

Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**“ Diseño de un Prototipo Experimental Fotovoltaico de
12 - 18 W. de Células de Silicio Monocristalino,
para el Aprovechamiento de la Energía Solar ”**

T E S I S

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

OSWALDO MORLA MORALES TAQUIRI

PROMOCION : 1984 - 2

LIMA • PERU • 1986

CONTENIDO

	Pág.
PROLOGO.....	1
CAPITULO 1	
1. INTRODUCCION.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.2.1 Razones climáticas.....	4
1.2.2 Razones tecnológicas.....	4
1.3 Objetivos.....	5
CAPITULO 2	
2. EL USO DE LA ENERGIA SOLAR PARA LA CONVERSION FOTOVOLTAICA.....	7
2.1 Sistema de conversión fotovoltaica.....	7
2.1.1 Uso de células solares como elementos de conversión fotovoltaica.....	7
2.1.2 Panel Solar.....	11
2.2 Uso de baterías como elementos de almacenamiento de energía.....	11
2.2.1 Características de las baterías de acumuladores de ácido-plomo.....	12
2.2.2 Factores de más importancia a tener en cuenta en las baterías de acumuladores de ácido-plomo	14
2.2.3 Relaciones de cálculo para la energía acumulada..	15
CAPITULO 3	
3. DISEÑO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	16
3.1 Metodología.....	16
3.1.1 Criterios para el dimensionamiento básico del sistema.....	16
3.1.1.1 Panel Solar.....	16
3.1.1.2 Geometría del Panel Solar.....	16
3.1.1.3 Acumulador.....	16
3.1.1.4 Geometría del acumulador.....	17
3.1.1.5 Reguladores.....	18
3.1.1.6 Elementos complementarios.....	19
3.2 Parámetros de mayor influencia en el diseño del sistema de conversión fotovoltaica experimental	19
3.2.1 Radiación solar.....	19
3.2.2 Carga del sistema ó consumo medio.....	19
3.3 Concepción del sistema experimental.....	19
3.3.1 Partes componentes.....	19
3.3.2 Disposición experimental.....	20
3.3.2.1 Funcionamiento de las partes y el conjunto.....	20

CAPITULO 4

4. PLAN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	24
4.1 Descripción de las experiencias.....	24
4.1.1 Mediciones en las células solares de silicio monocristalino	25
a) Evaluación de la célula solar individual.....	25
b) Evaluación de dos células solares de diferente área conectadas en serie.....	27
c) Evaluación de dos células solares de diferente área conectadas en paralelo	28
d) Evaluación del Panel Solar.....	29
4.1.2 Evaluación de la batería de acumuladores de ácido-plomo	31
a) Proceso de carga	31
b) Proceso de descarga	33
c) Determinación de la resistencia interna de la batería de acumuladores de ácido-plomo	34
4.1.3 Comportamiento del sistema fotovoltaico en un día cualquiera	35
4.2 Metodología del análisis	36
4.2.1 Análisis de la evaluación de las células solares	36
4.2.2 Análisis de la evaluación de la batería de acumuladores de ácido-plomo.....	39

CAPITULO 5

5. ANALISIS DE RESULTADOS	41
5.1 Datos experimentales	41
5.2 Evaluación de los datos experimentales	55

CAPITULO 6

6. PAUTAS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE UNA INSTALACION FOTOVOLTAICA	73
6.1 Características geográficas y climatológicas del lugar donde se va a instalar el sistema fotovoltaico	73
6.2 Estimado del consumo diario de energía	73
6.3 Estimado de la radiación solar que incide sobre el panel	74
6.4 Dimensionado de la batería de acumuladores de ácido-plomo	74
6.5 Selección de controles para el funcionamiento del sistema fotovoltaico	74
6.6 Dimensionamiento del Panel Solar del Sistema Fotovoltaico	75

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

APENDICE

PROLOGO

El trabajo aquí presentado tiene como principal objetivo el de ganar la experiencia necesaria para establecer el criterio técnico de diagnóstico de sistemas de conversión fotovoltaica.

En el Capítulo 1 señalo las ventajas que nos podría significar el logro del dominio de la técnica de la conversión fotovoltaica en el Perú, que cuenta con niveles medios de insolación suficientemente altos como para permitir un aprovechamiento interesante de la energía solar.

En el Capítulo 2 se describe el fenómeno de la conversión fotovoltaica, el uso de células solares como elementos de conversión fotovoltaica, señalándose las características que deben de tener estas células solares y su comportamiento con iluminación y sin iluminación.

También se dan aquí las características de las baterías de acumuladores de ácido-plomo y recomendaciones para el uso adecuado de éstas.

En el Capítulo 3 se describe el diseño del sistema experimental (construcción del panel solar, selección del acumulador, diseño y construcción del regulador de descarga).

Asimismo se describe el funcionamiento de las partes y el conjunto del sistema fotovoltaico.

En el Capítulo 4 se describe el Plan de ensayos experimentales que se van a llevar a cabo para la evaluación de cada uno de los componentes que conforman el sistema fotovoltaico.

Asimismo se describe la metodología que se ha empleado para la evaluación de cada ensayo.

En el Capítulo 5 presentamos los resultados experimentales y la evaluación de cada uno de los componentes del sistema fotovoltaico.

En el Capítulo 6 se dan las pautas fundamentales para el diseño de una instalación fotovoltaica, presentándose un programa en el lenguaje BASIC para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

La elaboración de esta Tesis de Grado a sido posible gracias a la colaboración de las siguientes personas:

Dr. Aníbal Valera Palacios.

Ing. Rafael Espinoza.

Silvio Morales Solórzano.

Arturo J. Morales Taquiri.

Quienes me apoyaron en la culminación satisfactoria de esta tesis.

También quiero darle mi agradecimiento a la Facultad de Física de la UNI a CONCYTEC y a la GTZ quienes me prestaron los implementos necesarios para la construcción y evaluación del sistema fotovoltaico.

CAPITULO 1

1.- INTRODUCCION

Concientes de que en un tiempo previsible se habrán agotado las existencias de petróleo, o que no será siempre posible obtenerlo debido a diversas circunstancias, aparte del excesivo gravamen que para el producto social supone su adquisición, va ganando cada vez más importancia en todo el ámbito mundial la necesidad de asegurar en el futuro el abastecimiento de energía.

La energía solar disponible es técnicamente aprovechable, dentro de las técnicas de aprovechamiento con mayor potencialidad, la misma que ha alcanzado buen desarrollo es la fotovoltaica.

La conversión fotovoltaica puede representar un potencial de desarrollo descentralizado y rural en nuestro medio, permitiendo el levantamiento del nivel de vida de la población campesina y contribuyendo a frenar el fenómeno agudo de migración acelerada que sufre el país.

A la hora de tomar una opción energética debe tenerse en cuenta que toda energía utilizable debe pasar por las sucesivas etapas de descubrimiento, transformación y producción.

Nosotros hemos querido abrir el camino en la evaluación de sistemas fotovoltaicos a través de un análisis cualitativo y cuantitativo.

Nuestro trabajo es de implementar un sistema fotovoltaico en el Laboratorio de la Facultad de Física de la Universidad Nacional de Ingeniería, en donde hemos hecho mediciones intensivas de las características individuales de cada uno de los componentes que conforman el sistema fotovoltaico.

1.1 ANTECEDENTES

Fue Becquerel en 1893 quien descubrió, la transformación de la energía lumínica (solar) en energía eléctrica a través de un efecto fotoeléctrico interno denominado efecto fotovoltaico, con un dispositivo de Selenio obteniendo un rendimiento del 1%. Debido al bajo rendimiento, sólo fue resaltado el aspecto físico. Posteriormente, en 1954, con el crecimiento del Silicio monocristalino, Bell Telephone desarrolla la primera célula solar con un rendimiento del 7%, lo que sirve de base para el relanzamiento de la energía solar y en particular la fotovoltaica, cuyo fuerte desarrollo queda

reflejado en la Tabla 1.

Algunos países están apuntando claramente a satisfacer sus necesidades energéticas por medio del sistema de conversión fotovoltaica, como en el caso del Japón que ha desarrollado un vasto plan en el campo de la energía solar y, en particular, en el campo fotovoltaico que prevee para 1990 una producción de 36W/año, o en el caso de Francia que ha realizado una reestructuración de su plan energético para dar un mayor protagonismo a la energía obtenida a partir de la transformación fotovoltaica, de modo de que en el año de 1985 marque el año cero a partir del cual las necesidades energéticas tienen que ser sustituidas por otro tipo de energía, hasta que se produzcan 10MW/año.

No menos indicativo es el hecho de que todas las compañías productoras de células solares tengan por casa matriz una fuerte Compañía Petrolera como puede verse en la tabla 2.

1.2 JUSTIFICACION

Hay varias razones por las que, un país como el Perú, debe y puede esforzarse por dominar cuanto antes las diversas tecnologías que hace posible la incorporación de las fuentes de energía renovables no tradicionales a su sistema de producción de energía eléctrica.

1.2.1 RAZONES CLIMATICAS

Dada la situación geográfica del Perú, los niveles medios de insolación, medidos por SENAMHI (Tablas 3,4,5,6,7,8,9 del apéndice) para algunas localidades del país, nos dan valores suficientemente altos como para permitir un aprovechamiento interesante de la energía solar.

1.2.2 RAZONES TECNOLOGICAS

La energía solar es tecnológicamente mucho más asequible que otras para la producción de energía eléctrica.

Las ventajas de la conversión fotovoltaica son:

- Una fuente de energía - el sol - gratuita.
- No hay piezas en movimiento lo que elimina el problema del desgaste de las piezas en sistemas clásicos.
- Necesidades de mantenimiento bajas, limitándose a una limpieza periódica de los módulos, y una verificación anual del nivel de electrolito de las baterías.
- Una duración de vida superior a la normal, que llevará a un mínimo de 20 años y más.

1.3 OBJETIVOS

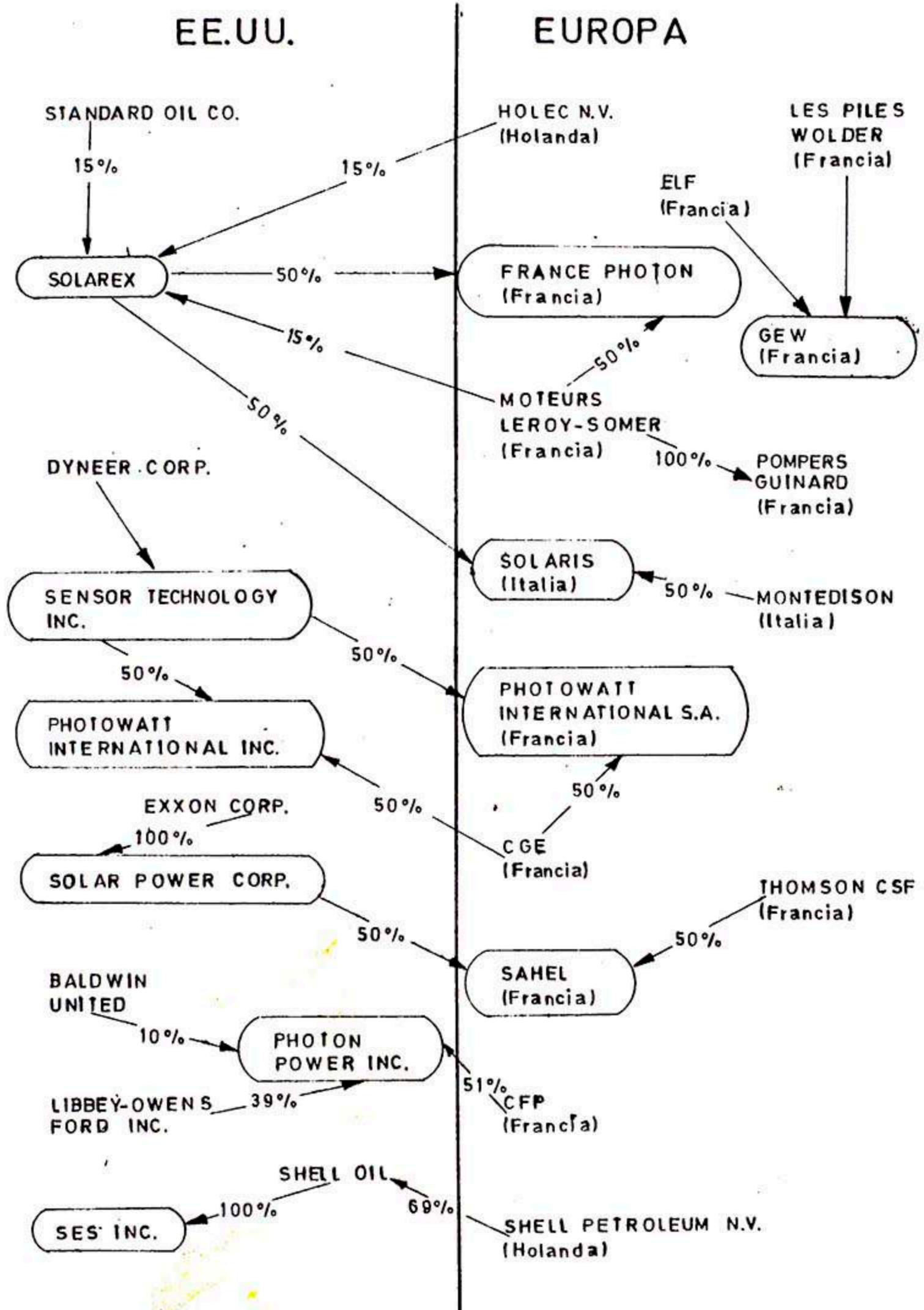
La implementación del sistema fotovoltaico: Panel, Batería y Regulador de descarga, tiene como principal objetivo el de ganar la experiencia necesaria para establecer el criterio técnico de diagnóstico de sistemas de conversión fotovoltaica.

