



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**



“ALIMENTACION DE UN FARO MARINO EN LAS ISLAS  
GALAPAGOS, CON ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICA”

**INFORME TECNICO**

Previa a la obtención del Título de:

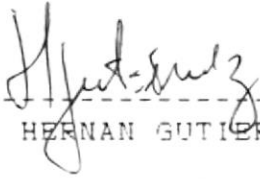
**INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

Especialización: **POTENCIA**

Presentado por:

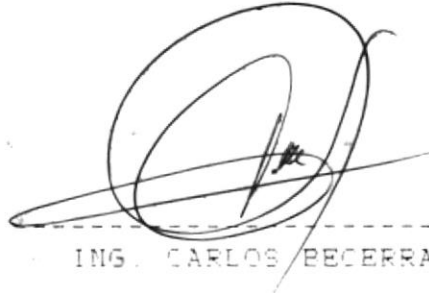
**Juan Francisco Pérez Merizalde**

1989



ING. HERNAN GUTIERREZ

DECANO DE LA F.I.E.



ING. CARLOS RECERRA

PROFESOR SUPERVISOR



ING. JAIME SANTORO



BIBLIOTECA

## AGRADECIMIENTO

El autor de esta obra, agradece al Ing. CARLOS BECERRA ESCUDERO, por su fecunda labor orientadora y crítica en la elaboración de este Informe Técnico.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Francisco Pérez Merizalde', written in a cursive style.

JUAN FRANCISCO PEREZ MERIZALDE

## DEDICATORIA

Dedico esta obra a mi madre  
Doña Eugenia Merizalde de  
Pérez, y a toda mi familia.

J. F. PEREZ

## DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expresadas en este Informe Técnico, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mismo, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Titulos Profesionales de la ESPOL).

-----  
JUAN F. PEREZ M.

## RESUMEN

Este Informe Técnico describe una interesante experiencia en una nueva rama de la ingeniería eléctrica: el uso de la electricidad solar fotovoltaica. El trabajo fue preparado dado un requerimiento profesional ocurrido en mayo de 1986, y tenía como objeto proporcionar las especificaciones técnicas (así como las perspectivas económicas) de un sistema de generación eléctrica fotovoltaica autónoma para intentar energizar un faro en una de las islas del Archipiélago Galápagos. La experiencia enfocó la posibilidad de emplear paneles fotovoltaicos planos bifaciales, aprovechando la alta irradiación solar en las islas (6 a 8 KW-h/m<sup>2</sup>-día).

El consumo eléctrico mensual calculado para el sistema fue de 618 A-h/mes, a 12 VDC. De los datos de heliofania de la zona, fue posible encontrar la irradiación global mensual estimada (130.7 KW-h/m<sup>2</sup>-mes

durante el mes de mínima irradiación). El cálculo final indicó la necesidad de emplear 2 paneles de 12 V, 45 W (potencia pico), bifaciales; y 2 baterías de 100 A-h, suficientes para proveer 164.8 A-h durante 8 días de autonomía de días nublados (baja heliofaula) durante el mes de máxima carga y durante las noches.

La experiencia solar en las islas Galápagos es en general, muy rica en conocimientos y conclusiones. Se deberán realizar posteriores esfuerzos para definitivamente introducir el uso de sistemas fotovoltaicos (FV) para energizar cargas rurales y remotas. Científicamente, será importante planificar la energización FV en las islas, por cuanto gozan de la mayor heliofaula en comparación con el resto de regiones del Ecuador. La experiencia narrada en este Informe, es apenas una pequeña muestra del potencial de esta aplicación.



BIBLIOTECA  
INDICE GENERAL

	PAG.
- RESUMEN .....	
- INDICE GENERAL .....	
- INDICE DE FIGURAS .....	
- INTRODUCCION .....	
- CAPITULO I.- .....	
GENERALIDADES SOBRE CAPTACION Y CONVERSION SOLAR	
1.1. El Uso de la Energia Fotovoltaica .....	
1.2. Caracteristicas de los Paneles Bifaciales .....	
1.3. Descripci3n del Sistema Fotovoltaico Aut3nomo .....	



-	CAPITULO II.- .....	
	<b>CARACTERISTICAS DE LA INSTALACION</b>	
	2.1. Especificaciones del Sistema de Faro ...	
	2.2. Disponibilidad de Heliofanía de la Zona.....	
	2.3. Cálculo de la Irradiación Global .....	
-	CAPITULO III- .....	
	<b>DISEÑO DEL SISTEMA GENERADOR FOTOVOLTAICO.</b>	
	3.1. Estrategia del Diseño Fotovoltaico.....	
	3.2. Cálculo de Variables del Sistema .....	
	3.3. Consideraciones Económicas del Sistema FV .....	
-	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	
-	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- FORMA DE INSTALAR UN PANEL BIFACIAL FV.....	
Figura 1.2.- CURVAS CARACTERISTICAS DE PANELES FV BIFACIALES .....	
Figura 1.3.- COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO TIPICO (AUTONOMO) .....	
Figura 2.1.- LOCALIZACION GEOGRAFICA DE LOS SITIOS .....	
Figura 3.1.- ARREGLO FINAL DE LA INSTALACION .....	



**BIBLIOTECA**

## INTRODUCCION

La crisis energética mundial ha obligado en general a todos los países a buscar nuevas fuentes de energía alternativa, habiéndose encontrado en los sistemas solares fotovoltaicos una de las soluciones. En este tipo de sistemas, la irradiación de energía solar parcialmente se convierte en energía eléctrica útil directamente del panel captador.

La energía eléctrica generada en los paneles o módulos fotovoltaicos tiene las siguientes ventajas: (1) Es una conversión energética limpia; es decir, no produce contaminación ambiental de ninguna especie (ni química ni sonora); (2) la fuente de energía de la conversión es gratis, ya que el único "combustible" es el sol, disponible en promedio 12 horas al día; y (3) Los costos de mantenimiento del sistema una vez instala

lado, son insignificantes en comparación con el costo de mantenimiento de otras fuentes de energía convencionales, lo cual permite aumentar el grado de autonomía y confiabilidad de la instalación fotovoltaica.

En el Ecuador, ya es prácticamente una realidad (aunque limitada) la utilización de paneles fotovoltaicos (FV). Su uso está circunscrito a la energización de equipos repetidores de telecomunicación (pública y privada) en zonas aisladas del campo. Existen muchas otras aplicaciones de las FV que poco a poco pueden irse implantando en el país.

La desventaja mayor de las fotovoltaicas es su costo inicial de instalación. El alto costo de los sistemas FV se debe básicamente al costo de las células solares FV y por ende de los paneles fotovoltaicos. En la actualidad, el costo de estos paneles FV está en el orden de los US\$ 4.5 a US\$ 5.0 dólares / watio fotovoltaico. Esto significa que las fotovoltaicas no son competitivas con la red eléctrica convencional de las zonas rurales y de ninguna manera con la red eléctrica urbana. Las aplicaciones FV terrestres no tienen esa finalidad. Consecuentemente, sólo se justifican eco-

nómicamente cuando el lugar donde se piensan instalar el sistema FV dista mucho de la red de electrificación y por lo tanto el costo del tendido de red llega a ser comparable.

Por lo tanto, hay lugares y aplicaciones donde sí es justificable el uso de las FV. En nuestro caso, se enfocó la oportunidad de emplear paneles FV para la alimentación eléctrica de un faro marino en las islas Galápagos. Las razones que justificaron el uso de fotovoltaicas en este caso particular fueron exclusivamente las siguientes:

- a) La gran cantidad de heliofanía anual presente en las islas Galápagos, en comparación con otros sitios del país.
- b) La distancia del lugar de la instalación a la red de alimentación eléctrica, considerando la poca densidad de red eléctrica rural en las islas.
- c) La necesidad de tener un sistema completamente autónomo de energización para el faro, independiente de fallas de red o del equipo generador, e

independiente de las molestias del mantenimiento y del suministro de combustible.

