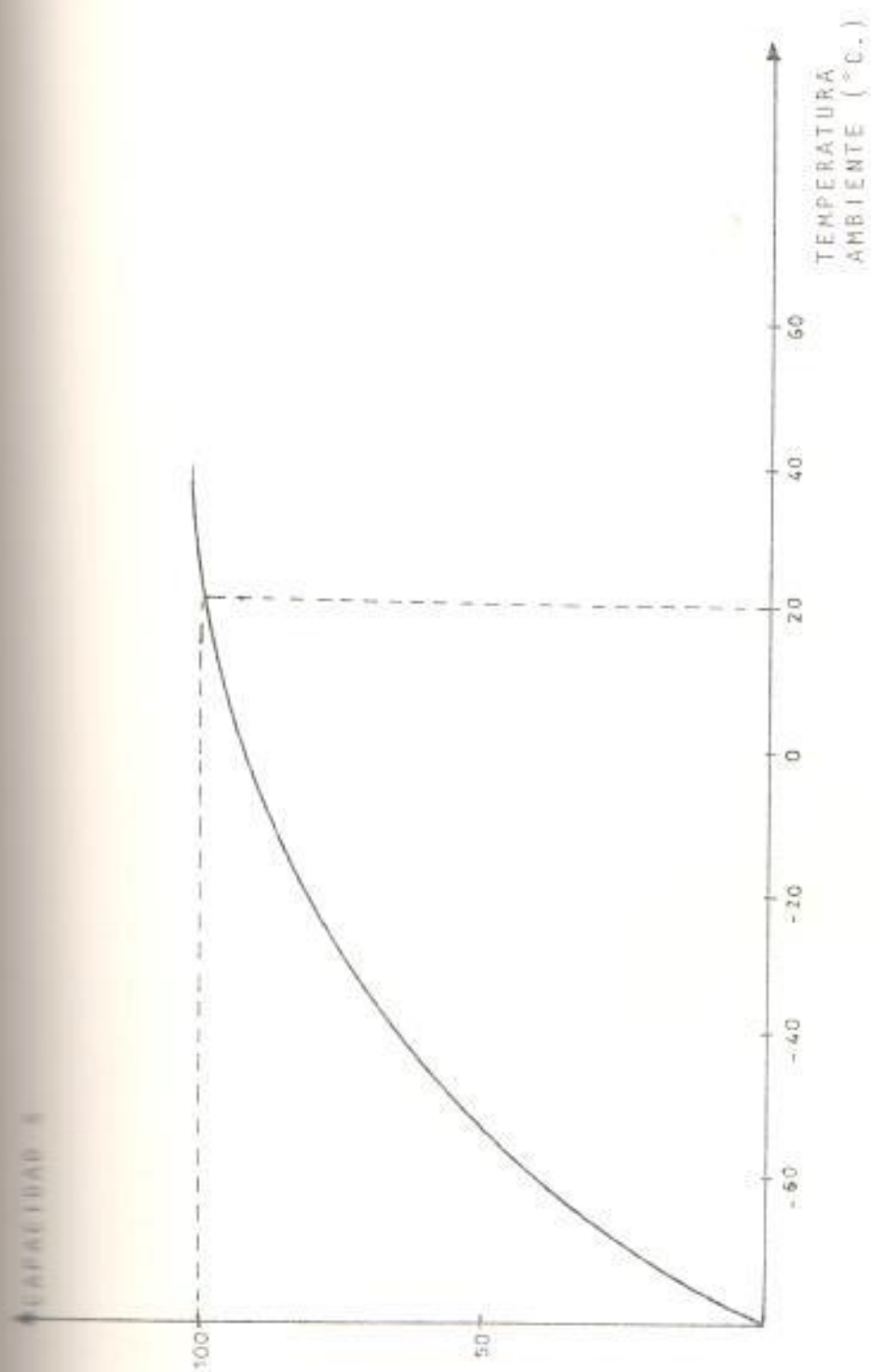


FIGURA 3.23 CAPACIDAD VS. TEMPERATURA AMBIENTE

Se debe no sólo a la resistencia eléctrica de las placas, de los separadores y de los conductores, sino a otra de carácter electroquímico, denominada de polarización que se mide en ohmios - amperio hora.

Su efecto se muestra como una pérdida de eficiencia energética debido al hecho de necesitar mayor tensión de carga que la que suministra durante la descarga.

CARACTERÍSTICA TENSION-TIEMPO EN LA CARGA cuando un acumulador está totalmente cargado, la corriente que suministra a partir de ese momento no es utilizada, produciéndose sobrecarga y perdiéndose en calor y corrosión, la única manera exacta de determinar que se ha alcanzado el estado de plena carga es midiendo la densidad del electrolito que no puede aumentar por encima de cierto valor, como la medida de la densidad es siempre difícil se establece una tensión límite que con cierto error determina el estado de plena carga.

La Figura 3.14 representa la variación de la tensión con el estado de carga.

Para regímenes lentos, la tensión por vaso al entrar en la zona de gases es aproximadamente 2,15 voltios que corresponde a unos 14,2 Voltios para una batería de 6 vasos (12 voltios), esta

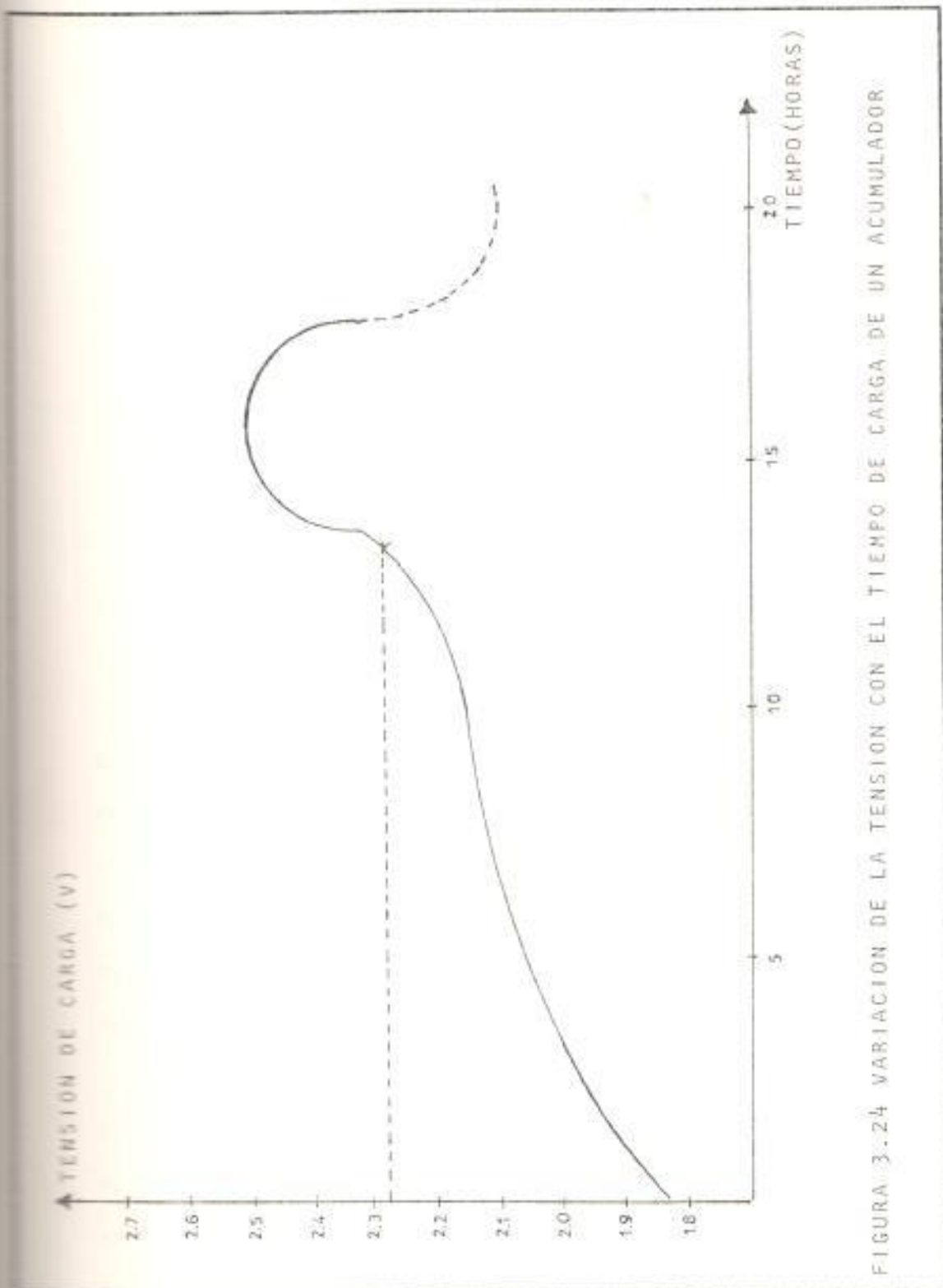


FIGURA 3.24 VARIACION DE LA TENSION CON EL TIEMPO DE CARGA DE UN ACUMULADOR



tensión es la que se tomara como referencia en el regulador para determinar que se ha llegado al estado de plena carga, evitando así el gáse.

**CARACTERISTICA TENSION-TIEMPO EN LA DESCARGA** Durante la descarga, la tensión depende de la corriente y del tiempo tal y como se aprecia en la figura 3.25.

Puede observarse que la tensión inicial es mayor cuanto más es la descarga, variando en el margen de 1,8 a 2,0 voltios.

En aplicaciones fotovoltaicas son frecuentes las descargas lentas, gracias a lo cual tendremos una tensión mayor por placa.

La relación entre la tensión en circuito abierto y la capacidad retenida es prácticamente lineal, variando en la forma que aparece en la figura 3.26, de aquí, en función de la profundidad de descarga que consideremos adecuada y que a su vez es función de la vida esperada del acumulador, podremos sacar la tensión de corte por bajo nivel de carga del regulador.

**CICLOS DE VIDA DEL ACUMULADOR** Los fabricantes definen la vida de la batería como el número de ciclos de carga-descarga que admite hasta el momento de perder un 20% de su capacidad nominal.

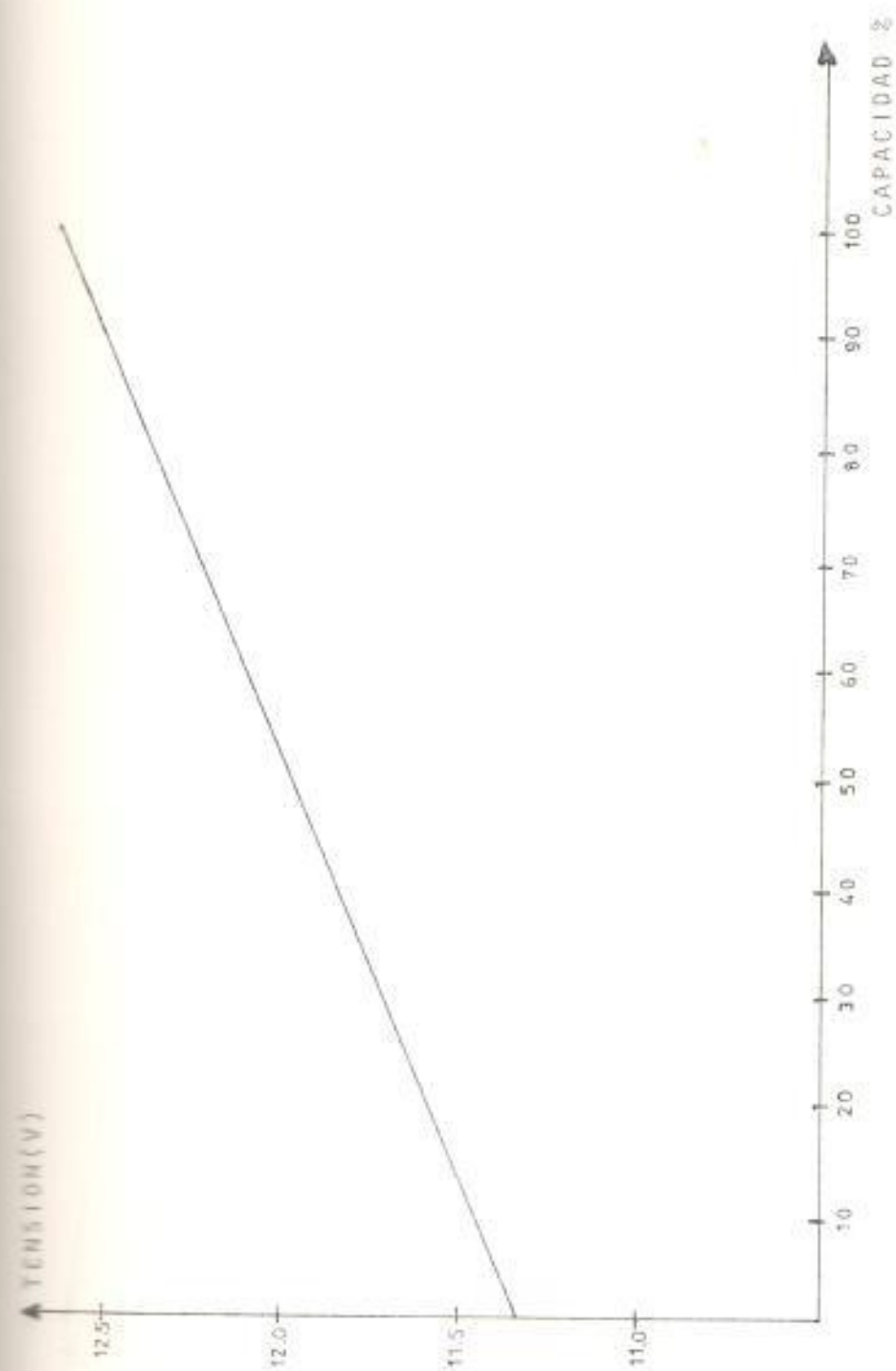


FIGURA 3.25 CAPACIDAD RETENIDA VS TENSION EN CIRCUITO ABIERTO

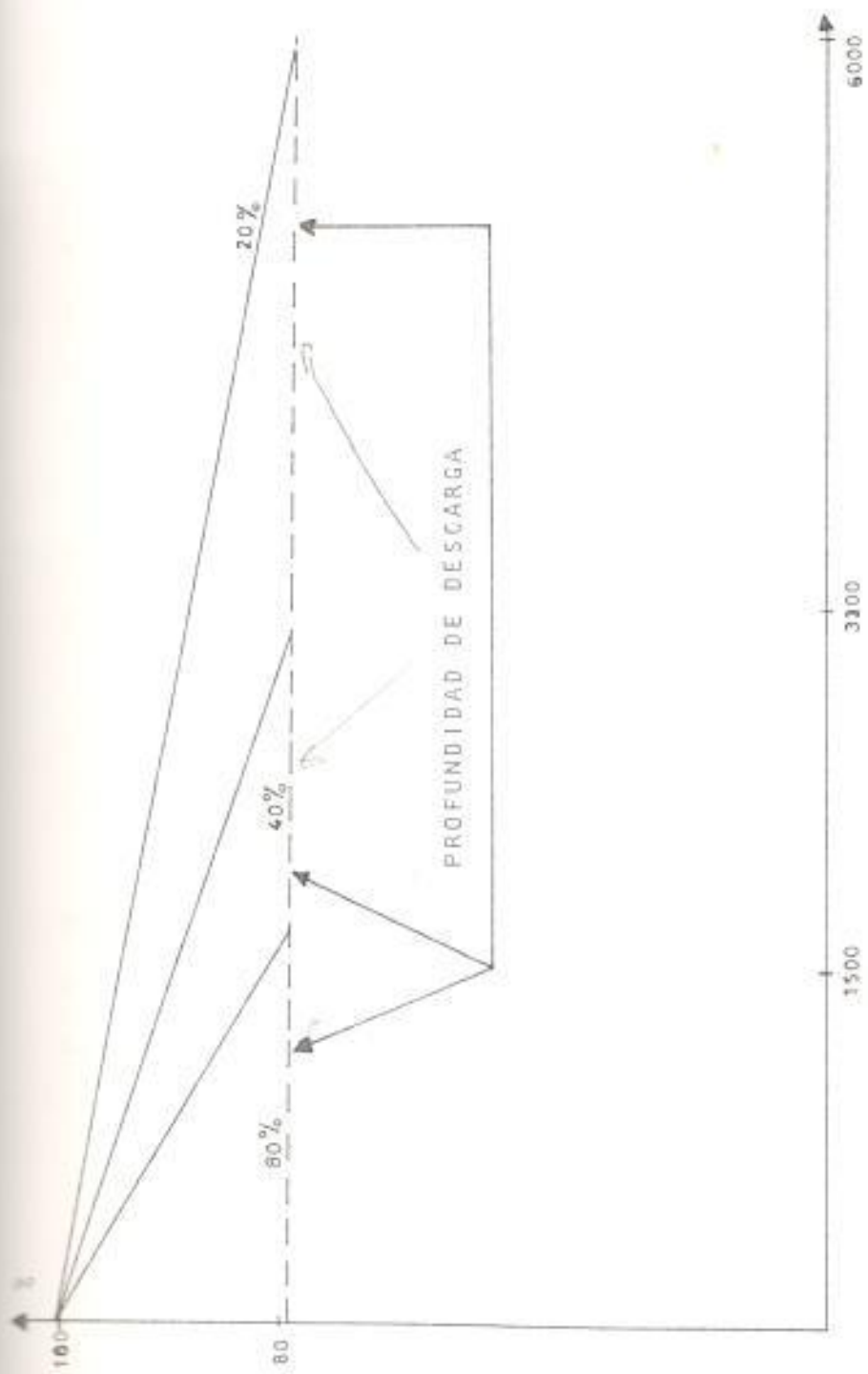


FIGURA 3.26 VIDA ESTIMADA DE UNA BATERIA EN FUNCION DE SU PROFUNDIDAD DE DES CARGA..

Las variables que influyen en la vida de un acumulador son la profundidad de descarga del ciclo y la temperatura.

En la figura 4.25 se muestra una curva típica de una batería. puede observarse que cuanto menor sea la profundidad de descarga tolerada, mayor será la vida del acumulador. en otras palabras, en una instalación fotovoltaica podemos optar por dos estrategias (dentro de unos límites) reduciendo el valor de la capacidad nominal a instalar, y por lo tanto el costo inicial, o bien permitir menores profundidades, para lo cual deberá instalarse una batería de mayor capacidad nominal, pero prolongaremos su vida.

En general, profundidades del 40% para baterías de Pb-Ca y del 70% para las de Pb-Sb son recomendables.

**SOBRECARGA** Se produce cuando una vez alcanzado el estado de plena carga sometemos al acumulador a una tensión superior a la de equilibrio.

Los efectos más inmediatos que produce una sobrecarga son:

- Incrementos de la resistencia eléctrica de la batería.
- Destrucción paulatina de la batería debido a una disminución de la sección de la placa positiva.

- Consumo de agua, esto es aumento del mantenimiento necesario para evitar una excesiva concentración del nivel de electrolito.

**CICLAJE DIARIO.** Se define como la carga que el acumulador ha intercambiado con el resto del sistema fotovoltaico (recibido del generador y cedido de la carga) durante el día, normalizado a su capacidad nominal, y expresado en tanto por ciento. La energía del ciclaje es la que se intercambia en forma reversible (ciclo de carga-descarga o de descarga-carga), pero no incluye la que cede o absorbe como efecto de un proceso de descarga o recarga sistemático.

Los fabricantes recomiendan un valor (entre el 10% y el 30%), superar este límite produce un desprendimiento paulatino de materia activa, con la consiguiente pérdida de capacidad y muerte de la batería.

**RENDIMIENTO DE LA BATERÍA EN EL CICLO DE CARGA-DESCARGA.** Las pérdidas energéticas en una batería son debidas a dos causas:

a. **PERDIDAS EN TENSION,** debidas a la diferencia entre el voltaje de carga y de descarga, en definitiva a la diferente resistencia interna de ambos procesos. Su valor suele ser de un 15% aproximadamente.

b. Pérdidas en corriente (aceptación de carga). Viene determinada por la parte de la corriente que se emplea en desprendimiento de gases. el rendimiento en Amp-Hora de un acumulador en buen estado se sitúa entre 0.85 y 0.95 lo que representa unas pérdidas de 5 o 15%, en general depende del estado de carga del acumulador, siendo mayor cuando más cercano se encuentra en su estado de plena carga.

La eficiencia final es el producto de ambos y viene a ser del orden del 75%.

AUTODESCARGA. Se define como la pérdida de capacidad que se produce en el acumulador cuando se encuentra en circuito abierto.

Aunque en aplicaciones fotovoltaicas no se conoce su valor se admite que este es muy bajo, y por lo tanto despreciable, debido a que el acumulador solo se encuentra en circuito abierto una pequeña fracción del día, y que, en la mayor parte de los días se compensa con el exceso de energía generada por el panel.

#### 3.3.4. CONVERTIDORES DC - AC

En muchas ocasiones la carga de una instalación fotovoltaica es un dispositivo de corriente alterna, por lo que se hace necesari-

no incluir un inversor que convierta la corriente continua del panel solar o de la batería en corriente alterna, para la gama de potencias de las típicas aplicaciones fotovoltaicas actuales (100-2000w) existen en el mercado inversores estáticos con excelentes rendimientos (95%). se están desarrollando inversores estáticos que trabajan con mayores potencias habiéndose llegado a los 60 KVA. no obstante los precios de los inversores son hoy relativamente elevados, por lo que su uso es restringido.

Los convertidores convencionales son de tensión de entrada 12-48 voltios y salida de 220v 1000w.

En general todos los convertidores están preparados para admitir demandas instantáneas (picos) del orden del 100% de su potencia nominal. Su instalación en un generador fotovoltaico se puede ver en la figura 3.27:

### 3.3.5 CARGAS ELECTRICAS:

Un sistema fotovoltaico se diseña de acuerdo a la carga eléctrica que se desea alimentar. conocer las características de dicha carga y su consumo energético medio no permitirá dimensionarlo correctamente, tanto desde el punto de vista de la fiabilidad necesaria como del costo.

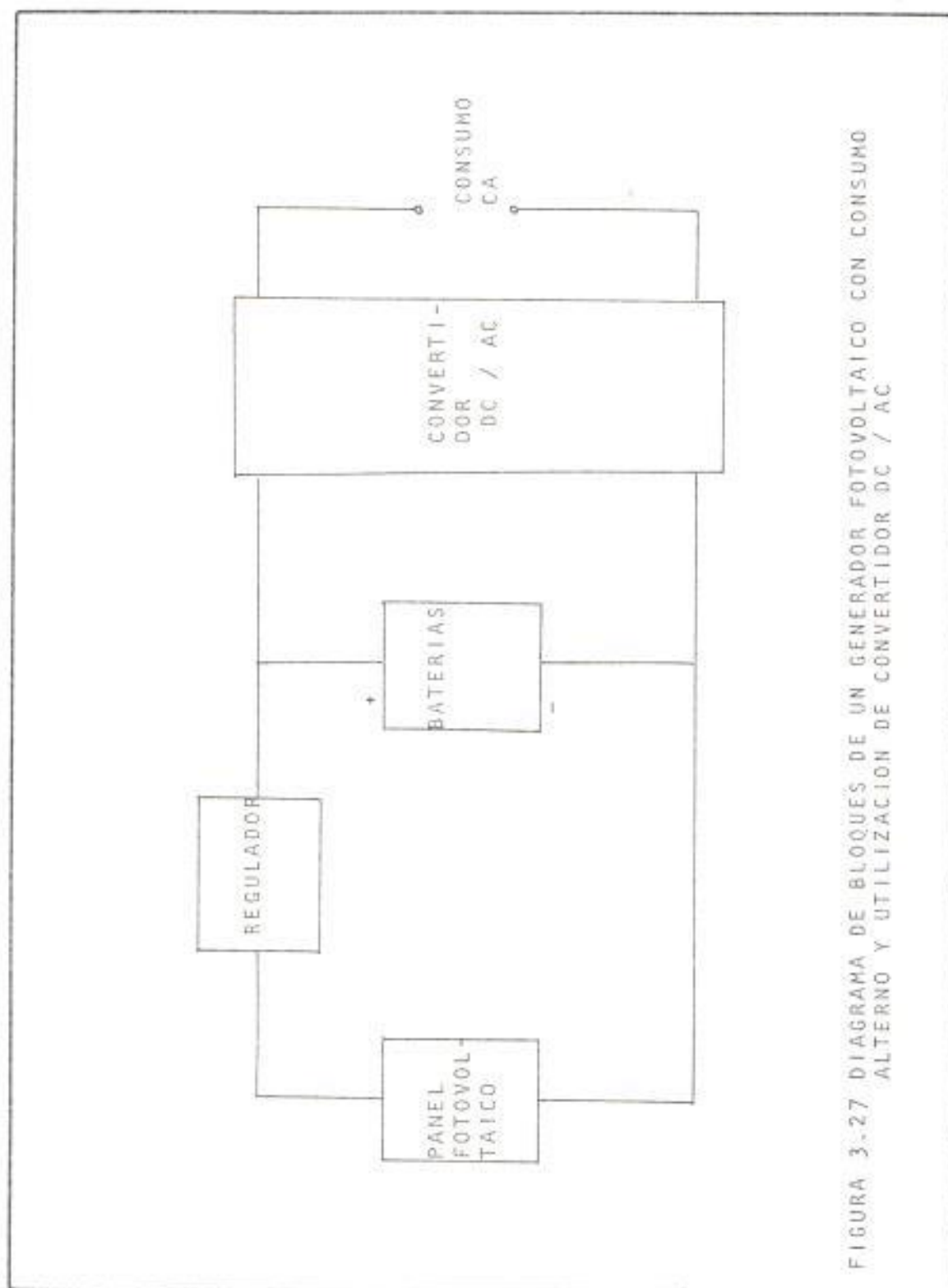


FIGURA 3.27 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO CON CONSUMO ALTERNO Y UTILIZACION DE CONVERTIDOR DC / AC



Desde el punto de vista de dimensionado, cada carga eléctrica individual se caracteriza por 3 parámetros.

Tensión.

Corriente

Ciclo de trabajo.

Para diseñar un sistema fotovoltaico es imprescindible estimar el ciclo de trabajo de cada carga, esto es en que momento del día, mes, año se espera que esté funcionando, esto nos permitirá conocer:

El consumo energético medio de cada periodo considerado.

La simultaneidad del consumo y de la generación.

La demanda pico de energía, su valor y su duración.

El costo de un generador solar aumenta casi linealmente con el consumo de la(s) carga(s) eléctrica(s) que deben ser alimentadas. Por esta razón resulta importante considerar aquellas estrategias que nos permitan reducir nuestra demanda, adaptarla mejor a las condiciones de generación o eliminar esfuerzos innecesarios a la batería, ellos son:

OPERACION CICLICA DE LOS COMPONENTES: No conectando simultáneamente todos los equipos a la batería presentan la ventaja de

reducir el régimen de descarga de la batería, aumentando su capacidad real, y permite reducir el tamaño de equipos tales como inversores, motores, etc, reduciendo sus pérdidas energéticas al permitir que se adapten mejor a la carga.

**SIMULTANIEDAD DE CONSUMO-GENERACION:** Esto es hacer trabajar las cargas los días soleados y en los momentos del día mas propicios con lo cual se obtendría la ventaja de disminuir las pérdidas debidas a la eficiencia de la batería.

**UTILIZAR EQUIPOS DE CORRIENTE CONTINUA:** Para reducir las pérdidas que inevitablemente se producen en los inversores.

#### 3.4.- CONDICIONES NECESARIAS PARA UN BUEN APROVECHAMIENTO DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS EN LA OBTENCION DE ENERGIA ELECTRICA.