A partir de evaluaciones resultantes y las consideraciones económicas correspondientes sería posible proponer un esbozo de plan nacional fotovoltaico que, dada la importancia y complejidad del mismo, habría que completar y lanzar lo antes posible para no perder, una vez más, la iniciativa en tan vital área energética.

TABLA 1: Desarrollo histórico del efecto fotovoltaico.

1953	Crecimiento de silicio monocristalino (lingote)
1954	Célula solar de silicio (Pearson, Fuller & Chapin)
1955	Célula solar de CdS (Reynolds y Cols)
	Teoría de la célula solar (Pfann & V. Roosbroeck/Prince)
1957	Teoría mejorada de la unión PN (Sah, Noyce & Shockley)
1958	Eficiencia y gap de las células solares (Loferski, Rappaport, Wysocki)
1959	Teoría de la respuesta espectral. Análisis de los mecanismos de pérdidas (Wolf)
1960	Efecto de la resistencia serie. Contactos en peine (Wolf & Rauchenbach)
	Célula de Si N/P resistente a la radiación (Mandelkorn & Kesperis)
1961	Contactos evaporados de Ti-Ag (BTL)
1966	Célula de Si dopada con Li (Wysocki)
1967	Modelo de la célula solar de Cu ² S-Cd (Shiozawa y Cols)
1973	Célula violeta (Lindmayer & Allison)
	Células de N ⁺ -P/P ⁺ "BSF" (Mandelkorn, Lamneck & Scudder)
1974	Crecimiento de silicio EFG (Ciszek)
1975	Célula doble cara (Anwar)
1976	Crecimiento de Si policristalino sobre cinta de grafito
1980	Crecimiento de Si monocristalino CVD en pared caliente (Bloem, Giling)

TABLA 2: CONEXIONES ENTRE LAS INDUSTRIAS FOTOVOLTAICAS DE EUROPA Y E.E.UU. (% de acciones en la creación de la industria)



CAPITULO 2

2.- EL USO DE LA ENERGIA SOLAR PARA LA CONVERSION FOTOVOLTAICA

2.1 SISTEMA DE CONVERSION FOTOVOLTAICA

Se entiende por conversión fotovoltaica la transformación directa de la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (conducción eléctrica) en base a la liberación de electrones por absorción de fotones suficientemente energizados.

La aplicación técnica es posible por ahora sólo con semiconductores y algunos materiales amorfos.

2.1.1 USO DE CELULAS SOLARES COMO ELEMENTOS DE CONVERSION FOTOVOLTAICA

Una célula solar fotovoltaica puede ser definida, en forma muy general, como un dispositivo que absorbe fotones del espectro solar para formar un exceso de carga eléctrica dentro del material, la cual, posteriormente es acelerada por un campo eléctrico interno, generando de este modo un flujo de corriente eléctrica.

En toda transformación se define el rendimiento η como la relación entre la potencia eléctrica máxima a la potencia incidente (solar).

El arte fotovoltaico consiste, entonces en llevar el rendimiento η a sus valores más altos por el método más económico posible.

Para ello deberán de tenerse en cuenta una serie de factores como son:

- a) Material
- b) Campo eléctrico separador
- c) Contactos eléctricos
- d) Capa antirreflectiva

El material deberá cumplir las siguientes condiciones:

- Que absorba la energía solar en pequeños espesores de material (algunas micras).
- Que la luz interaccione con el material produciendo cargas positivas y negativas, y que dichas cargas tengan una duración tal que puedan llegar a la zona del campo eléctrico separador.

Entre los materiales existentes, cumplen estos requisitos los semiconductores y algunos materiales amorfos. Estos materiales tienen una zona de energía prohibida (gap) que

determina el rendimiento teórico máximo del dispositivo, pues fotones de una energía menor que la energía del "gap" no pueden crear pares de cargas en el semiconductor. De esto se deduce que los materiales más adecuados tendrán un "gap" comprendido entre 0.9 y 1.5 eV. De dichos materiales, los que tienen el suficiente desarrollo tecnológico son el GaAs, PIn y Si monocristalino, policristalino y amorfo.

Los parámetros correspondientes al material base son: anchura de la banda prohibida, resistividad y espesor.

En cuanto al campo eléctrico separador, que es la parte activa del dispositivo, se puede crear en los semiconductores por la presencia de una heterogeneidad en el material. Si la heterogeneidad se produce a nivel de impurezas se dirá que se trata de una homounión, y en caso de que la heterogeneidad se debe a constituyentes se tratará de una heterounión. La intensidad del campo eléctrico nos va a definir su capacidad de transformación, por lo que se sugieren campos altos. La homounión se consigue dopando fuertemente con impurezas donadoras si el material base es receptor o viceversa.

En el caso de una heterounión se juega con la diferencia de estructura del material, aunque los campos son algo más pequeños. Sin embargo, desde el punto de vista óptico puede tener ventajas, ya que uno de los semiconductores puede ser transparente y el otro absorbente.

Los parámetros a destacar son:

Profundidad de difusión y concentración máxima de difusión.

En cuanto a los contactos colectores deberán ser óhmicos y con una resistencia de contacto baja, menor de 1 ohm.

Los parámetros son la resistencia serie y el espesor del material.

En cuanto a la capa antirreflectiva sabemos que los materiales semiconductores escogidos reflejan la radiación solar en un 31% para longitudes de onda largas y en un 52% para las cortas. Esto se puede corregir empleando una capa antirreflejante de espesor conveniente para que la reflectividad sea mínima para fotones correspondientes al máximo de intensidad del espectro solar .

Después de haber desarrollado el análisis cualitativo pasamos al análisis cuantitativo para lo cual es necesario establecer una relación entre los modelos tecnológicos y los modelos eléctricos de la célula solar (simulación) tanto en la oscuridad como en el estado de iluminación. En la oscuridad las homouniones son diodos

cuyas curvas características I-V se rigen por la ecuación empírica:

$$I = I_0(\exp(eV/\gamma KT) - 1)$$

donde:

I: Corriente del diodo
 I₀: Corriente de saturación
 e: Carga del electrón
 V: Tensión sobre el diodo
 γ: Factor de calidad del diodo (comprendido entre 1 y 2)
 K: Constante de Boltzmann
 T: Temperatura absoluta (K)

Si se ilumina la célula solar los fotones (cuantos de luz) de energía $h\nu > E_g$ van a ser absorbidos, llevando electrones de la banda vacía a la banda llena. Si este proceso tiene lugar cerca a la juntura entonces los portadores de carga minoritarios de un lado (electrones del lado p y huecos del lado n) van a ser llevados hacia el otro lado de la juntura por el campo eléctrico interno existente. Es decir en un diodo iluminado se produce una corriente eléctrica.

Esta fotocorriente es de sentido contrario a la corriente de polarización directa. Por esto la curva característica del diodo con iluminación debe tener la siguiente ecuación:

$$I = I_0(\exp(eV/\gamma KT) - 1) - I_f$$

donde:

I_f: Fotocorriente
 V: Fotovoltaje

El fotovoltaje aparece, debido a que al llegar los portadores minoritarios a la otra zona compensan cierto número de cargas iónicas de la red, disminuyendo así la barrera de potencial establecida provocando un desnivel de potencial, lo que constituye el fotovoltaje.

Las curvas que corresponden a la ecuación del fotodiodo se representan en la figura 1, sin iluminación y con iluminación.

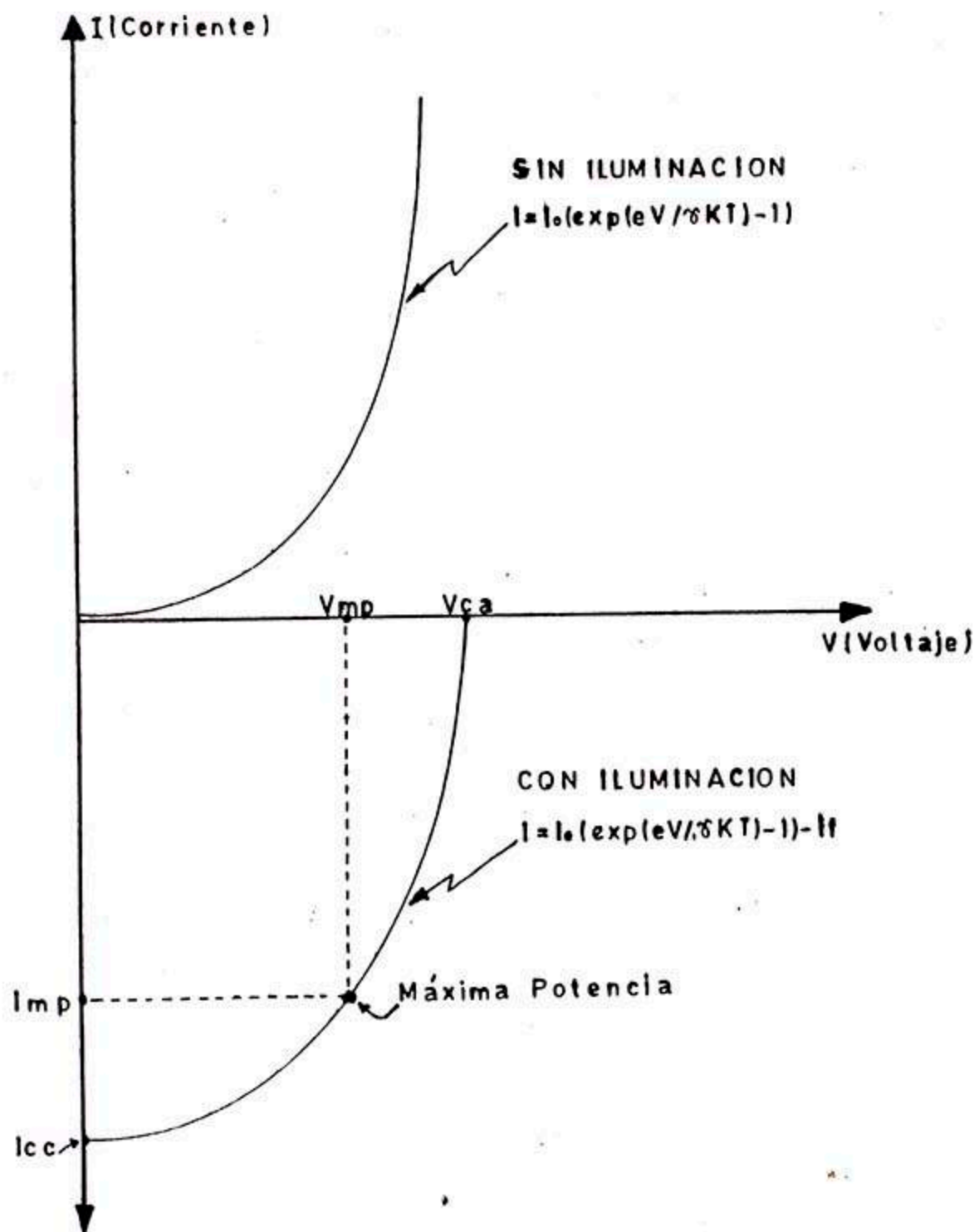


FIG. 1: Curvas características de la célula solar con y sin iluminación.

La curva característica de la célula solar bajo iluminación da los siguientes puntos característicos.

V_{ca} : El fotovoltaje a circuito abierto, cuyo valor está dado por:

$$V_{ca} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_f}{I_0} \right)$$

I_{cc} : Fotocorriente de corto circuito, cuyo valor está dado por:

$$I_{cc} = I_f \alpha$$

$I_{mp}V_{mp}$: Potencia máxima. Si se grafica a la vez la potencia fotoeléctrica $I.V$ se observa que existe un máximo para una fotocorriente I_{mp} y un fotovoltaje V_{mp} , este último muy cerca del fotovoltaje a circuito abierto. En este punto mp : ($I_{mp}V_{mp}$), la célula solar da la máxima potencia eléctrica. Por este motivo se escoge una impedancia de carga para que la célula solar trabaje en este punto.

n : Eficiencia de la célula solar, se define como:

$$n = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_s A}$$

donde:

I_s (W/m^2): Intensidad de radiación solar interceptada por la célula solar

A : Area de la célula solar.

2.1.2 PANEL SOLAR

Un generador de energía eléctrica fotovoltaica consta fundamentalmente de un panel solar, cuyo dimensionado correcto va a influir de una manera mayor en la fiabilidad del sistema.

Para un dimensionado aproximado se parte de los siguientes datos:

Partiremos 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, deberemos estimarlos a partir de los de zonas de clima, latitud y temperatura similares.

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

Con estos dos datos se puede dimensionar en forma aproximada el panel solar.

2.2 USO DE BATERIAS COMO ELEMENTOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

A menudo, el almacenamiento de la energía en baterías es indispensable para el éxito de los sistemas fotovoltaicos.

Durante la luz diurna, los módulos solares recargan las baterías, de forma que éstas puedan proveer energía

eléctrica durante la noche y durante días nublados.

Las baterías industriales que en la actualidad ofrecen el mayor rendimiento son las baterías de acumuladores de ácido-plomo.