Estas razones llevaron a plantear, en mayo de 1986, como experiencia profesional del suscrito, la posibilidad de usar FV. Cabe destacar que a nivel profesional, ese tipo de experiencia era en esa época, y todavía lo es ahora, una de las primeras en su género. En verdad, existen investigaciones del uso de la energía solar (térmica y fotovoltaica) en instituciones como la ESPOL; sin embargo, la experiencia descrita en este Informe Técnico anima a impulsar esta nueva especialidad de la ingeniería eléctrica y a abrir nuevas perspectivas de campo profesional para el egresado y para el ingeniero eléctrico. En forma particular, se planteó la posibilidad de introducir profesionalmente el uso de una nueva marca de paneles FV que tenían la peculiaridad de ser bifaciales, es decir, capaces de captar energía solar en ambas caras.

Este informe tiene como finalidad describir los principales aspectos técnicos de aquel planteamiento efectuado a manera de solución de problema específico de ingeniería eléctrica, para alimentar un faro marino en

las islas Galápagos empleando electricidad fotovoltaica generada en paneles bifaciales. El informe se divide básicamente en tres capítulos, que contienen toda la información necesaria sobre el tema.

El primer capítulo intenta ilustrar un poco sobre el tema de las fotovoltaicas en cuanto a las perspectivas generales de su uso en el mundo y en el Ecuador. También se dedica a indicar generalidades sobre las características de los paneles FV, especialmente los paneles fotovoltaicos bifaciales que fueron el motivo particular del planteamiento, y de la forma de instalación del sistema.

El capítulo segundo se dedica exclusivamente a describir las características de la instalación; haciendo énfasis en las especificaciones de la carga (o sea, del faro marino), la disponibilidad de horas de sol nominal en la zona, y la cantidad de energía solar estimada para la zona. Estas son las principales variables que intervienen en el cálculo de la instalación fotovoltaica.

Finalmente, el tercer capítulo habla sobre el di-

seño en sí. Se señala la estrategia general del diseño y de la metodología del cálculo de las variables del sistema, destacándose la simplicidad del método. Asimismo, el capítulo presenta los resultados y las consideraciones económicas asociadas con el planteamiento de dicha solución.



## CAPITULO I

### GENERALIDADES SOBRE CAPTACION Y CONVERSION SOLAR

El uso de sistemas fotovoltaicos (FV), relativamente hablando, es un tema nuevo en el ámbito ecuatoriano de la ingeniería. El material escrito está circunscrito a pocas bibliotecas y especialistas, y en un futuro cercano deberá haber mayor auge del uso de las FV. En este primer capítulo, se hablará brevemente de la importancia de la utilización de FV, para inmediatamente pasar a describir los paneles FV bifaciales y cómo debe funcionar regularmente un sistema FV autónomo. No se pretende proporcionar al lector de todos los argumentos científicos de las FV (pues ese no es el alcance de este escrito), sino más bien ubicarse un poco en el terreno de la justificación general del porqué se usó FV en el proyecto.

## 1.1. EL USO DE LA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.-

Los recursos energéticos que posee un país dentro de su patrimonio, no son inagotables. Pensando en caso específico del recurso hidrocarburífico, nos lleva a reflexionar sobre su futura escasez y las consecuencias que traerá no solamente al país sino al mundo entero. De ahí nace la idea de buscar por nuevos rumbos y hallar nuevas formas de conversión energética que se conviertan pronto en un reemplazo adecuado para el petróleo. El recurso del sol es una de esas alternativas y como tal debe promocionarse su uso y desarrollo en el mundo y en el Ecuador, y formar parte de la ingeniería. Precisamente la idea de este Informe Técnico es la describir cómo se ha empleado el recurso sol en la solución de un problema -aunque simple- de ingeniería.

La radiación solar llega a la tierra con un flujo energético que varía ligeramente con la posición del globo en su órbita y con la actividad solar en cada momento, pero que aproximadamente es  $1.4 \text{ KW/m}^2$  con un espectro similar al de un cuerpo

negro alrededor de los  $6000^{\circ}$  K. Cuando la energía solar atraviesa la atmósfera sufre una cierta absorción que depende de las condiciones atmosféricas, de la altura sobre el nivel del mar y de la oblicuidad de los rayos. En el Ecuador, el último factor es poco importante; y alcanzamos a recibir entre 2 y 8 KW-h por día y por metro cuadrado, dependiendo de las características climáticas de la zona y del mes del año. Por ejemplo, las islas Galápagos son las más aventajadas en cuanto a recepción de energía en los meses de invierno especialmente (llegando al nivel de los 6 a 8 KW-h/m<sup>2</sup>-día).

La energía solar puede ser utilizada para varias aplicaciones y en diversas formas. Hay subáreas determinadas de lo que se conoce como Ingeniería Solar (por ejemplo, arquitectura solar, conversión termosolar, producción de biomasa y producción de electricidad). En nuestro caso, nos remitiremos a referirnos solamente a lo que es producción de electricidad mediante la conversión fotovoltaica ya que ésta es empleada en el proyecto.

Precisamente, la experiencia descrita en este Informe Técnico trata sobre la energización de un faro señalizador mediante un generador FV.

## 1.2. CARACTERISTICAS DE LOS PANELES BIFACIALES.-

Los paneles FV son generalmente monofaciales, es decir, están en capacidad de convertir la energía solar que reciben por una sola de sus caras. Esta es la característica general de los paneles planos. Sin embargo, el propósito de fondo del diseño fue fomentar e introducir en el mercado el uso de otro tipo de paneles FV: el panel bifacial.

El panel bifacial contiene los mismos elementos de un panel FV común, con la diferencia que sus células tienen la ventaja de poder convertir la energía solar en ambas caras. La ventaja de la fabricación y utilización de estas células es que se aprovecha más la energía del sol, aumentando la eficiencia del panel (aproximadamente a 1.5 veces que la del panel monofacial de iguales características).

Los paneles FV bifaciales son conocidos como paneles captadores de albedo (la reflexión del suelo terrestre), por ser activos en ambos lados. Las células bifaciales fueron desarrolladas por un equipo científico del Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, a fines de la década de los setenta. Las células bifaciales son estructuras semiconductoras de tipo  $P^+NN^+$ ,  $N^+PP^+$  ó  $P^+IN^+$ , con rejillas metalizadas de doble lado. En laboratorios se ha alcanzado una relación de eficiencias de hasta 98% comparando la conversión del lado frontal con la del lado posterior de las células bifaciales; sin embargo, a nivel comercial, estas células marcan generalmente una relación de 50%.

La figura 1.1 muestra la forma de instalación de un sistema de electricidad solar fotovoltaica usando paneles bifaciales. Obsérvese que para este tipo de paneles se requiere aprovechar en lo mejor posible el reflejo de la energía solar reflejada desde el suelo (lo cual se denomina albedo), por lo tanto es necesario adecuar el área de la instalación. Una técnica simple y barata pa