En el afán de obtener mejores resultados en la transformación de energía solar en energía eléctrica (menos pérdidas) es necesario tomar en consideración ciertas características o condiciones externas que se presentan al tener los paneles conectados en bloques (arrays) tales como bajos en funcionamiento por no hacer trabajar el sistema en las características dadas por el fabricante, o en bajos debido a trabajar el sistema fuera de los rangos de temperatura de los paneles, etc.

### 3.4.1 GENERALIDADES

Antes de empezar características importantes a considerar para un buen aprovechamiento de las células solares es necesario mencionar ciertos mecanismos generales que ocasionan pérdida de eficiencia dentro del módulo y son:

a. Empaquetamiento. Las células no ocupan toda la superficie del módulo, el factor de empaquetamiento típico se sitúa alrededor del 70%.

b. Pérdidas en el encapsulado. Debidas a la absorción de los materiales empleados, típicamente se consigue una eficiencia óptica del 95%.

c. Pérdidas por iluminación no homogénea. No suelen superar el 2%.

d. Pérdidas por inhomogeneidad de la célula. Existe una cierta dispersión en la fabricación de las células solares, compensada en parte por la selección previa que se realiza en la fábrica. La pérdida de potencia no suele ser superior del 1%.

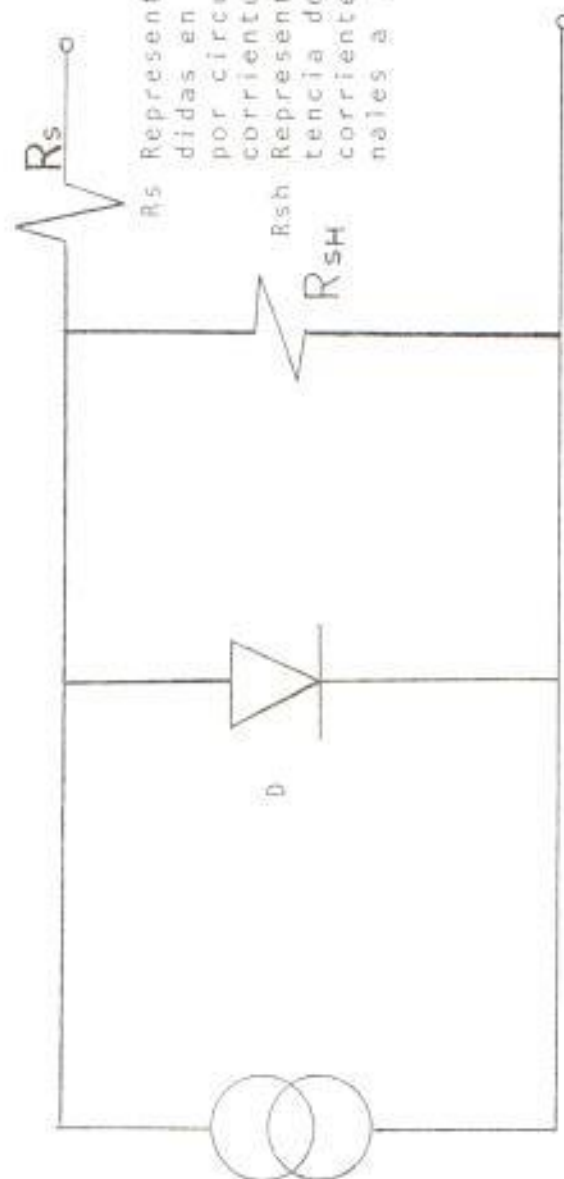
### 3.4.2 CARACTERÍSTICA V - I IDEAL DE UN MÓDULO:

Expuesta a un flujo de fotones (presencia de luz), una célula fotovoltaica puede ser considerada como una fuente de intensidad variable y de tensión fija.

Desde el punto de vista eléctrico una célula se comporta como un generador de corriente montado en paralelo con un diodo  $D$  y una resistencia  $R_{sh}$  (resistencia shunt) y en serie con otra resistencia  $R_s$  (resistencia serie). figura 3.28.

Luego las células solares son diodos de una estructura particular, por lo tanto pueden compararse con diodos normales de silicio, en la figura 3.29 se dan las curvas características con polarización directa e inversa de una célula solar, la curva 1 es la trazada en la oscuridad y resulta completamente semejante a la de un diodo ordinario, la "2" trazada con una iluminación dada resulta de una transición de la "1" y tiene la forma clásica de una curva de fotodiodo iluminado.

En el cuadrante (se ve el diodo con polarización directa, en la oscuridad (curva 1) y con su iluminación (curva 2); en este último caso, la característica no sale de cero, puesto que entre los bornes de la célula existe una tensión debida al efecto fotoeléctrico, por eso existe una tensión debida al efecto fotoeléctrico, por eso ha desaparecido el codo clásico de la característica de los diodos normales.



$R_s$  Representan las pérdidas en la célula por circulación de corrientes laterales.  
 $R_{sh}$  Representa la existencia de fugas de corriente proporcionales a la tensión.

FIGURA 3.28 CIRCUITO ELECTRICO COMPLETO EQUIVALENTE DE UNA CELULA SOLAR FOTOVOLTAICA

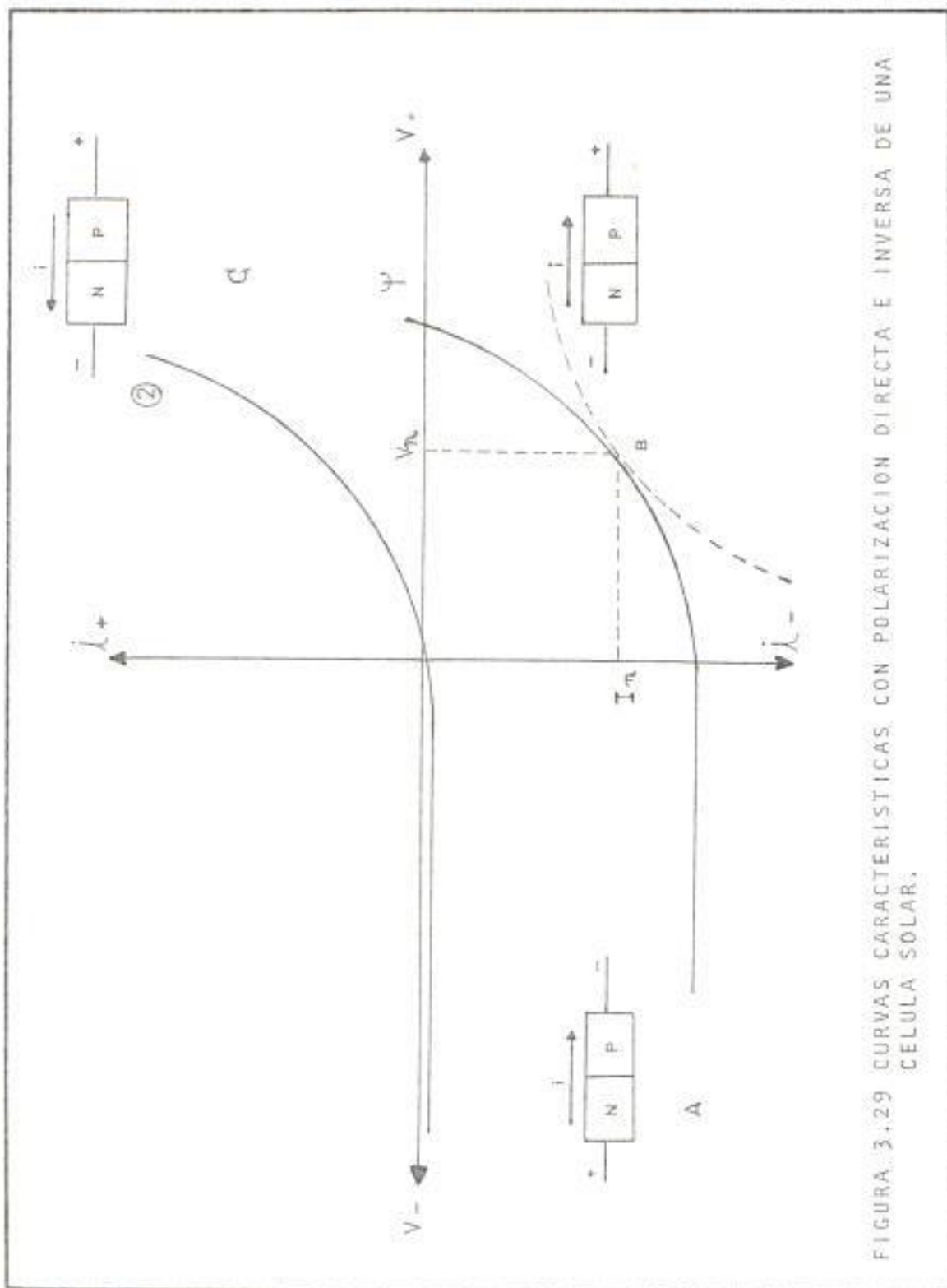


FIGURA 3.29 CURVAS CARACTERISTICAS CON POLARIZACION DIRECTA E INVERSA DE UNA CELULA SOLAR.

En el cuadrante A, la curva "1" indica la corriente de fuga de oscuridad en función de la tensión inversa; la "2" da la variación de esa corriente con la iluminación; la célula funciona como fotodiodo.

En el cuadrante B el diodo funciona como generador de energía y es esa precisamente la región de utilización normal de las células solares. La potencia eléctrica  $V_i$  dada por la célula o fotorpila pasa por un máximo con unos valores determinados de  $I$  y  $V$  que se designa  $I_n$  (corriente nominal) y  $V_n$  (voltaje nominal) para un valor dado de flujo luminoso ( $f$ ) y de temperaturas específicas o uno óptimo de la resistencia de carga,  $R = V_n/I_n$ .

En la práctica como todas las células solares funcionan con dificultad fuera de la región B su atención se centra solo en esta zona, por lo que los fabricantes expresan sus características como si estuviera en el primer cuadrante (figura 3.30) y de la cual se toma muy en cuenta sus características indicadas a continuación.

Corriente de cortocircuito,  $I_{cc}$ .- Esta magnitud es la corriente dada por una célula en cortocircuito, con una iluminación determinada y fija.

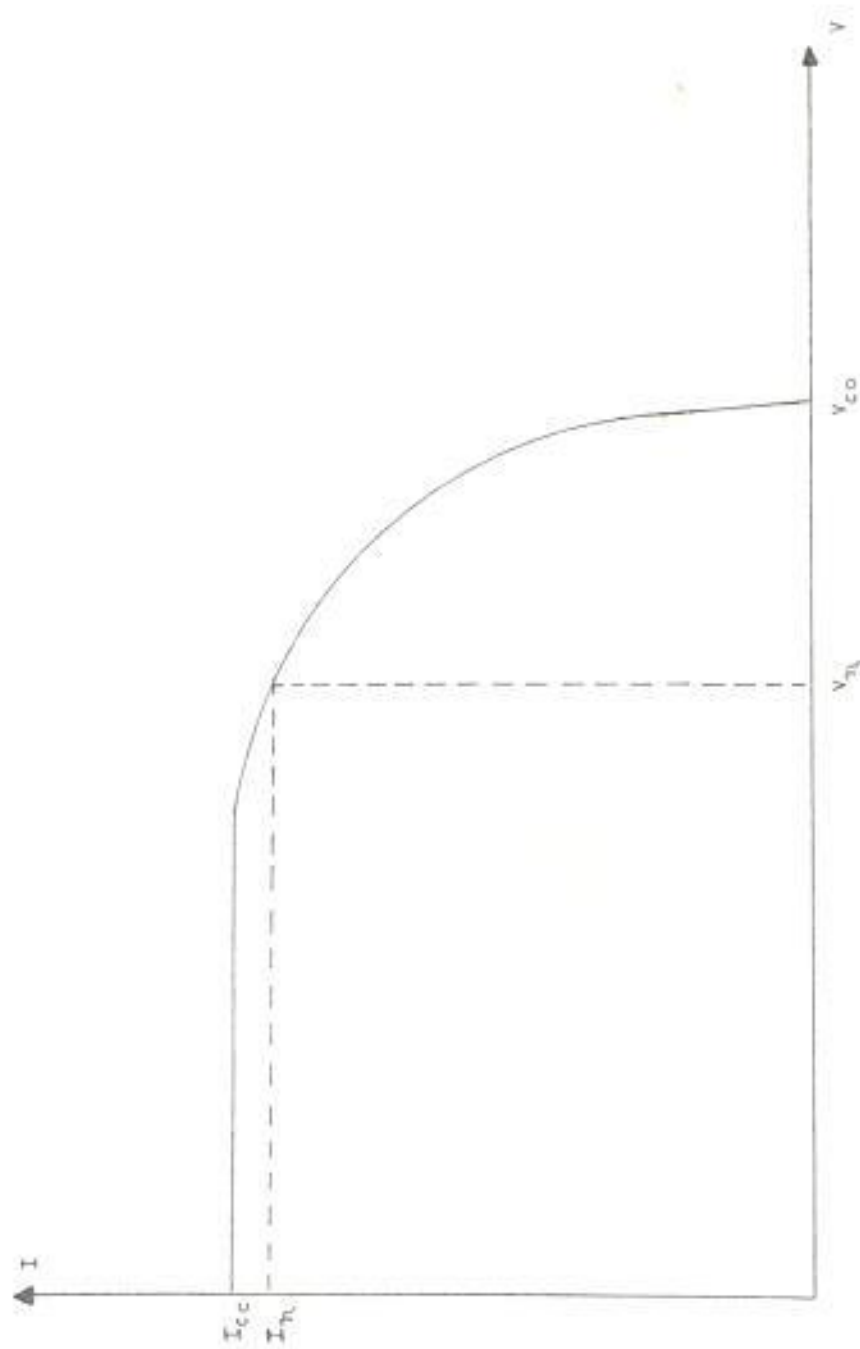


FIGURA 3.30 CARACTERÍSTICA I - V DE UNA CELULA SOLAR



Tensión en Vacío (Circuito abierto)  $V_{oc}$ . - Es la diferencia de potencial entre bornes en ausencia de consumo, con una iluminación fija y una temperatura determinada.

Corriente nominal  $I_n$ . - Es la corriente proporcionada por la célula en el punto de funcionamiento óptimo, teniendo aplicada una carga  $R_n$  de valor también óptimo, elegida de modo que la potencia eléctrica sea máxima.

Tensión Nominal  $V_n$ . - La que corresponde a  $I_n, R_n$  y la potencia máxima  $P_n$ . en la figura 4.28 se han indicado  $I_n$  y  $V_n$ .

El Rendimiento  $\eta$  que varía entre el 5% y el 14% aproximadamente es la razón entre la energía luminosa recibida y la eléctrica dada.

La Temperatura Límite de Funcionamiento, que es de unos  $100^\circ\text{C}$

Para definir la característica  $V-I$  ideal de un módulo se admiten internacionalmente las siguientes condiciones standards de medida.

- 1.- temperatura de célula:  $25^\circ\text{C}$ .
- 2.- Espectro de radiación solar: AM1 o AM1.5
- 3.- Irradiancia frontal:  $100\text{ mW/cm}^2$

4.-Irradiancia posterior: 50 mW/cm<sup>2</sup> (bifaciales)

La figura 3.31 muestra una típica curva  $V - I$  de un módulo fotovoltaico comercial.

Las curvas facilitadas por los fabricantes de acuerdo a las condiciones standar de medida deben ser modificadas para tener en cuenta las condiciones reales de trabajo en el campo, que en general , reducen la eficiencia de los mismos.

#### 3.4.3 TEMPERATURA DE LA CELULA:

La temperatura tiene mucho que ver en el buen rendimiento de la célula, pues un aumento de esta modifica las actuaciones de las células.

Mientras que la corriente de cortocircuito  $I_{cc}$  aumenta, la tensión de circuito abierto disminuye, de ello resulta una ligera disminución de la potencia máxima que deberá ser tomada en cuenta en un calculo de la configuración. figura 3.32.

La Temperatura produce el doble efecto de disminuir la tensión( a razón de 2mV/grado centigrado y célula) y aumentar levemente la corriente. Como consecuencia se produce una perdida de eficiencia tal y como se muestra en la figura 3.33.

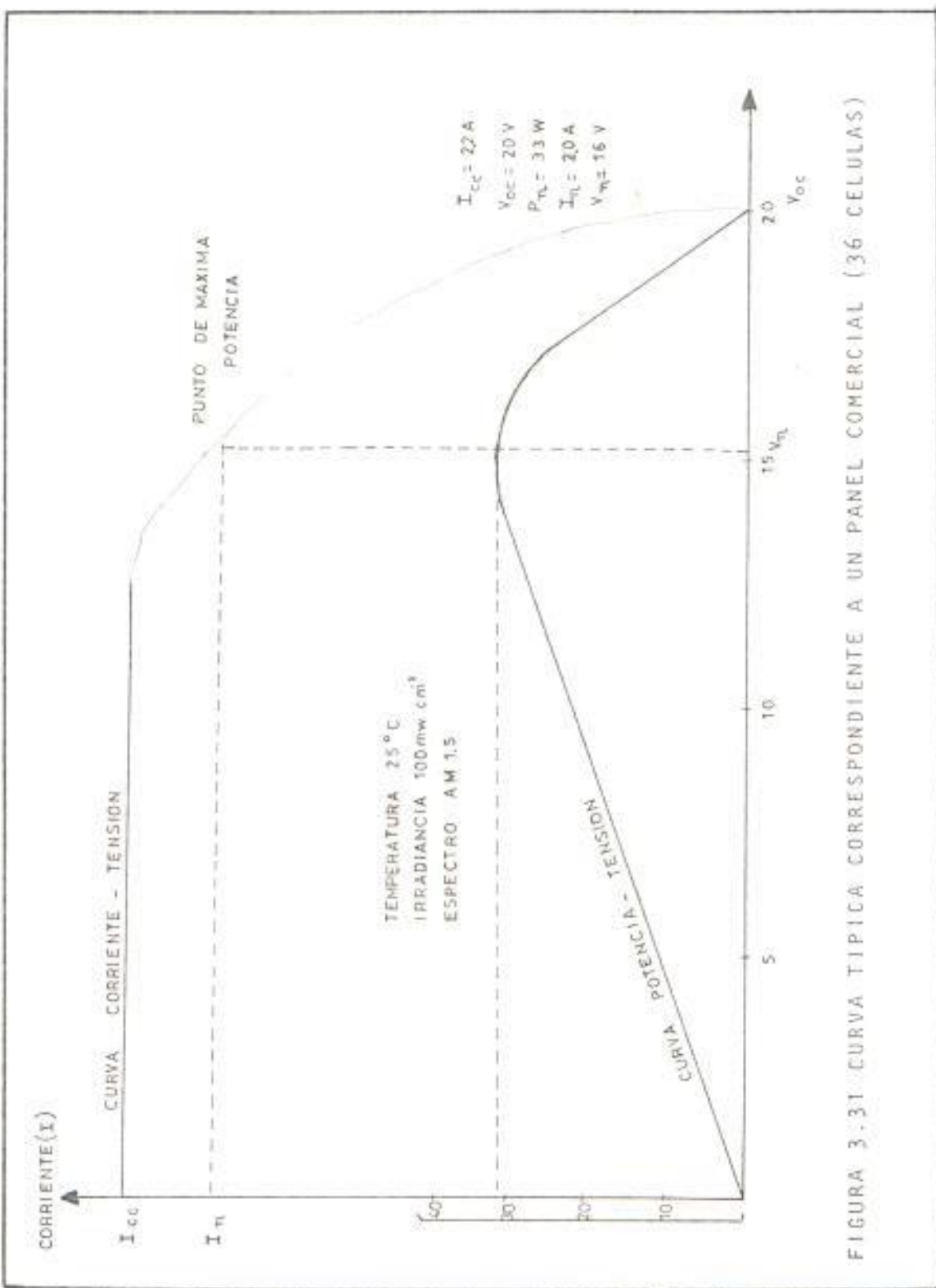


FIGURA 3.31 CURVA TIPICA CORRESPONDIENTE A UN PANEL COMERCIAL (36 CELULAS)

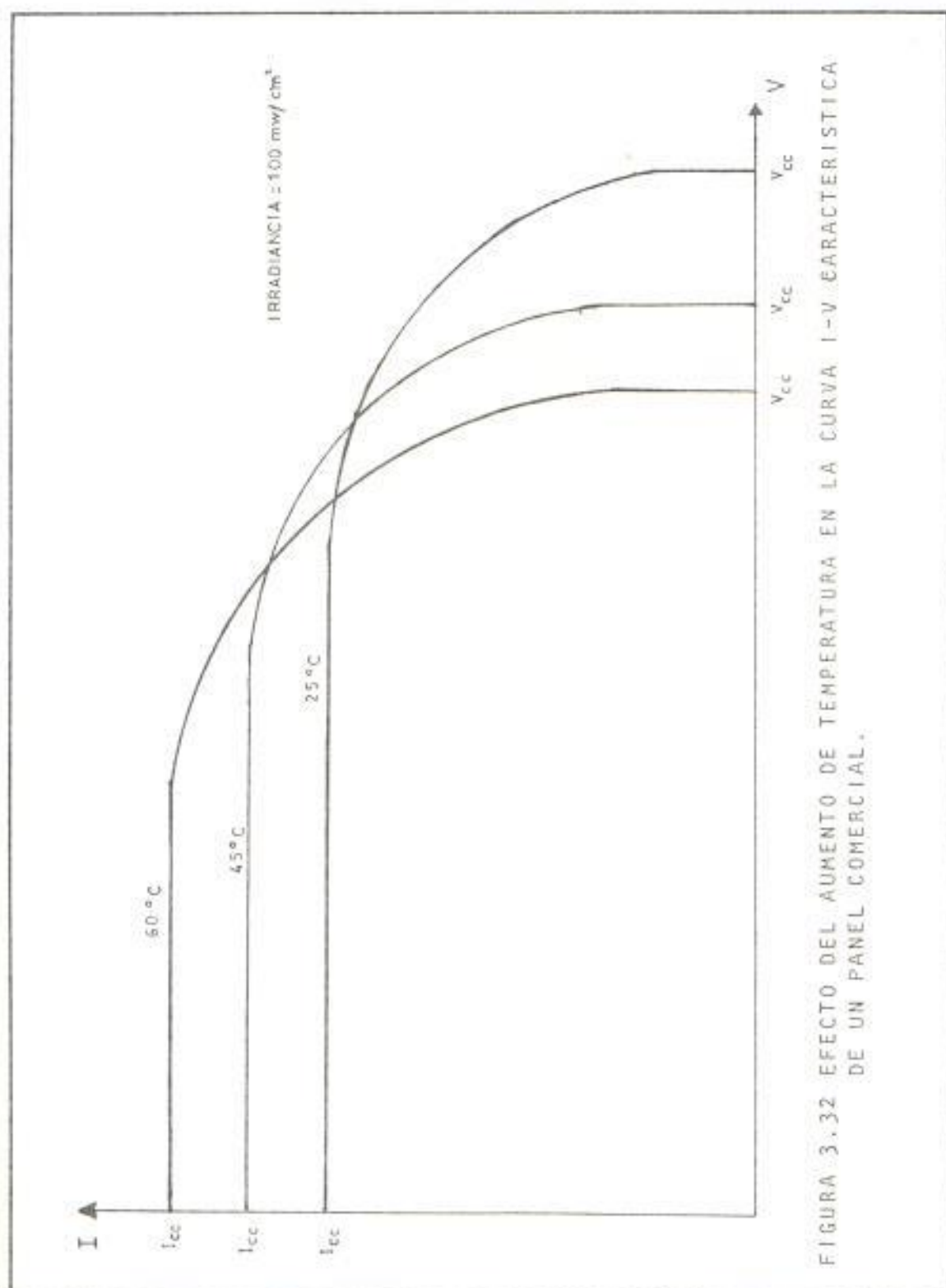


FIGURA 3.32 EFECTO DEL AUMENTO DE TEMPERATURA EN LA CURVA I-V CARACTERÍSTICA DE UN PANEL COMERCIAL.

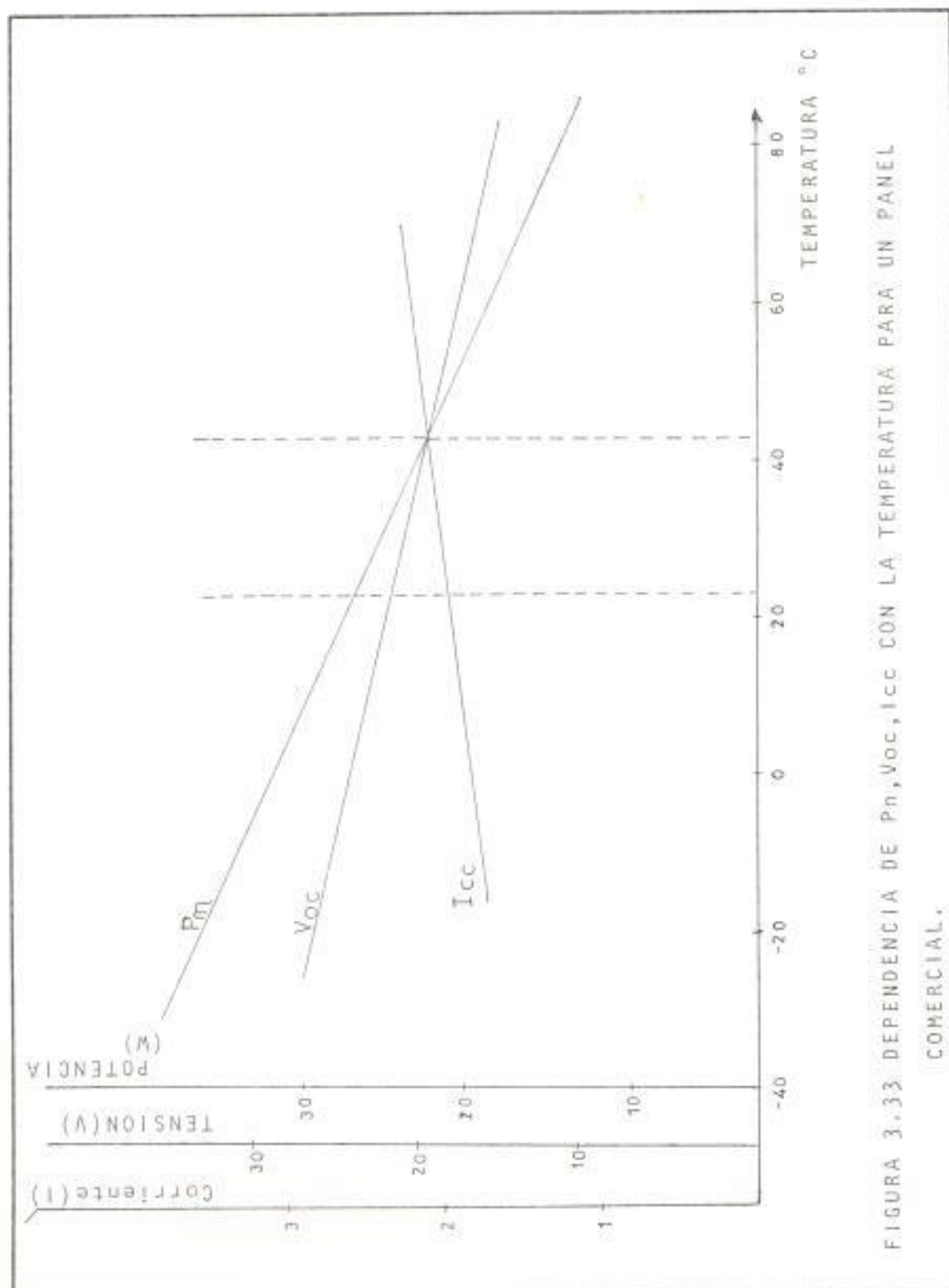


FIGURA 3.33 DEPENDENCIA DE  $P_m$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{cc}$  CON LA TEMPERATURA PARA UN PANEL COMERCIAL.