2.2.1 CARACTERISTICAS DE LAS BATERIAS DE ACUMULADORES DE ACIDO-PLOMO

Cuando el acumulador está cargado, el material activo es peróxido de plomo en la placa positiva y plomo esponjoso en la placa negativa. El electrolito es una solución acuosa de ácido sulfúrico. La concentración del electrolito se expresa mediante su peso específico, que es la relación entre el peso de un volumen determinado de electrolito y el de igual volumen de agua. El ácido sulfúrico concentrado tiene un peso específico de 1.830; el agua tiene un peso específico de 1.000. El ácido sulfúrico y el agua se mezclan en la proporción adecuada para que la mezcla tenga el peso específico que se desee.

Cuando la batería está completamente cargada, todo el material activo de la placa positiva es peróxido de plomo y todo el material activo de la placa negativa es plomo esponjoso, La concentración de ácido en el electrolito es máxima y, por lo tanto, lo es también su peso específico. El material activo de ambas placas es poroso, de manera que tiene cualidades de absorción semejantes a la de una esponja, y por ello los poros se llenan con el electrolito. Cuando la batería se descarga, el ácido que está dentro de los poros, se separa del electrolito para formar un compuesto químico con el material activo de las placas, cambiándolo en sulfato de plomo. Cuando continúa la descarga, entra más electrolito en los poros del material activo y se va formando más sulfato.

Puede comprenderse perfectamente que, a medida que el proceso avanza, el peso específico del electrolito disminuye progresivamente, ya que la proporción de ácido que existe en él es cada vez menor. En la carga ocurre lo contrario: el ácido sulfúrico que al final de la descarga se ha transformado en sulfato de plomo, se regenera. Este aumento en la concentración de ácido sulfúrico hace que el peso específico aumente, y continúa aumentando hasta que todo el ácido sulfúrico esté otra vez en el electrolito. A partir de este momento, por mucho que se continúe la carga, el peso específico permanecerá constante, ya que todo el ácido sulfúrico está ya en el electrolito, y puede decirse que la batería está completamente cargada. El material de la placa positiva es otra vez peróxido de plomo y el de la negativa plomo esponjoso; el peso específico es máximo.

La figura 2, que muestra un acumulador cargado, en

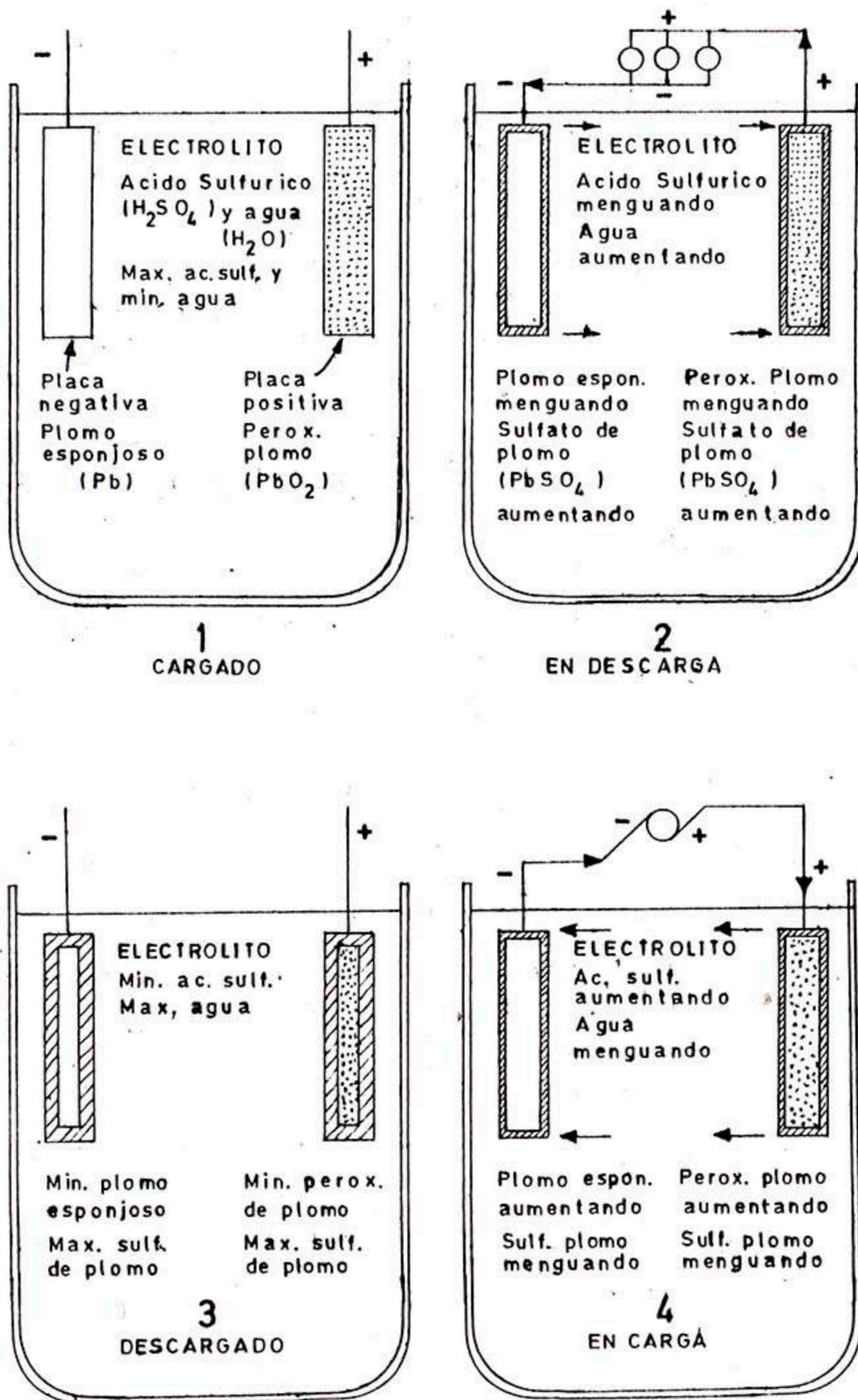


FIG. 2: REACCIONES QUIMICAS DEL ACUMULADOR DE PLOMO EN LA CARGA Y EN LA DESCARGA.

período de descarga, descargado y en período de carga, ilustra claramente la acción química que se produce durante la carga y la descarga.

2.2.2 FACTORES DE MAS IMPORTANCIA A TENER EN CUENTA EN LAS BATERIAS DE ACUMULADORES DE ACIDO-PLOMO

La capacidad útil en amperios-hora de una batería de acumuladores depende del régimen de descarga, y es mayor si la descarga es continua y de un valor moderado o es intermitente si la descarga es muy alta y de corta duración.

En caso de emergencia, si una batería es descargada por completo, el perjuicio permanente que puede ocasionársele se reducirá bastante si se le recarga inmediatamente.

El descenso de peso específico del electrolito no puede ser mayor que un valor preestablecido, el cual varía con el tipo de acumulador y viene indicado por el fabricante.

Una batería debe, desde luego, cargarse con corriente continua, y la corriente debe conducirse de manera que pase por ella en el sentido adecuado. El polo positivo de la fuente de carga debe conectarse al terminal positivo de la batería, y el polo negativo de la fuente al terminal negativo de la batería.

Una batería considerablemente descargada puede cargarse con una gran intensidad de corriente, pero, a medida que la carga va progresando la corriente tiene que disminuirse, pues, si se mantiene una corriente elevada, sólo una porción de la misma se empleará en desalójar el ácido de la placas, y la corriente sobrante servirá para descomponer el agua del electrolito en oxígeno e hidrógeno, que se desprenden como gases.

El desprendimiento de gases de la batería sirve, por lo tanto, para indicar en todo momento si la intensidad de carga es adecuada o demasiado elevada. Consecuentemente, cuando el acumulador produzca burbujas en la carga, debe reducirse la intensidad para no desperdiciar corriente. Además, la acción de las burbujas que se escapan de los poros de la placa produciendo ebullición en la parte superior del electrolito, tiene la tendencia a arrastrar material activo de las placas, especialmente la positiva.

Es bien conocido el hecho de que las baterías se gastan. Este desgaste puede apreciarse especialmente en el electrodo positivo, cuyo material activo se reblandece con el uso, y si no fuera por este hecho inevitable, la duración de las baterías sería mucho más larga de lo que es hoy día. Como el material de la placa se reblandece con el uso, el que está situado en la superficie de la

placa tiene tendencia a caer en el fondo del vaso formando un sedimento. La acción del gas al escaparse de los poros de las placas, y los remolinos que se crean en el electrolito al ascender las burbujas hacia la superficie, activan la caída de material y acortan la duración de la batería.

Las baterías de acumuladores de ácido-plomo se mantienen fácilmente en buenas condiciones durante largo tiempo, prestando servicios sin averías, si se siguen las siguientes instrucciones de entretenimiento.

- 1.- Mantener limpio el exterior de la batería.
- 2.- Añadir agua a intervalos de tiempo regulares.
- 3.- Mantener la batería en un buen estado de carga.
- 4.- Llevar una hoja de servicio escrita.

2.2.3 RELACIONES DE CALCULO PARA LA ENERGIA ACUMULADA

RENDIMIENTO.- Es la relación entre la energía que suministra el acumulador o batería de acumuladores y la que hace falta suministrarle para recuperar el estado inicial, bajo condiciones específicas de temperatura, intensidad y tensión final.

RENDIMIENTO DE TENSION.- Es la relación entre la tensión media durante la descarga y la tensión media durante la carga.

RENDIMIENTOS EN VATIOS-HORA (RENDIMIENTO ENERGETICO).- Es la relación entre los vatios-hora que proporciona la batería en la descarga y los necesarios para la carga.

CAPITULO 3

3.- DISEÑO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

3.1 METODOLOGIA

Para el diseño experimental se ha tenido en cuenta que estamos utilizando células solares de silicio monocristalino de 70 cm² de área a las que se sujetan en sus caras contactos fabricados de un compuesto de plata altamente conductor.

Típicamente, estas células solares generan más de un amper a 0.45 Volt a máxima potencia y bajo una intensidad de radiación solar de 1000W/m².

3.1.1 CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO BASICO DEL SISTEMA

3.1.1.1 PANEL SOLAR

Dado las características de la célula solar a emplear se ha adoptado la tensión del panel solar a máxima potencia en aproximadamente 14 voltios para el funcionamiento sobre una batería de 12 voltios con 1 voltio de caída de tensión en el diodo antiretorno y el cableado.

Se ha utilizado dobles tiras de cobre bañadas en estaño que permite que los circuitos hagan conexiones redundantes tanto en la parte anterior como en la parte posterior de cada célula solar.

3.1.1.2 GEOMETRIA DEL PANEL SOLAR

Configuración de células solares: 34 en serie.

Longitud: 965 mm.

Ancho: 550 mm.

Profundidad: 30 mm.

Peso: 6 Kg.

3.1.1.3 ACUMULADOR

Se está utilizando una batería de acumuladores de ácido-plomo, que tiene débil tasa de autodescarga permitiendo almacenar la energía para el consumo nocturno

y diurno cuando la radiación solar es insuficiente.

3.1.1.4 GEOMETRIA DEL ACUMULADOR

Las características de la batería de acumuladores marca ETNA son las siguientes:

Batería de: 12 Voltios.

tipo: S-11

Placas por celda: 11

Total de placas: 66

Amper-hora: 70

Largo: 305 mm.

Ancho: 170 mm.

Alto-Poste: 225 mm.

Peso: 17.400 Kg. (secas)
24.200 Kg. (cargadas)

Cantidad de solución electrolítica (1.225): 5.200 ltrs.

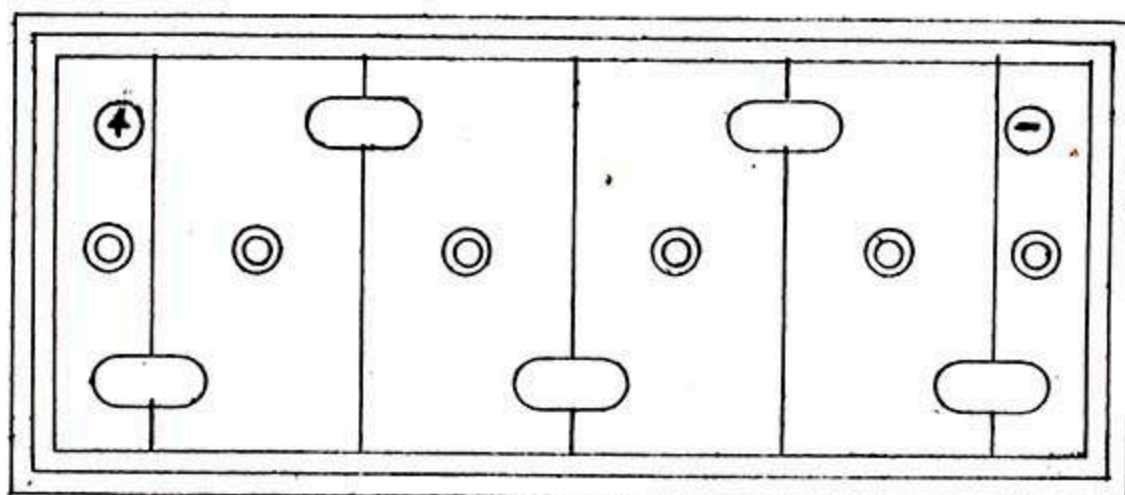


FIG. 3: Posición de postes positivos y negativos de la batería de acumuladores de ácido-plomo.