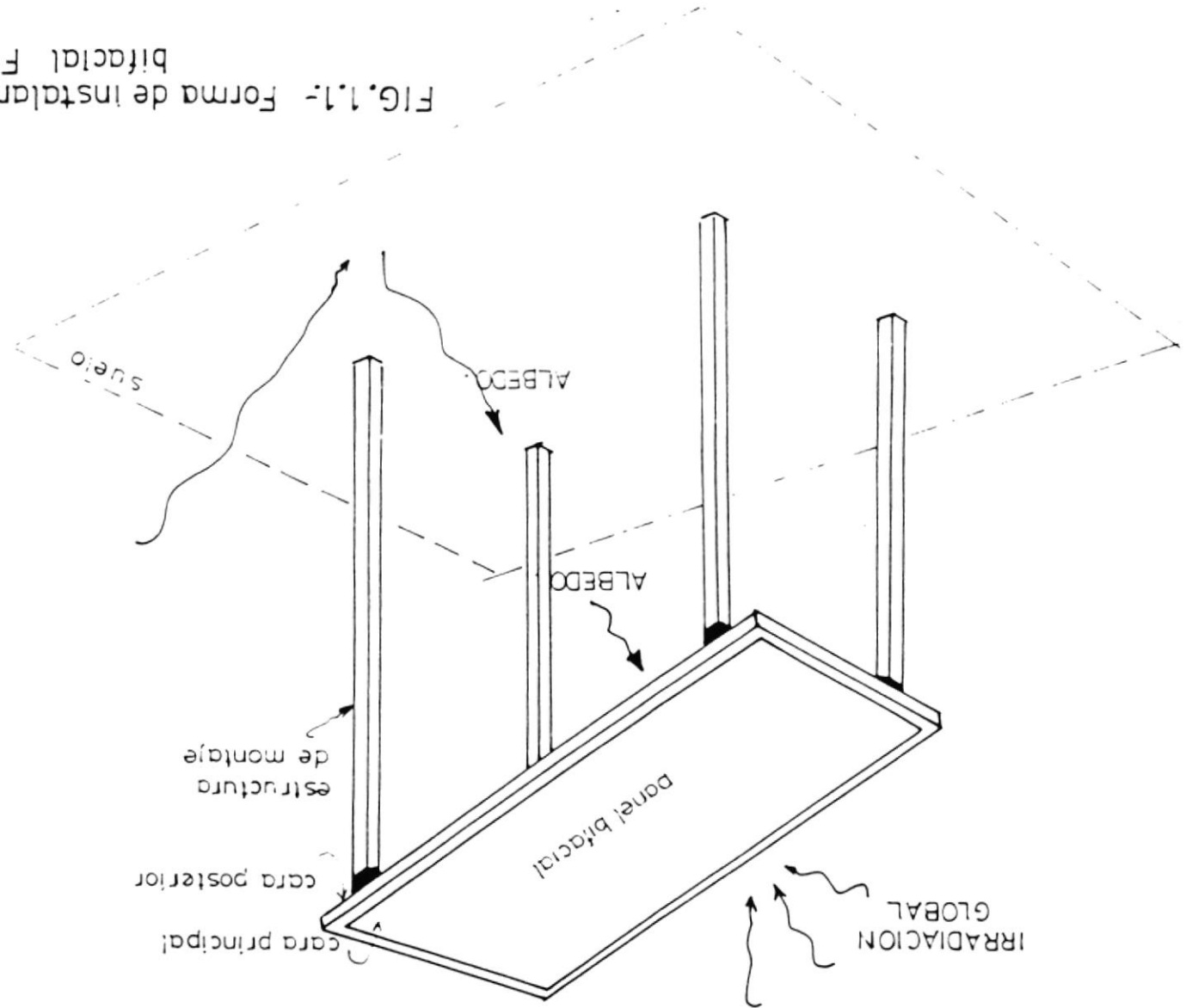


FIG. 1.1- Forma de instalar un panel bifacial FV

La electricidad solar fotovoltaica ocupa un papel básico dentro del panorama global de la energía, debido al uso cotidiano y necesario de la energía eléctrica y sus aplicaciones. La base de la conversión FV es la célula solar, la cual está fabricada de silicio que está estructurado en forma de diodo P-N aplanado. Cada célula genera una potencia eléctrica DC cuando es iluminada con luz solar, con un rendimiento aproximado entre 10 a 20%. Cada célula puede producir un voltaje de unos 0.5 VDC y una corriente que depende de la superficie captadora de la célula, en una relación aproximada de 240 A por cada metro cuadrado y cada KW/m de luz solar. Es decir que un disco celular de 10 cm de diámetro puede suministrar 0.5 VDC y unos 2 A (es decir, una potencia de 1 W).

Un grupo de células solares se interconectan en serie, montadas en módulos o paneles, con el objeto de proporcionar un voltaje apropiado, ya que 0.5 VDC es insuficiente en la mayoría de aplicaciones. La compañía fabricante de paneles FV se encarga de embeber al módulo en un material encapsulante y protegerlo con una capa de material

transparente (vidrio). Un panel típico puede suministrar de 20 W hasta 50 W, de acuerdo al modelo del fabricante dependiendo del Área y eficiencia del panel.

El costo de las células solares fotovoltaicas fue siempre el mayor tropiezo cuando se empezaron a fabricar, pero ahora el costo es menor (aunque no todavía competitivo con la energía eléctrica convencional). Actualmente se puede conseguir paneles FV a un costo de hasta 4.5 dólares/watio, en el mercado internacional. Para efectos de los cálculos ilustrados en este Informe Técnico, se empleó la cifra básica de S/ 1450 sucres por watio fotovoltaico de panel, cifra válida para mayo/86.

Es necesario recalcar que los paneles fotovoltaicos no están para competir económicamente con el costo de la energía eléctrica de la red convencional por ejemplo en instalaciones urbanas. Las FV en efecto, son justificables en zonas rurales, especialmente remotas, donde el costo de instalación de la red convencional sea igual o mayor que las FV. Igualmente, las FV tienen la ventaja de pro-



BIBLIOTECA



ducir energía eléctrica sin ruido, sin contaminación y sin depender del suministro y transporte de combustible alguno (como sucede con los generadores a diesel, por ejemplo). Por consiguiente, en situaciones especiales, las FV son la mejor solución técnico económica a un problema determinado.

Existen innumerables formas de aplicación de sistemas FV, en lugares remotos, especialmente rurales. Las principales aplicaciones, potencialmente útiles para zonas aisladas de nuestro país (algunas ya son realidad), son:

- Electrificación rural complementaria.
- Alimentación de equipos de telecomunicación.
- Estaciones meteorológicas.
- Puestos de vigilancia forestal;
- Desalinización de agua de mar;
- Protección catódica de ductos metálicos.
- Alimentación de faros y radiobalizas.
- Energización de viviendas rurales.
- Puestos de socorro y centros de salud.
- Bombeo e Irrigación de plantaciones.
- Refrigeración de vacunas y medicina.
- Granjas avícolas, etc.

ra adecuarla, es pintando la superficie del suelo con pintura blanca ya que ésta aumenta notablemente el coeficiente de reflexión. Adicionalmente, es necesario elevar la ubicación del panel por lo menos 1.5 metros encima del nivel del suelo, para así aprovechar el reflejo del suelo, y hacer útil el poder de captación de ambas caras del panel.

Recordemos que el panel bifacial tiene la particularidad de convertir energía por ambas caras, pero una de ellas es la principal. El fabricante considera que en condiciones nominales de trabajo, la cara principal recibe una radiación frontal de  $100 \text{ mW/cm}^2$ ; mientras que la cara posterior está en capacidad de convertir hasta  $50 \text{ mW/cm}^2$  solamente. Esto significa que la eficiencia del panel bifacial en comparación con un panel plano convencional, es de 150% a lo sumo.