Si recordamos que para cargar una batería de plomo ácido necesitamos una tensión superior a 14 voltios, nos daremos cuenta de que esta disminución de la tensión puede llegar a ser crítica, pudiendo producirse la paradoja de que en momentos especialmente soleados el panel no tenga suficiente tensión como para cargar la batería en el punto de máxima potencia.

Es conveniente notar que una célula suele calentarse por encima de la temperatura ambiente, manteniéndose prácticamente constante la diferencia (Tcélula-Tambiente), con el objeto de caracterizar este fenómeno se ha definido una 'temperatura nominal de operación de célula', que según los estándares internacionales debe medirse en las siguientes condiciones.

1. Temperatura ambiente, 20°C.
2. Velocidad del viento  $1 \text{ ms}^{-1}$ .
3. Irradiancia frontal  $80 \text{ mW cm}^{-2}$ .
4. Irradiación posterior,  $40 \text{ mW cm}^{-2}$  (según criterio de fabricante de módulos bifaciales).
5. Carga. circuito abierto.
6. Instalación en condiciones normales.

Este dato suele venir dado en los catálogos de los fabricantes y oscila entre 40°C. y 45°C..

Con el objeto de cuantificar este efecto existe una tabla (tabla 5) la cual ha sido escogida en relacion con nuestra zona ecuatorial y supone los siguientes datos.

$T_{NOC}$  (temperatura de operacion de la célula) =  $43^{\circ}C$ .

$T_{célula}$  - ambiente =  $23^{\circ}C$ .

Caída de tensión en el regulador y en el cableado 0,7 voltios.

Tensión de carga de la batería de acuerdo a la figura 3.34 que puede expresarse mediante :

$$V(v) = 14,95 - 0,035 T (^{\circ}C.)$$

Luego es importante recalcar que el sistema deberá tener un sensor de temperatura ambiente, el cual actúe desconectando el sistema y así evitar disminución en la vida útil de los acumuladores de energía y en la célula en si.

En nuestro medio el promedio de temperatura ambiente es de  $27^{\circ}C$  (promedio anual) lo cual es un rango normal para un buen funcionamiento de la célula.

#### 3.4.4 RADIACION SOLAR EXPUESTA A LA CELULA:

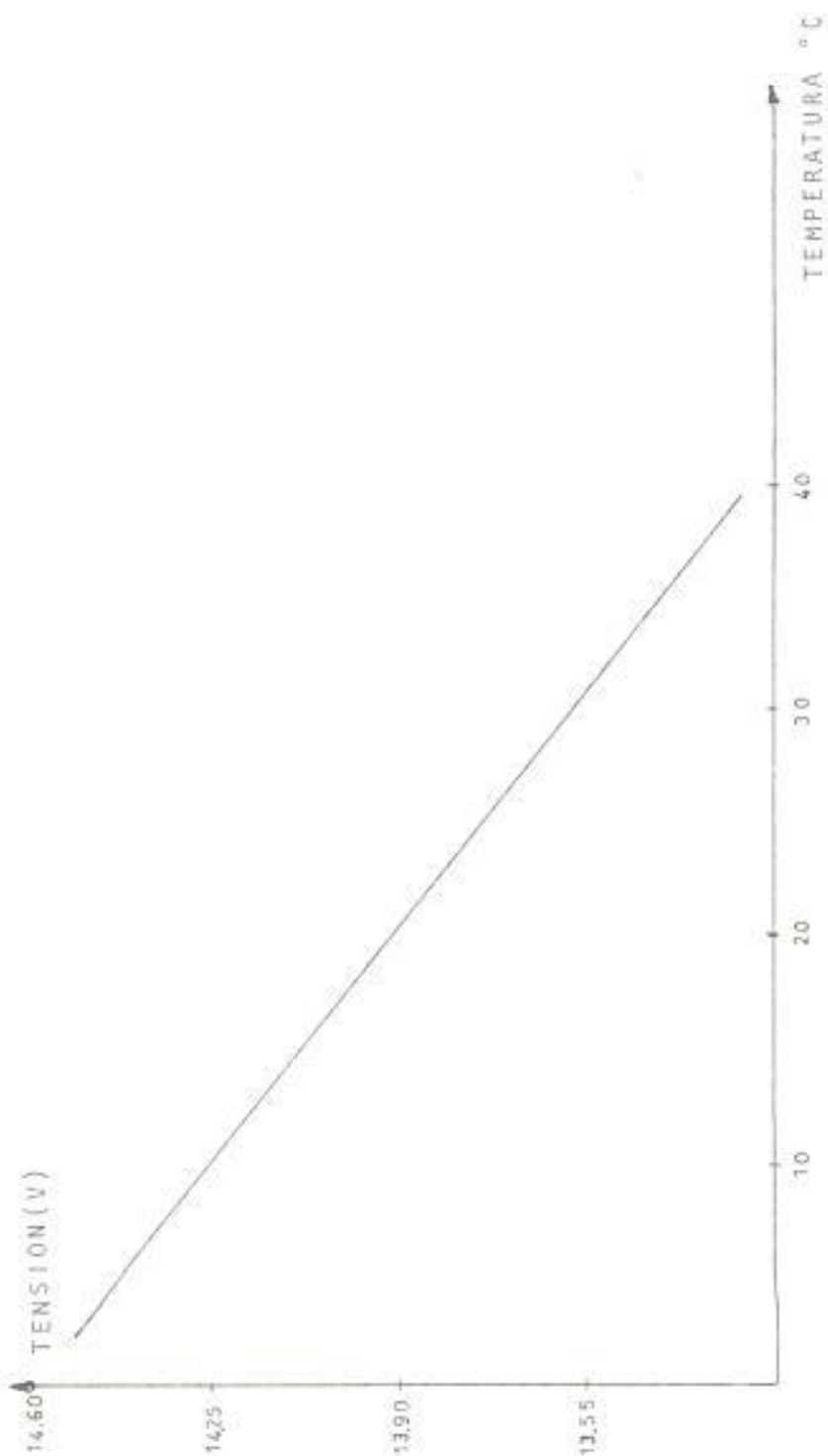


FIGURA 3.34 TENSION DE CARGA VS TEMPERATURA PARA UNA BATERIA DE PLOMO ACIDO



El valor de la intensidad emitida por el módulo es prácticamente proporcional a la cantidad de fotones recibidos por la célula, mientras que la tensión es relativamente constante.

Por este motivo el valor de la potencia emitida por la célula será proporcional al valor de la luminosidad, esta característica esencial muestra que para valores de luz solar bajos (figura 3.35) (mañana, atardecer, nubosidad) una célula es capaz de emitir una cierta potencia.

En cuanto al rendimiento de la célula se puede decir que este tiende a aumentar al aumentar la radiación solar.

Sin embargo al aumentar la corriente con la radiación solar, aun pequeños valores de resistencia serie pueden producir importantes pérdidas óhmicas que deterioran drásticamente el rendimiento de conversión para altos valores de radiación solar.

Como combinación de estos efectos la curva de rendimiento-concentración de radiación solar acaban siendo de la forma de la figura 3.36 donde se pueden observar 3 regiones bien diferenciadas: (a) la región donde el efecto  $R_s$  (resistencia serie) es despreciable y en la que la curva se aproxima a la ideal para  $R_s=0$  creciendo con la concentración. (b) la región dominada por la resistencia serie en la que el rendimiento decae rápidamente con la concentración de la radiación solar y (c) la

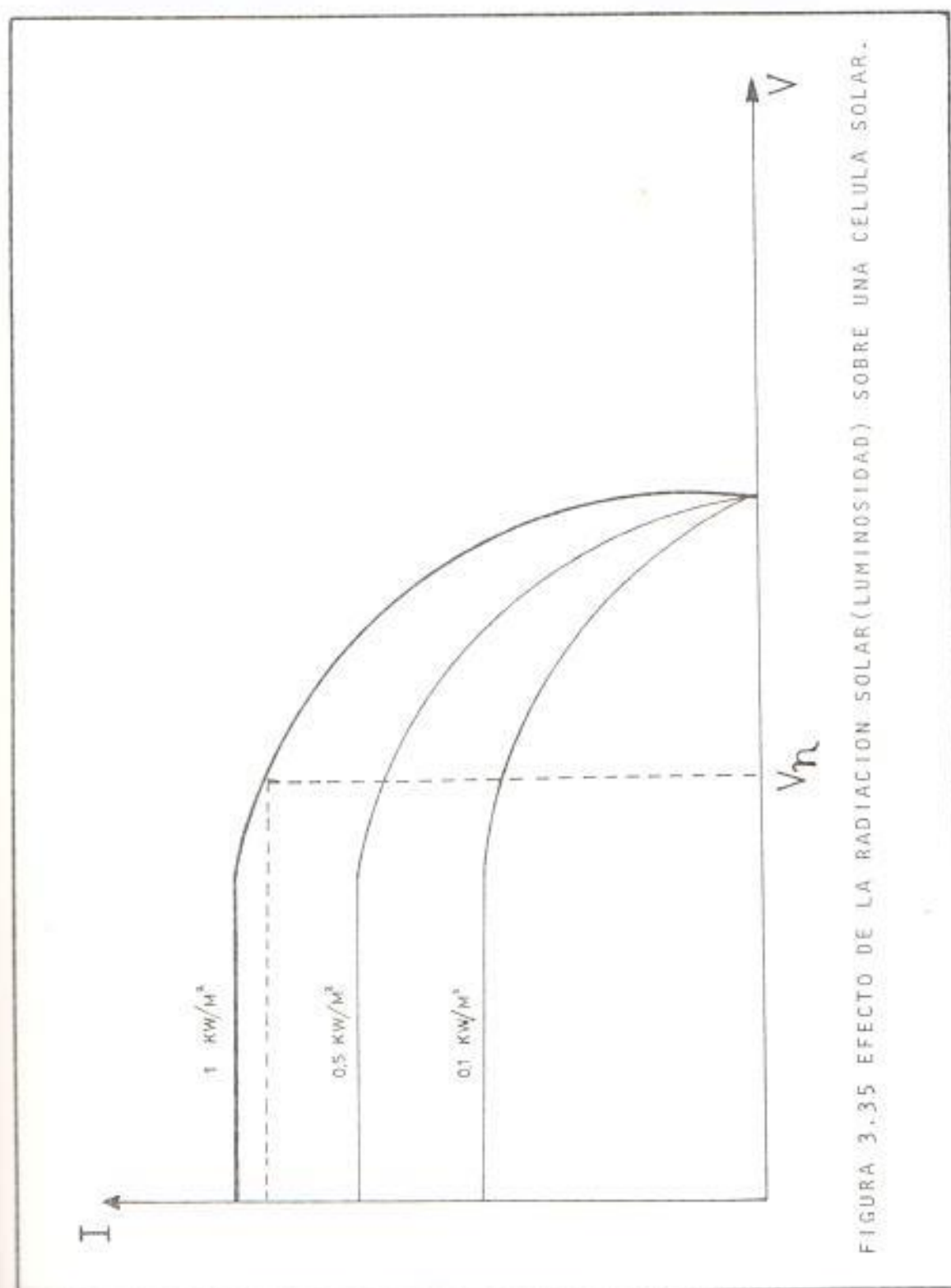


FIGURA 3.35 EFECTO DE LA RADIACION SOLAR (LUMINOSIDAD) SOBRE UNA CELULA SOLAR.

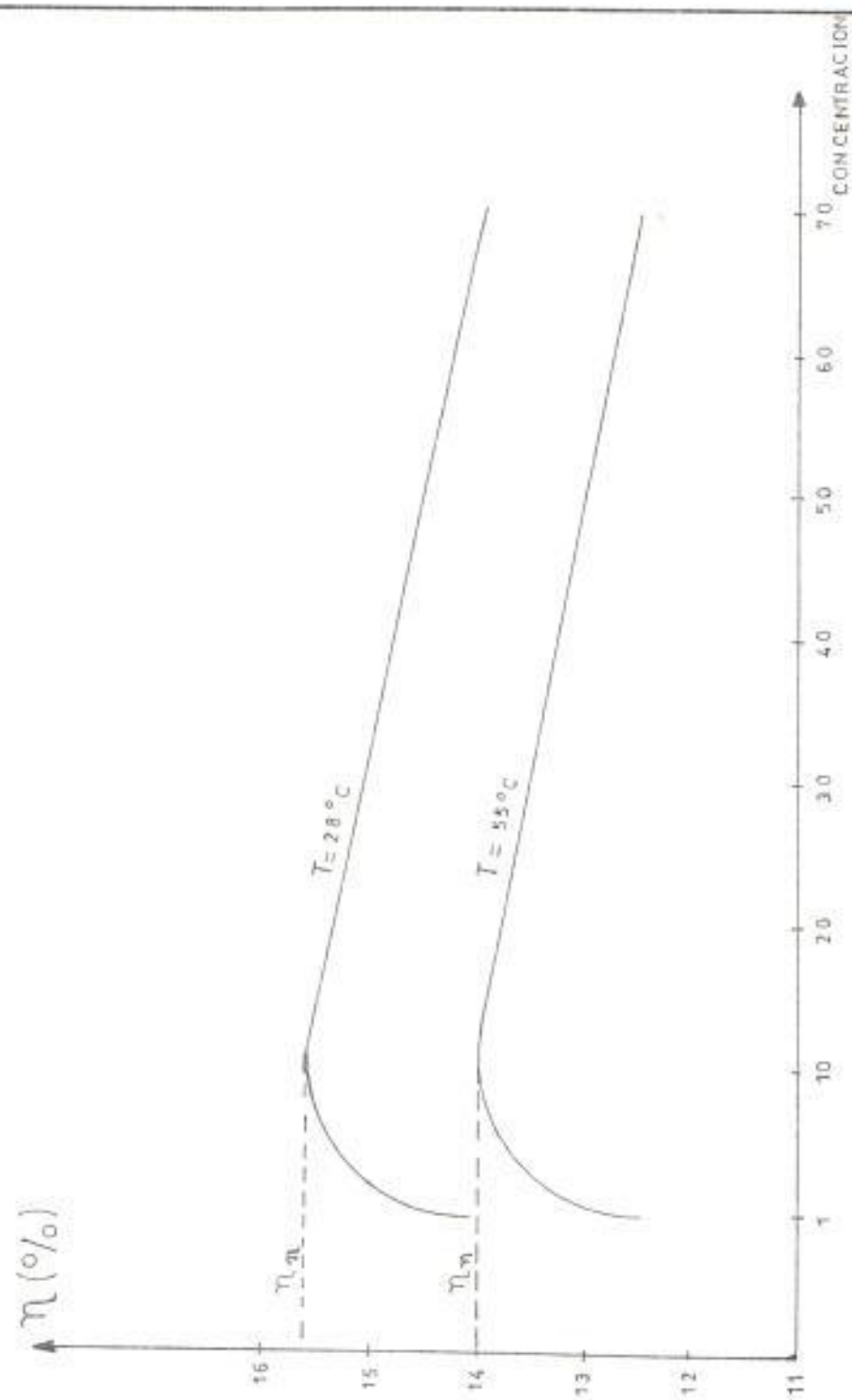


FIGURA 3.36 EFECTO DEL AUMENTO DE RADIACION Y TEMPERATURA SOBRE EL RENDIMIENTO DE CELULAS SOLARES DE SILICIO

región que rodea al punto de máximo rendimiento, influida por los dos efectos contrapuestos anteriores y que presenta una disminución lenta de  $\eta$  alrededor de  $\eta_m$  (rendimiento normal).

#### 3.4.5 EFECTOS DE PUNTOS CALIENTES BY-PASS (DIODO DE BLOQUEO):

Un tema que en grandes sistemas con un gran número de paneles planos series y paralelos pueden tener importancia, es la posibilidad de que se produzcan averías irreparables a causa de sombras locales o funcionamiento deficiente de una o varias células, el mecanismo que produce estas averías es un calentamiento localizado cuyo origen se describe a continuación. La figura 3.37 muestra un grupo de células en serie conectadas a una batería y una carga, si una de las células tiene una corriente fotogenerada inferior a las demás, necesariamente se tiene que producir un reajuste de las corrientes y de las tensiones del circuito.

En un circuito en que todas las células funcionan normalmente, la tensión de batería se alcanza de un modo escalonado como se aprecia en la figura 3.37.b. La introducción de un elemento con un funcionamiento anómalo altera drásticamente esta distribución de tensiones. Igualmente la corriente se reduce hasta que la tensión de los elementos que funcionan normalmente suba

lo suficiente como para compensar la caída de tensión de la célula anómala. Si la corriente de equilibrio es mayor que la corriente de cortocircuito de la célula anómala, su tensión será negativa (figura 4.37.d) produciéndose en ella una disipación de potencia, la célula habrá pasado de comportarse como generador a comportarse como carga.

Si se redujera la tensión de la batería, el efecto sería mucho más drástico aumentando la potencia disipada en la célula anómala.

Esta disipación extraordinaria en la célula puede en determinados casos producir un deterioro irreversible del encapsulante, de las células vecinas e incluso de los contactos.

En grandes paneles formados por combinaciones en serie de grupos de células en paralelo, este fenómeno de degradación por calentamiento ha de tenerse en cuenta a la hora de diseño, como tendencia ha de evitarse siempre que sea posible sistemas con gran número de células en serie, cuando los grupos están formados por pocas células en paralelo. Cuando esto no es posible se hace necesario el empleo de Diodos conectados en SHUNT sobre grupos de células en serie y con polarización inversa a estas.

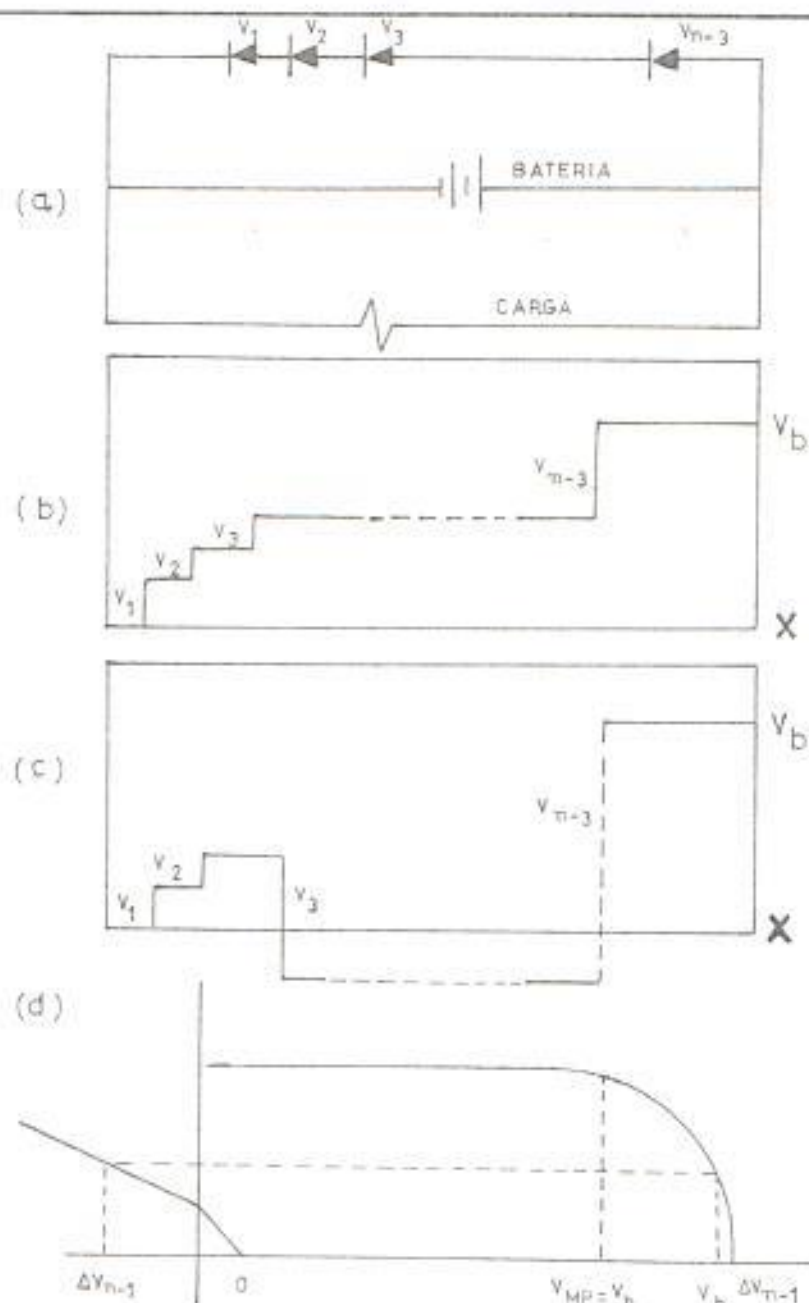


FIGURA 3.37 MECANISMO DE FALLO POR PUNTO CALIENTE (a) CIRCUITO COMPUESTO POR  $n$  CELULAS SOLARES EN SERIE, UNA BATERIA Y UNA CARGA (b) DISTRIBUCION DE TENSIONES POR ELEMENTOS  $V_1 = V_2 = V_3 = V, V_{n-3} = V(n-3)$  CUANDO TODAS LAS CELULAS TRABAJAN CORRECTAMENTE (c) DISTRIBUCION DE TENSIONES POR ELEMENTOS CUANDO LA TERCERA CELULA TIENE UNA CORRIENTE FOTOGENERADA INFERIOR A LAS DEMAS  $V_1 = V_2 = V, V_3 = 0$  (d) CURVAS IV DEL PANEL Y DE #ERA CELULA RESPECTIVAMENTE.

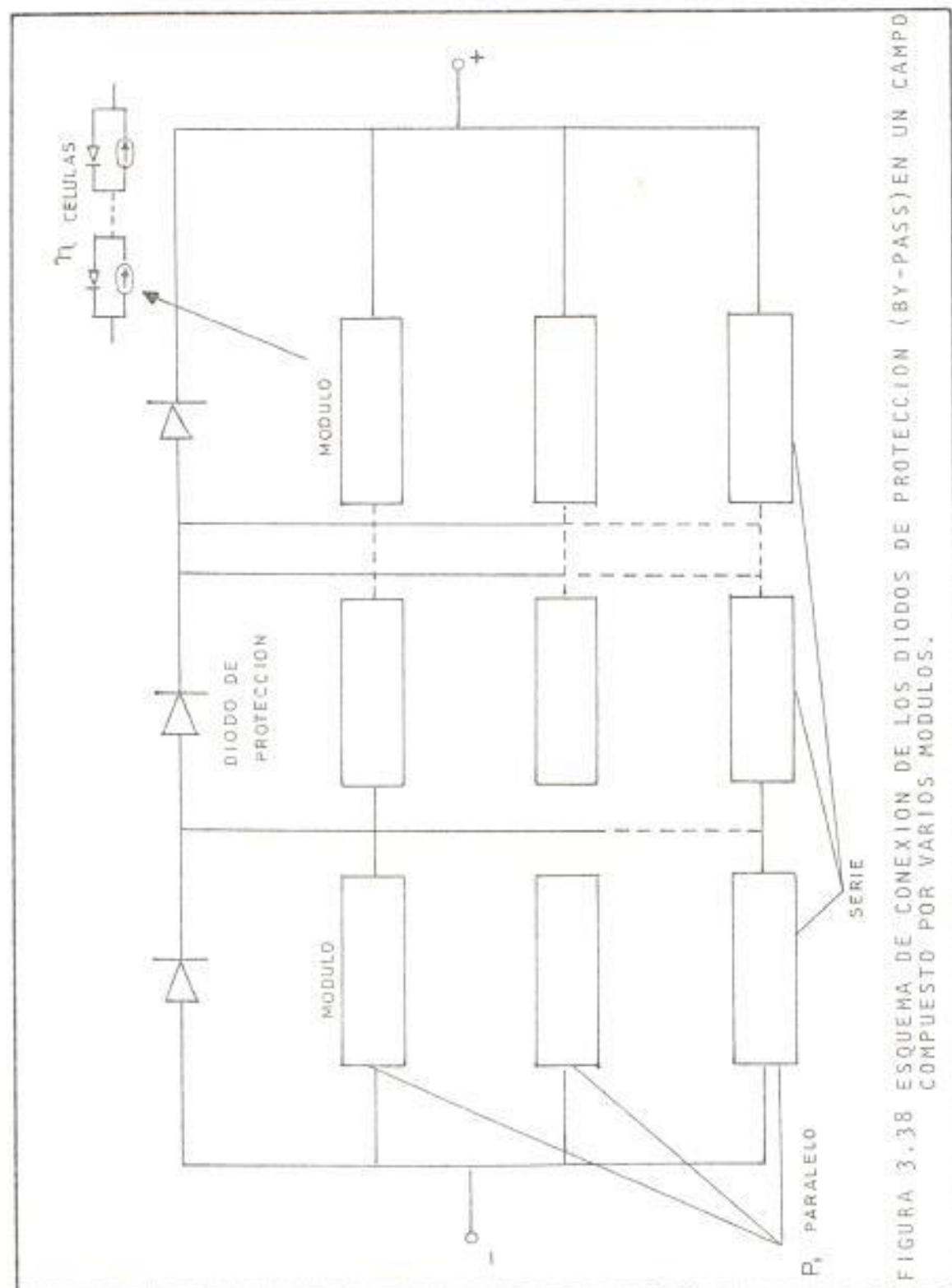
En estos casos sería conveniente utilizar un panel plano que incorporara dichos diodos y que tuviera un diseño específicamente concebido para tales sistemas.

Algunos fabricantes incorporan dentro del módulo algunos diodos By-Pass colocados en paralelo con cada serie de  $C$  células de modo que la potencia máxima que en el caso peor disipa una célula sea precisamente la correspondiente a esas  $C$  células.

El número de células que protege cada diodo es función de las características de estas, siendo frecuente 12 o 18. El diodo de protección deberá estar diseñado para soportar una corriente igual a la corriente nominal de toda la rama serie en la que está conectado.

Este efecto es especialmente importante cuando se conectan varios módulos formando combinación serie paralelo, en este caso se colocarán en paralelo con los módulos varios diodos de protección como se indica en la figura 3.38.

La máxima corriente que deberá soportar el diodo es precisamente lo que corresponde a la suma de las corrientes de los  $P$  módulos en paralelo. Sin embargo, esto solo ocurriría si todos los módulos conectados a ese diodo quedaran interrumpidos.





En muchas de las aplicaciones, los paneles fotovoltaicos deben cargar una batería de acumuladores con el fin de almacenar la energía producida durante las horas de sol y utilizadas durante la noche.

Los sistemas fotovoltaicos se diseñan de tal forma que la tensión del panel sea mayor que la tensión de la batería para casi cualquier iluminación diurna. Así el panel está siempre en condiciones de cargar la batería.

sin embargo al llegar la noche la tensión  $V_{oc}$  del panel se hace menor que la tensión de la batería y esta tiende a descargarse a través de las células solares bajo polarización directa. para evitar esta descarga se debe colocar un DIODO DE BLOQUEO.

Es conveniente que la potencia consumida por este diodo sea pequeña; por ello son recomendados los diodos de barrera SCHOTTKY, que tienen una tensión de puesta en conducción menor que los diodos convencionales. Si la tensión del panel o paneles es grande, las pérdidas en el diodo de bloqueo son poco importantes.

El DIODO DE BLOQUEO es colocado en oposición a las células (catodo conectado al polo positivo de la batería). Esta solución que es muy frecuente produce una introducción de una caída

de tensión aproximada de 0.6 voltios (diodo de unión P-N) con polarización directa. Lo que supone unas pérdidas de casi un 5% de la energía generada.

En algunas ocasiones este diodo de bloqueo es reemplazado por algún elemento electromecánico para la apertura del circuito en la noche o la apertura podría ser manual.