3.1.1.5 REGULADORES

Para el buen funcionamiento de la batería se requiere el uso de reguladores que aseguren la mayor protección de la batería cargada por un generador fotovoltaico.

Los reguladores deben cumplir con las siguientes funciones:

- LIMITACION DE LA CARGA DE LA BATERIA para evitar su rápida destrucción por una carga que sobrepase los valores límites autorizados.
- CONTROL DE FIN DE DESCARGA para evitar la descarga completa de la batería y su destrucción.
- PUESTA EN "FLOATING" CONTROLADA DE LA BATERIA en el caso en que esté cargado y que el panel solar siga produciendo energía, (modo rebosamiento). El regulador debe mantener la batería en su tensión de equilibrio (aproximadamente 2.22 V. por elemento de 2 V. nominales).

Paralelamente el panel solar debe ser acoplado a una carga de alta impedancia y la energía producida es repartida entre una corriente muy baja de mantenimiento en las baterías y una carga de tipo resistiva. Las ventajas de esta solución son las siguientes:

- Mayor duración de vida útil de la batería que ya no es solicitada en modo rebosamiento (este modo puede acontecer durante gran parte del año).
- Consumo reducido de electrolito, lo que reduce el mantenimiento.
- Gran sencillez de puesta en obra de los reguladores que sólo desperdician en calor una reducida parte de la potencia cresta de los módulos.
- Gran funcionalidad de los reguladores que pueden aceptar una amplia gama de potencia cresta sin modificación.

En nuestro caso debido a que la potencia máxima del panel solar diseñado es de sólo 18 Vatios, se hace innecesaria la presencia del regulador de carga de la batería, pues no va a pasar el valor límite de tensión superior de la batería (12.5 V.), en el peor de los casos la potencia generada va a servir para mantener en estado de "floating" a la batería.

Para controlar la descarga si es necesaria la existencia de un regulador automático de descarga, cuyo diseño y funcionamiento se describe en 3.3.2.1.

3.1.1.6 ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS

Como piezas complementarias se han utilizado:

- Marco de aluminio
- Terminales para las conexiones eléctricas
- Encapsulamiento en resina de polyester y cara delantera de vidrio.
- Tornillos con tuercas para la sujeción

3.2 PARAMETROS DE MAYOR INFLUENCIA EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONVERSION FOTOVOLTAICA EXPERIMENTAL.

3.2.1 RADIACION SOLAR

Para el diseño experimental hemos tomado como referencia los datos proporcionados por SENAMHI sobre la energía solar disponible en la zona de la Molina según la TABLA 4. Si este sistema se quisiera probar en cualquier otro lugar se tendrá que tener en cuenta este parámetro.

3.2.2 CARGA DEL SISTEMA O CONSUMO MEDIO

Este es otro de los datos imprescindibles, pues, un consumo óptimo de la carga, permite una mejor fiabilidad de funcionamiento y menor batería para la autonomía.

3.3 CONCEPCION DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

3.3.1 PARTES COMPONENTES

La composición del sistema experimental es la siguiente:

- 1) El panel solar
- 2) Batería
- 3) Regulador automático de descarga
- 4) Carga

3.3.2 DISPOSICION EXPERIMENTAL

El siguiente esquema muestra la disposición experimental:

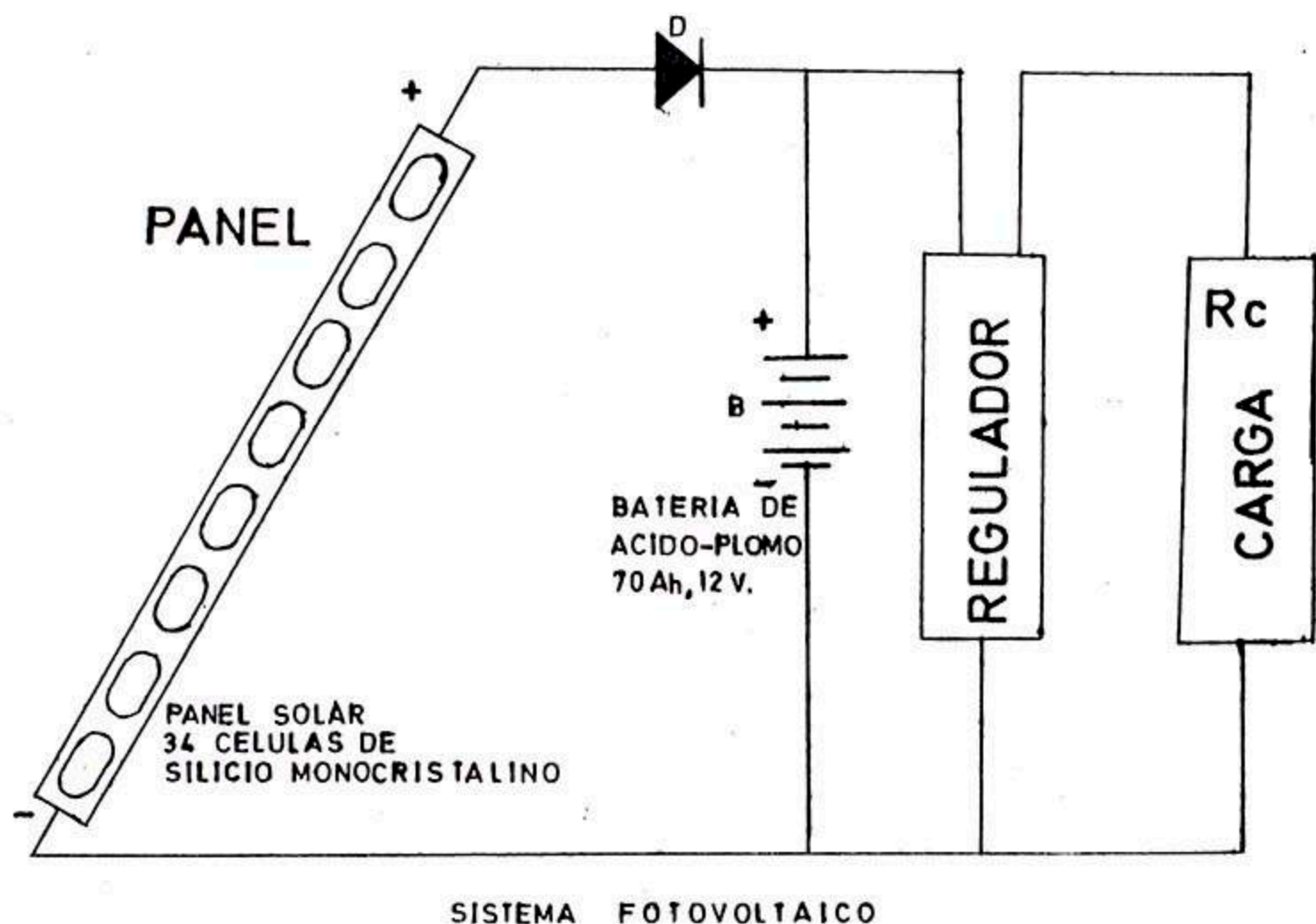


FIG. 4: SISTEMA FOTOVOLTAICO INDEPENDIENTE: PANEL SOLAR, BATERIA, SISTEMA DE REGULACION DE LA BATERIA, DIODO ANTIRETORNO (D) Y CARGA (Rc).

3.3.2.1 FUNCIONAMIENTO DE LAS PARTES Y EL CONJUNTO

El panel solar convierte directamente la energía solar en energía eléctrica. Esta generación de energía eléctrica impone un almacenamiento de energía entre el generador fotovoltaico y el consumo (o carga).

Para el almacenamiento estamos utilizando una batería de acumuladores de ácido-plomo de 70 Ah-12V.

Para evitar la descarga completa de la batería y su destrucción se está utilizando un regulador automático de descarga, para cuyo diseño se ha tomado en cuenta lo siguiente:

- Como se trata de un sistema experimental se está utilizando un relé que conecta y desconecta la carga de la batería, lo cual se puede observar directamente según

la posición de los contactos del relé. Para un diseño posterior se puede utilizar un componente electrónico estático que efectúe la misma función del relé.

- Fijar la tensión de descarga mínima de la batería en 11 Voltios, momento en que debe cesar el paso de corriente hacia la carga.

- Cuando se desconecta la carga de la batería (11 V.), ésta aumenta su tensión hasta un valor inferior a 11.5 Voltios.

El equipo que se va a describir consiste en un regulador de descarga de baterías estándar, la cual desconecta automáticamente la batería de la carga cuando se alcance la tensión mínima fijada, evitando la sulfatación de ésta.

LA LISTA DE MATERIALES ES LA SIGUIENTE:

R1: Resistencia ajustable de 10 K.

R2: Resistencia de 1 K, 1/4 W.

R3: Resistencia de 2 K, 1/4 W.

R4: Resistencia de 680 ohms, 1/4 W.

R5: Resistencia ajustable de 10 K.

R6: Resistencia de 820 ohms, 1/4 W.

R7: Resistencia de 100 K, 1/4 W.

R8: Resistencia de 1 ohm, 100 W.

R9: Resistencia de 60 ohms, 2 W.

C1: Condensador electrolítico 100 uF/25 V.

RL1: Relé Ralux mod. ZV 12 V.

TR1: Transistor BD 136.

CI1: Circuito integrado 741.

D1: Diodo 1N4148.

D3: Diodo zener BZX79 C4V7

D4: Diodo 1N4148.

1 Voltímetro.

1 Circuito impreso.

4 terminales.

1 interruptor simple.

1 interruptor doble.

FUNCIONAMIENTO

Este modelo de regulador de descarga trabaja por el procedimiento de tensión constante. La máxima corriente con que puede trabajar es de 5 Amper.

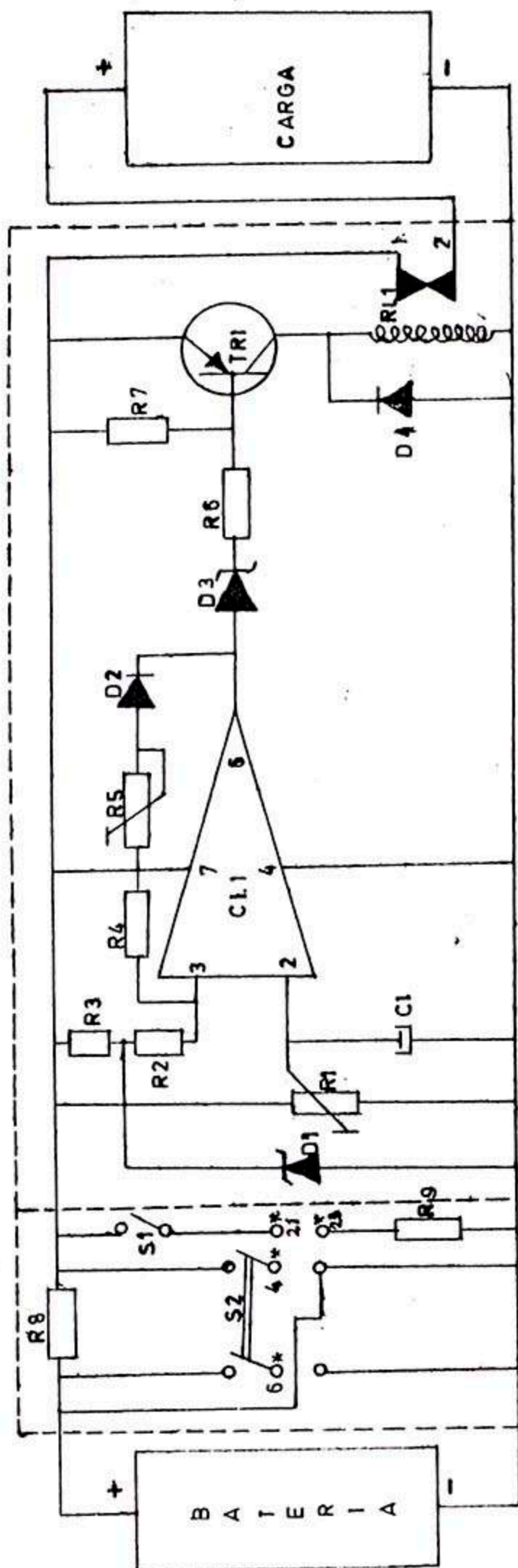
El circuito electrónico que se instala sobre el equipo se alimenta directamente de la tensión de salida de la batería y va analizando la tensión que va adquiriendo la batería. Esta función se realiza mediante la resistencia variable R1 cuyo cursor está conectado a la entrada inversora (patilla 2) del circuito integrado CI1, consistente en un amplificador operacional. La tensión aplicada a la entrada no inversora (patilla 3) es constante y está estabilizada por el diodo zener D1, sirviendo de referencia.

Los ajustes de las tensiones límites superior e inferior se realizan mediante las resistencias variables R1 y R5. La primera controla el valor al cual la batería activa el relé y deja pasar la corriente hacia la carga (aproximadamente 11.5 Voltios) y la segunda sirve para fijar la tensión mínima (aproximadamente 11 Voltios) momento en el cual se desactiva el relé y cesa el paso de la corriente hacia la carga.

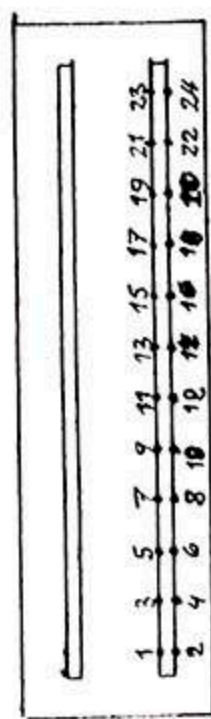
Para determinar el estado de la batería en forma visual se ha adicionado un voltímetro digital al circuito, el cual para su funcionamiento está alimentado por la batería, tal como se muestra en el esquema eléctrico. Sus puntos de medición están conectados en los bornes centrales de un interruptor tipo cuchilla. De acuerdo a la posición del interruptor mide: Tensión de la batería ó corriente que pasa hacia la carga.