La figura 1.2 muestra un resumen de las curvas características de un panel solar fotovoltaico bifacial (de la marca ISOFOTON), ilustrándose cómo influye la otra cara en la curva característica I-V del panel. Estas curvas corresponden a

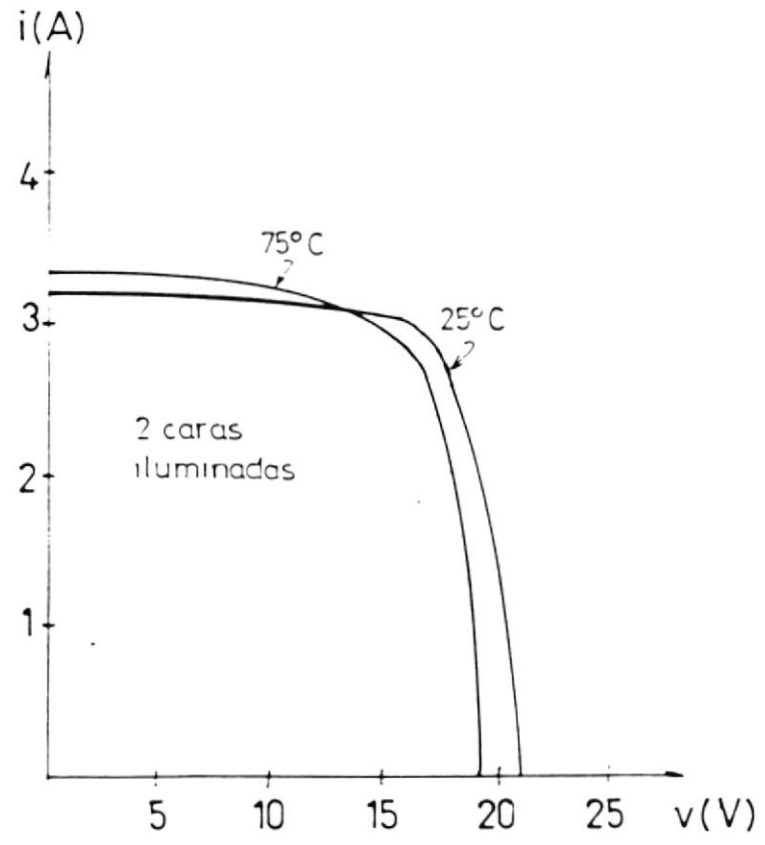
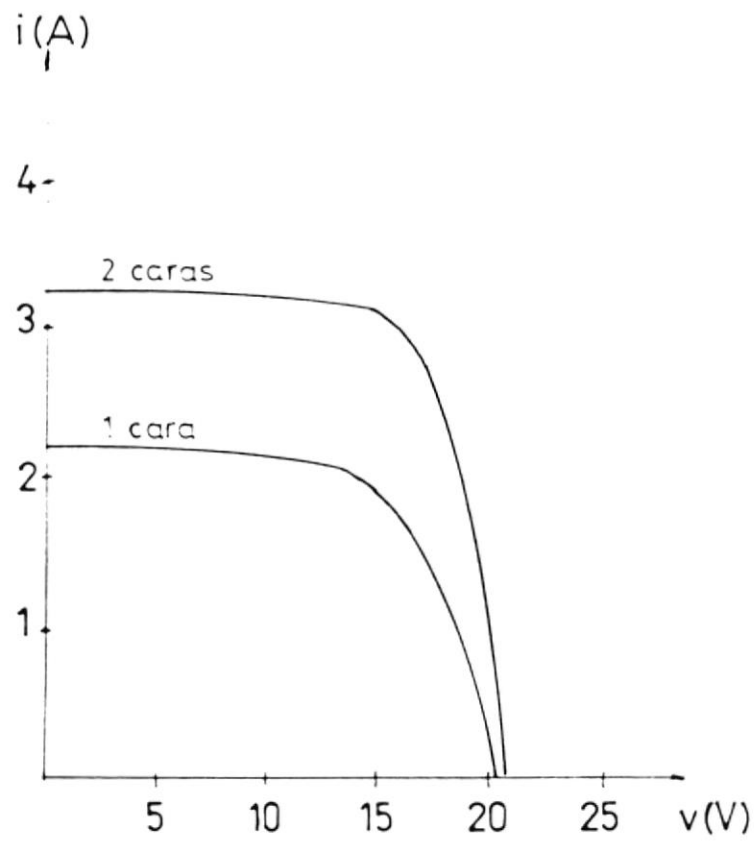


FIG.1.2.- Curvas características de paneles FV bifaciales

un panel bifacial de 45 vatios de potencia pico; voltaje de circuito abierto igual a 21 V; corriente de cortocircuito de 3.2 A; corriente y voltaje de operación a potencia máxima iguales a 2.8 A y 16 V, respectivamente. Este tipo de panel es utilizable en una instalación de 12 VDC (ya que el voltaje de panel debe ser mayor que el de la batería para asegurar su carga). El panel consta de 36 células redondas bifaciales de silicio, de 100 mm de diámetro, para poder suministrar los 45 Wp. Sus características eran:

- Longitud: 105.5 cm.
- Ancho: 44.0 cm.
- Espesor: 40 mm.
- Peso: 6 Kg.
- Cubierta: vidrio templado de bajo contenido de hierro (3 mm).
- Encapsulante: acetato de etilenvinilo (EVA).
- Marco: Aluminio anodizado.
- Costo Promocional: S/ 63.450.00 (may/86).

### 1.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FOTOLTAICO AUTÓNOMO. -

La estructura de un sistema FV autónomo depende considerablemente de las características y requisitos de la carga que debe satisfacer el conjunto de paneles ("array") y de la radiación solar disponible en la zona. Básicamente el sistema se compone de las siguientes partes, tal como se observa en la figura 1.3:

- a) Paneles o módulos fotovoltaicos, que son el ente generador de la energía. Estos paneles son imprescindibles en la instalación FV ya que son los transductores de la energía solar en eléctrica. La sección anterior describió los detalles técnicos sobre ellos.
  
- b) Banco de baterías, para almacenamiento de energía eléctrica y usarla en horas nocturnas o en horas diurnas de baja irradiación. La mayoría de instalaciones FV deben tener su banco de baterías, pero hay aplicaciones fotovoltaicas en donde la acumulación se la

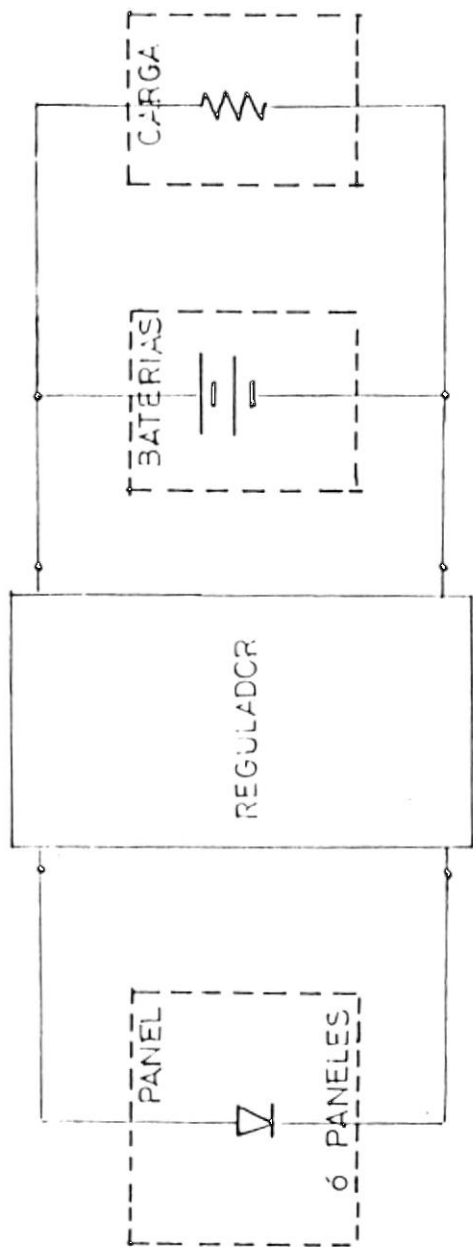


FIG.1.3.- Componentes de un sistema fotovoltaico típico (autónomo)

hace a través de la energía potencial de un fluido. Tal es el caso de aplicaciones FV en irrigación de campos, en donde los paneles energizan directamente una bomba durante el día y se acumula agua en un tanque elevado para usarla durante las noches, sin necesidad de baterías de respaldo.

- c) Regulador de voltaje, que sirve para mantener el voltaje de operación de la carga y evitar la saturación de las baterías. El regulador es de uso recomendable, como en el caso de instalaciones remotas no atendidas por personal de mantenimiento regularmente, donde una sobrecarga prolongada puede producir daños en las baterías. Existen dos clases de reguladores: serie y paralelo. En el regulador serie, cuando la batería está plenamente cargada el circuito regulador/control se encarga de desconectar el panel FV hasta que la batería pierda parte de su carga. En el regulador paralelo, cuando la batería está cargada el control deriva la corriente necesaria para evitar su sobrecar-

ga, dejando pasar la suficiente para alimentar la carga y compensar la autodescarga de la batería.