### 3.5.- FIABILIDAD DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO:

Se entiende por fiabilidad la probabilidad de que un sistema concreto satisfaga en un momento dado la función para la que ha sido diseñada. Si decimos que la fiabilidad de un circuito es 0.993 expresamos que dicho circuito funcionará bien el 99.3 % de las veces o lo que es lo mismo que fallará por término medio siete veces por cada 1000 que se use o si se quiere por cada 1000 horas de funcionamiento; siete estará estropeado.

Llamando tasa de fallos al número de fallos del sistema considerado por unidad de tiempo, y tiempo medio entre fallos (TMEF) a su inverso, en los generadores fotovoltaicos de electricidad había 2 tipos fundamentales de fallos.

Lec. No. \_\_\_\_\_

a) Los fallos que ocurren aleatoriamente en el tiempo con independencia de la historia previa del sistema, La función de probabilidad asociada con este tipo de fallos sigue una ley de poisson:

$$F(t) = e^{-\lambda t}$$

donde  $\lambda$  es la tasa de fallo, en la figura 4.37 se representa cualitativamente esta probabilidad.

b) Los fallos debidos al envejecimiento natural de los elementos del sistema considerado, que siguen una ley de distribución gaussiana.

$$F(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(t-\mu)^2} dt$$

Donde  $\mu$  y  $\sigma$  corresponden al valor medio y a la desviación típica de la distribución. en la figura 3.39 se presenta igualmente la probabilidad del fallo en función del tiempo en forma cualitativa.

La fiabilidad de un generador solar formado por varios elementos puede calcularse a partir de la fiabilidad de estos.

En la figura 3.40 aparece representado en bloques un generador fotovoltaico, en línea de puntos se representa la parte correspondiente al generador de emergencia que en general es opcional.

Como es fácilmente demostrable, la fiabilidad de los elementos conectados en serie viene dada por el producto de las de cada uno de ellos.

$$F_{\text{total}} = \prod_{i=1}^n F_i$$

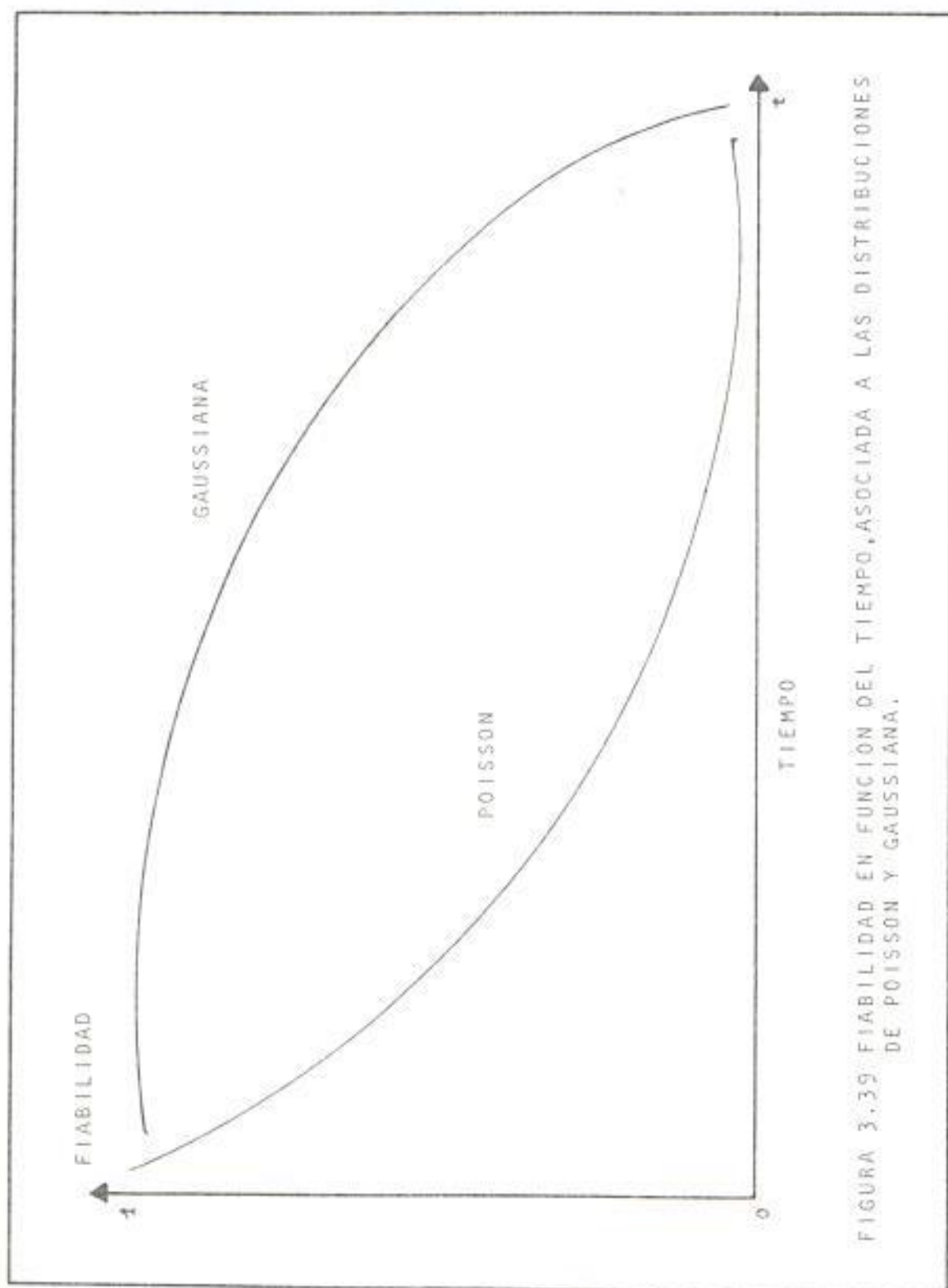


FIGURA 3.39 FIABILIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, ASOCIADA A LAS DISTRIBUCIONES DE POISSON Y GAUSSIANA.

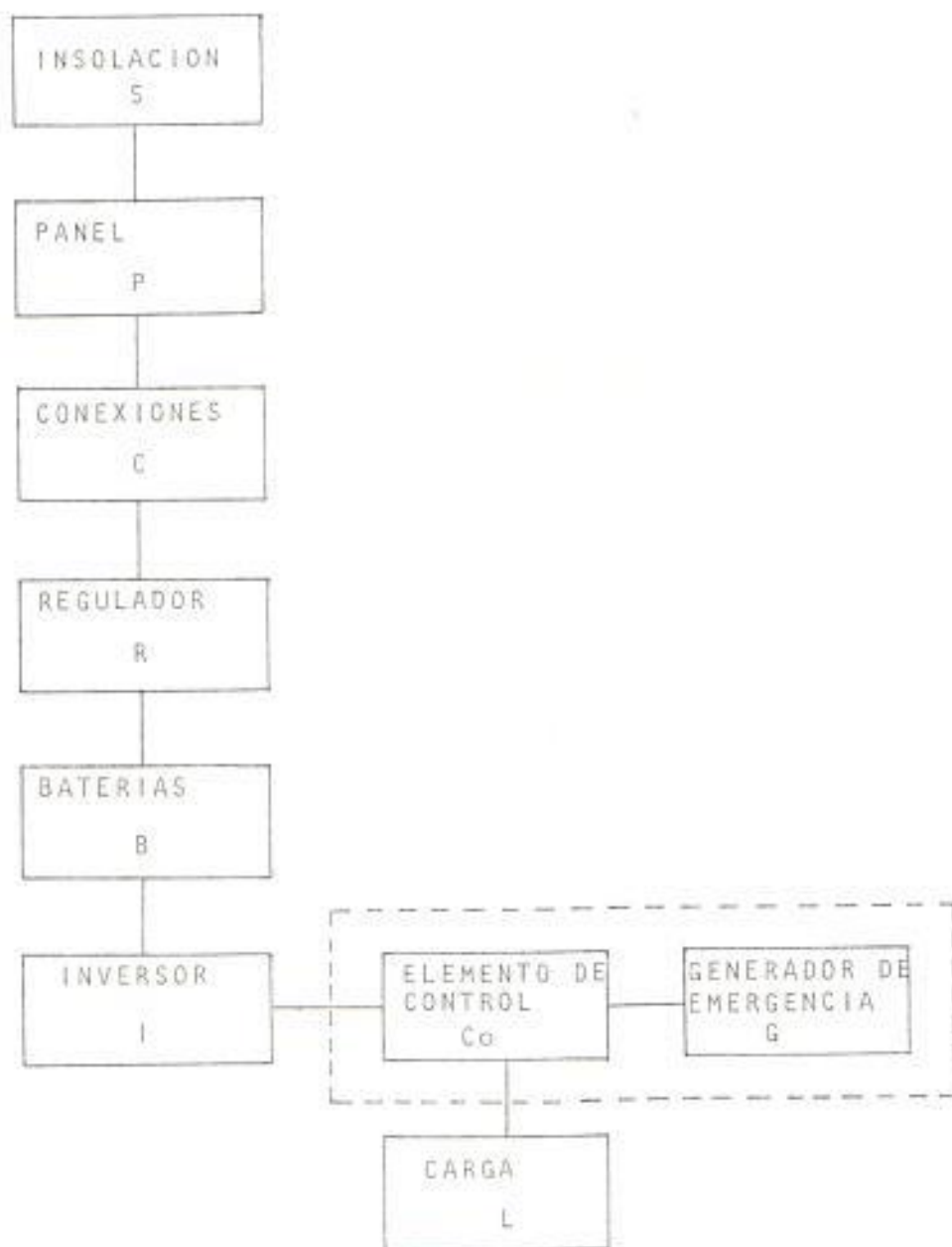


FIGURA 3.40 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO PARA EL ESTUDIO DE FIABILIDAD.

Mientras que la de los elementos conectados en paralelo adopta la expresión:

$$F_{\text{Paralelo}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i)$$

Si aplicamos estas expresiones a un generador fotovoltaico autónomo obtendremos:

$$F = F_m \cdot F_p \cdot F_c \cdot F_r \cdot F_b \cdot F_i$$

o bien:

$$F = F_{\text{CG}} \cdot \{1 - (1 - F_{\text{CG}}) \cdot (1 - F_m \cdot F_p \cdot F_c \cdot F_r \cdot F_b \cdot F_i)\}$$

Si utilizamos un generador de emergencia,

A su vez cada  $F_i$  puede calcularse dividiendo en sub bloques el elemento.

En la tabla 6 se recogen los valores típicos de fiabilidad de los distintos componentes de un sistema fotovoltaico.

ELEMENTO	FIABILIDAD(F <sub>i</sub> )
Panel	98,0
Conexiones	99,0
Regulador	99,5
Batería	97,0
Inversor	99,5
Generador aux.	99,5

Elemento control	99,5	
-----		

TABLA 6 VALORES TÍPICOS DE LA FIABILIDAD DE LOS ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN UN GENERADOR FOTOVOLTAICO:

Como vemos, solo nos queda por determinar la fiabilidad de la insolaración, entendiéndolo como tal a la que se deriva del dimensionado de la instalación, donde jugamos con el tamaño de la batería y del panel.

La fiabilidad de insolaración se lo puede definir también como lo complementario de la probabilidad de pérdida de carga ( que se sucede cuando la corriente que suministra al receptor es menor que la que este necesita y que había sido establecida en el diseño de dicho sistema, debido a una falta de radiación incidente simultáneamente a un defecto de la energía acumulada en la batería.

Una vez calculada  $F_s$  podemos determinar la fiabilidad del sistema fotovoltaico.

En la mayor parte de los casos, sin embargo el dato de partida es precisamente la fiabilidad requerida por el generador, para lo cual debemos ajustar  $F_s$ , que depende de nuestro diseño, despejando su valor de las ecuaciones anteriormente vistas para obtener:

$$F_s = F / (F_p \cdot F_c \cdot F_r \cdot F_b \cdot F_A)$$

o bien:

$$F_s = (F/F_{co} - F_{ca}) / ((1 - F_{co})(F_{ca}, F_{cc}, F_{cr}, F_{cb}, F_{ci}))$$

En la figura 3.41 y 3.42 se representa las expresiones anteriores para ambos casos asumiendo los valores de la tabla 6.

Como puede verse existe un limite teórico de fiabilidad situado en el 93 % para un generador autónomo y en el 99.1 para un sistema dotado de generador de emergencia.

Estos limites solo pueden ser sobrepasados si añadimos redundancia en los elementos. En general estos limites son iguales o superiores a los que se consiguen con el tendido eléctrico en lugares remotos.

### 3.6.- SELECCION DE INCLINACION OPTIMA DE PANELES SOLARES EN EL LITORAL ECUATORIANO PARA MEJOR OBTENCION DE LA RADIACION SOLAR Y CONSEGUIR MAYOR CORRIENTE ELECTRICA SEGUN MODELO DE COLLARES Y PEREIRA.

Para el estudio de inclinación óptima de los paneles en la zona del litoral se ha utilizado el modelo del programa de COLLARES y PEREIRA, el cual a partir de los valores de radiación global diaria en superficies horizontales permite conocer la radiación global sobre superficies inclinadas, dependiendo unicamente de parámetros que se indican a continuación.



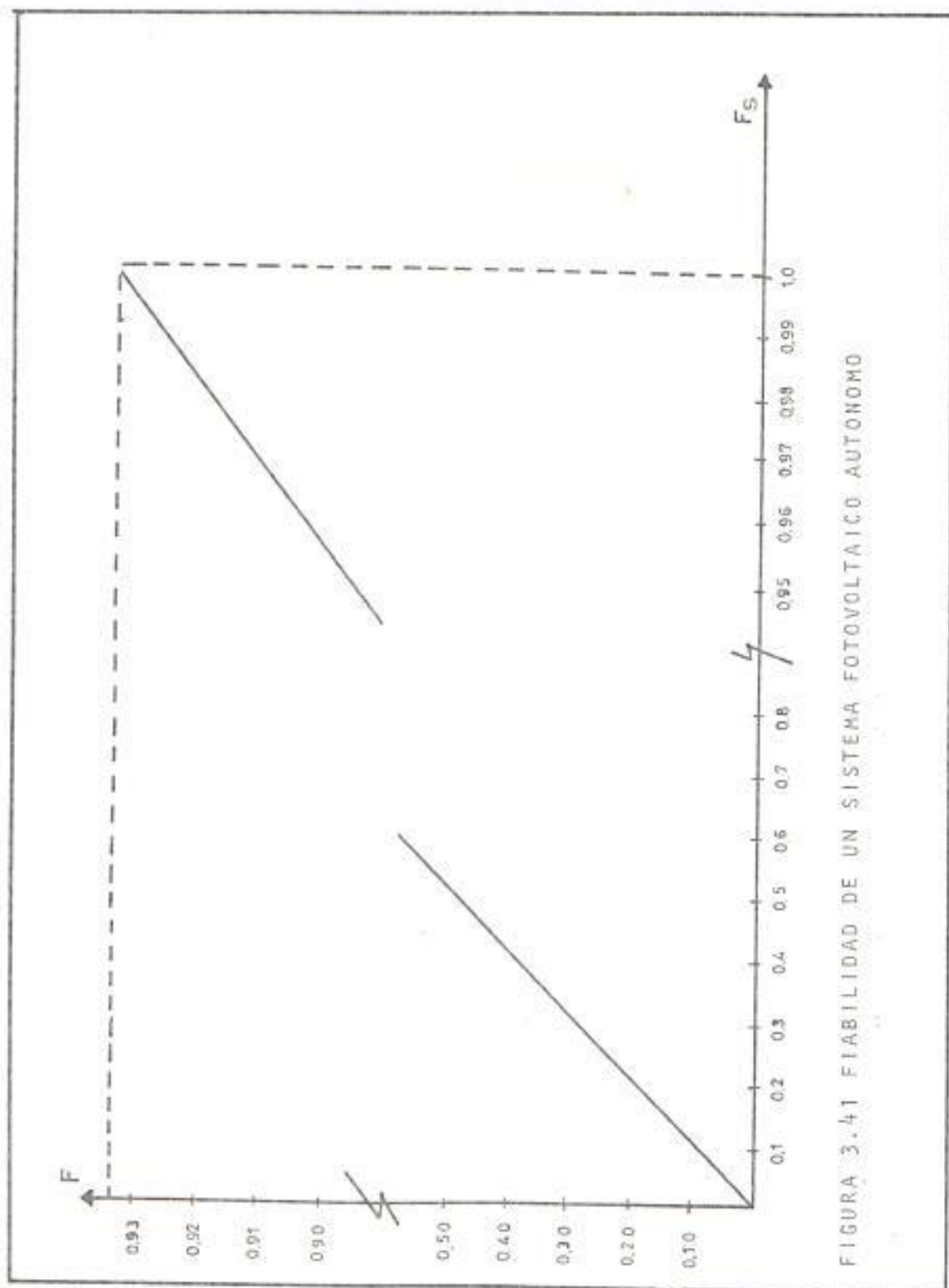


FIGURA 3.41 FIABILIDAD DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTONOMO

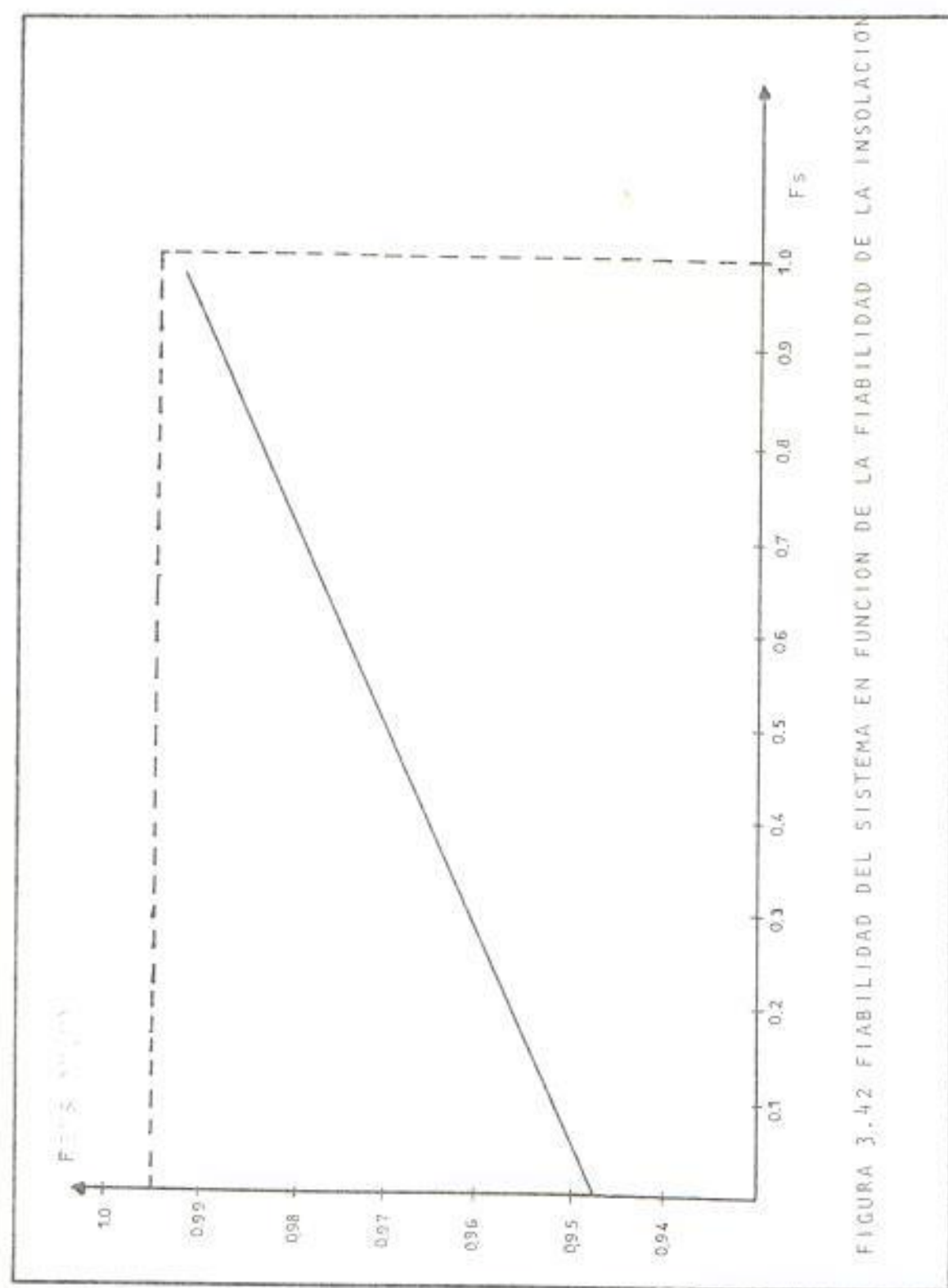


FIGURA 3.42 FIABILIDAD DEL SISTEMA EN FUNCION DE LA FIABILIDAD DE LA INSOLACION

x

Los valores escogidos de radiación solar global diaria sobre superficie horizontal fueron tomados de la información suministrada por la ESPOL sobre mediciones realizadas de energía solar en Guayaquil y para el año 1963, pudiendo suponerse similares para cualquier otro año de análisis, dichos valores fueron dados en  $\text{Btu-dia/pie}^2$  y convertidos luego a  $\text{KW-hora/M}^2\text{-dia}$  utilizando el factor de conversión:

$$1 \frac{\text{Btu-dia}}{\text{pie}^2} = 3.153 \times 10^{-4} \frac{\text{KW-Hora}}{\text{M}^2} \text{ dia}$$

A su vez estos valores fueron escogidos de la tabla ??? luego de haber calculado el valor de radiación medio del mes en base a los valores de radiación diario, obteniéndolo dividiendo la sumatoria de las radiaciones de todos los días del mes para el número de radiaciones medidas, o sea Valor de la radiación

considerado .....  $\frac{\text{valor medio} = \text{Eradiaciones diarias de todo mes}}{N \text{ de días medidos}}$

Luego se determina cuál es el día típico en el mes en que este valor de radiación media tuvo lugar (nro de día del año) para efecto de considerarlo también como dato de entrada también en el programa.

A continuación símbolos y parámetros utilizados en el programa.

(11) Radiación solar global sobre superficie horizontal en .....  
 $\text{KW-hora-dia/M}^2$

(N12) Radiación solar global sobre superficies inclinadas.

- $R_w$  Reflectividad de los alrededores, la cual se considero de un valor de 0,10 por ser esta la de la roca.
- RLAT Latitud.
- KA Angulo de inclinacion de los colectores en grados.
- DIA(12) Dia tipico de cada mes.
- DEC Declinacion solar.
- AHPS Angulo horario de puesta de sol sobre superficie horizontal.
- AHPI Idea sobre superficie inclinada.
- AH Minimo angulo horario de puesta al sol.
- REN insolacion extraterrestre sobre una superficie perpendicular a los rayos solares.
- REI Idea sobre superficie horizontal
- FC Indice de claridad.
- FD Factor de insolacion difusa
- RD Relacion entre la radiacion directa media sobre superficie inclinada y la radiacion directa media sobre superficie horizontal

Luego los valores de radiacion solar global diaria sobre superficie horizontal y los valores de dia tipico fueron los mostrados en la tabla 7.

MESES	RADIACION SOLAR GLOBAL	DIA TIPICO
1 AÑO	DIARIA (KWH-DIA/M <sup>2</sup> )	DEL AÑO

Feb	3.71	14
Mar	3.66	32
Abr	3.40	87
May	3.27	91
Jun	3.12	133
Jul	3.17	159
Ago	3.09	200
Sep	2.89	226
Oct	2.50	258
Nov	2.68	298
Dic	2.89	303
Dic	2.83	353

TABLA 7. VALORES DE RADIACION Y DIA TIPICO ESCOGIDOS  
PARA EJECUCION DE PROGRAMA.

Reflectividad del suelo =  $R_0 = 0.10$

Latitud del lugar  $2.5^\circ$

### 3.6.1 PROGRAMA DE COLA APLICACIONES:

Los datos de radiacion solar global sobre la superficie horizontal para los 12 meses del año  $I(12)$ , así como los valores de días tipicos para los 12 meses  $HA(12)$ ; y los valores de lati-

tud y reflectividad se introducen en el computador de la siguiente manera.

Crear un archivo de datos con tres registros, cada uno de los cuales tendrá la siguiente información y en el orden indicado.

PRIMER REGISTRO. DIA(12) (n de día del año).

Columna 1 - 3 Día típico del mes de Enero. Formato entero XXX

Columna 4 - 6 Día típico de mes Febrero. Formato entero XXX

columna 7 - 9 Día típico de mes de Marzo. Formato entero XXX

Columna 10 - 12 Día típico de mes de Abril. Formato entero XXX

Columna 13 - 15 Día típico de mes de Mayo. Formato entero XXX

Columna 16 - 18 Día Típico de mes de Junio. Formato entero XXX

Columna 19 - 21 Día típico de mes de Julio. Formato entero XXX

Columna 22 - 24 Día típico de mes de Agosto. Formato entero XXX

Columna 25 - 27 Día típico de mes de Sept. Formato entero XXX

Columna 28 - 30 Día típico de mes de Octub. Formato entero XXX

Columna 31 - 33 Día típico de mes de Nov. Formato entero XXX

Columna 34 - 36 Día típico de mes de Dicc. Formato entero XXX

SEGUNDO REGISTRO (1-12) Kwh-día/M<sup>2</sup>.

Columna 1 - 4 Radiación solar global de día típico mes Enero

Columna 5 - 8 Radiación solar global de día típico mes Febrero

Columna 9 - 12 Radiación solar global de día típico mes Marzo

Columna 13 - 16 Radiación solar global de día típico mes Abril

Columna 17 - 20 Radiación solar global de día típico mes Mayo  
Columna 21 - 24 Radiación solar global de día típico mes Junio  
Columna 25 - 28 Radiación solar global de día típico mes Julio  
Columna 29 - 32 Radiación solar global de día típico mes Agosto  
Columna 33 - 36 Radiación solar global de día típico mes Sept.  
Columna 37 - 40 Radiación solar global de día típico mes Octb.  
Columna 41 - 44 Radiación solar global de día típico mes Nov.  
Columna 45 - 48 Radiación solar global de día típico mes Dicb.  
Todos los valores, en formato decimal X.XX.

TERCER REGISTRO R<sub>s</sub>, R<sub>LA</sub> (grados).

Columna 1 - 4 reflectividad del suelo Formato decimal X.XX

Columna 5 - 8 Latitud de Lugar.....Formato decimal X.XX

FORMA DE EJECUCION DEL PROGRAMA.

Para ejecutar el programa en el computador 4341 de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, si el archivo de datos por ejemplo se llama DATOS COLL y si el archivo de salida se llama-  
re RESULT COLL, las sentencias a digitar serán las siguientes:

FI S DISK DATOS COLL (enter)

FI 6 DISK RESULT COLL (enter)

START (enter)

(enter)....significa oprimir la tecla -enter-

Con lo cual tendremos el resultado de la ejecución en el archivo de salida RESUL COLL.

El listado del programa se puede encontrar en el anexo de la tesis y los resultados obtenidos a continuación cuyos valores fueron graficados utilizando LOTUS 123 DE IBM PC para inclinación de panel de  $0 - 10 - 20 - 25$  grados (figura 3.43).

Para efectos de mejor análisis el programa fue modificado para obtener en una sola ejecución valores de radiación para diferentes inclinaciones de la superficie o panel, para lo cual se hace variar KA (inclinación) con valores de  $5^\circ$  en  $5^\circ$  desde  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$ , logrando con ello obtener en un solo cuadro un esquema que da la idea del comportamiento de la radiación solar para diferentes inclinaciones del panel y para los diferentes meses del año.