La carga que vamos a utilizar va a ser variable. Usaremos un televisor de 12", un ventilador de 12 V., 12 W. y un fluorescente de 20 Vatios.

FIG.5: ESQUEMA ELECTRICO DEL REGULADOR DE DESCARGA DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO-PLOMO



CIRCUITO DE MEDICION / CIRCUITO DE CONTROL DE DESCARGA DE LA BATERIA / MEDICION DE TENSION



VOLTIMETRO

- (p+L : p-6) MEDICION DE TENSION
- (p+21: p-23) SUMINISTRO DE TENSION PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL VOLTIMETRO
- (p (-5V)(ca20mA): 20 : p 2 2(+5V)(ca.20 mA)) TENSION AUXILIAR
- SELECCION DEL PUNTO DECIMAL
- p8-p10 → XXXX.
- p8-p12 → XXX.X
- p8-p14 → XX.XX
- p8-p16 → X.XXX

CAPITULO 4

4.- PLAN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

4.1 DESCRIPCION DE LAS EXPERIENCIAS

Los ensayos a realizarse consisten en evaluar cada uno de los componentes principales del sistema fotovoltaico, bajo diferentes condiciones de trabajo, para poder determinar en cada uno de ellos su eficiencia y así determinar la eficiencia total del sistema.

Las células solares de silicio monocristalino van a ser evaluadas de la siguiente manera:

- a) Célula solar individual.
- b) Dos células solares de diferente área en serie.
- c) Dos células solares de diferente área en paralelo.
- d) Panel Solar.

En los casos a) y d) a la célula solar se le va a someter a diferentes niveles de intensidad de radiación solar, trazándose para cada nivel la curva de corriente versus tensión para diferentes regímenes de carga, para proceder luego a la evaluación de los parámetros principales.

En los casos b) y c) a las células solares se le va a someter a un nivel de intensidad de radiación solar, trazándose primero la curva "IV" para cada célula individual y luego se traza la curva "IV" para la conexión serie o paralelo según sea el caso.

Para los casos a), b) y c) se simuló la radiación solar utilizando una lámpara de descarga especial que tiene un alto aprovechamiento lumínico y una excelente reproducción cromática.

Para el caso d) se usó la radiación solar normal.

Para la evaluación de la batería de acumuladores de ácido plomo, se llevó a la batería hasta la tensión mínima fijada en 11 Voltios y se inició el proceso de carga, utilizando una fuente de corriente continua marca KEPCO como simulador del panel solar.

Para el proceso de descarga de la batería se ha usado una resistencia fijada en 12 ohmios como elemento de carga.

He querido mostrar el comportamiento del sistema fotovoltaico (Panel Solar- Batería- Regulador- Carga) en

un día cualquiera, para lo cual he utilizado un voltímetro registrador de 12 canales marca LINSEIS, que nos grafica el comportamiento de cada componente del sistema fotovoltaico a lo largo del día.

4.1.1 MEDICIONES EN LAS CELULAS SOLARES DE SILICIO MONOCRISTALINO

Como se anunció en 4.1 (descripción de las experiencias), Las células solares de silicio monocristalino van a ser evaluadas en cuatro casos. En cada uno de ellos vamos a determinar en forma experimental, el comportamiento de las células solares bajo determinadas intensidades de radiación solar.

Para una intensidad de radiación solar y temperatura específicas se traza la curva Corriente-Tensión mediante un trazador marca SEFRAM-PARIS.

De esta curva se obtienen tres puntos que definen las características eléctricas de las células solares:

1) El punto de funcionamiento óptimo, en el cual la célula solar libera la máxima potencia ($P_{m\acute{a}x}$). A este punto corresponden valores de tensión V_{mp} (tensión para máxima potencia) y de corriente I_{mp} (corriente para máxima potencia).

2) El punto donde la tensión es nula y el valor de corriente máximo (corriente de corto-circuito I_{cc}).

3) El punto donde la corriente es nula y el valor de Tensión máximo (tensión a circuito abierto).

Además determinaremos el rendimiento y el factor de relleno en cada uno de los casos.

a) EVALUACION DE LA CELULA SOLAR INDIVIDUAL

Equipo que se utilizó:

- Una célula de silicio monocristalino de 70 cm² de área
- Un portacélulas.
- Una lámpara de descarga HQI-E 400 W/DV.
- Un trazador de diagrama: Marca SEFRAM-PARIS.
- Una resistencia variable: 0-5 ohmios.
- Una resistencia fija: 0.01 ohm 1%-100 W. marca KEPCO.

- Un radiómetro: Marca HAENNI MESSGERATE.
Rango: 0-999.9 W/m².
- Un termómetro: Rango (-11.5°C)-(53°C) con divisiones de décimas de grado.
- Una termocupla de Cobre-Constantan.
- Un multímetro digital.
- Cables de conexión.

PREPARACION DEL EQUIPO:

Durante el proceso de conexión se debe verificar que las puntas de los cables de conexión estén perfectamente limpias, en caso de no estarlo tomar una lija de agua y pulirlas, esto se hace para disminuir la resistencia de contacto.

La mica del portacélulas debe ser cuidadosamente limpiada y no debe tocarse con los dedos.

Colocar la célula de forma que quede en forma perpendicular a los rayos luminosos de la lámpara.

Con el radiómetro y la lámpara encendida hacer marcas en la superficie que va a sostener al portacélulas para diferentes niveles de intensidad de radiación de la lámpara (300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800 W/m²).

PROCEDIMIENTO:

Para cada nivel de intensidad de radiación de la lámpara se debe trazar la curva "IV", variando el valor de la resistencia variable desde el valor mínimo hasta el valor máximo. Asimismo se deben tomar lecturas del termómetro (°C) y del voltímetro digital (mV) para cada nivel de intensidad de radiación de la lámpara.

SE FIDE:

Determinar la temperatura de trabajo de la célula solar según la condición de radiación.

Para cada nivel de intensidad de radiación de la lámpara graficar la curva de potencia en función del voltaje.

Graficar la variación de la corriente de corto-circuito, de la potencia máxima y de la corriente para potencia máxima según las condiciones de radiación.

DISPOSICION DEL EQUIPO:

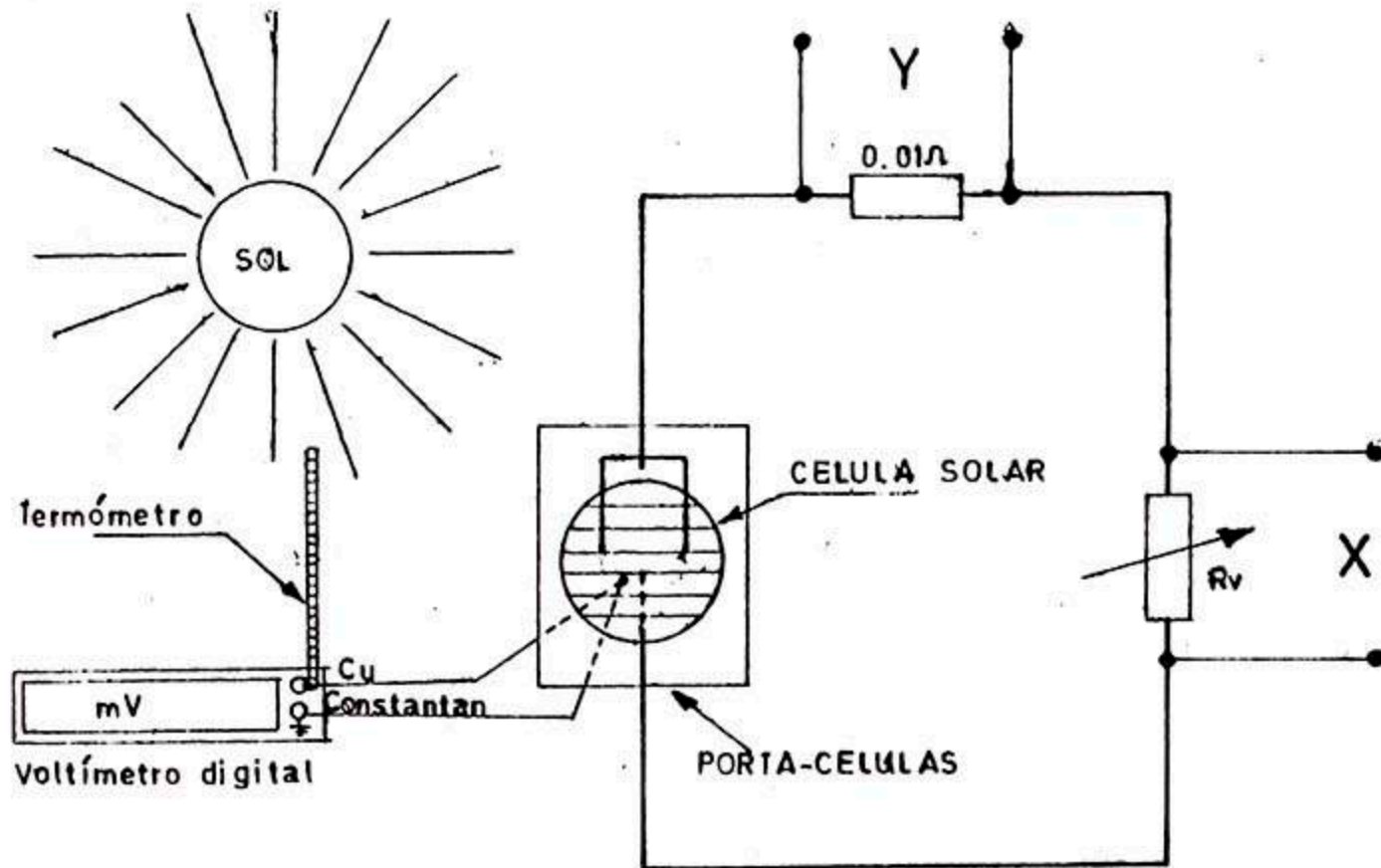


FIG. 6: Disposición del equipo para la evaluación de la célula solar individual. X, Y son los bornes de entrada de tensión al trazador de diagrama.

b) EVALUACION DE DOS CELULAS SOLARES DE DIFERENTE AREA CONECTADOS EN SERIE

Se va a utilizar el mismo equipo de a) a la que se añade una célula solar de silicio monocristalino de 65 cm^2 de área.

PROCEDIMIENTO:

Para un nivel de intensidad de radiación de la lámpara se trazará la curva "IV" primero para cada célula solar en forma individual y luego para la conexión en serie.

SE PIDE:

Graficar la variación de la potencia en función del voltaje.

Analizar los problemas que se podrían presentar en la conexión de dos células solares de diferente área en serie.

DISPOSICION DEL EQUIPO:

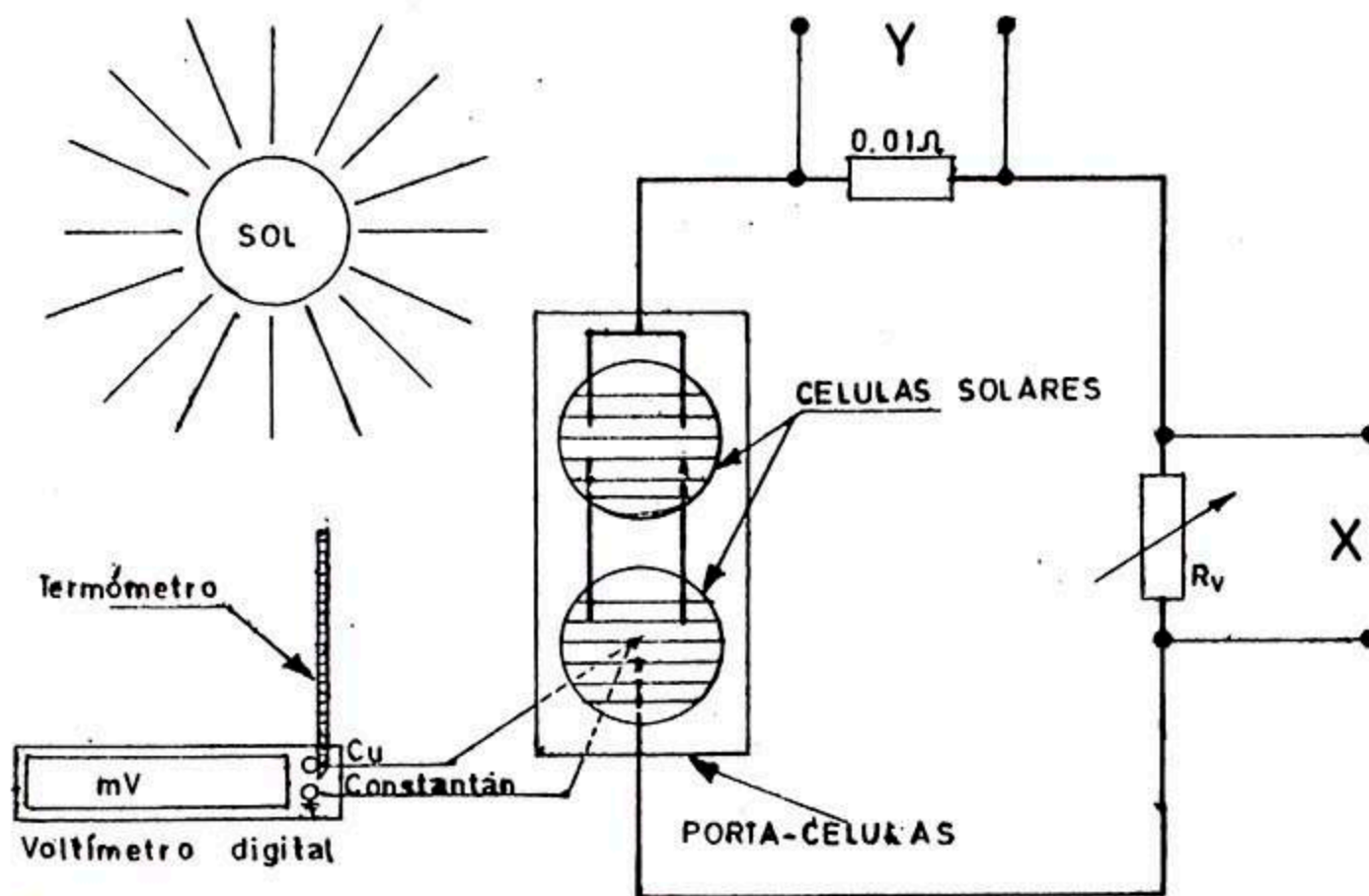


FIG. 7: Disposición del equipo para la evaluación de dos células solares de diferente área conectados en serie. X, Y son bornes de entrada de tensión al trazador de diagrama.

c) EVALUACION DE DOS CELULAS SOLARES DE DIFERENTE AREA CONECTADOS EN PARALELO

Se usa el mismo equipo de b) y sus mismas consideraciones, lo que se cambia es la disposición en la conexión de las células, tal como se muestra en la figura 8.