- d) Elementos auxiliares, que ayudan a conformar el sistema FV en su totalidad. Por ejemplo, la estructura de montaje, el accesorio de seguimiento del sol (en nuestro caso no fue necesario), el circuito seguidor del punto de máxima potencia (que tampoco fue utilizado en nuestra instalación por consideraciones de costo); etc.

En otras ocasiones (no en nuestro sistema) es necesario utilizar un circuito inversor, para convertir la corriente DC en AC, por tratarse de cargas que funcionan con AC, como el caso de muchos aparatos electrodomésticos.



## CAPITULO II

### CARACTERISTICAS DE LA INSTALACION

En este capítulo se describirán las principales características del sistema estudiado. Estas características se relacionan fundamentalmente con tres partes del estudio: (1) El tipo de consumo de la carga a energizar, es decir el faro; (2) la cantidad de horas de sol nominal disponible en la zona del estudio, es decir, la heliofania; y, (3) la cantidad de energía solar estimada a partir de la heliofania. Conociendo el consumo y la irradiación solar estimada, será posible entonces determinar más adelante las características necesarias del sistema final.

#### 2.1. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DEL FARO.--

Se trata de examinar la posibilidad de energizar



autónomamente un faro para uso de navegación, mediante un generador fotovoltaico. El faro, denominado "Santa María", se encuentra ubicado en la Isla Santa María (Floreana o Charles) del Archipiélago Galápagos, aproximadamente a  $1^{\circ} 15'$  de latitud sur y  $90^{\circ} 29'$  de longitud oeste.

El consumo eléctrico primordial del faro consiste en la linterna de señalización marítima, de potencia 11.5 W. Este vatiaje proviene del consumo regular de la linterna de 10 W más el consumo por concepto del destello (que es de 1.5 W). El voltaje del sistema es de 12 voltios DC (y 0.83 A de consumo). El grupo de destello opera con intervalos de "prendido" y "apagado", según la tabla siguiente válida para 20 segundos de operación:

ESTADO	TIEMPO (segundos)	
prendido	1	5%
apagado	2	10%
prendido	1	5%
apagado	2	10%
prendido	1	5%

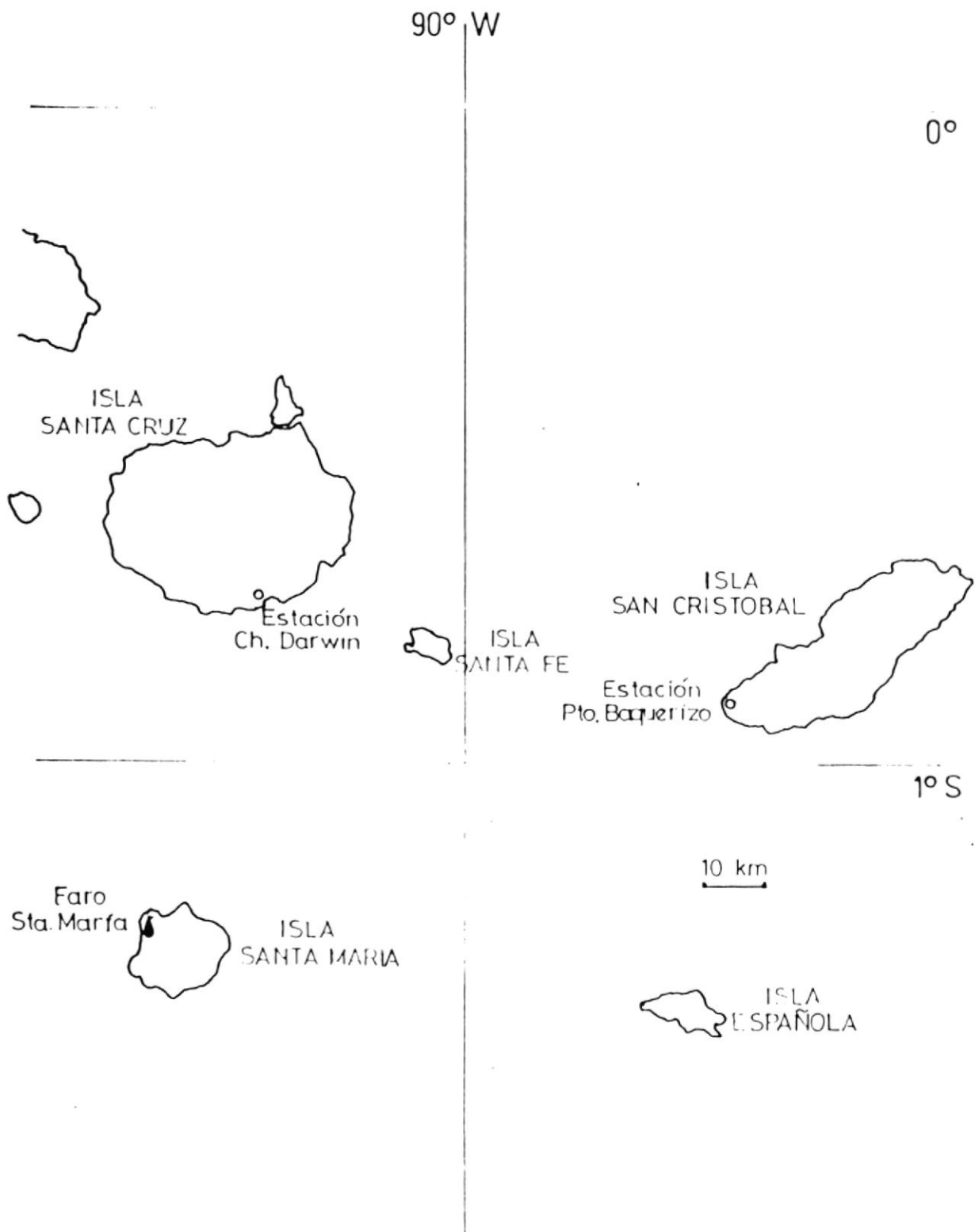


FIG. 2.1.- Localización geográfica de los sitios.

apagado	2	10%
prendido	1	5%
apagado	10	50%

-----

TOTAL                      20 Segundos

Porcentaje de estados apagados..... 80%

Porcentaje de estados prendidos ... 20%

El funcionamiento de la linterna es permanente y por consiguiente se supone que la energía consumida en vatio-hora, durante un día de funcionamiento, es

$$E = 24h \cdot 10W + 24h \cdot (1.5W) \cdot (0.20) \quad [2.1]$$

$$E = (240.0 + 7.2) \quad [2.2]$$

$$E = 247.2 \text{ W-h/día} \quad [2.3]$$

Es decir, que la demanda de la carga eléctrica (Q), expresada en A-h/día, será

$$Q = (247.2 \text{ W-h/día}) / 12V \quad [2.4]$$

$$Q = 20.6 \text{ A-h/día}$$

[2.5]

Se considera a esta demanda como constante durante los días del mes y durante los doce meses del año. Lo cual significa que el diseño se facilita, ya que no se trata de una carga de demanda mensual variable ni de demanda diaria variable. El valor de  $Q$  será útil más adelante para calcular el resto de variables correspondientes al sistema FV.

## 2.2. DISPONIBILIDAD DE HELIOFANIA DE LA ZONA.-

La heliofania ( $H$ ) se define como la cantidad de horas de sol nominal que recibe una superficie iluminada por energía solar. Es decir, son las horas en las cuales la radiación solar alcanza el valor nominal umbral de  $1 \text{ KW/m}^2$ . Se expresa en horas/día u horas/mes, de acuerdo al destino de los datos de entrada. En nuestro caso, se utilizó como dato de entrada la cantidad media de heliofania diaria durante cada uno de los doce meses del año.