Del gráfico podemos concluir que:

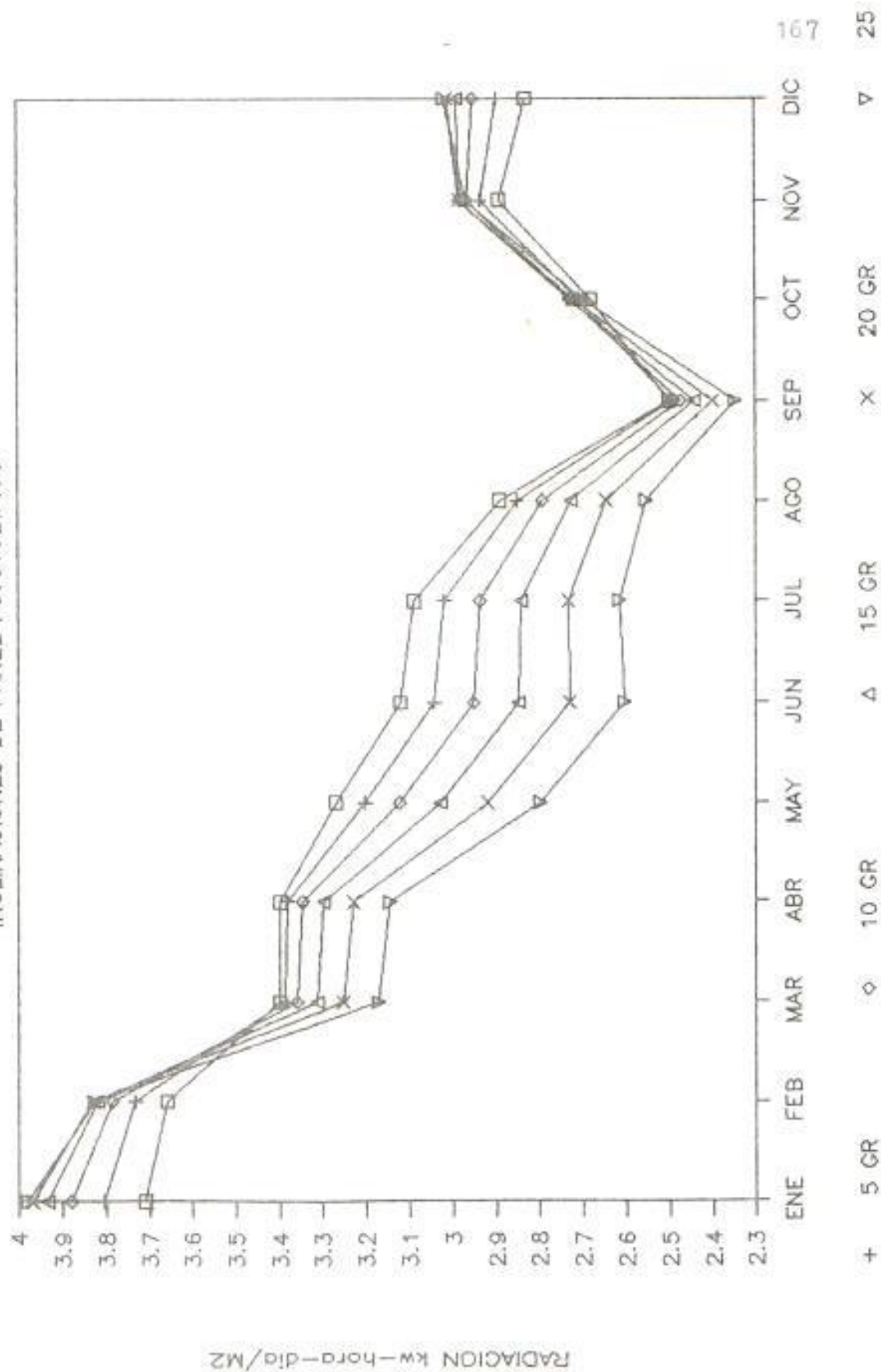
Para favorecer la captación en los meses de invierno el panel se inclinara un ángulo entre  $10^\circ$  y  $25^\circ$  desde los meses de Noviembre hasta Marzo y Abril.

Para favorecer la captación de los meses de verano el panel debere estar entre ángulos de  $0^\circ$  y  $5^\circ$  (desde Abril - Mayo hasta Octubre).



# RADIACION SOLAR PARA DIFERENTES INCLINACIONES DE PANEL FOTOVOLTAICO

FIGURA 3.43



## CAPITULO 4

### 4.0.- METODOLOGIAS DE DIMENSIONADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Y APLICACION A ZONAS RURALES DEL ECUADOR.

#### 4.1.- GENERALIDADES

Dimensionar una instalacion fotovoltaica consiste en determinar el numero de paneles, su inclinacion y el tamaño del sistema de acumulacion para satisfacer la demanda energetica con la mayor fiabilidad y al minimo costo.

Se trata de un problema complejo en el que intervienen datos climatológicos, distribuciones temporales de carga, inclinacion de los módulos, etc.

Para Abordar estos problemas se han encontrado en bibliografias, tres tipos de metodologias diferentes:

Método Simple.

Método de simulacion.

Método estadístico.

Para el método simple se parte de valores medios (anuales o mensuales) de radiación y de consumo, aplicando a continuación uno de los dos criterios siguientes:

a) Criterio de la "media anual": la energía colectada por el panel a lo largo del año debe ser consumida en el mismo periodo, luego se aplica un coeficiente de seguridad al tamaño del panel y se calcula un tamaño de acumulación suficiente para almacenar las deficiencias anuales.

b) Criterio del "mes peor": la energía colectada por el panel en el mes peor debe ser igual a la consumida en el mismo periodo. La acumulación se calcula de modo que proporcione algunos días de seguridad en el suministro.

Por el mes peor se entiende aquel en el que concierne entre la energía consumida y la radiación expresada en horas equivalentes de sol nominal es máxima (generalmente en nuestro litoral, podría ser Diciembre).

Estos métodos sencillos pueden llevarse a cabo a mano, y en general ninguno permite seleccionar el ángulo óptimo de inclinación del panel que deberá ser un dato de partida.

El margen de optimización económica del sistema es reducido, pues solo se puede jugar con el factor de sobredimensionado y el número de días de autonomía.

El otro método de dimensionado, el de simulación consiste en simular el comportamiento de un módulo durante un periodo de tiempo bajo diferentes hipótesis en cuanto a la superficie colectora y al tamaño de la acumulación.

La ventaja más evidente de este método es la de su exactitud, pues reproduce con precisión el comportamiento del sistema partiendo de datos reales de radiación a lo largo de un elevado número de años, sin embargo a mi juicio presenta algunos inconvenientes fundamentalmente por la necesidad de disponer de datos de radiación día a día a lo largo de un periodo muy largo de años (aproximadamente 9 años); teniendo en cuenta que la mayor parte de la información disponible se encuentra ya promediada o globalizada.

Este método no permite tampoco a priori determinar la inclinación óptima del colector, aunque sería posible con ligeras modificaciones.

El otro método de dimensionado es el "Método estadístico": en él se parten de datos estadísticos de la radiación, en cuanto a valores medios y función de la distribución y mediante cálculos iterativos

llegan a determinar la fiabilidad definida a través del concepto de probabilidad de pérdida de carga.

La ventaja de este método consiste en su adaptabilidad a situaciones en las que los datos se encuentran promediados. Su inconveniente es que supone una función de distribución única para cada mes. Sin tener en cuenta las probabilidades condicionales de sucesión de días claros y oscuros

por otra parte los métodos citados anteriormente toman como únicos datos la insolación media anual, el consumo medio anual y supone una distribución gaussiana de la radiación a partir del inicio de su desviación standard, esta última suposición, aunque comúnmente aceptada no es estrictamente cierta, siendo más bien de tipo Poisson, de modo que el máximo de la función densidad de probabilidad se encuentra desplazado del valor medio en los meses de verano, apareciendo máximos en los meses de invierno como lo hemos visto en los gráficos de radiación anterior.

A pesar de todo este el método simple es uno de los más utilizados como forma de rápido dimensionado de sistemas fotovoltaicos, sin embargo en el dimensionado hay que tomar en cuenta que los componentes del sistema cuyo dimensionado correcto va a influir de una manera mayor en la fiabilidad del conjunto, son naturalmente el panel y la bate-

ria, la estimación del tamaño para una fiabilidad fijada por el usuario y un costo es un problema complejo que analizaré en varios pasos.

El método rápido de dimensionado parte siempre de los datos de radiación solar existentes en la zona en la que se va a instalar el sistema, si estos datos no existen o son insuficientes debemos estimarlos a partir de los de zonas de clima, latitud y temperatura similares obteniendo un mapa nacional o continental de radiación. La exactitud del resultado queda por tanto matizada por la calidad de los datos de que se disponen además de las aproximaciones inherentes a un dimensionado simple.

Otro dato imprescindible será el de la carga o el consumo medio que va a tener el usuario al que alimenta el generador fotovoltaico.

Con estos datos, el proceso de dimensionado puede esquematizarse como sigue:

- A. Tensión de funcionamiento.
- B. Carga media diaria del sistema en Amperios - hora.
- C. Media anual del número diario de horas de sol.
- D. Capacidad necesaria del panel en Amperios.
- E. Factor de seguridad.
- F. Número de paneles.

G. Elección del ángulo de inclinación del panel.

recolectada por la célula.

A. Determinación de la tensión de funcionamiento ( $V_n$ ). Los valores más frecuentes son: 12,24, y 48 voltios, pero en cualquier caso varían con las necesidades del usuario.

B. Cálculo de la carga diaria media del sistema en Amperios - Hora. (C). Para ello hay que dividir el consumo medio diario de energía (expresado en WH) por la tensión nominal elegida en el paso anterior.

$$C = \frac{\text{Consumo diario medio en WH}}{V_n}$$

$V_n$

C. Cálculo de la media anual del número diario de horas equivalentes de sol nominal (H). (Se considera a un sol nominal en usos terrestres la radiación con espectro AM 1,5 e intensidad de 1 KWH/M<sup>2</sup> ).

Como una hora de sol nominal da lugar a una energía anual de 365 KWH/M<sup>2</sup>, bastará dividir la radiación anual del lugar expresado en KWH/M<sup>2</sup> para 365 para obtener:

$$H = \frac{\text{Radiación total anual en (KWH)}}{365}$$

365

La radiación total anual son obtenidas a partir de los datos de radiación que se disponen en la zona en estudio o de zonas con iguales condiciones climatológicas.

Si el dato de que se dispone es sobre superficie horizontal habrá que multiplicar por un factor (1.1 o 1.2) para pasar al valor correspondiente a superficie inclinada (que será la posición en la que normalmente se colocará el panel). O se seleccionará directamente el valor sobre superficie inclinada si es que se dispone de él.

D. Calcular la capacidad necesaria del panel. En Amperios, como el cociente entre los resultados anteriores, es decir, entre la carga media diaria (C) y la media anual del número diario de horas equivalentes de sol nominal.

$$I_0 = \frac{C}{H}$$

H

E. Factor de seguridad: Aplicar al anterior resultado un factor de seguridad que tenga en cuenta la pérdida de eficiencia del panel por suciedad y envejecimiento, y por las pérdidas de la batería, su valor típico es 1.2

$$I = I_0 \times 1.2$$

En aquellas instalaciones situadas en zonas especialmente polvorientas y de lluvias poco frecuentes, y que no quedan limpiarse periódicamente, este factor debería ser aumentado.

F. Cálculo del número de módulos necesarios: Para ello bastará en medir la tensión nominal de (3) por la tensión nominal de cada módulo que es un dato suministrado por el fabricante, lo que determinará el número de módulos en serie.



$N$  de módulos en serie =  $\frac{\text{Tension nominal de la carga } V_b}{\text{Tension nominal de cada modulo } V_M}$

Tension nominal de cada modulo  $V_M$

Este valor de modulo en serie será normalmente entero ya que tanto los equipos como los módulos trabajan con tensiones multiples de 12.

Para calcular el número de módulos en paralelos habrá que dividir la corriente obtenida en el apartado (e) por la intensidad nominal de cada modulo en el punto de máxima potencia que también vendrá especificada por el fabricante.

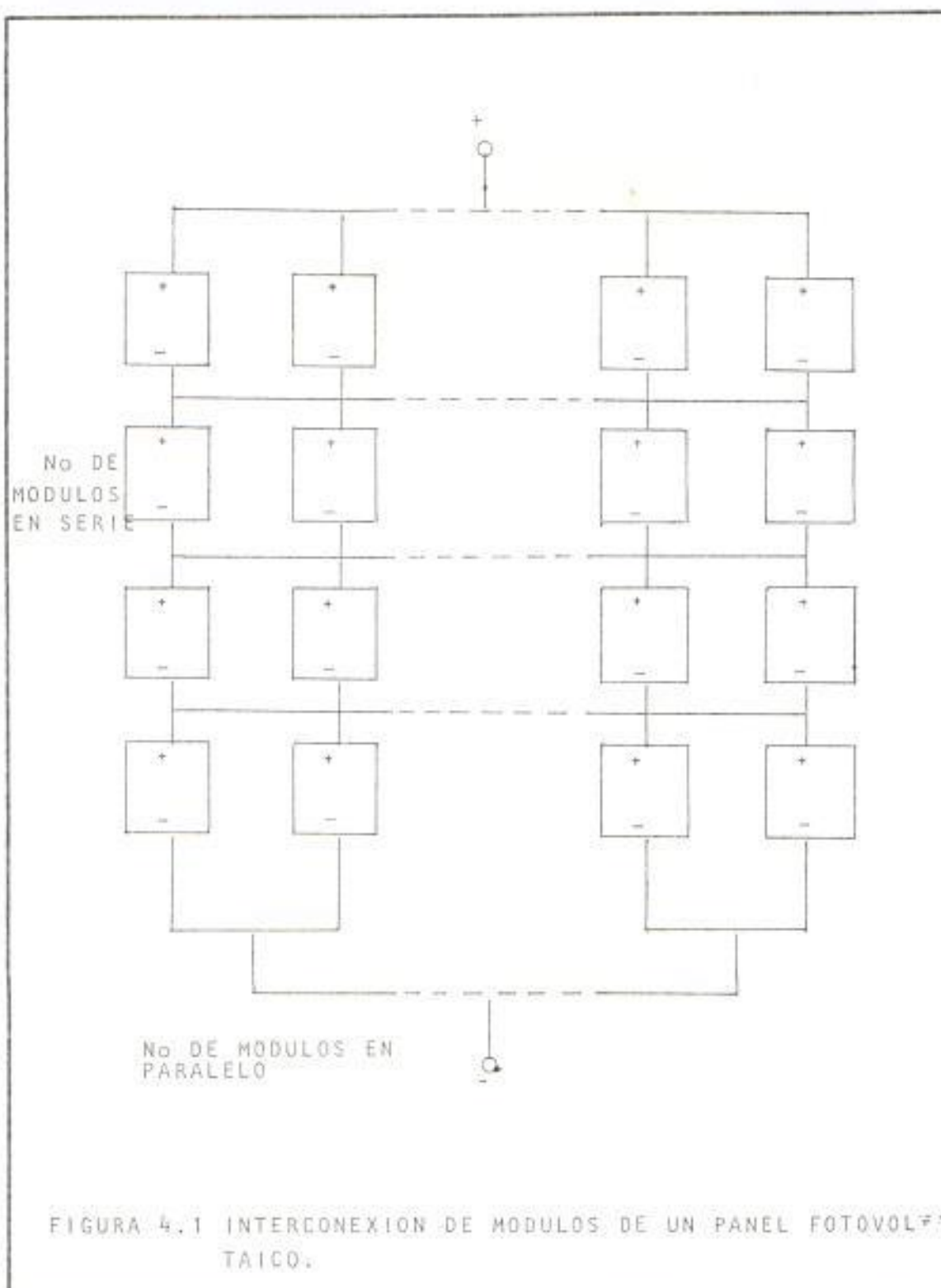
$N_0$  de módulos en paralelo =  $\frac{\text{Corriente total del panel (I)}}{\text{Corriente nominal de cada modulo } I(N)}$

Corriente nominal de cada modulo  $I(N)$

No debe confundirse la corriente nominal de un modulo en el punto de máxima potencia con su corriente de cortocircuito que también suele venir especificada por el fabricante.

El número total de módulos será el producto del número serie por el número paralelo, la disposición eléctrica de los módulos será como la indicada en la figura 4.1, donde se muestra una forma de aumentar la fiabilidad de un gran panel mediante la redundancia en las conexiones exteriores.

G) Elección del ángulo de inclinación. El ángulo óptimo para captar la mayor cantidad posible de energía a lo largo del año coincide con la



latitud del lugar. No obstante en la mayor parte de las aplicaciones se suele tomar un ángulo de inclinación mayor que la latitud en beneficio de una mayor captación durante el invierno, cuando la radiación es menor, a costa de una mejor captación en verano cuando la radiación es máxima.

Para nuestro país podemos considerar favorable los valores de inclinación de panel sugeridos en el capítulo anterior, es decir entre  $0^\circ$  y  $5^\circ$  para los meses desde abril hasta octubre y de  $10^\circ$  y  $25^\circ$  desde noviembre hasta Abril.

H) Determinar el tamaño de la batería en base al número máximo de días con climatología adversa que se esperan y que es función de la latitud y del número diario de horas equivalentes de sol nominal H. La tabla 8 obtenida empíricamente muestra un valor inicial razonable de la capacidad de la batería en función de H.

NUMERO DIARIO DE HORAS (EQUIVALENTES DE SOL NOMINAL)	FACTOR DE DIMENSIONADO DE LA BATERIA.
H	Factor
5	19
4.5	15
4	20

3.5	25
3	30
2.5	40
2	80
-----	

TABLA 3 ESTIMACION EMPIRICA DE LA CAPACIDAD DE LA BATERIA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO EN FUNCION DE LA MEDIA ANUAL DEL NUMERO DIARIO DE HORAS EQUIVALENTE DE SOL NOMINAL.

A la hora de elegir la batería adecuada ha de tenerse en cuenta la capacidad requerida a un régimen de descarga determinado. Normalmente los fabricantes de baterías dan su capacidad referida a un régimen de descarga de 10 horas (C10). En los sistemas fotovoltaicos actuales los regímenes de descarga son muchísimos más lentos y superan fácilmente las 200 horas, siendo frecuente regímenes de 500 horas. Este hecho hace que la capacidad real disponible sea mayor que la nominal C8 o C10. Concretamente, la C500 puede llegar a ser la C8, lo que pone de manifiesto la importancia de este efecto.

La capacidad de la batería en asperímetros (B) será la resultante de multiplicar el factor F de la tabla 3.1 por la carga media diaria calculada en el apartado B.

$$B = F \times C$$

Con este cálculo del tamaño de la batería quedará definido el sistema fotovoltaico y concluido el dimensionado simple propuesto.

Como se puede observar en el cálculo anterior hay 2 factores para cuya determinación se recurre a la experiencia: el ángulo de inclinación del panel y la capacidad de la batería.

El primero de ellos tiene una importancia relativa y la norma expresada de inclinar el panel  $10^\circ$  o  $20^\circ$  por encima de la latitud es válida cuando el consumo es uniforme a lo largo de todo el año. Si esto no es así la inclinación será aquella que favorezca a la captación en los periodos más críticos considerando el consumo y la radiación.

La determinación del tamaño de la batería es por contra esencial para el correcto funcionamiento de la instalación con un costo razonable. La tabla 5.1. es coherente con el cálculo del tamaño del panel indicado en el apartado B. considerando los valores medios anuales del consumo y la radiación.

Para el dimensionado de la batería conviene tener en cuenta además que la profundidad del ciclo diario de descarga que esta puede soportar sin un deterioro grave de su vida no debe superar un 5%. Si todo el consumo de la carga fuera nocturna la limitación mencionada significaría que el tamaño mínimo de la batería para una correcta vida de la misma sería por lo menos equivalente a 20 días de consumo.

El valor correspondiente a esa profundidad máxima de descarga diaria puede variar de una batería a otra y de un fabricante a otro, pero será siempre un dato a tener cuenta en el dimensionado.

Para terminar este apartado referente al dimensionado simple, es necesario recordar las limitaciones del mismo en base a las simplificaciones adaptadas. Para pequeñas instalaciones de pocos paneles este dimensionado puede ser suficiente para realizar la instalación, ya que aunque se tuviera una mayor precisión difícilmente se llegará a alterar el número de paneles a utilizar, sin embargo para grandes sistemas el calcular en forma precisa cada uno de los elementos puede conducir a importantes ahorros.

#### 4.2 PROGRAMA DE LINEAS Y REDES PARA ZONAS RURALES DEL LITORAL ECUATORIANO:

A la presente fecha el suministro de energía eléctrica en el Ecuador lo prestan 63 entidades de las cuales 17 son empresas eléctricas, en donde en 16 de ellas INECEL (Instituto Ecuatoriano de Electrificación) es el mayor accionista.

Para la generación y transmisión de la energía eléctrica INECEL ha planificado la conformación del sistema eléctrico interconectado con las líneas de alta tensión que es alimentado desde centrales eléctricas fundamentalmente de origen Hidráulico. Los principales elementos

de este sistema nacional interconectado (SNI) están en servicio desde 1984).

De este sistema interconectado se entrega (a parte) y se entregará energía en bloque a las diferentes regiones del país, puesto que de este sistema se encuentra ya gran parte en operación y parte en construcción, por consiguiente las centrales eléctricas que existen en la actualidad, y las que se terminen en el futuro se interconectarán al sistema durante el transcurso de ejecución del plan maestro. De igual modo lo harán las líneas de menos voltaje que en forma radial transportarán energía a todo el país.

En lo que respecta a la zona del litoral las entidades que tienen a cargo la electrificación son las siguientes en orden de provincia.

#### PROVINCIA DE ESMERALDAS:

La Empresa Eléctrica de Esmeraldas S.A. que sirve al cantón Esmeraldas, Al cantón Quilinde y a las ciudades de Limónes y San Lorenzo.

El Municipio de Esmeraldas suministra el servicio a las parroquias Rio verde, Montalvo y Rocafuerte.

El Municipio de Nuisne que sirve a la ciudad de Nuisne.

#### PROVINCIA DE MANABÍ:

El Sistema Eléctrico Regional de Manabí sirve a la provincia de Manabí con excepción del cantón El Carmen y la parroquia Pichincha que están fuera de su cobertura.

#### PROVINCIAS DEL GUAYAS - LOS RIOS:

El Sistema Regional Guayas - los Rios comprende las provincias del Guayas, Los Rios, la parroquia Pichincha en la provincia de Manabí, la parroquia Mana en la provincia del Cotopaxi, el sector sur occidental de la provincia del Pichincha, la parte litoral de la provincia del Azuay, Cañar y Chimborazo y exceptuando las parroquias Balao y Tenquí de las provincias del Guayas.

Al momento este sistema regional se encuentra servido por las empresas eléctricas:

Empresa eléctrica del Ecuador, que sirve a la ciudad de Guayaquil;  
 Jefatura regional Ineeel- Guayaquil, que sirve a los cantones Daule, Balzar, Urbinajato, El Empalme; A las Parroquias Eloy Alfaro, Puna, Tenquí y Balao de la provincia del Guayas, Al cantón Quevedo de la provincia de los Rios, y al sector sur occidental de la provincia del Pichincha.

La Empresa Eléctrica Península de Santa Elena que sirve a los cantones Salinas y Santa Elena además de las parroquias General Villamil, El Morro, Posorja y Progreso.



La Empresa Eléctrica Milagro que sirve a los cantones: Milagro, Yaguachi, Naranjito, Naranjal, además de la parte litoral de la provincia del Azuay.

La Empresa Eléctrica Los Ríos S.A. que tiene su área de concesión en los cantones Babahoyo, Urdaneta, Pueblo Viejo, Esba, Vinces y Ventanas de la provincia de los Ríos además de la parroquia Paquerito Moreno (Jujan) y la localidad de tres postes en la provincia del Guayas; y el municipio de Calceta que sirve a la parroquia Pichincha de la provincia de Manabí.

#### PROVINCIA EL ORO:

El Sistema Regional del Oro comprende La provincia El Oro, La parroquia Bailao y Tenquei de la provincia del Guayas y la parroquia Ponce Enriquez de la provincia del Azuay.

El sistema se encuentra servido por:

La Empresa Eléctrica El Oro S.A. que sirve a los cantones Machala, El Guabo, Pasaje, Santa Rosa, AREMILLAS, Husquillas y Zaruma, Y a la parroquia Ponce Enriquez de la Provincia del Azuay. La Jefatura regional de Inceel Guayaquil que suministra el servicio a las parroquias de Tenquei y Bailao; y el municipio de Piñas que sirve al cantón Piñas.

Todos estos sistemas regionales a su vez se interconectarán al Plan Maestro Nacional, del cual podemos ver sus rasgos generales en el gráfico 4.2 donde se pueden apreciar las líneas de alta tensión existentes y programadas.

Si bien este plan maestro constituye un buen punto de apoyo para el tendido de líneas secundarias hacia diferentes partes del país, es necesario recalcar que como estas, están encargadas a diferentes entidades eléctricas, en colaboración con municipios y consejos provinciales. El plan de Electrificación rural elaborado por Inecel no tendrá una marcha normal en su cumplimiento y por ende tardará un tiempo considerable en obtener energía eléctrica aquellos sectores del País alejados de medianos sectores habitacionales, y peor aun sectores impenetrables como zonas montañosas en la sierra y oriente, así como cercanas a la playa y poblaciones lejanas a cantones en el litoral.

Quedándole a estos sectores no alimentados suplir esta necesidad por otra alternativa que satisfaga sus necesidades prioritarias de energía tal como, luz por las noches, calentadores de agua refrigeración, etc.

Por ello considero que estas serian zonas donde a mediano plazo se justifica con su debido estudio, inversiones que provean de esta energía y que podrían ser menos costosas que un tendido de línea y

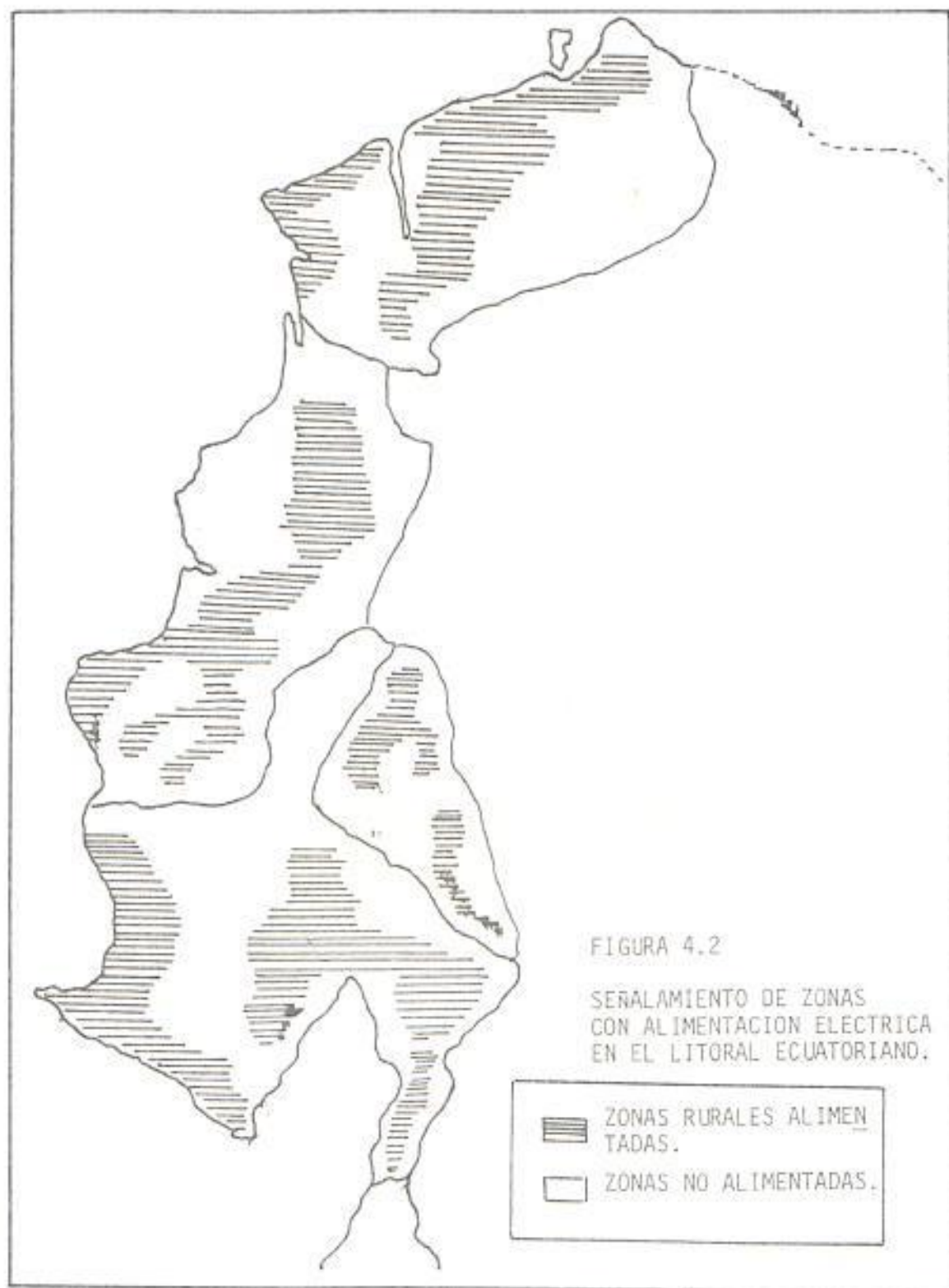




FIGURA 4.2

SERALAMIENTO DE ZONAS  
CON ALIMENTACION ELECTRICA  
EN EL LITORAL ECUATORIANO.