DISPOSICION DEL EQUIPO:

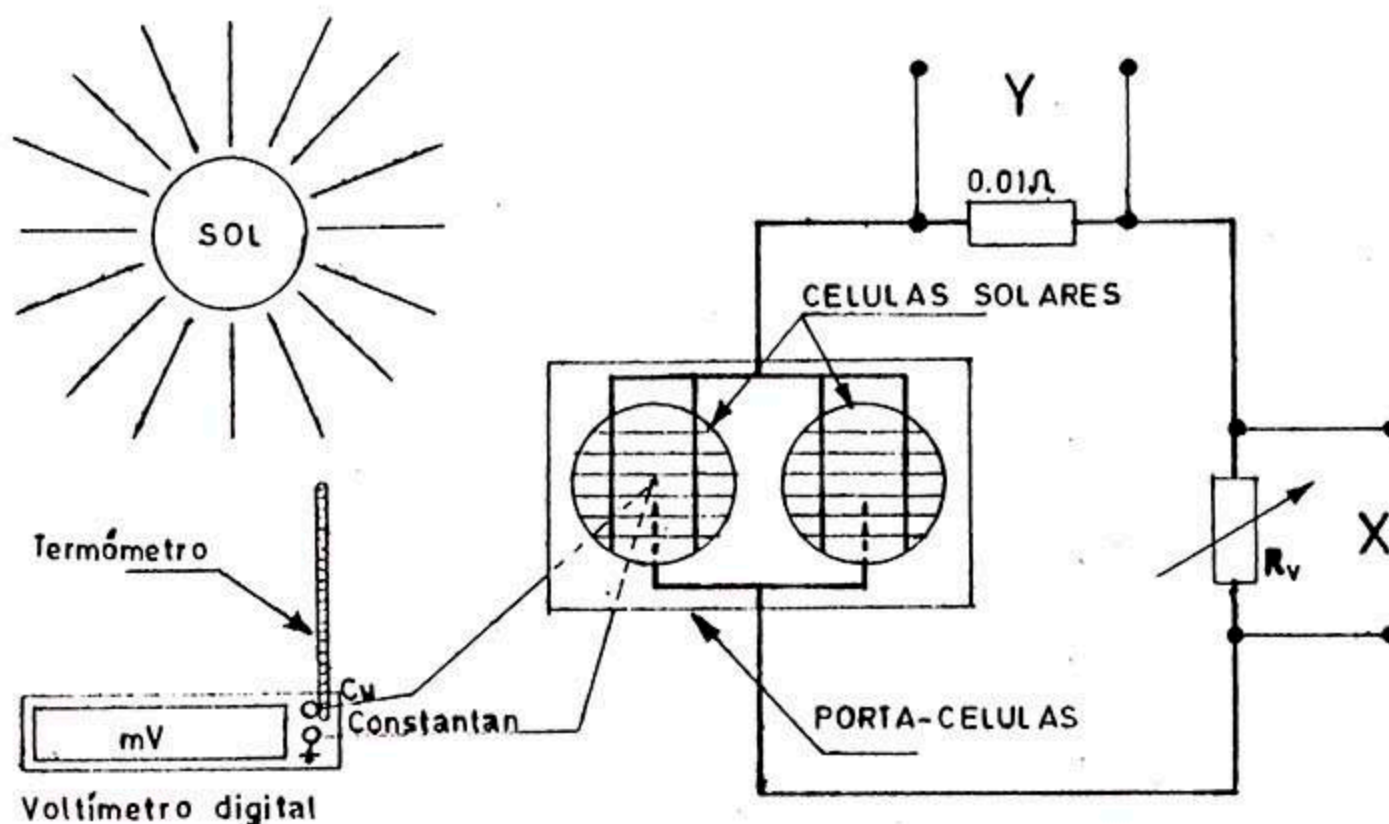


FIG. 8: Disposición del equipo para la evaluación de dos células solares de diferente área conectadas en paralelo. X,Y son los bornes de entrada de tensión al trazador de diagrama.

d) EVALUACION DEL PANEL SOLAR

EQUIPO:

- Un panel solar de 34 células de silicio monocristalino.
- Un sensor de temperatura. Marca AMR (Ahlborn Mess-U. Regelunstechnik).
- Un solarímetro. Marca: Solar 118 (Instruments Haenni Messgeraete).
- Un trazador de diagrama. Marca SEFRAM-PARIS.
- Una resistencia variable de 50 Ohmios.
- Una resistencia fija de 0.01 ohm. 100 W.
- Un multímetro digital.
- Un termómetro.
- Una termocupla de cobre-constantan.

DISPOSICION DEL EQUIPO:

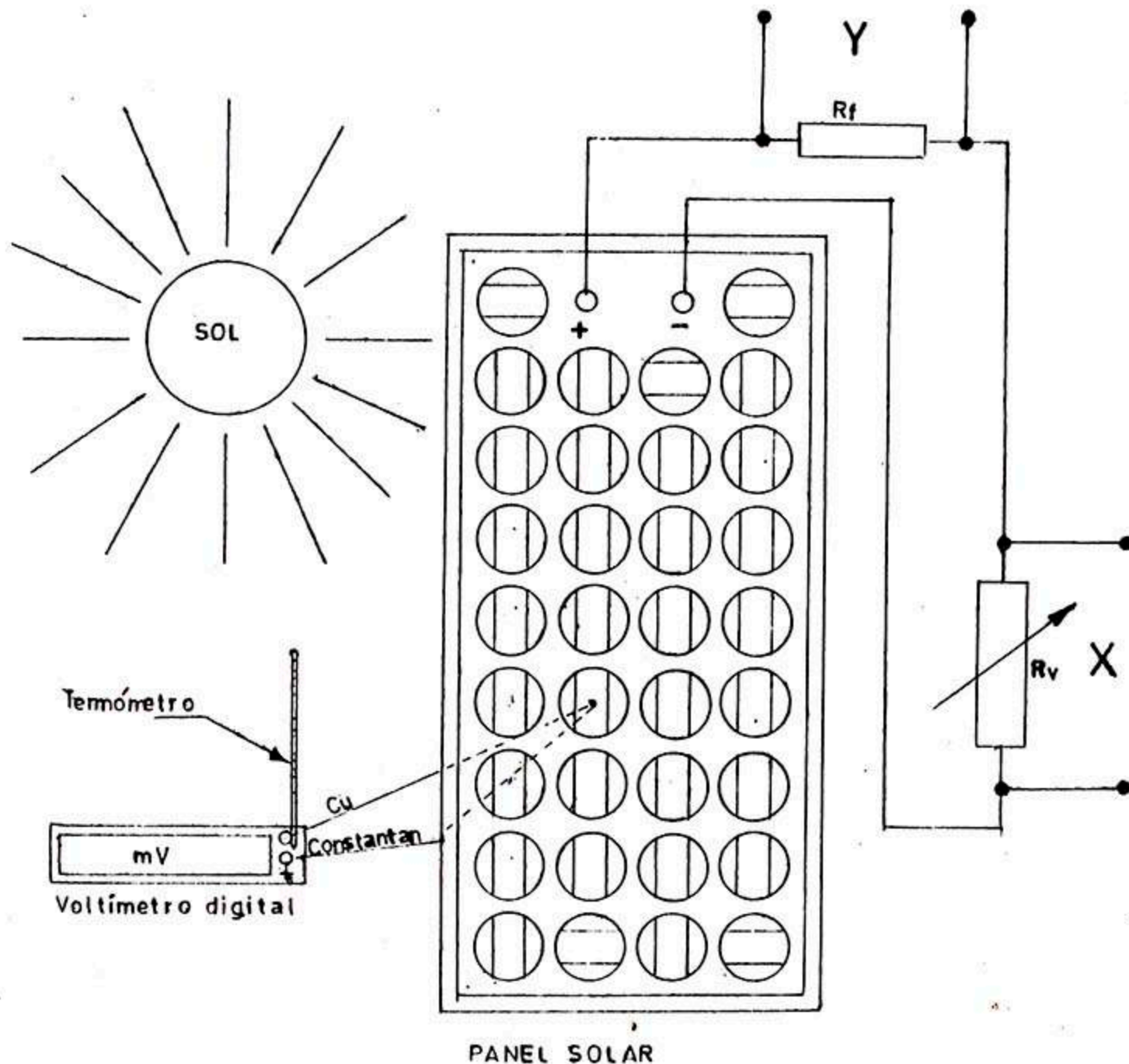


FIG. 9: Disposición del equipo para la evaluación del Panel Solar de 34 células de silicio monocristalino. X, Y son los bornes de entrada de tensión al trazador de diagrama.

PROCEDIMIENTO:

Para un nivel de intensidad de radiación solar dado se debe trazar la curva "IV", variando el valor de la resistencia variable desde un mínimo hasta un máximo.

Tomar datos de temperatura y radiación solar para unas 4 células solares con la termocupla de cobre-constantan.

Utilizando el sensor de temperaturas tomar datos de

temperatura de las 34 células que conforman el panel solar.

SE PIDE:

- Determinar la temperatura promedio de funcionamiento de las células solares que conforman el panel solar para una radiación dada.
- Graficar la curva de potencia en función del voltaje para cada condición de radiación.
- Determinar los puntos característicos del panel solar según las condiciones de radiación

4.1.2 EVALUACION DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO PLOMO

Para la evaluación de la batería de acumuladores de ácido plomo, se han efectuado las siguientes mediciones:

- a) Proceso de carga.
- b) Proceso de descarga.
- c) Determinación de la resistencia interna.

a) PROCESO DE CARGA

EQUIPO:

- Una fuente de corriente continua. Marca KEPCO.
Rango de Voltaje: 0-36 Voltios.
Rango de corriente: 0-15 Amper.
- Una batería de acumuladores de ácido-plomo 70Ah-12V.
marca ETNA.
- Dos multímetros digitales.
- Una resistencia de 0.01 ohms. 100 W.
- Cables de Conexiones.

PROCEDIMIENTO:

Descargar la batería de acumuladores de ácido plomo hasta la tensión de 11V.

Fijar el valor de la tensión de la fuente de corriente continua en aproximadamente 13 voltios, limitando la

corriente hasta un máximo de 2.5 Amper.

De acuerdo a la curva de variación de la corriente producida por el panel a lo largo de un día de "buen sol" tomar intervalos de una hora y de ese intervalo tomar un valor promedio de corriente que debe ser aplicado por la fuente de corriente continua a la batería de acumuladores de ácido plomo.

Tomar lecturas de corriente, tensión inicial y tensión final para cada intervalo.