La información sobre heliofania proviene de la

información recolectada por medidores especiales (heliógrafos) que generalmente son supervisados o manejados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Un heliógrafo registra la heliofanía diaria por la concentración efectuada por medio de una lente esférica; de tal manera que se usa el efecto de la luz concentrada sobre un papel sensible que hace quemar el papel cuando la radiación sobrepasa el nivel crítico. También existen medidores directos de radiación solar global (que se miden con un actinógrafo o un piranómetro); pero solamente en contadas estaciones de la red nacional de INAMHI. Esta institución, en conclusión, posee una extensa red nacional de estaciones meteorológicas, y algunas de éstas tienen la capacidad de suministrar datos de heliofanía mensual. La red existe en las cuatro regiones del Ecuador (Litoral, Oriente, Sierra y Galápagos).

Para el caso específico de las Islas Galápagos, el INAMHI tiene a su disposición cinco estaciones meteorológicas, que son las siguientes:

ESTACION	LATITUD SUR gra. min.	LONGITUD W gra. min.
Seymour	00 26	90 17
Charles Darwin	00 44	90 18
El Progreso	00 54	89 34
Puerto Baquerizo	00 54	89 47
Puerto Villamil	00 56	91 01

De estas estaciones, sólo las estaciones CHARLES DARWIN y PUERTO BAQUERIZO (Isla San Cristóbal), poseen registros aceptables de heliofania, muchos de ellos vienen registrados desde la década del setenta. El promedio de las heliofanias por mes, para estos dos sitios específicos, se observan en la tabla 2.1.

Considerando que el Faro "Santa María", motivo del diseño, se encuentra cercano a ambas estaciones meteorológicas, se tomó como válido las heliofanias correspondientes a la estación PUERTO BAQUERIZO. A esto se agrega el hecho de que por observadores de la región y de otros datos proporcionados por técnicos especializados, las condiciones



BIBLIOTECA

solares de la isla San Cristóbal (que es donde está la Estación Puerto Baquerizo) son similares a las de la isla Floreana (que es donde está situado el Faro del estudio).

### 2.3. CALCULO DE LA IRRADIACION GLOBAL.-

Como metodología del diseño ejecutado, fue indispensable partir de un dato solar. En este caso, se partió de los datos de heliofania en las islas Galápagos. Para ello se buscó información técnica que permitiera transformar la heliofania en términos de irradiación global. Las consultas realizadas ayudaron a esbozar algunos aspectos de esta interesante metodología que se muestran a continuación.

Con los datos de heliofania se puede proceder a calcular la irradiación solar global de la zona (G), expresada en KW-h/m<sup>2</sup>-día ó KW-h/m<sup>2</sup>-mes, de acuerdo a la expresión de Page, dada por

$$G = G_0(a + b(H/H_s)) \quad [2.6]$$



TABLA 2.1

**Heliofanías Diarias Medias Mensuales en las Estaciones  
Charles Darwin (Isla Santa Cruz) y  
Puerto Baquerizo (Isla San Cristóbal)**

MES	CH. DARWIN	PTO. BAQUERIZO
Enero	5.80 h/día	6.40 h/día
Febrero	6.35	7.66
Marzo	6.50	8.48
Abril	7.60	8.47
Mayo	4.90	8.21
Junio	4.85	6.75
Julio	2.50	6.75
Agosto	2.01	5.58
Septiembre	2.33	5.06
Octubre	3.14	4.66
Noviembre	4.01	5.76
Diciembre	3.81	5.60



La ecuación [2.6] es usada para la creación de tablas especiales que muestran los valores mensuales de irradiación solar global en una zona determinada. Aquí mostraremos brevemente los principales aspectos del método, aunque fueron los resultados los que valieron y fueron empleados durante el diseño del sistema FV, previa la consulta a especialistas en el tema solar.

Además de la irradiación global ( $G$ ) y la heliofanía ( $H$ ), esa expresión contiene los siguientes parámetros:

$G_0$  Es el valor de la irradiación diaria extraterrestre, es decir, aquella irradiación solar existente antes de entrar la luz del sol a la atmósfera terrestre. Su valor depende de la latitud, la época del año y la constante solar (igual a  $1.367 \text{ KW/m}^2$ ). Los valores de esta irradiación pueden calcularse para cada mes y cada zona. Los valores mensuales de  $G_0$  fueron obtenidos de tablas válidas para el Ecuador.

**Hs** Es la duración teórica del día, lo que depende de la época del año y de la latitud de la zona. Los valores de **Hs** fueron obtenidos de tablas formuladas para el Ecuador.

**a y b** Son las CONSTANTES CLIMATICAS, las cuales generalmente provienen de una determinación estadística, generada por los registros de datos en las estaciones meteorológicas durante muchos años en cada zona en particular. Para el caso de las islas Galápagos, se han seleccionado los siguientes valores para estas constantes:

CONSTANTE	Invierno	Verano
<b>a</b>	0.265	0.251
<b>b</b>	0.371	0.404

La tabla 2.II muestra los valores obtenidos para **G<sub>o</sub>**, y adicionalmente muestra los resultados del cálculo de la fórmula de Page, para los valores esperados de irradiación global **G** (en un día medio del mes y durante el mes respectivo). Tam

bién, en la misma tabla 2.II, se muestra la irradiación global anual ( $\text{KW}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{año}$ ) y la irradiación global diaria promediada en el año (expresada en  $\text{KW}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{día}$ ).

De dicha tabla se usó el dato correspondiente al peor mes de radiación, es decir, Septiembre, en donde la irradiación global mensual alcanza los  $130.07 \text{ KW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$  por mes (tal como se apreciará en el cálculo siguiente ilustrado en el capítulo 3).

TABLA 2.11

Resultados del Cálculo de Irradiación Global Solar,  
 evaluada durante el año, en las Galápagos.

Mes	$G_0$ KW-h/m <sup>2</sup>	$G$ KW-h/m <sup>2</sup> -día	$G$ KW-h/m <sup>2</sup> -mes
Enero	10.18	4.71	145.85
Febrero	10.48	5.25	147.11
Marzo	10.54	5.55	172.15
Abril	10.17	5.43	162.95
Mayo	9.59	5.04	156.31
Junio	9.21	4.40	132.09
Julio	9.32	4.20	130.15
Agosto	9.81	4.31	133.74
Septiembre	10.28	4.34	130.07
Octubre	10.41	4.25	131.82
Noviembre	10.22	4.54	133.11
Diciembre	10.03	4.40	136.43
Irradiación Anual:		1714.77	KW-h/m <sup>2</sup> -año
Irradiación Diaria:		4.70	KW-h/m <sup>2</sup> -día



**BIBLIOTECA**

## CAPITULO III

### DISEÑO DEL SISTEMA GENERADOR FOTOVOLTAICO

En este capítulo se describe la estrategia seguida en el diseño, los cálculos de los diferentes parámetros del sistema y las sugerencias sobre los componentes que debe tener la instalación fotovoltaica. Al final, se mostrará también el resultado del cálculo de costos del sistema fotovoltaico únicamente (excluyendo los costos del sistema de consumo, es decir, el faro y sus elementos).

#### **3.1. ESTRATEGIA DEL DISEÑO FOTOVOLTAICO.**

El objetivo del diseño consistió en determinar la cantidad de módulos (o paneles) fotovoltaicos necesarios así como la capacidad del banco de baterías de acumulación de respaldo. Además, el dise-

ño incorporó las sugerencias sobre los elementos auxiliares que requiere el sistema FV para su operación.

En todo caso, el aspecto fundamental del diseño se concentra en el cálculo de:

- (1) El número de paneles FV; y,
- (2) La capacidad del banco de baterías.

Este cálculo parte de los datos de consumo eléctrico del faro durante los meses del año (Q) y la cantidad de irradiación solar global disponible (G). En el diseño importa la relación entre Q y G, escogida durante el mes donde esta relación tiene el máximo valor. Este criterio, denominado "criterio del peor mes", lleva a determinar la Capacidad Fotovoltáica (I), es decir, el número máximo de amperios por cada KW/m<sup>2</sup> nominal de energía solar. Por lo tanto, esta capacidad viene dada por

$$I_{\max.} = 1.2 \frac{(Q/G)}{\max.} \quad [3.1]$$

Donde se ha empleado un factor de seguridad igual a 1.2 (valor típico en este tipo de diseño), para tomar en cuenta las pérdidas y la inconfiabilidad del sistema de captación/conversión/acumulación.