-  ZONAS RURALES ALIMENTADAS.
-  ZONAS NO ALIMENTADAS.

que podrían introducir la pauta de la CONVERSION FOTOVOLTAICA en la obtencion de energia electrica.

#### 4.2.1 SENALAMIENTO DE ZONAS NO ALIMENTADAS Y CONSIDERADAS PARA EL ESTUDIO:

Revisando el plan maestro de electrificación y considerando los programas de electrificación de los diferentes sistemas regionales eléctricos del litoral en el gráfico 4.2 señalo cuales serian aproximadamente zonas no alimentadas y que podríamos considerar para efectos de estudio de utilización de conversión fotovoltaica en esas zonas con el correspondiente conocimiento de los valores de radiación solar global diaria para el correspondiente modelo a diseñar.

#### 4.3.- SELECCION DE NUMERO DE PANELES EN BASE A NECESIDADES:

Para efectos de ejemplo de algunos dimensionados fotovoltaicos en zonas rurales o viviendas aisladas donde el consumo de energía suele ser menos, he considerado tres casos particulares.

- a) Viviendas de bajo consumo utilizadas en fines de semana.
- b) Viviendas de medio consumo, utilizadas en fines de semana y un mes de vacaciones.
- c) Viviendas de uso permanente.

Sin embargo creo necesario cierta información de interés en cuanto a cargas de estos usuarios domésticos.

REFRIGERADORES. La potencia pico generada por refrigeradores disponibles comercialmente es graficada en la figura 4.3, el aislamiento juega un papel muy importante en la reducción del consumo de potencia.

El Duty-cycle (ciclo de servicio) depende de:

Temperaturas del aire ambiente

Temperatura interna colocada por el termostato.

Frecuencia de abrir la puerta del refrigerador.

Los refrigeradores comunes comercialmente disponibles tienen motores AC. Los cuales pueden requerir un inversor para ser alimentados por un sistema fotovoltaico, sin embargo unidades especiales comercialmente ya se encuentran disponibles (todavía no en nuestro País) y que son alimentadas por voltaje DC a 12 o 24 voltios. ellos generalmente tienen muy baja eficiencia.

TELEVISORES: La figura 4.4 muestra la potencia nominal de un televisor comercial blanco y negro o a color graficada versus el ancho de la pantalla, como puede verse la potencia disipada por una alimentación DC es menor que la realizada por una alimentación AC (cerca de la mitad). La eficiencia del transformador (rectificador) regulador se vuelve baja, por esta razón el uso de televisores con alimentación fotovoltaica DC es grandemente recomendable.

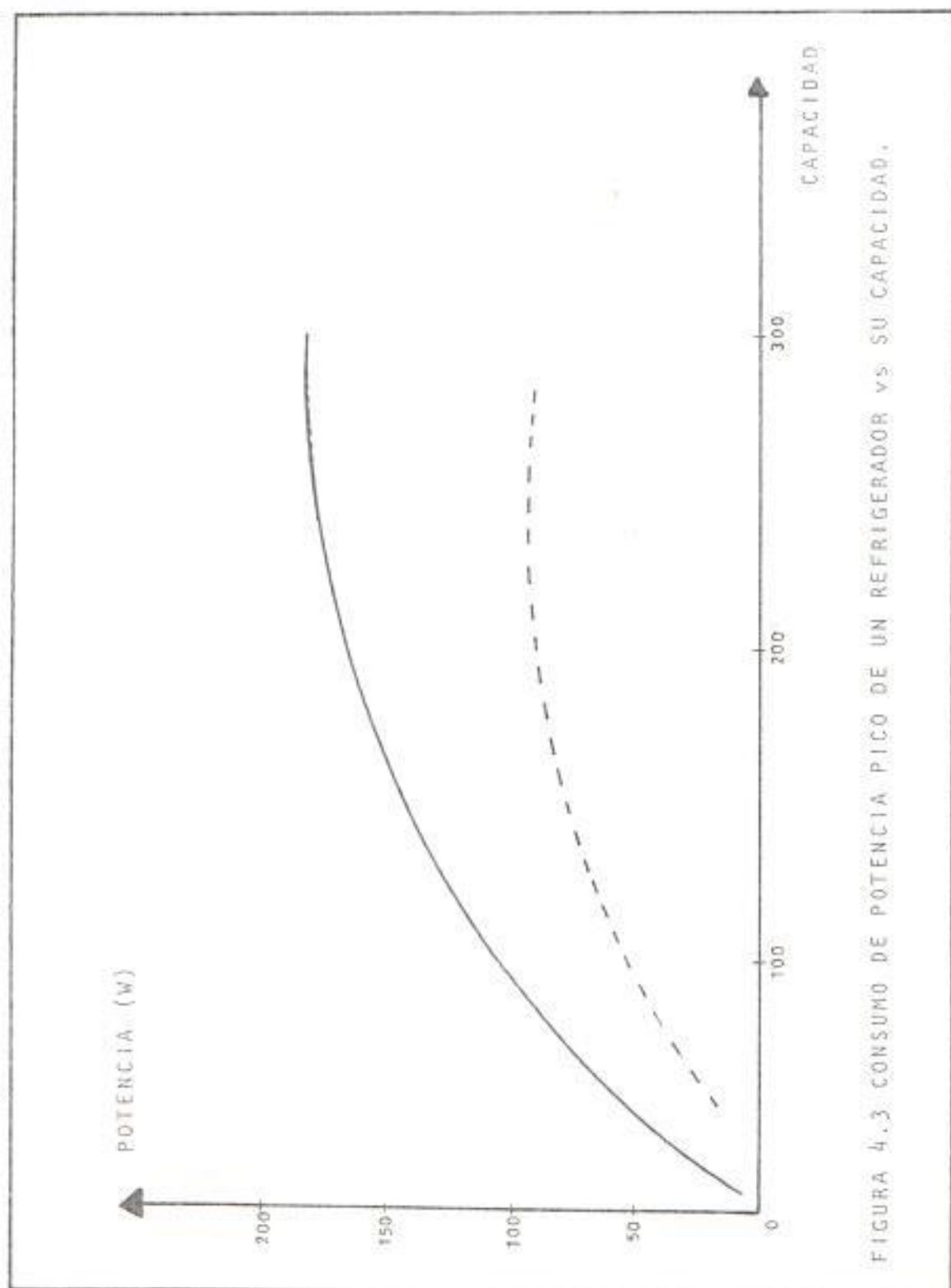
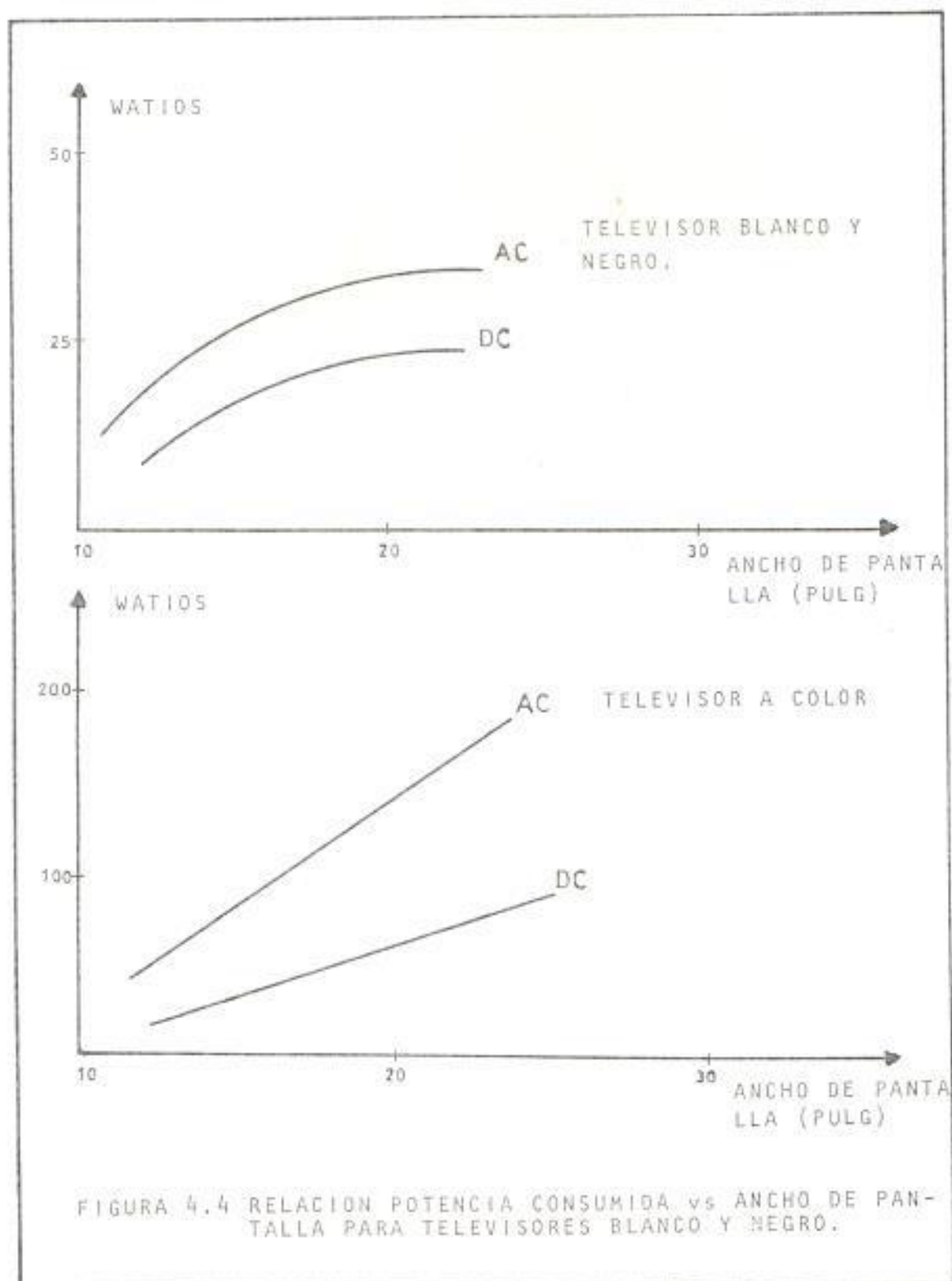


FIGURA 4.3 CONSUMO DE POTENCIA PICO DE UN REFRIGERADOR VS SU CAPACIDAD.



ALUMBRADO. Lámparas incandescentes tienen una baja eficiencia óptica; mientras que la eficiencia de las lámparas de Neón (fluorescentes) es completamente mayor.

Así una lámpara de Neón de 30 vatios tiene una misma salida de luz que una luz incandescente de 100 vatios.

Para un grupo de casas o para pequeñas villas otros servicios requerirían ser posibles, tales como radios, máquinas de moler, máquinas lavadoras de ropa, etc. sin embargo en algunos casos como el de la lavadora funcionan con motores de corriente alterna AC, razón por la cual requerirán de un inversor para trabajar con suministro eléctrico fotovoltaico.

Este sistema se encuentra ya parte en operación y parte en construcción, por consiguiente las centrales eléctricas que existen en la actualidad, y las que se terminen en el futuro se interconectarán al sistema durante el transcurso de ejecución del plan maestro, de igual modo lo harán las líneas de menor voltaje que en forma radial transportarán energía a todo el país.

En lo que respecta a la zona del litoral las entidades que tienen a cargo la electrificación son las siguientes en orden de provincia.



#### 4.3.1 ALGUNAS APLICACIONES EN BASE A NECESIDADES DE KILOWATIOS INVESTIGADAS EN ZONAS RURALES (CONSUMOS DIARIOS MEDIOS).

En base a la clasificación de viviendas rurales indicadas anteriormente podemos establecer 3 aplicaciones de dimensionado.

##### VIVIENDAS DE BAJO CONSUMO UTILIZADAS EN FINES DE SEMANA.

Se acepta una situación de mínima consumo y mínima utilización, los puntos de consumo son 5 puntos de luz y un receptor de tv con el siguiente perfil de consumo.

Luz Comedor.....	30W	-----3h/dia	-----90 wh/dia
Luz cocinas.....	20W	-----2h/dia	-----40 wh/dia
Luz 2 dormitorios.....	30W(2)	-----0.5h/dia	-----30 wh/dia
tv.....	18W	-----2h/dia	-----36 wh/dia

La potencia de consumo es 120 Wátios y el consumo diario es 196 wh/día, el consumo semanal (2 días) es de 392 wh/día y el anual es de 13.3 Kwh (34 semanas sin 18 semanas correspondientes a 3 meses fríos en el año). El número de horas teóricas que se utilizarán los 120 Wátios instalados son:

al día.....	196/120.....	1.63 horas
A la semana.....	392/120.....	3.26 horas
Al año.....	13300/120.....	110.83 horas

A). Tensión de funcionamiento ( $V_n$ ). escogemos el voltaje de 12 voltios que es lo más usual en paneles fotovoltaicos.

B). Carga media diaria del sistema en Amperios-hora (C).

$$C = \frac{\text{Consumo diario medio}}{V_n} = \frac{196 \text{ Wh}}{12V} = 16 \text{ Amp-Hora}$$

C). Numero diario de horas equivalente de sol nominal. (H). Escogiendo una radiación solar total anual (la del año 1983 por ejemplo) con aproximadamente 330821 Btu-día/pie<sup>2</sup>, lo cual equivale a 1043,07 Kwh/m<sup>2</sup>.

$$H = \frac{\text{Radiación total anual (KWh/día)}}{365} = \frac{1043,07}{365} = 2,857 \text{ horas}$$

$$= 3 \text{ horas}$$

D). Capacidad necesaria del panel en Amperios (I):

$$I_0 = \frac{C}{H} = \frac{16 \text{ amp-hora}}{3 \text{ horas}} = 5,33 \text{ amperios}$$

E). Factor de seguridad por efectos de perdidas de eficiencia del panel.

$$I = I_0 \times 1,2 = 5,33 \times 1,2 = 6,4 = 7 \text{ amperios.}$$

F). Numero de módulos:

$$N \text{ de módulos en serie} = \frac{\text{Tensión nominal de carga}}{\text{Tensión nominal de c/nodulo}}$$

$$= \frac{12 \text{ volt carga}}{12 \text{ volt panel}} = 1 \text{ panel}$$

$$12 \text{ volt panel}$$

$$N \text{ modulos en paralelo} = \frac{\text{Corriente necesaria del panel}}{\text{Corriente nominal del modulo}}$$

$$\text{Corriente nominal del modulo}$$

$$= \frac{7}{2} = 3,5 = 4 \text{ paneles}$$

$$2$$

$$N \text{ total de paneles} = N \text{ paneles en serie} \times N \text{ paneles en paralelo}$$

$$= 4 \times 1$$

$$= 4 \text{ paneles (12 voltios 24 watos)}$$

G). Elección de ángulo de inclinación. Según el estudio realizado en el capítulo anterior podemos indicar que las inclinaciones adecuadas del panel son de 0° y 5° en los meses de Abril hasta Octubre y de 10° y 25° desde Noviembre hasta Abril.

H). Determinación del tamaño de la batería. En base al cuadro de la tabla 7 y teniendo como datos el número de horas diarias de sol nominal  $H$  horas obtenemos un factor de dimensionado de la batería ( $F$ ) de:

$$\text{para } H = 3 \text{ ----- } F = 30$$

La capacidad de la batería en Amperios - Hora ( $B$ ) será la resultante de multiplicar el factor  $F$  por la carga media diaria calculada en B.

$$B = F \times C = 30 \times 16 \text{ amperios - hora} = 480 \text{ amp-hora.}$$

Con este cálculo queda definido el sistema fotovoltaico y concluido el dimensionado simple propuesto.

Ver diagrama de conexiones figura 4.5

Para efectos comparativos a continuación el diseño de una vivienda con el mismo consumo diario que el caso anterior, es decir:

Luz comedor.....	20w	-----3h/día	-----90wh/día
Luz cocina.....	20W	-----2h/día	-----40wh/día
Luz dormitorio...	30w	-----0.5h/día	-----30wh/día
Tv.....	10w	-----2h/día	-----16wh/día

Es decir igual potencia de consumo 120 vatios y el consumo diario 196 wh/día.

Sin embargo su uso será continuo, es decir el mismo consumo diario todos los días del año.

Debido a que existe el mismo consumo diario, todos los valores encontrados para el caso anterior son iguales para esta estación, es decir, se necesitarán ribeizmente 4 paneles para el diseño, así como baterías de 480 Amp- hora, sin embargo debido a que se tendrá un consumo de carga mas frecuente según se muestra en el gráfico 4.6.

El proceso de descarga de los acumuladores es más continuo en el segundo caso que en el primero y a pesar de tener días de

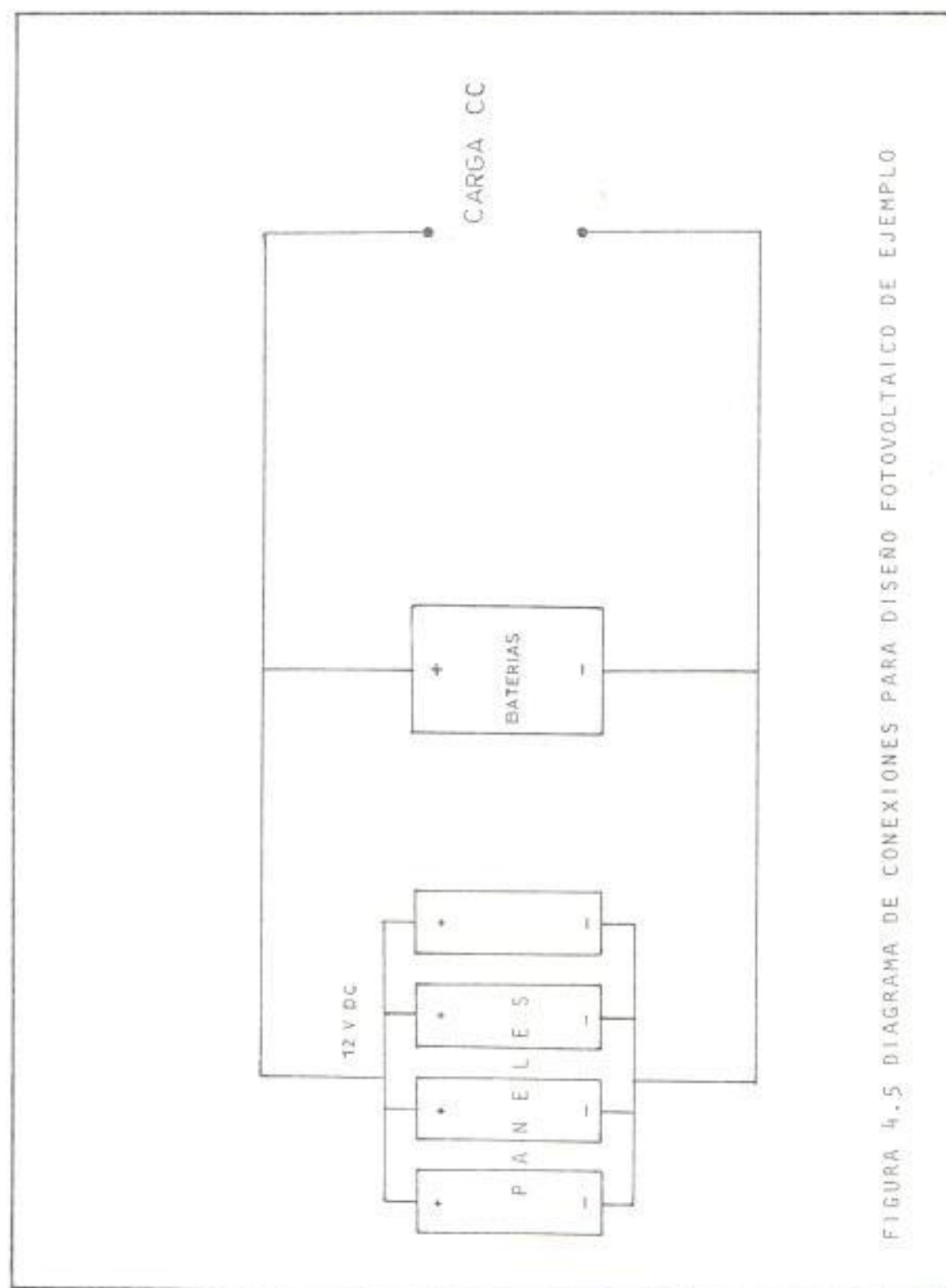


FIGURA 4.5 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA DISEÑO FOTOVOLTAICO DE EJEMPLO

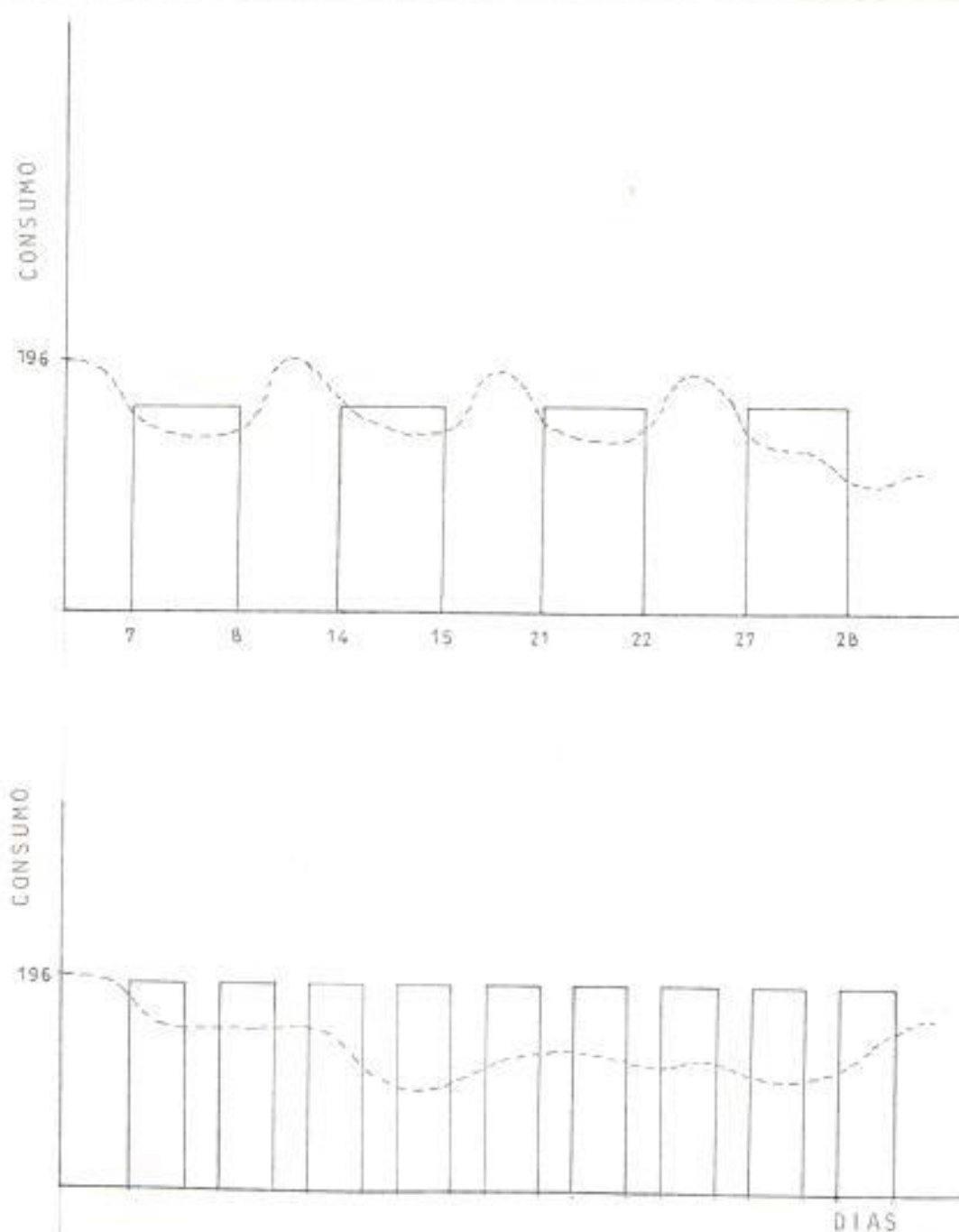


FIGURA 4.6 RELACION DE CURVAS DE CONSUMO EQUIVALENTES DE UN ACUMULADOR PARA UN MISMO CONSUMO DIARIO PERO USO NO FRECUENTE (ARRIBA) Y FRECUENTE (A BAJO)

autonomía, estas se agotarán más rápidamente, razón por la cual las soluciones serán:

1). Aumentar el número de baterías ( hasta obtener una curva de carga mas o menos estable obteniéndolo experimentalmente) conectándolos en paralelo.

2). Aumentando la capacidad del panel fotovoltaico, puesto que a mayor potencia del panel, menor número de días invierte el acumulador en adquirir su plena carga.

Sin embargo cuando la necesidad de aumentar acumulación se produce sin variar la potencia del panel es comparativamente mas importante que la propia disminución de la potencia del panel hasta el punto de que el costo del conjunto generador aumenta a medida que disminuye el número de paneles, como se muestra en la figura 4.7, donde se representa la evolución del costo relativo de la acumulación, panel y del generador en función del número de días de autonomía del acumulador 100% cargado.