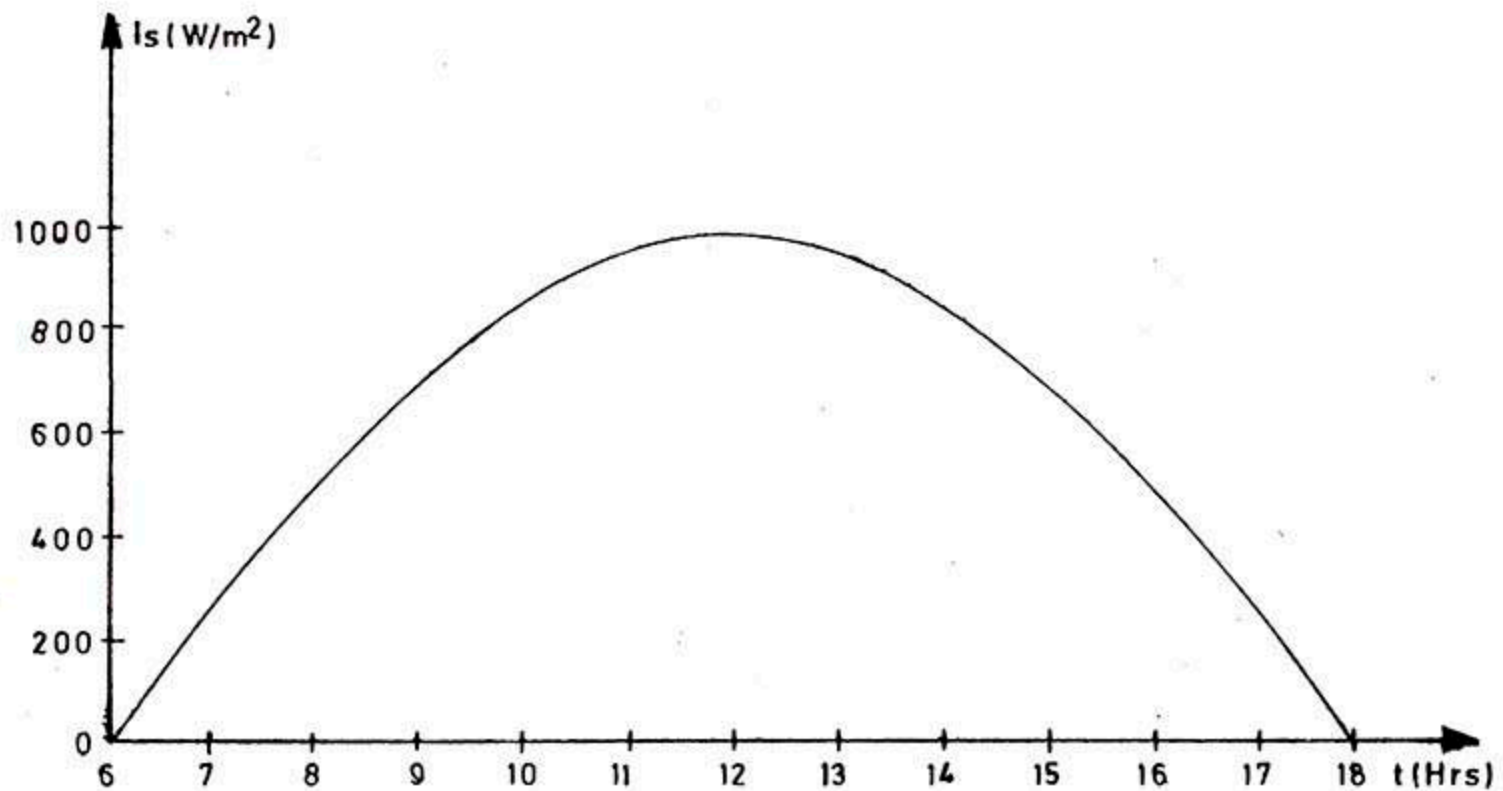


FIG.10: VARIACION DIARIA DE LA INTENSIDAD DE RADIACION SOLAR A LO LARGO DE UN DIA IDEAL.

$$I_s = 1kW/m \cos(\pi/12)(t-12)$$

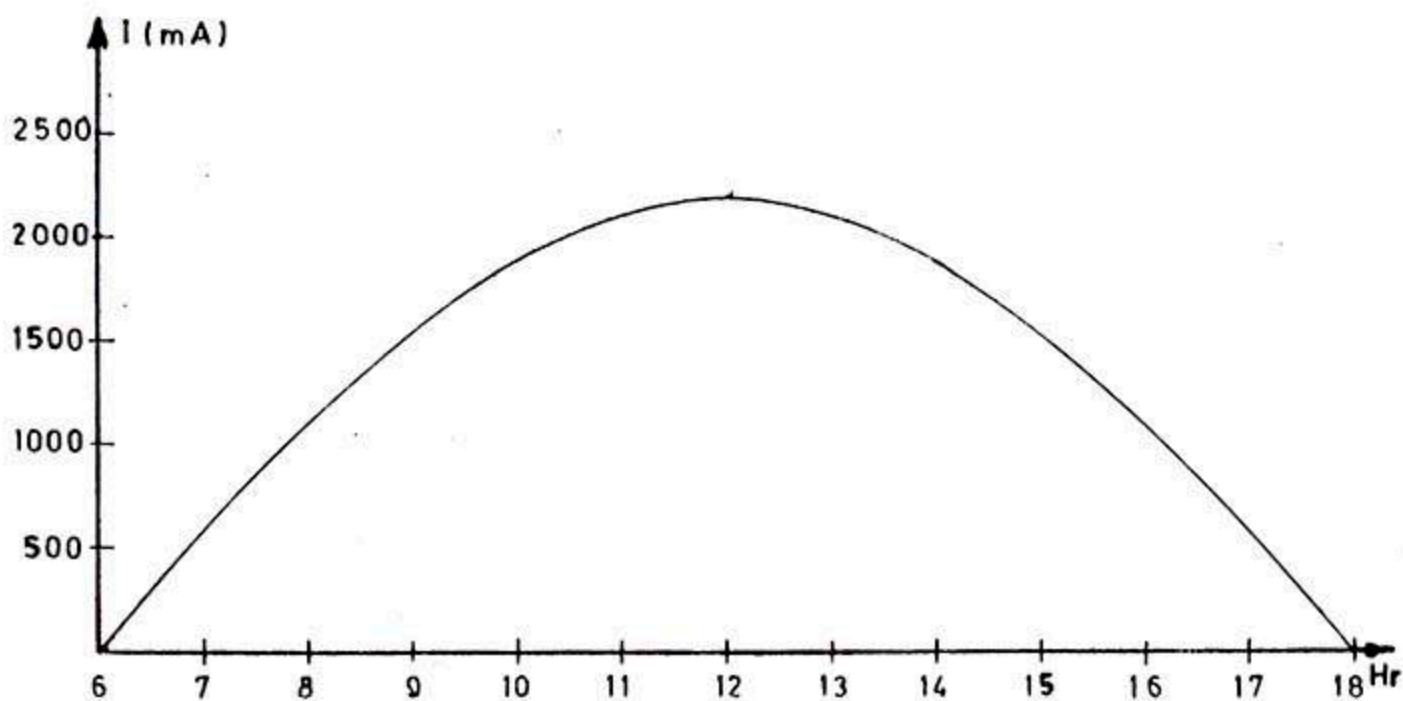


FIG. 11: Variación de la corriente producida por el panel solar a lo largo de un día de "buen sol".

DISPOSICION DEL EQUIPO

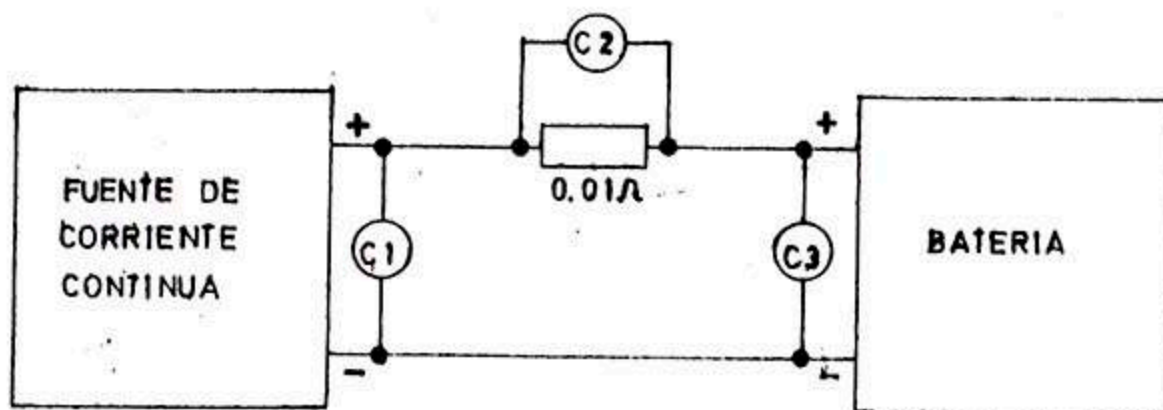


FIG. 12: Disposición del equipo para el proceso de carga de la batería de acumuladores.

SE PIDE:

Con los datos de tensión de la fuente y la corriente aplicada en cada intervalo de tiempo determinar la energía suministrada a la batería.

Con los datos de tensión de la batería durante el proceso de carga determinar la tensión promedio de carga.

b) PROCESO DE DESCARGA

EQUIPO:

- Una batería de acumuladores de ácido-plomo de 70Ah-12V.
- Una resistencia variable de 50 ohms.
- Dos multímetros digitales.
- Una resistencia de 0.01 ohm. 100W.
- Cables de conexión.

PROCEDIMIENTO

Se fija la resistencia variable en 12 ohms.

Se conecta a la batería el regulador de descarga.

Se conecta la resistencia en los bornes de salida del regulador de descarga y con el multímetro medimos la tensión de la batería cada cierto intervalo de tiempo hasta que el relé del regulador de descarga se desconecte, que tendría lugar en la tensión de 11V.

DISPOSICION DEL EQUIPO

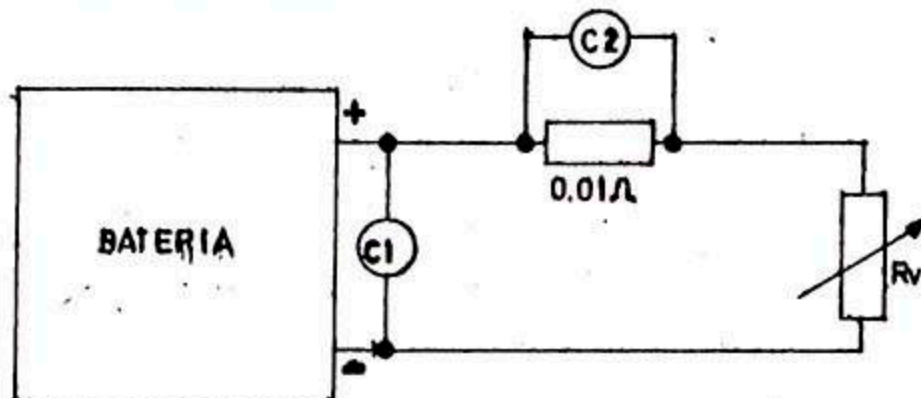


FIG. 13: Disposición del equipo para el proceso de descarga de la batería de acumuladores.

SE PIDE:

Con los datos de la resistencia y de la tensión de la batería de acumuladores de ácido-plomo determinar la energía suministrada a la carga.

Determinar la tensión promedio de descarga.

Con las evaluaciones de a) y b) se pide determinar los rendimientos energéticos y de tensión.

c) DETERMINACION DE LA RESISTENCIA INTERNA DE LA BATERIA DE ACUMULADORES ACIDO-PLOMO

EQUIPO:

- Una batería de acumuladores de ácido-plomo de 70Ah-12V. Marca ETNA.
- Una resistencia Variable de 50 ohms.
- Una resistencia fija de 0.01 ohm. 100 W.
- Dos multímetros digitales.
- Cables de conexión.

PROCEDIMIENTO:

Variar la resistencia hasta aproximadamente 11 ohms y

conectarlo a la batería de acumuladores de ácido-plomo y con la ayuda de los multímetros tomar las lecturas de corriente que va hacia la carga y la tensión de la batería.

Variar la resistencia a un valor menor y repetir el mismo procedimiento señalado líneas arriba.

SE PIDE:

Graficar V_1/I vs R_0 .

La intersección de la recta obtenida con el eje de V_1/I será el valor de la resistencia interna de la batería.

DISPOSICION DEL EQUIPO:

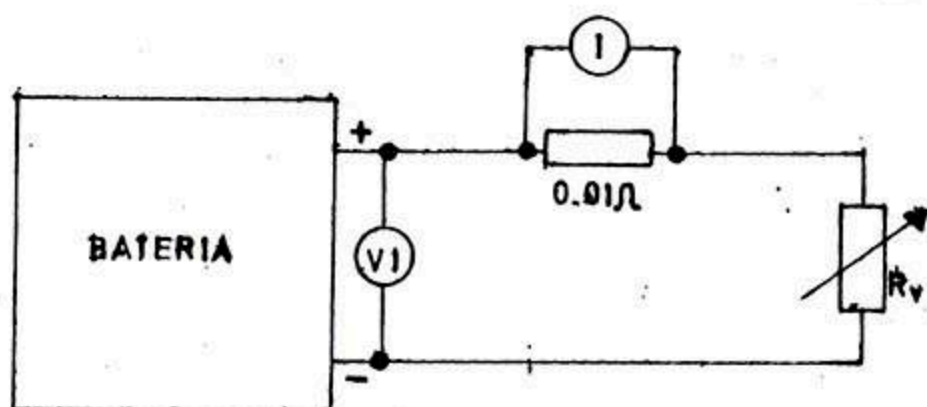


FIG. 14: Disposición del equipo para la determinación de la resistencia interna de la batería de acumuladores.

4.1.3 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE UN DIA CUALQUIERA

Aquí se puede observar en forma gráfica el comportamiento del sistema fotovoltaico en condiciones de trabajo.

EQUIPO:

- Un panel solar de 34 células de silicio monocristalino.
- Una batería de acumuladores de ácido-plomo de 70Ah.12V.
- Un regulador de descarga de 5 Amper máximo.
- Una carga variable.
- Un voltímetro registrador de 12 canales. Marca LINSEIS. Rango: 1mV-500V.

- Una resistencia de 0.01 ohms. 100 W.
- Una resistencia de 0.05 ohms. 100 W.
- Un solarímetro.
- Cables de conexión.