Una vez determinado el valor de  $I$  durante el peor mes, podemos hallar el número de paneles dividiendo para la corriente nominal de panel ( $I_p$ ). Esto dará el número de paneles en paralelo. El número de paneles en serie (que en nuestro caso, no son necesarios), se calcularía dividiendo el voltaje de operación del sistema para el voltaje nominal de panel  $V_p$ . En nuestro diseño, sólo es necesario determinar el número de paneles a partir del número entero inmediato superior de la relación

$$N_p = I/I_p \quad [3.2]$$

Donde  $I_p$  es el amperaje nominal de cada panel bifacial correctamente montados (usufructuando del albedo).

El número de baterías de 12 V se obtienen partiendo de la suposición de que en el peor de



los casos la baterías debe ser capaz de suministrar energía durante ocho días del mes de mayor consumo. Es decir, se prevé 8 días de autonomía. Por lo tanto, el número de baterías (Nb), viene dado por

$$N_b = 8.0 (Q/d) \quad [3.3]$$

donde d es el número de días del mes de mayor consumo. Cabe indicar que siendo el voltaje del sistema igual al voltaje de batería (12 V), entonces no hubo necesidad de considerar baterías en serie en la instalación.

### 3.2. CALCULO DE VARIABLES DEL SISTEMA.-

Habiéndose hallado que septiembre era el mes de mínima irradiación esperada en la zona, y ya que se ha asumido al consumo como constante durante el año, entonces, aplicando la expresión 3.1, el máximo valor de I será:

$$I_{\text{máx.}} = 1.2 \times 20.6 \times 30 / 130.7 \quad [3.4]$$

$$I_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = 5.66 \text{ A/(KW/m}^2\text{)} \quad [3.5]$$

Por consiguiente, usando la expresi3n 3.2, tenemos

$$N_p = 5.66 / 2.8 = 2.02 \quad [3.6]$$

Es decir, que fueron necesarios dos (2) paneles fotovoltaicos bifaciales (en paralelo).

Se observa de la expresi3n [3.6] que si hubiese sido un panel plano monofacial el del dise1o, entonces la corriente de panel (de similares caracteristicas) hubiese sido 50% veces menor, es decir, s3lo 1.87 amperios/panel. Por lo tanto, el resultado hubiese sido 3 paneles monofaciales. Este ahorro de paneles se debe a la capacidad adicional de captaci3n de albedo que tienen los paneles FV bifaciales. De todas maneras, cabe indicar que desde la 3poca de este trabajo profesional hasta la presente, los fabricantes de paneles FV monofaciales han aminorado los costos de producci3n y han acaparado m3s el mercado frente a los paneles bifaciales.

Empleando la expresión 3.3, el número de baterías de 12 V (en paralelo), será

$$N_b = 618 \times (8/30) = 164.8 \text{ A-h} \quad [3.7]$$

Por lo tanto, se requirieron prácticamente dos (2) baterías de 100 A-h en paralelo. Aunque también había la alternativa de usar 1 batería de 100 A-h en paralelo con una de 70 A-h, pero por aumentar la confiabilidad de operación del sistema en días nublados, se prefirió por las dos baterías de 100 Amperio-hora.

La figura 3.1 ilustra la conformación definitiva de la planta FV diseñada, compuesta por los 2 paneles bifaciales de 45 W en paralelo, las 2 baterías de 100 A-h en paralelo, y el regulador. La carga nominal, y única, es el faro de 11.5 W.

### 3.3. CONSIDERACIONES ECONOMICAS DEL SISTEMA FV. -

Como sucede en todo análisis de factibilidad de instalación de un sistema de generación, sea con-

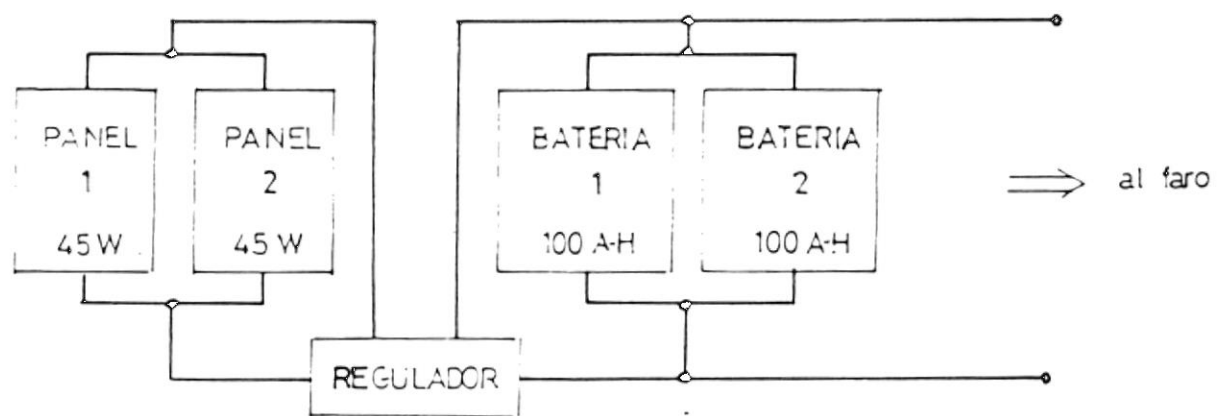


FIG. 3.1.- ARREGLO FINAL DE LA INSTALACION.

vencional o no convencional, es muy necesario calcular el tipo de inversión que debe hacer el cliente con el propósito de examinar la verdadera rentabilidad del sistema a instalar. En el caso de una planta de generación fotovoltaica, inclusive una relativamente pequeña como la que aquí se ha presentado, fue necesario dejar constancia de la rentabilidad de la misma. Los criterios considerados sirvieron para aclarar el panorama general de la funcionalidad de la instalación FV y las implicaciones económicas asociadas con el usuario.

Las ventajas económicas, que son las que interesan a la larga, pueden visualizarse superpuestas desde varios ángulos:

- (1) **Ventajas por Mantenimiento:** Ya que la planta FV exige mucha menor preocupación por concepto de mantenimiento preventivo y correctivo, en comparación con plantas eléctricas de otro tipo (a diesel, por ejemplo). Esta facilidad repercute favorablemente en la rentabilidad del sistema FV.

(2) **Ventajas por Combustible:** En vista de que las fotovoltaicas sólo necesitan del sol como fuente de energía. Por lo tanto no hay costos por combustible ni tampoco costos por transporte y almacenamiento de éste. Esta rebaja favorece la rentabilidad del sistema FV en cualquier aplicación rural.

(3) **Ventajas por Accesibilidad:** Al no haber implicaciones altas por concepto de combustible ni mantenimiento, tampoco será imprescindible la construcción de vías de acceso de elevado costo. Prácticamente, no es necesario involucrar costos auxiliares por vías de acceso.

Por otro lado, la única desventaja de las plantas FV es el costo inicial de los paneles.