2).- UTILIZACION DE VIVIENDA PERMANENTE:

#### Consumos

4 dormitorios.....40V(4)-----2h/día-----120 wh

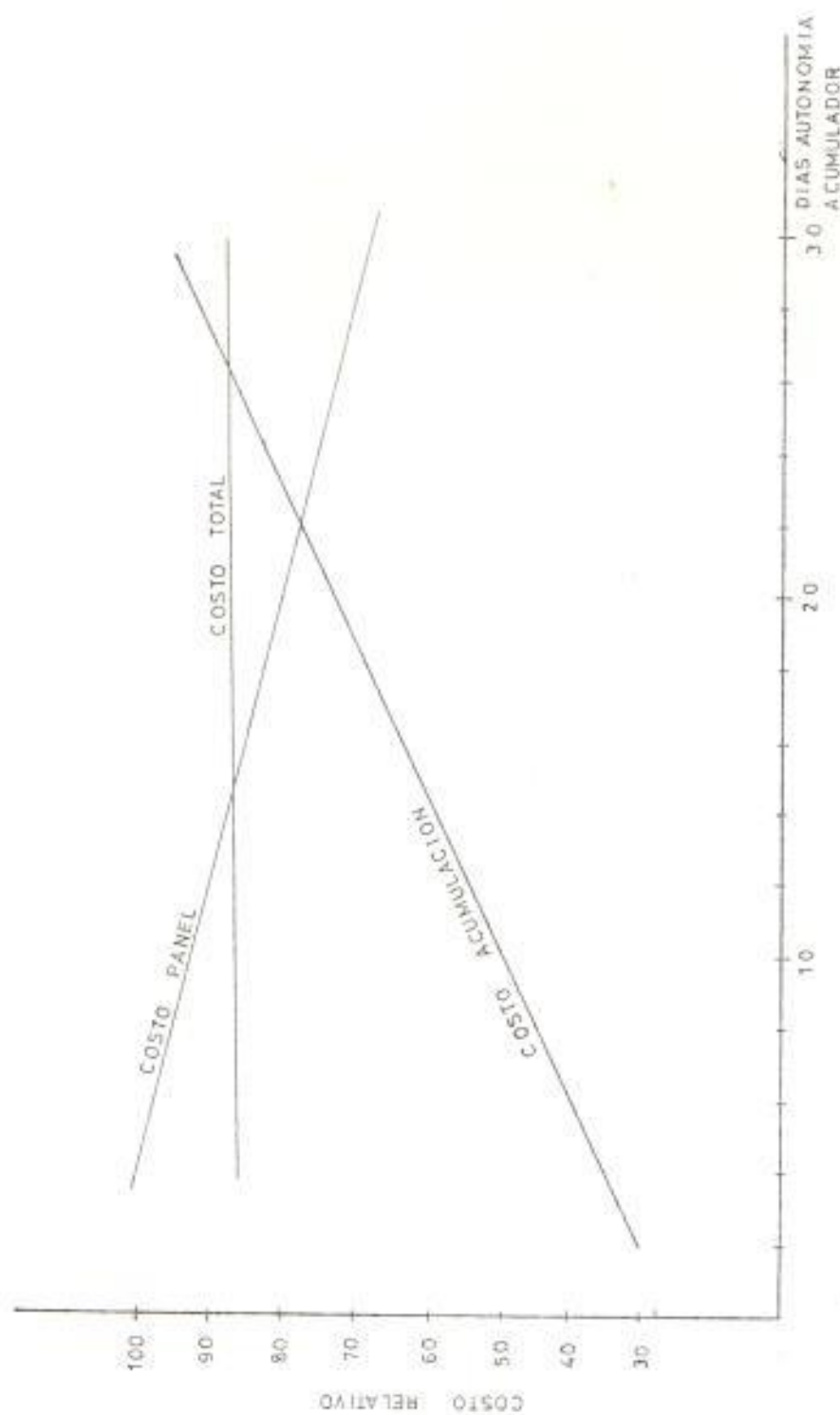


FIGURA 4.7 EVOLUCION DEL COSTO RELATIVO DE LA ACUMBLACION PANEL FOTOVOLTAICO Y GENERADOR TOTAL EN FUNCION DEL NUMERO DE DIAS DE AUTONOMIA.



l. Baño.....	40w	-----0.5h/día-----	20 wh
comedor.....	40w	-----0.5h/día-----	20 wh
cocina.....	40w	-----1h/día-----	40 wh
TV.....	25w	-----2h/día-----	36 wh
Radio cassette.....	10w	-----1h/día-----	10 wh
Maq afeitar.....	12w	-----0.2h/día-----	2.4 wh
batidora.....	180w	-----0.2h/día-----	3.6 wh
Frigorifico.....	150w	-----5h/día-----	750 wh
Plancha electrica, 1000w		-----0.14h/día-----	140 wh

La potencia de consumo es 1532 W y el consumo diario es 1374 Wh/día.

A). Tensión de funcionamiento. (Vn) 12 voltios.

B). Carga media del sistema (C).

$$C = \frac{\text{consumo diario medio}}{V_n} = \frac{1374}{12} = 129 \text{ Ah}$$

C). Nro diario de horas equivalente. Considerando la misma radiación global total.

$$H = \frac{\text{radiación total anual (Kwh/M}^2)}{365} = \frac{1043.07}{365} = 2.85 \text{ horas} \\ = 3 \text{ horas}$$

D). Capacidad necesaria del panel en Amperios

$$I_0 = C = \frac{129 \text{ amp. hora}}{H} = 43 \text{ amp}$$

E) Factor de seguridad.

$$I = I_0 \times 1.2 = 51.6 = 52 \text{ amperios}$$

F) Número de módulos.

$$\text{Nro de módulos en serie} = \frac{12 \text{ voltios}}{V_0} = 1$$

$V_0$

$$\text{Nro de módulos en paralelo} = \frac{\text{Corriente necesaria en el panel}}{\text{Corriente del módulo}}$$

$$= \frac{52}{2} = 26 \text{ paneles}$$

$Z$

$$\text{Nro total de paneles} = 26 \times 1 = 26 \text{ paneles (24W 12V)}.$$

G) Idem caso anterior.

H) Capacidad de la batería.

$$B = F \times C = 30 \times 129 = 3870 \text{ amp-hora}$$

I) reguladores e inversoras.

## CAPITULO 5.

## 5.0.- ANALISIS DEL COSTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

El presente capítulo se trata de estudiar el costo de un sistema fotovoltaico utilizando conceptos microeconomicos de costos y de ahorros en el ciclo de vida del sistema.

Si bien un sistema fotovoltaico puede tener un costo inicial superior al de otras alternativas, puede resultar ventajoso pues no requiere combustibles y sus gastos de mantenimiento son menores.

## 5.1.- ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL ANALISIS DE COSTOS Y RENTABILIDAD.

Si queremos analizar la viabilidad de un sistema fotovoltaico que opcionalmente puede llevar incorporado un generador de emergencia se debe tener en cuenta los siguientes datos.

1. Vida del sistema y periodo de estudio. -

Un análisis de costos de ciclo de vida de un sistema requiere conocer la duración de cada elemento que interviene en el mismo.

En el caso fotovoltaico el problema se complica debido a que la mayoría de los generadores llevan relativamente poco tiempo instalados y a que la vida estimada de la batería depende en gran medida del uso al que se le haya visto sometida, normalmente se acudiría a informaciones facilitadas por el fabricante, siendo práctica común considerar la vida de un panel 20 años y la de la batería entre 5 y 10 (baterías fotovoltaicas), pero entre 1 y 3 para baterías normales de plomo-ácido validas también para un esquema de acumulación fotovoltaica.

Debemos fijar asimismo, el periodo para el cual vamos a hacer el estudio, que no debe exceder la vida del sistema al que aporta energía.

Debe tenerse en cuenta el valor residual de los elementos del sistema al finalizar el periodo de estudio o en el momento de ser substituído.

### 2.-Costos iniciales o de primera inversión.-

Incluye los siguientes conceptos:

- Costo de los materiales.
- Costo de diseño e ingeniería.
- Costo de instalación.
- Costo del terreno, obras de preparación (nivelado, fallado, etc).

### 3.-Costo de operación, mantenimiento y sustituciones.-

Incluye los costos por sustitución de baterías y combustible en el caso de tener un generador de emergencia.

#### 4.- Inflación y tasa de interés.

Para este caso podemos seguir 2 caminos para tratar de la inflación:

-Suponer que todos los gastos permanecen constantes en términos de suces con respecto al año base debido a que los aumentos son consecuencia de la inflación, y por lo tanto, y por lo tanto no tomarla en cuenta.

Incluir la inflación en la tasa de descuento, de manera que tengamos:

$$(1+d) = (1+i) \times (1+f)$$

Donde: d =Tasa de descuento.

i =Tasa real de interés

f =inflación

Note se que la tasa real de interés solo refleja el poder adquisitivo del dinero, pero no tiene en cuenta la inflación cuando ya estamos trabajando en términos de dinero constante.

#### 5. Créditos, subvenciones, seguros, etc.

Los cuales podrían ser aplicables a algunos de los componentes del sistema.

## 5.2.- CRITERIOS ECONOMICOS PARA DETERMINAR LA RENTABILIDAD DE UNA ALTERNATIVA ENERGETICA.

Como se comenta anteriormente, a la hora de analizar la rentabilidad de un sistema con una fuerte inversión inicial y unos mínimos gastos posteriores, utilizaremos los criterios de estudiar el costo a lo largo del ciclo de vida, sin embargo para analizar la competitividad que ofrece el suministro fotovoltaico frente al convencional por red, se han introducido dos conceptos fundamentales: rentabilidad y economía.

El primero compara los costos por unidad de producto (costo del kWh suministrado). El segundo compara los costos globales (los que se generan a lo largo de la vida de la instalación), independientemente del número de kWh producidos.

Estos conceptos son una consecuencia de las siguientes consideraciones:

1). En el suministro por red se realiza una inversión inicial (el costo de contratación) y cada año se paga una factura (podemos considerar para el efecto que se paga una al año).

2). En el suministro fotovoltaico se realiza una inversión inicial y al cabo de unos años se deben realizar unos gastos de reposición

(debido a que la vida de las baterías es inferior a la considerada de la instalación).

La primera comparación determina cuál de los dos sistemas es más rentable y con la segunda cuál es el más económico. Obviamente ambos conceptos coinciden si las prestaciones energéticas proporcionadas coinciden. El análisis de la competitividad se lo realiza de esta forma porque en la mayoría de los casos una instalación de una vivienda puede no ser rentable, pero interesar al cliente por cuanto a costa de unas ciertas restricciones, le resulta más económica.

En efecto, el concepto de rentabilidad de un producto (el kWh) es el que debe tener presente una empresa, pero el concepto de economía es el que interesa a la postre al usuario de una vivienda.

A) Se define como costo de kWh:

$$C(\text{kWh}) = \frac{B \cdot E}{n \cdot \text{kWh año}}$$

siendo:

B = cuota de amortización anual de la instalación a sueros constantes debido a que se tiene en cuenta la inflación). Puede obtenerse de la siguiente ecuación.

$$B = I \cdot \frac{(1+r)^n}{(1+p)(1+r)^{n-1} + \dots + (1+p)^{n-2}(1+r) + (1+p)^{n-1}}$$

con:

$n$  = años de amortización de la instalación

$r$  = rédito bancario

$p$  = índice general de inflación

$I$  = inversión (en el caso de suministro por red este es el costo de contratación).

$E$  = costo anual por mantenimiento (a sures constantes). En el caso de suministro por red, el valor de  $E$  se transforma en la factura anual.

B). Se define como costo global de la instalación:

$$CG = I_i + CAR + CAE$$

siendo:

$CAR$  = sumatorio de los costos actualizados de reposición (en concepto de baterías para el caso de suministro fotovoltaico).

$CAE$  = sumatorio de los costos actualizados de mantenimiento.

El concepto de rentabilidad compara los costos de KWh de ambos suministros y el de economía los costos globales respectivos.

Para una vivienda dada se conocerán perfectamente los costos para el suministro fotovoltaico; por el contrario, para el suministro por red será función del costo de contratación, ya que este depende muchos factores ya que podría ser el caso de una vivienda aislada donde se tendrá que tener en cuenta dentro de este rubro el tendido de líneas



en esta área de la vivienda, por consiguiente estos resultados de competitividad se ofrecerán en función de este costo de contratación, es decir, para caso se definirá el costo de contratación mínimo a partir del cual para una vivienda dada sería rentable o económico instalar un suministro fotovoltaico, así, si frente a un caso concreto la compañía suministradora exige un costo de contratación superior al establecido, el sistema fotovoltaico es competitivo.

### 5.3.- ANALISIS PROSPECTIVO PARA LA PRODUCCION DE ENERGIA FOTOVOLTAICA (RECALCAR USOS A CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO) E IMPORTANCIA FUTURA COMO ALTERNATIVA DE ELECTRIFICACION PRIMARIA:

El planteamiento básico de este análisis tiende a superar el enfoque con que se han venido abordando los análisis sobre los posibles usos de la energía solar, y en especial los basados en la conversión fotovoltaica, y que consiste en proponer aplicaciones para las que la energía solar fotovoltaica es especialmente idónea; no entrar en los condicionantes que frenan su desarrollo y concluir que en un determinado horizonte podrían o deberían alimentarse con energía solar fotovoltaica una determinada serie de equipos y/viviendas cuya gran difusión generaría un enorme mercado.

Aun estando convencidos de que la difusión masiva de la energía solar fotovoltaica se va a producir dentro de la presente generación y probablemente antes de fin de siglo, se calcula que teniendo en cuen-

ta que que la producción de la energía solar va a tropezar a corto y mediano plazo con grandes resistencias, no solo achacables a maniobras o actitudes pendientes a defender el desarrollo de otras fuentes de energía, sino también debidas simplemente a la inercia que frena cualquier cambio tecnológico radical, que hace que frecuentemente la lógica de muchos planteamientos técnicos y económicos irreprochables quede superada por la realidad de unas estructuras y hábitos de evaluación y decisión resistentes a la innovación, temerosos de los riesgos que esta lleva siempre consigo.

Con este criterio se tratará el sector de la energía solar fotovoltaica como se analiza cualquier otro sector industrial, aunque teniendo presentes, claro está sus características fuertemente diferenciadoras.

Se considera que con estos criterios realistas, los análisis ganan validez, llegando incluso a ofrecer un claro interés para orientar las políticas de producción y comercialización de las entidades actuales o potencialmente introducidas en el sector.

Como bases de partida se utilizan las consideraciones siguientes comúnmente aceptadas.

a) La energía solar fotovoltaica tiene respecto a otras fuentes de energía, ciertas características específicas que la hacen idónea para

una multiplicidad de usos en puntos aislados: en particular para instalar unidades de instalación eléctrica de potencia tan pequeña como se quiera, sin que ello, implique un aumento exponencial de los costos unitarios, y además estas unidades pueden funcionar en cualquier lugar con relativa independencia de las condiciones geográficas e incluso climáticas, y por tanto con un elevadísimo grado de autonomía.

b) La energía solar fotovoltaica está experimentando en la actualidad un rápido proceso de reducción de costos que se traduce en una paralela ampliación de los campos de aplicación en los que su uso resulta competitivo respecto a otras fuentes de energía. Los límites que se contemplan actualmente en el proceso de abaratamiento, deben permitir que antes de final de siglo, el costo de producción de energía eléctrica de origen fotovoltaico sea inferior al de las restantes fuentes de energía.

c) Una buena parte de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica de mayor interés a corto plazo está dentro de la esfera de gestión del sector público. En este sentido, la actitud responsable que cabe esperar de la administración en cuanto al fomento y promoción de las fuentes de energía alternativas facilitará y acelerará la difusión y desarrollo de la energía solar fotovoltaica.

Estas condiciones han conducido al establecimiento de la estructura general de estudio articulada en tres etapas bien diferenciadas, que corresponden a otros tantos momentos caracterizados por situaciones diferentes en el proceso de reducción de costos y en el tipo de mercado asequible a la energía solar fotovoltaica. Estas etapas son las siguientes:

#### ETAPA 1980 \_ 1985.

Se caracteriza por:

- Costos elevados de la energía solar fotovoltaica, en general mas de 10 dólares por vatio solar instalado.
- Aplicaciones limitadas a la alimentación de instalaciones aisladas y que precisen pequeñas potencias, menos de 1-kw.
- Necesidad de intervención decidida del sector público para facilitar el desarrollo tecnológico y poner las bases de la futura industria fotovoltaica.

#### ETAPA 1985 \_ 1995

Se caracteriza por:

- Costos de la energía solar fotovoltaica bastante mas reducidos, pero aun excesivamente elevados como para alcanzar la plena competitividad de la energía solar fotovoltaica como fuente de energía primaria.
- Las aplicaciones se extienden a instalaciones de potencia intermedia (menos de 10kw) quedando fuera del ambito de aplicación de la energía solar fotovoltaica solo los puntos que están aplicados a la red general.

El sector privado entra de lleno en la utilización de la energía solar fotovoltaica aunque en muchas áreas continúan siendo necesarios apoyos indirectos por parte del sector público.

#### ETAPAS POSTERIORES A 1995

Se caracteriza por:

- Costos de la energía solar fotovoltaica por debajo de los 2 dólares/watio solar instalado, zona en la que se va entrando progresivamente en competencia con las actuales fuentes de producción de energía en gran escala.

- La energía solar fotovoltaica entra en el sector energético básico, especialmente en el campo que actualmente cubren las centrales intermedias. Se mantienen reforzadas, todas las aplicaciones en instalaciones aisladas, aunque dadas las grandes dimensiones que alcanza el sector pasan a ser una fracción mínima del mismo.

El estudio realizado y las previsiones de evolución de mercado expuestas a lo largo de este estudio no son en absoluto optimistas, sino al contrario, sino en todo caso pecan de prudentes. Los volúmenes de mercado previstos en el presente artículo para los años próximos, es decir a corto plazo, son sensiblemente más prudentes que las previsiones que actualmente se realizan las empresas que comercializan energía solar fotovoltaica.

Con respecto al futuro a medio y largo plazo, el desarrollo que se supone para este tipo de energía es comparativamente muy inferior al que tiene en otros Países tales como España y EEUU, sin embargo el mercado de la energía solar fotovoltaica mantiene un ritmo de crecimiento asombroso. En cada una de las etapas vistas anteriormente podría superarse, no obstante para que esto suceda es necesario un fuerte apoyo del sector público.

A corto plazo aun cuando se careciera de este apoyo público, el mercado crecería con bastante rapidez en base a razones de prestigio de la energía solar fotovoltaica, pero este crecimiento pero este crecimiento se iría agotando dado posiblemente de que en la práctica, el sector consumidor con potencial económico para situarse fuera de las leyes del mercado es forzosamente reducido. En cualquier caso todos los equipos serían importados ya que la carencia de expectativas claras frenaría la industria para introducirse en el sector. Por consiguiente es necesaria una decidida intervención del sector público en apoyo de la energía solar y en particular de la energía solar fotovoltaica, esta actuación debe ir enfocada en el siguiente sentido.

La administración debería modificar aquella actitud que viene manteniendo sobre la energía solar como fuente alternativa de energía tratándolo como algo utópico y válido únicamente para el siglo próximo o para horizontes que ni siquiera se vislumbran, llegando a afir-

nar incluso que es una fuente energética con gran impacto ambiental lo que es simplemente falso, en este sentido el plan energético debería contemplar un verdadero programa de desarrollo de las nuevas fuentes que constituyen ya una verdadera alternativa de cara al final del siglo.

#### 5.4.- ESTUDIO ECONOMICO PARA VIVIENDAS (UNIFAMILIARES AUTONOMAS) CON INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS (EJEMPLOS CON DATOS RECOGIDOS EN ZONAS RURALES).

En esta parte del capítulo pretendo analizar y calcular los valores económicos de una instalación fotovoltaica y para ello, he subdividido el análisis en 2 partes considerando puntos de vistas diferentes.

##### 1) Análisis de rentabilidad y economía.-

Para ello considero una vivienda rural con consumo permanente y con carga necesaria como para satisfacer necesidades prioritarias de una vivienda, es decir el punto (2) del capítulo anterior donde el consumo es 1537 vatios requiriendo para ello el uso de 26 paneles, sin embargo si escogemos para el caso módulos solar de alta eficiencia M75, variarían el número de paneles, de los cuales sus datos técnicos son:

Marca.....Arco solar:

Modelo.....	M75
Corriente típica bajo carga.....	2,94 Amperios
Tensión típica bajo carga.....	16 Voltios
Corriente de cortocircuito.....	3,27 amperios
Tensión de circuito abierto.....	19,9 voltios
largo.....	111 cms
Ancho.....	33 cms
profundidad.....	3,6 cms
peso.....	11,6 Lbs
N° de células por panel.....	33 células

Estos datos fueron suministrados por los catálogos suministrados por Electron Ecuatoriana S.A. Quito-Ecuador, por el ingeniero Jorge Caba representante en el área de fotovoltaico.

Con este tipo de panel tendremos ahora que:

$$N^{\circ} \text{ de paneles en serie} = \frac{\text{tensión de carga}}{\text{tensión en panel}} = \frac{12}{16} = 0,75 = 1$$

$$N^{\circ} \text{ de paneles en paralelo} = \frac{\text{corriente carga}}{\text{corriente en panel}} = \frac{51}{2,94} = 17$$

$$N^{\circ} \text{ total de paneles} = 1 \times 17 = 17 \text{ paneles}$$

Además es necesario anotar que como los datos técnicos están dados a una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> y 47°C. (temperatura normal de operación



NOCT) y como nuestra radiación promedio son 1000 W-hora/M<sup>2</sup> y temperatura de 20°C, en promedio anual según se observa en la curva de rendimiento figura 6.3, no es necesario aplicarle un factor de corrección a estos valores.

Luego para el caso de análisis de rentabilidad tendremos:

Inversión inicial con alternativa fotovoltaica.

17 paneles	94.000	1.598.000
13 baterías del co.	40.000	520.000
( 120 Ah/día x 10 días autonomía) /100 Ah		
Estructura y obra civil		250.000
Desplazamiento e instalación		50.000
7 Fluorescentes (40 watio)	5.000	35.000
		2.453.000

Inversión inicial con alternativa convencional

Generador AC/DC 120 voltios AC 25 Amperios (tanque 5 galones)

12 V DC, 8.3 Amp		350.000
7 Fluorescentes (40 watio)		35.000
		385.000

A) ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

El costo de un Kilovatio-Hora según formulas sección 6.3 será:

$$C(\text{KWH}) = \frac{B + E}{n \text{ kwh año}}$$

$$B = \frac{I (1+r)^n}{(1+p)(1+r)^{n-1} + \dots + (1+p)^{n-1}(1+r) + (1+p)^n} = (0.05846)(2.453.000)$$

$$n = 20 \text{ años}$$

$$r = 0.32 = \text{redito bancario}$$

$$p = 0.30 = \text{indice de inflacion}$$

$$E = \text{Mantenimiento anual} = 0.5 \% \text{ del costo} = (0.05)(2.453.000) = 12.265$$

$$N^{\circ} \text{Kw año} = 1374 \text{ Wh/día} \times 365 \text{ días/año} = 501.5 \text{ Kwh/año}$$

Luego:

$$C = \frac{12265 + 141.401}{501} = 155.667 \text{ \$/Kwh}$$

501

Para alternativa convencional

$$n = 10 \text{ años}$$

$$r = 0.32$$

$$p = 0.30$$

$E =$  factura anual por consumo + Mantenimiento =

gasolina 3 galones por día x 365 días.....	108.000
bujías ..anual.....	2.000
Limpieza y daños.....	40.000
	-----
	150.000

$$B = 0.1086 I = (0.1086)(385.000) = 41.811$$

$$C = \frac{41.811 + 150.000}{385} = 382,85 \text{ \$/KWH}$$

501

## B) ANALISIS ECONOMICO

### Análisis económico para una alternativa fotovoltaica

$$C_0 = I_0 + \text{CAR} + \text{CAE}$$

$I_0 =$  inversión inicial ..... 2.453.000

$\text{CAR} =$  Sumatorio de los costos actualizados de

reposición de las baterías (vida útil de

4 años) 10 \\$/año...en 20 años..... 200.000

$\text{CAE} =$  Sumatorio de los costos actualizados de

mantenimiento.....

$$= [E(1+p)/(1+r) + \dots + E(1+p)^n/(1+r)^n]$$

$$= [12.265(1+0,3)/(1+0,32) + \dots + 12.265(1+0,3)^{20}/(1+0,32)^{20}]$$

$$= (12,265)(16,99) \dots\dots\dots 208,832$$

$$\text{Costo global } _p = 2.453.000 + 200.000 + 208.382 = \dots\dots\dots 2.861.382$$

#### Análisis económico para alternativa convencional

$$I = \text{inversión inicial} \dots\dots\dots 385.000$$

$$\text{CAR} = \text{costos de reposición} \dots\dots \text{VARIOS} \dots\dots\dots 100.000$$

$$\text{CAE} = \text{Costos actualizados de mantenimiento} \dots\dots\dots$$

$$= E[(1+0,3)/(1+0,32)^1 + \dots + (1+0,3)^{10}/(1+0,32)^{10}]$$

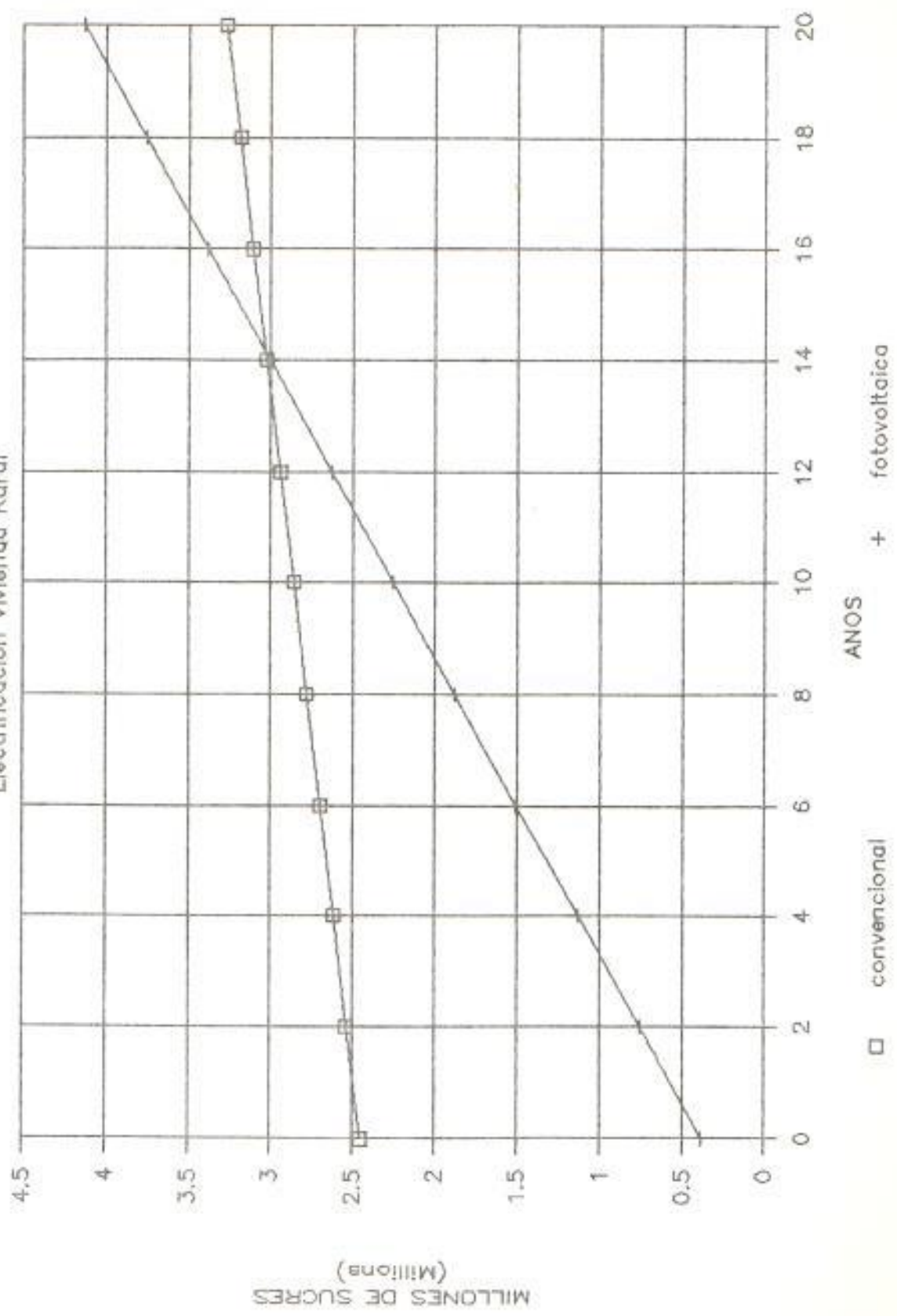
$$= (150.000)(9,15) \dots\dots\dots 1.372.500$$

$$\text{Costo global } _c = 385.000 + 100.000 + 1.372.500 = \underline{\underline{1.857.500}}$$

si gravitamos los resultados obtenidos obtendremos el gráfico 5.1, donde podemos observar que si bien la inversión inicial de la alternativa convencional es más barata que la alternativa fotovoltaica, esta última se convierte en más económica a partir del 13 a 15avo año, esto quiere decir que si bien al momento no es conveniente esta alternativa, lo es a mediano plazo, plazo que que disminuirá con el abaratamiento de los paneles solares y que y que se está sucediendo rápidamente, así también se ha considerado el tiempo amortizable del generador un poco generoso puesto que en la vida practica se averiguo que es entre los 5 y 8 años, sin embargo lo he puesto en 10 años, además es importante recalcar que si se analiza otros usos desde el punto de

# Comparacion Costos

## Electrificacion Vivienda Rural



vista global económico ya ha sido escogida la alternativa fotovoltaica para su uso en relación con la convencional, tales como estaciones de radio, estaciones repetidoras, etc.

2) Obtención de distancia mínima recomendada para seleccionar alternativa fotovoltaica en vivienda rural dentro de zona no alimentada por red energética.

Una opción que considero interesante para considerar en el análisis de una alternativa Fotovoltaica para una vivienda distante de la red es poder determinar un punto de equilibrio, el cual sería la mínima distancia permisible de la red, encima de la cual a una vivienda se vuelve más económico considerarla para energía la con paneles solares fotovoltaicos.

Para ello he recogido datos de tendido de la red de una línea monofásica de energía a los recintos de la parroquia San Lorenzo, cantón Guaranda, realizado por una compañía privada y los cuales considero de interés para este análisis. Y de los cuales considero la información para un kilómetro de línea de la siguiente manera:

#### GASTOS DIRECTOS

MATERIAL.....	564.583
MANO DE OBRA.....	178.400

Transporte.....(material x 5%)..... 28.229

771.240

#### GASTOS INDIRECTOS

Administrativos:

Transferidos:

Utilidad:

Dirección Técnica:

etc.....15% gastos directos:.....

115.681

Total de Tendido de 1 Km..... 900.000

Si incluimos el precio de un transformador de 10 Kva, que es que se usa aproximadamente para un poblado de 10 casas, entonces tendremos que el costo total es:

900.000 + 300.000(transformador)..... 1.200.000.

Lo cual nos indica que si bien el punto mínimo donde la alternativa por red y la fotovoltaica son equivalentes y que es 1.4 Kilometros (2.861.000/1.200.000), considero que debe considerarse para efectos de economía por lo menos en 100% menos, lo cual ocurriría a los 4,8 Km aproximadamente 5 Km, con lo cual podríamos decir que la alternativa fotovoltaica es 100% más conveniente para una vivienda rural si se encuentra distante del tendido de red aproximadamente 4 Km o más.

## CAPÍTULO 6

R.O. - EXPERIENCIA A REALIZAR CON PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS.

## OBJETIVO. -

Determinar la curva de descarga de las baterías de un sistema fotovoltaico para 2 tipos de consumo de carga: frecuente y no frecuente.

## MATERIAL UTILIZADO. -

- 2 paneles solares fotovoltaicos marca "Solares" de la serie SX-110 con las siguientes características eléctricas.

Potencia pico..... $P_p = 36$  Watio

Voltaje a  $P_p$ ..... $V_p = 17.25$  voltios

Corriente a  $P_p$ ..... $I_p = 2.1$  Amp.

Corriente corto circ..... $I_{cc} = 2.35$  Amp.

Voltaje a circ abierto..... $V_{ca} = 22.25$  voltios

- Baterías de 12 voltios 70 vatios-hora

- Focos de 40 vatios DC

## TEORIA. -

Los módulos fotovoltaicos SOLARES DE LA SERIE SX están compuestos de 40 células solares de silicio semicristalino de 10 cm x 10 cm resis-



tentes a la corrosión que pueden conectarse para usos de 6 o 12 voltios mediante un simple cambio de cables en la caja de conexión.

Las células están protegidas por una superficie de vidrio templado. Un marco resistente de aluminio anodizado sirve de soporte estructural del módulo y facilita el montaje del conjunto.

Las 40 células conectadas en serie (dos hileras paralelas de 20 células con alambrado para 6 voltios) del módulo Ex tienen características superiores, especialmente en climas calientes. Con la célula a una temperatura de funcionamiento de 50°C, el punto máximo de potencia del módulo permanece muy por encima de los 14, asegurando una carga adecuada para una batería de 12 voltios o la operación de un equipo de 12 voltios y suficiente voltaje para la operación de sistemas de alto voltaje. El voltaje adicional también ofrece un margen para las pérdidas de voltaje del sistema (causadas por controles, cables y conectores). Este margen de seguridad de voltaje garantiza un funcionamiento adecuado del sistema bajo una variedad de condiciones de diseño.

#### PROCESO.-

para conocer los datos experimentales reales que producen estos paneles se realizaron las siguientes mediciones para 3 días obteniéndose los datos que se muestran en la tabla nro 9 (los 2 grupos de 20

HORA	TEMPERAT. GRADOS	Vp Voltios	Ip Amp	Vl Voltios
9,00	23	17,80	1,08	13,58
10,00	25	18,70	1,26	13,73
12,00	26	19,60	1,42	14,02
14,00	30	18,32	1,12	14,00
15,00	33	19,34	2,81	13,38
16,00	30	18,31	1,63	12,43
18,00	33	15,40	0,50	12,40
DIA NUMERO 2				
9,00	26	18,87	1,24	12,77
10,00	27	18,09	1,03	12,86
12,00	30	19,40	2,49	13,34
14,00	29	18,30	1,06	13,57
15,00	30	18,84	2,11	14,04
16,00	29	17,14	0,44	13,52
18,00	30	17,02	0,52	13,48
DIA NUMERO 3				
9,00	27	18,75	1,29	
10,00	28	18,84	1,15	
12,00	30	19,47	2,38	
14,00	32	18,95	2,02	
15,00	29	18,65	1,87	
16,00	28	17,93	0,65	
18,00	28	17,11	0,39	

TABLA 9 VALORES OBTENIDOS DE MEDICIONES CON PANELES PARA 3 DIAS DIFERENTES

células conectados en serie), las mediciones se realizaron con intervalo de un día, (figura 6.1).

$V_p$  = voltaje del panel en vacío [voltios]

$I_p$  = Corriente generada por el panel en corto circuito [amperios] (1 panel).

$T$  = temperatura, [ $^{\circ}$ C]

$H$  = Hora [hora-Min]

$V_i$  = voltaje carga de baterías con 2 paneles.

Luego se procedió a realizar en estado de carga a la batería la medición de los voltajes y corrientes de carga para una carga luminaria de 40 vatios, 12 voltios, manteniéndose siempre cargándose la batería directamente por los paneles, pero en los lapsos de medición desconectándose los paneles y conectando la carga luminaria de 40 vatios para realizar las mediciones que determinaran el estado de descarga de la batería como se observa en el gráfico 6.2 y 6.3 realizándose esto para 2 situaciones.

a). consumo frecuente de carga (3 días consecutivos).

b). Consumo no frecuente de carga (intervalo de 7 días).

Para lo cual se obtuvo los valores mostrados en la tabla 10 y 11

Los valores en vatios ( $P$ ) fueron obtenidos como el producto del voltaje por corriente medidos y luego se hizo gráficos de estos valores [W] vs tiempo de estado de consumo de carga, cuya escala para

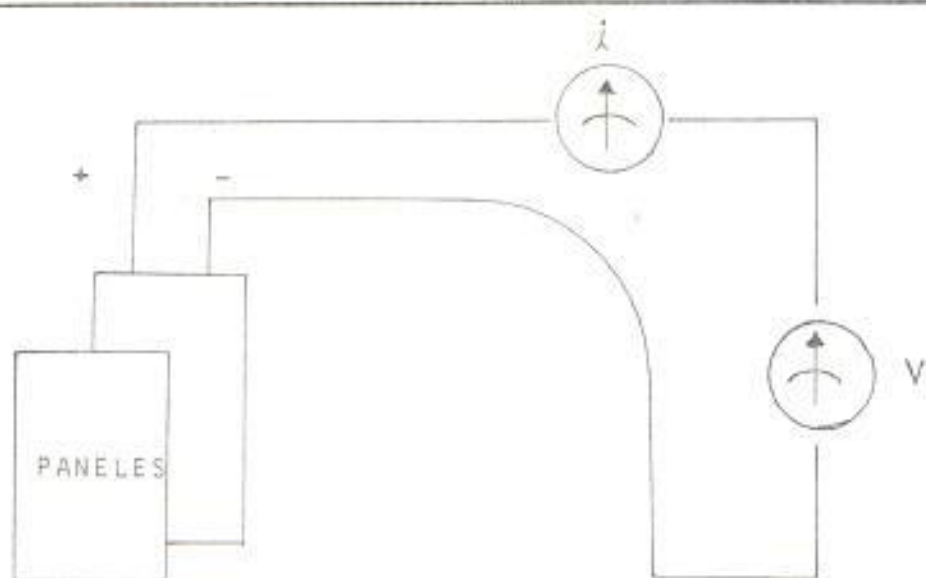


FIGURA 6.1 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA OBTENER VALORES REALES SUMINISTRADOS POR PANEL (TABLA 9).

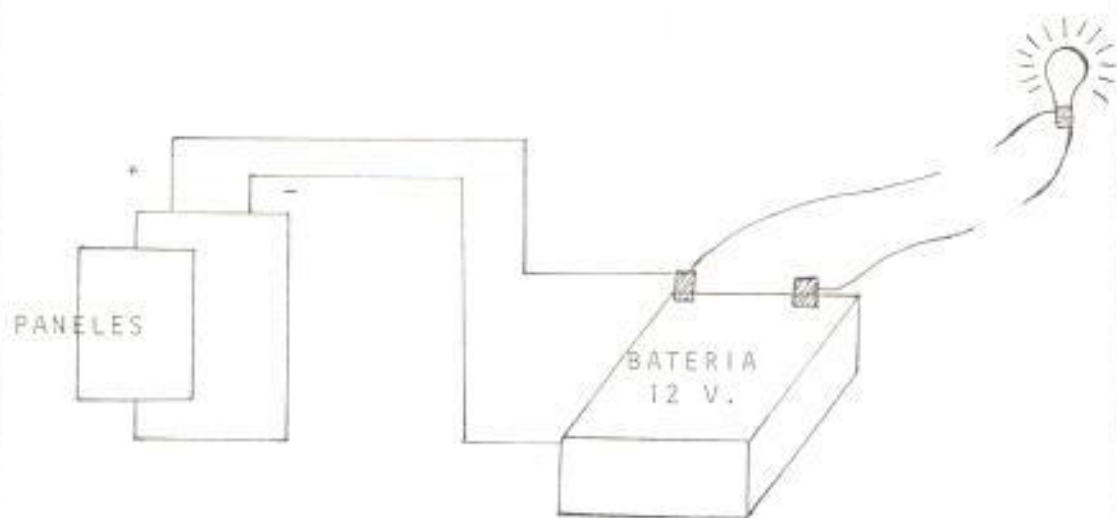


FIGURA 6.2 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA OBTENER VALORES DE CONSUMO FRECUENTE Y NO FRECUENTE (TABLA 10 Y TABLA 11).

HORA	I Amp	V Volt	W Wattios
13,10	4,00	13,55	54,20
13,20	3,99	12,50	49,87
13,42	3,99	11,20	44,68
14,10	3,91	11,77	46,07
14,30	3,93	11,94	46,92
15,20	3,96	11,60	47,04
16,30	3,95	11,81	46,64
17,00	3,91	11,80	46,13
DIA NRO 2			
18,45	3,97	12,25	48,63
19,45	3,95	12,03	47,51
20,15	3,98	11,95	47,32
20,55	3,92	11,60	46,25
22,00	3,90	11,75	45,82
22,30	3,91	11,80	46,13
DIA NRO 3			
19,30	3,97	11,20	44,46
20,00	3,86	12,10	46,70
21,20	3,85	11,85	45,62
21,45	3,82	11,83	45,11
23,30	3,98	11,80	46,94
24,00	3,85	11,78	45,35

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA ELECTORAL  
 Depto. de Ingeniería Eléctrica  
 BIBLIOTECA

Inv. No. \_\_\_\_\_

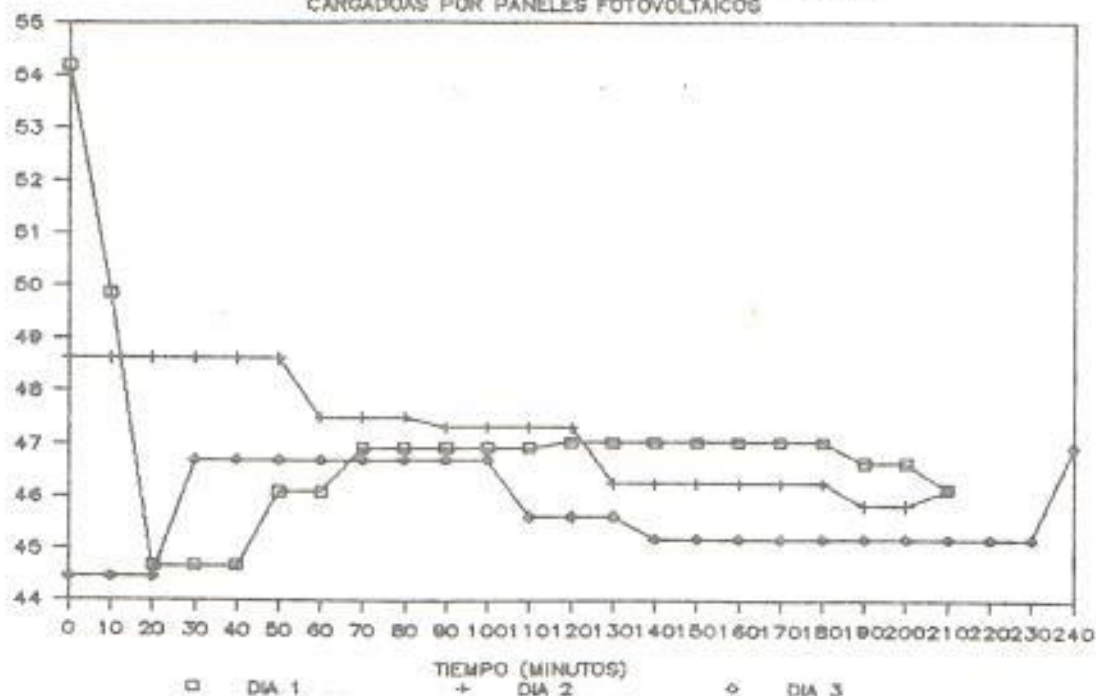
TABLA 10 VALORES ELIMINISTRADOS POR BATERIAS POR CONSUMO FRECUENTE DE CARGA

HORA	I1 Amp	V1 Volt	W Wattios
18,30	4,20	12,30	51,66
20,00	4,05	12,28	49,73
20,30	4,05	12,17	49,28
21,00	3,96	11,95	47,32
21,30	3,95	11,89	46,96
22,00	3,92	11,89	46,60
23,00	3,94	11,90	46,88
DIA NRO 2			
21,20	4,03	12,70	51,18
21,50	4,01	11,99	48,07
22,25	3,96	11,88	47,04
23,00	4,00	11,79	47,16
23,30	3,91	11,79	46,10
24,15	3,92	11,82	46,33

TABLA 11 VALORES SUMINISTRADOS POR BATERIAS POR CONSUMOS FRECUENTES DE CARGA

# CONSUMO FRECUENTE DE BATERIAS

CARGADAS POR PANELES FOTOVOLTAICOS



# CONSUMO NO FRECUENTE DE BATERIAS

CARGADAS POR PANELES FOTOVOLTAICOS

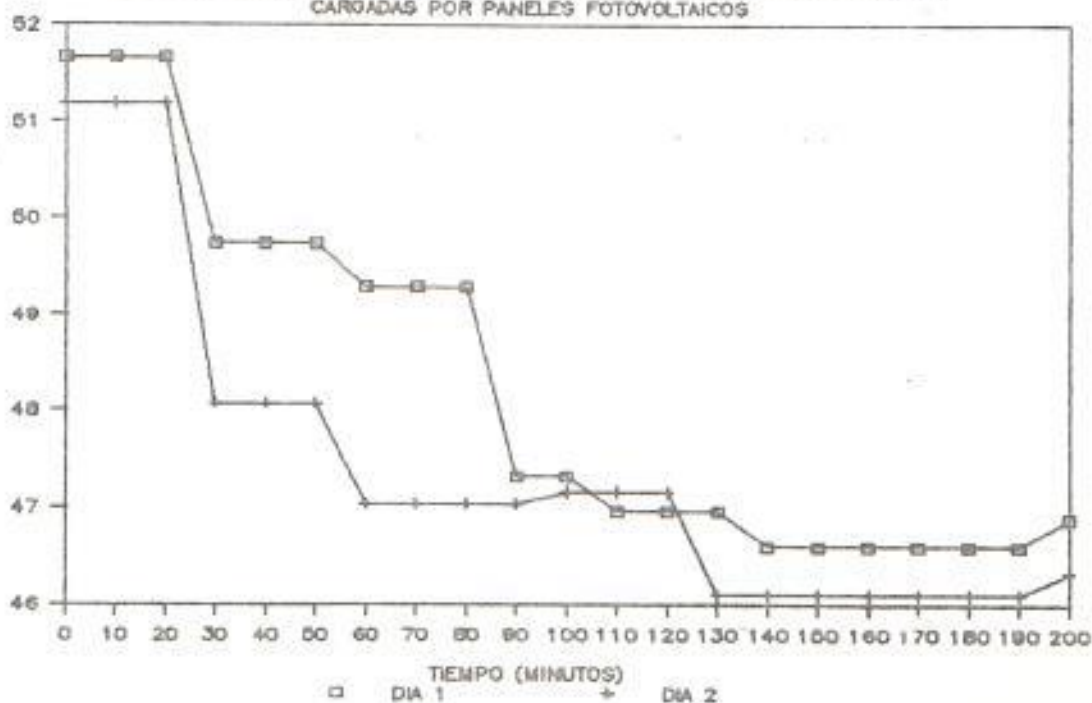


FIGURA 6.3 COMPORTAMIENTO DE CONSUMO DE BATERIAS PARA USOS FRECUENTES Y NO FRECUENTES vs TIEMPO DE CONSUMO

efecto del gráfico parte desde cero, pero para efectos reales, es en diferentes momentos (horas del día), cuyos valores se encuentran en las tablas anteriores.

De los gráficos (GRÁFICO 2.2) podemos obtener algunas conclusiones que son las siguientes:

1. Para el caso de viviendas, baterías normales de plomo ácido (utilizadas en los automóviles) son válidas para almacenar la energía entregada por paneles fotovoltaicos puesto que la vida útil de ellas no decrece rápidamente, pues se mantienen recargadas casi constantemente debiendo solo tener en cuenta, el buen mantenimiento de dichas baterías (alimentación periódica de los niveles correctos de ácido), y que la vida útil de estas baterías serán de un promedio de dos a tres años aproximadamente, a diferencia de las baterías fotovoltaicas que no requieren de ningún mantenimiento, y que tienen un promedio de vida útil de 8 años aproximadamente.

2. En nuestro medio las horas aceptables para alimentar las baterías desde paneles fotovoltaicos, tomando en cuenta el buen nivel de carga originado por la intensidad de radiación solar es recomendable entre las 9:00 - 16:00 horas aproximadamente, según se puede observar en la primera parte de este experimento, lo cual es importante para efecto de sistemas manuales de desconexión del sistema Panel - Baterías.



3. De los gráficos obtenidos por la segunda parte del experimento se puede concluir que:

Si bien el consumo no frecuente de baterías con respecto al consumo frecuente origina valores iniciales de potencia mayores, estos se estabilizan posteriormente dependiendo de las necesidades de la carga, sin embargo esto puede deberse debido a que en el caso de consumo no frecuente, las baterías siempre estuvieron recargándose (durante el rango adecuado de horas cada día), lo cual originaba que de valores de potencia iniciales mayores en las primeras horas que para el caso de consumo frecuente.

Sin embargo creo necesario considerar que si bien la potencia suministrada por las baterías para ambos casos después de las primeras horas es similar (entre 46 y 48 vatios), esto se debe a que el experimento se lo realizó con baterías en buen estado (nuevas), lo cual incide en el buen comportamiento de estas, puesto que dependiendo del tiempo de uso podrá existir una mayor diferencia entre el consumo promedio después de las primeras horas entre el consumo frecuente (será más bajo) versus el consumo promedio después de las primeras horas para el consumo no frecuente, lo cual se observa pero en poca escala para esta parte del experimento.

Puesto que en el tercer día de consumo frecuente la potencia entregada por la batería es alrededor de 45 vatios, lo cual no ocurre para el caso de consumo no frecuentes, donde la potencia oscila entre 47 y 48 vatios.

4). Finalmente creo conveniente mencionar que si bien el consumo frecuente incide en la baja de potencia suministrada por las baterías, con respecto al consumo frecuente, esto no sucede en gran escala, (dependiendo ello también de la vida útil de las baterías, ya sean las normales o las fotovoltaicas), por lo cual sería adecuado sobre dimensionarse en el número de baterías en un 10-20 % para estar lo suficientemente seguro de satisfacer la potencia de carga instalada en cualquier momento.

Sin embargo para no incrementar el número de paneles en el sistema, lo cual sería la otra alternativa, pero mucho más costosa, es conveniente que si se usa ese 10-20 % más de baterías adicionales, rotar la recarga por los paneles de estas para estar siempre con todas las baterías en uniformidad de potencia de poder suministrar.

#### -CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El planteamiento básico de este estudio tiende a superar el enfoque con que se han venido abordando los análisis sobre los posibles usos de la energía solar, y en especial los basados en la conversión fotovoltaica, y que consiste en proponer aplicaciones para las que la energía solar fotovoltaica es especialmente idónea; no entrar en el fondo de los condicionantes que frenan su desarrollo y concluir que en un determinado horizonte "podrían" o "deberían" alimentarse con energía solar fotovoltaica una determinada serie de viviendas rurales cuya difusión podría generar un enorme mercado.

Aun estando convencido de que la difusión masiva de la E.S.F. se va a producir dentro de la presente generación y probablemente antes de fin de siglo, se calcula teniendo en cuenta que la introducción de la energía solar tropieza y seguirá topizando con grandes resistencias, no solo achacables a maniobras o actitudes tendientes a defender el desarrollo de otras fuentes de energía, sino también debido a la inercia que frena cualquier cambio tecnológico radical, que hace que frecuentemente la lógica de muchos planteamientos técnicos y económicos irrefragables quede superada por la realidad de unas estructuras y hábitos de evaluación y decisión resistentes a la innovación, temerosos de los riesgos que esta lleva siempre consigo.

Sin embargo es necesario señalar que la evolución futura de los sistemas fotovoltaicos parece depender esencialmente de dos factores:

1. La variación de precios de los paneles fotovoltaicos.
2. El hallazgo de soluciones técnicas que conduzcan a un desarrollo conveniente de los componentes del generador fotovoltaico.

Otros factores juegan sin duda un papel indirecto importante e, incluso determinante en el futuro de los generadores fotovoltaicos. La evolución de precios de la electricidad generada por centrales convencionales puede contribuir a retardar o a acelerar una implantación importante de la conversión fotovoltaica. La información y mentalización adecuada de los ciudadanos puede igualmente contribuir como factor de apoyo. Evidentemente este último aspecto está estrechamente ligado a las responsabilidades de los gobiernos, que pueden fomentar campañas de información de los ciudadanos, así como su interés a través de subvenciones y créditos adecuados.

En cualquier caso, la evolución futura de los generadores fotovoltaicos puede variar de país a país, pero parece ser que en países similares al nuestro con días altamente soleados y de bajo nivel de desarrollo, los sistemas fotovoltaicos podrían ser de una utilización progresiva para resolver necesidades inmediatas tales como electrificación de servicios médicos, clínicas y viviendas rurales.

Por ello creo importante recalcar que si en el capítulo 6 se observa no conveniente el uso de generación fotovoltaica al momento, a mediano plazo con la tendencia a la baja de costos por panel y por watio solar instalado, si se llegara a obtener una justificación económica para un plazo promedio de 5 años esto se volvería automáticamente conveniente puesto que si bien al momento el país (1987) existen proyectos de electrificación que tienden a llegar con energía eléctrica por el método convencional a muchas zonas del país, sin embargo, quedan y quedarán muchas zonas rurales donde ya sean viviendas o clínicas rurales están instaladas y donde no llega dicha energía y donde con un buen criterio sería necesario considerar el uso de generadores fotovoltaicos.

Cabe anotar que si bien en nuestro país no se tiene en consideración otro tipo de utilización de energía para un determinado uso (cosa que en otros países lo hacen), la corriente es más fuerte, pues ya se ve una franca abertura a la comercialización de dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía solar tal es el caso de calentadores solares que ya existen en uso real en aplicaciones de viviendas, de igual manera para los paneles solares fotovoltaicos existiendo al momento algunas casas comerciales fomentando en pequeña parte su uso y existiendo ya las primeras aplicaciones, lo cual nos puede llevar a pensar que es un campo que se está ya desarrollando en otros países y que su investigación en pos de mejoramiento de precios, rendimiento y potencial seguirán en crecimiento.

## BIBLIOGRAFIA

- WOLFGANG PALZ: Electricidad solar, Blume, Madrid, 1980.
- AGUSTA KUBIO J. Energia solar utilizacion y aprovechamiento, Paraninfo, Madrid, 1984.
- LOQUE A. Panorama de la Energía Solar, Madrid.
- SAJA G. El Generador Fotovoltaico, Madrid.
- EGUREN J. Estructura y Componentes De Un Generador Fotovoltaico, Madrid.
- ARAUJO G. Panorama De Las Aplicaciones Terrestres de La Energia Solar Fotovoltaica, Madrid.
- QUIX C. y SERRA L. Estudio Economico De Instalaciones Fotovoltaicas Para Viviendas Unifamiliares, Marcombo, Mexico.
- LOQUE A. Teoria y Tecnologia Para La Electrificación Solar, Marcombo, Barcelona.
- PUELLA J. y SANCHEZ C. Dimensional Del Acumulador de Una Instalación Fotovoltaica, Marcombo, Barcelona.
- PROG F. Instalaciones Practicas De La Electricidad Solar, Marcombo, Barcelona.
- GIOPFRIDA. Photovoltaic System, International Center For Advanced Technical And Vocational training, 1960.
- JUSTER F. Las células solares, Paraninfo, Madrid, 1980.
- ARG TELEFUNKEN, Principales Aplicaciones De La Energia Solar, Mexico, 1980.

CARRASCO F., GONZALES F., LETRÓN C. Nociones Básicas Sobre Generadores Fotovoltaicos, INE, QUITO, 1985.

CARRASCO F., GONZALES F., DURAND J. Estudio Del Potencial Solar y Eólico Del Ecuador, INE, QUITO, 1985.

PAZMINO M., TESSITORE M. Determinación De La Radiación Solar Global En La Región Del Litoral Ecuatoriano, Revista tecnológica de la ESPOL, CUYAQUII, 1981.