Estas consideraciones son útiles para calcular los **costos iniciales** del sistema fotovoltaico, que es una información importante para el usuario. Adicionalmente, también calcularemos (sólo para conocimiento del autor) el **valor actualizado de vida útil**.

a) Costos Iniciales:

Este es el valor que debe presupuestarse el cliente para invertir en la instalación del sistema fotovoltaico (excluyendo la carga, es decir, el faro, en este caso). A continuación se muestra los costos iniciales, considerando precios de mayo de 1986 (la fecha de la oferta), en sucres:

- 2 PANELES BIFACIALES 45W .....	S/	126.900
- 2 BATERIAS 100 A H .....	S/	62.200
- 1 REGULADOR 12V, 60W .....	S/	23.000
- CABLES Y ACCESORIOS .....	S/	21.500
- ESTRUCTURA DE MONTAJE .....	S/	9.500
- ADECUACION DEL SUELO (ALBEDO) ..	S/	5.800
- MANO DE OBRA .....	S/	25.000
- DIRECCION TECNICA DE MONTAJE ...	S/	45.000
-----		
TOTAL DE COSTO INICIAL .....	S/	318.900

b) Valor de Vida Útil:

Este suministra una cifra del valor actualizado al tiempo presente (en mayo de 1986) del monto completo de la inversión, con criterio de tiempo de recuperación. En este análisis, el periodo de estudio se estimó en 20 años, que para efectos de cálculo coincidía con el periodo de vida útil del sistema. El valor de vida útil entonces comprende tres contribuciones:

- (1) El costo total inicial ( $C_i$ ), ya calculado de S/ 318.900 sucres;
- (2) El costo actualizado por concepto de las sustituciones de baterías ( $C_s$ ); y,
- (3) El costo actualizado por concepto de operación y mantenimiento ( $C_m$ ).

En la segunda contribución fue necesario utilizar la tasa real de interés  $i$ , que en esa época era de 0.049; en vista de que el por-



centaje de inflación se estimaba en 22% y la tasa de descuento nominal era de 28% aproximadamente. Adicionalmente, hubo que considerar un número estimado (en este caso, 3) de sustituciones de baterías durante los 20 años de vida estimada del sistema; así como un porcentaje del costo inicial de las baterías (en este caso, 10%) en el momento de su sustitución. Por lo tanto, el Costo Actualizado por concepto de las sustituciones de baterías ( $C_s$ ), resultó

$$C_s = 62.200 (1-0.1) \sum_{n=1}^3 \left[ \frac{1}{1+0.049} \right]^{20n/(1+3)}$$

[3.8]

Luego,  $C_s$  sale igual a S/ 105.786 sucres.

El costo actualizado por operación y mantenimiento se calcula considerando también una tasa real de interés igual a 4.9%, un periodo de estudio de 20 años, y una cifra anual equivalente al 1% del costo total inicial

(porcentaje que es bastante bajo en comparación con otros sistemas de generación autónoma). Por consiguiente,

$$C_m = 318.900 * 0.01 [1 - 1.049^{-20}] / 0.049 \quad [3.9]$$

Por lo tanto,  $C_m$  es igual a S/ 40.081 sucres.

Sumando  $C_i$ ,  $C_s$  y  $C_m$ , nos da que el Valor Actualizado de Vida Útil es de S/ 464.767.00 sucres.

Dicha cifra significa que el costo equivalente unitario de un kilovatio hora de electricidad fotovoltaica ( $C_u$ ) proporcionada por el sistema durante toda su vida, puede calcularse mediante

$$C_u = \left[ \frac{464.767 * 0.049}{1 - 1.049^{-20}} \right] / (2.381 * 2 * 0.045) \quad [3.10]$$

Donde se han considerado un total anual de 2.381 horas de heliofania que reciben los 2

paneles de 45 W (0.045 KW). Este cálculo nos arroja un costo de S/ 172.50 sucres por cada KW-h de electricidad FV instalada.

Este valor evidentemente es mucho mayor que cualquier costo de energía eléctrica urbana o rural suministrada por EMELEC o INECCEL; sin embargo, su validez es aceptada técnica y económicamente dadas las ventajas antes mencionadas de las fotovoltaicas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha reportado un trabajo profesional que ha sido claramente no convencional. A entender del autor, el trabajo merece tomarse en cuenta aunque sea parcialmente o como parte inicial, no tanto por su contenido (pues no tiene la profundidad de un proyecto formal de investigación), sino más bien por su proyección y utilidad práctica (como debe ser todo proyecto de tipo profesional).

Al tenor de los criterios esgrimidos y considerando los cálculos efectuados, podríamos extraer las siguientes recomendaciones a corto y a largo plazo:

- a.- La experiencia ha indicado que las Islas Galápagos es una región rica en heliofauna, y por lo tanto representa un ahorro substancial instalar plantas fotovoltaicas en esa zona, en comparación con otras regiones del Ecuador. De acuerdo a datos

suministrados por profesionales que han trabajado en diseños FV en regiones del Litoral, Sierra y Oriente, hay una notable ventaja con la región Insular en cuanto a radiación solar. Esta diferencia debe ser aprovechada en todos los aspectos, más aun si se desea instalar centros generadores de energía eléctrica no contaminantes en una zona que requiere de un cuidado estratégico y ecológico como es la región Insular.

- b.- Los paneles FV bifaciales representan una ventaja frente a los monofaciales, siempre y cuando comparemos paneles monofaciales y bifaciales de características similares. En la actualidad (1989) existe un auge mundial de la industrialización de paneles monofaciales, e incluso en el Ecuador existe también un mercado propicio para la comercialización de ellos a través de un importante distribuidor local. En efecto, ya es posible conseguir paneles planos monofaciales de alta eficiencia, tal como el modelo M-75 de la firma ArcoSolar. Se puede decir, entonces, que tomando en cuenta las características de área, costo y eficiencia, los paneles bifaciales han perdido te-

rreno en el mercado mundial de los últimos años.

De todas maneras, vale concluir que en lo que concierne a este proyecto, pudo demostrarse una ventaja ahorrativa de 3 a 2 en el número de paneles bifaciales frente a los monofaciales. Esto arrojó un costo total inicial de S/ 318.900.00 sucres para instalar el sistema generador FV con dos paneles bifaciales (cuyo costo promocional era de S/ 63.450.00 sucres/panel). De haberse empleado paneles monofaciales (en un número de 3), el costo total inicial se hubiese elevado aproximadamente a S/ 405.000.00 sucres, a precios de esa época.

- c.- Debe proseguirse la investigación aplicada al estudio de los sistemas fotovoltaicos en zonas rurales. La ESPOL ha desarrollado proyectos de esta clase; pero podría ser interesante ir analizando y resolviendo problemas puntuales que sean de evidente beneficio al agricultor, al empresario rural o a la medicina rural, mediante el uso de plantas de generación fotovoltaica.

El uso de plantas FV no sólo está circunscrito a alimentación de faros marinos, sino a muchísimas otras aplicaciones ya explicadas en el capítulo I de este Informe. A manera de recomendación, vale indicar que será útil realizar estudios previos de la factibilidad de los sistemas en función del tipo de consumo, de la irradiación global disponible en la zona y, en especial, de la distancia de aislamiento entre la zona y la red de electrificación rural, para cada aplicación en particular.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- C.A. Becerra, Dimensionamiento y Rentabilidad de Sistemas Solares Fotovoltáicos para Energización de Estaciones Repetidoras Rurales del IETEL-R2, Informe Técnico, Guayaquil, Marzo, 1986.
- 2.- J.K. Page, "The Estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Shortwave Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitudes 40N-40S", Proc. U.N. Conf. on New Sources of Energy, 4(S98), pp. 378-390, 1961.
- 3.- J.L. Araujo, ed., Electricidad Solar Fotovoltáica: Sistemas Fotovoltáicos Autónomos. Part. 1, Universidad Politécnica de Madrid, España, 1983.



- 4.- M. Pazmiño & M. Tassitore, "Determinación de la Radiación Solar Global en la Región Litoral", Rev. Tecnológica, Guayaquil, pp. 35-60, 2(4), 1981
  
- 5.- Japan Consulting Institute, Project of Institute of Electrification of the Republic of Ecuador (INECEL): Report of Research on Photovoltaic Power Plants for Galapagos Islands, JCI/INECEL, Quito, Enero, 1985.
  
- 6.- C.A. Becerra, Metodología del Estudio sobre un Programa de Preservación de Medicinas y Vacunas de Uso Rural, por medio de Paneles Fotovoltaicos, Informe Interno a la Fundación PVM, Guayaquil, Marzo, 1989.



A.F. 142477