DISPOSICION DEL EQUIPO

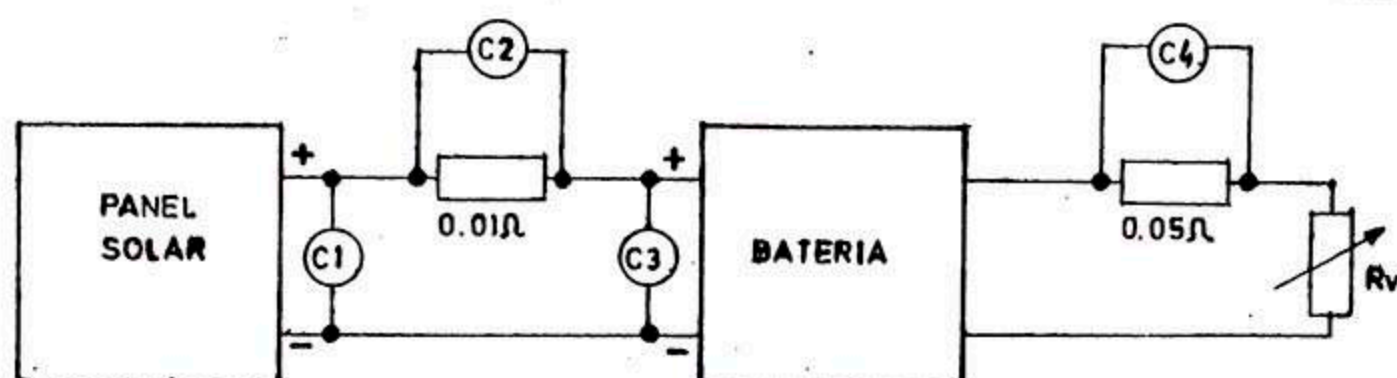


FIG. 15: Disposición del equipo para observar el comportamiento del sistema fotovoltaico en un día cualquiera. C1, C2, C3, C4 son los canales 1, 2, 3, 4 del multímetro registrador.

4.2 METODOLOGIA DEL ANALISIS

Para el análisis del plan de ensayos experimentales se han utilizado los siguientes gráficos y las siguientes relaciones que nos permiten evaluar a cada uno de los componentes del sistema fotovoltaico.

4.2.1 ANALISIS DE LA EVALUACION DE LAS CELULAS SOLARES

a) DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE TRABAJO DE LA CELULA SOLAR

$$T_c = T_a + T_t$$

Donde:

T_c : Temperatura de trabajo de la célula solar ($^{\circ}\text{C}$).

T_a : Temperatura ambiente, leída directamente del termómetro colocado en el borne del multímetro digital ($^{\circ}\text{C}$).

T_t : Temperatura de la termocupla. Los milivoltios del multímetro digital se convierten en grados centígrados según la Tabla para una termocupla de Cobre-Constantan.

b) DETERMINACION DE LOS PUNTOS CARACTERISTICOS, EFICIENCIA MAXIMA Y "FACTOR DE LLENADO" DE LA CELULA SOLAR

Esta se va a realizar a partir del gráfico de corriente (I) versus tensión (V) para un intensidad de radiación solar dada.

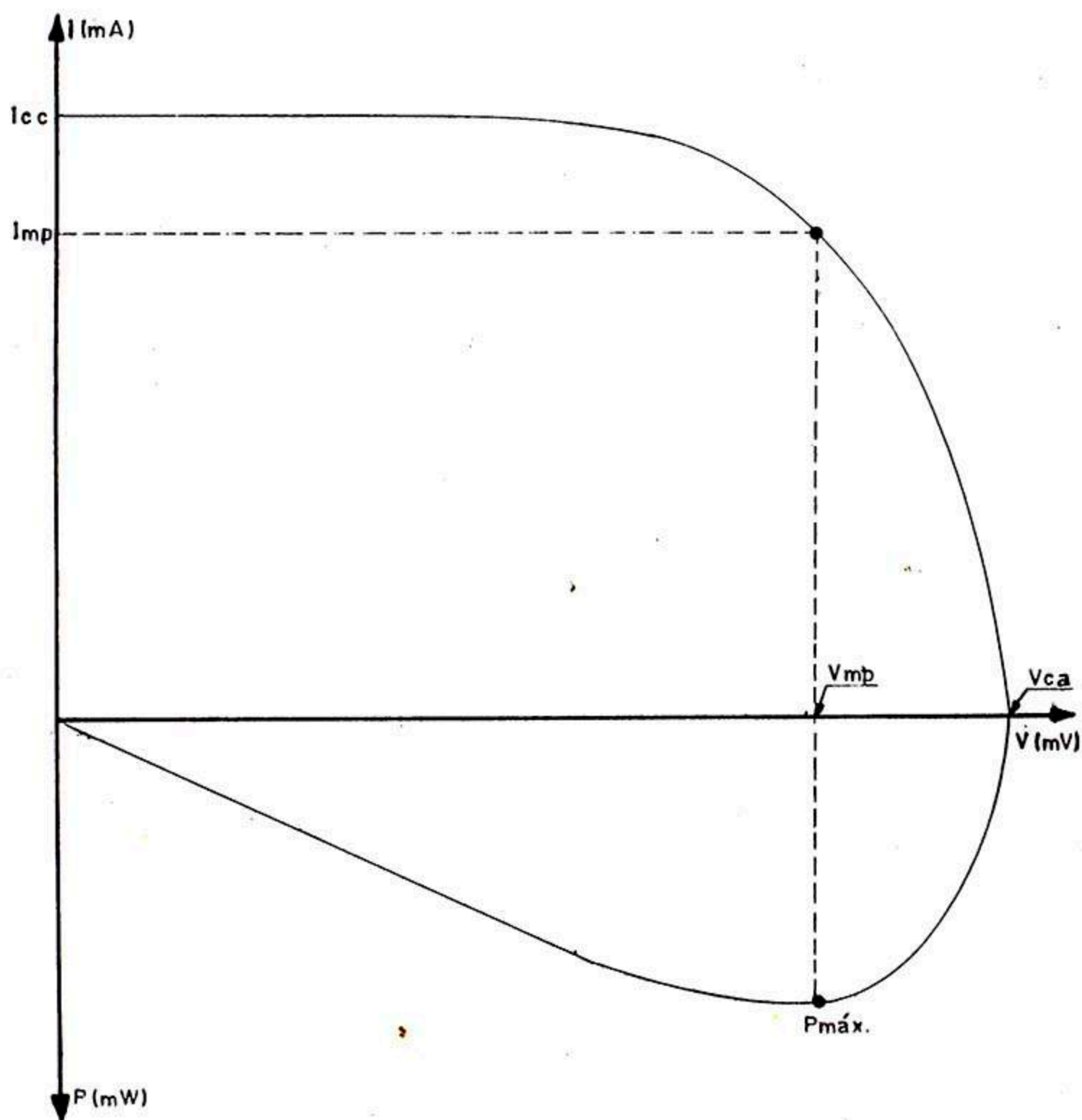


FIG. 16: Curvas IV: $I=I(V)$; $P=P(V)$ y puntos críticos de una célula solar.

Donde:

Vca: Voltaje máximo (voltaje a circuito abierto).

Icc: Corriente máxima (corriente de corto-circuito).

Pmáx: Potencia máxima.

Vmp: Voltaje en potencia máxima.

Imp: Corriente en potencia máxima.

EFICIENCIA MAXIMA:

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{I_m V_m}{n I_s A_c}$$

Donde:

n : Eficiencia máxima.

Pi: Potencia incidente.

n: número de células solares.

Is: Intensidad de radiación solar incidente.

Ac: Area de la célula solar.

FACTOR DE LLENADO

$$FF = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{cc} V_{ca}}$$

4.2.2 ANALISIS DE LA EVALUACION DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO PLOMO.

A. RENDIMIENTO DE TENSION:

$$\eta_v = \frac{V_{md}}{V_{mc}}$$

Donde:

V_{md} : Tensión media durante la descarga.

V_{mc} : Tensión media durante la carga.

B. RENDIMIENTO ENERGETICO:

$$\eta_E = \frac{W_{hd}}{W_{hc}}$$

Donde:

W_{hd} : Vatios-hora que proporciona la batería durante la descarga.

W_{hc} : Vatios-hora necesarios para la carga de las baterías.

C. DETERMINACION DE LA RESISTENCIA INTERNA:

Se parte del esquema trazado en la figura 17.

De este esquema se tienen las siguientes ecuaciones:

$$E_B = I(R_x + R_v)$$

$$\frac{E_B}{I} = R_x + R_v$$

Cuando $R_v \rightarrow 0$

$$R_x = \frac{E_B}{I}$$

Donde R_x viene a ser la resistencia interna de la batería

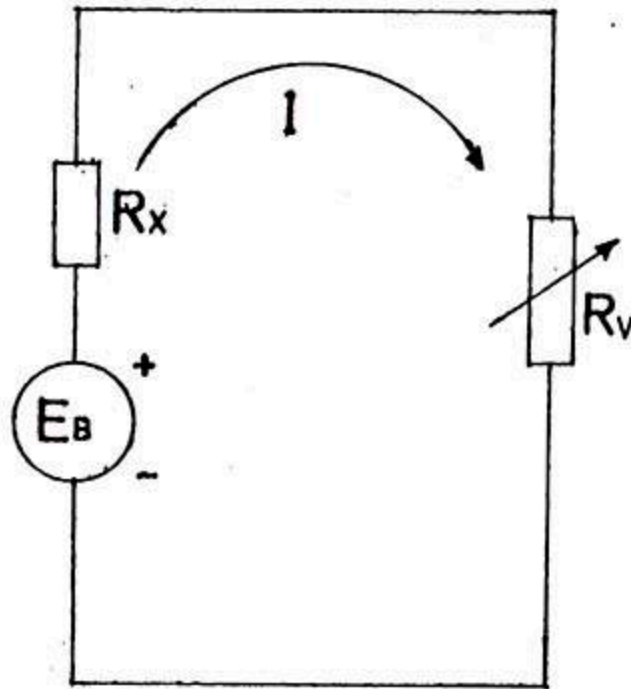


FIG. 17: Esquema para determinar la resistencia interna de la batería de acumuladores de ácido-plomo.

La resistencia interna de la batería también se puede determinar en forma gráfica, tal como se muestra en la figura 18.

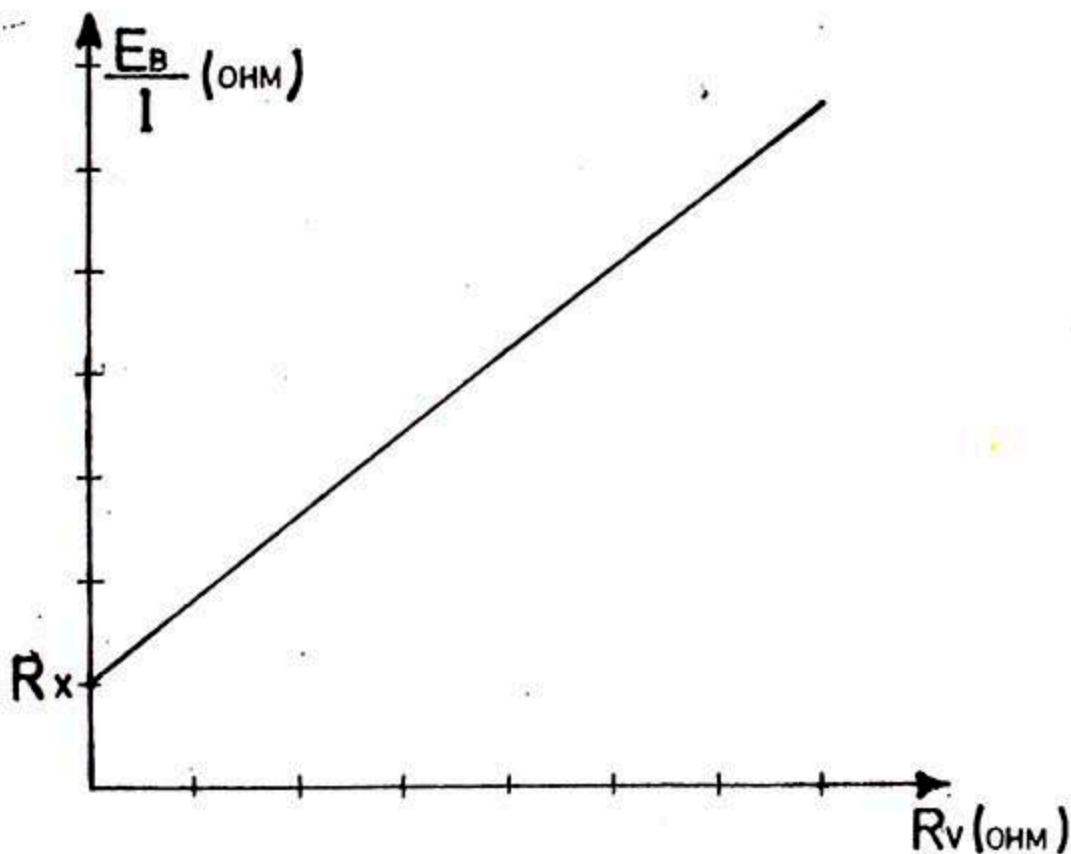


FIG. 18: Determinación gráfica de la resistencia interna de la batería de acumuladores de ácido plomo.

CAPITULO 5

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 DATOS EXPERIMENTALES

a) DATOS Y CURVAS EXPERIMENTALES PARA LA EVALUACION DE LA CELULA SOLAR INDIVIDUAL.

TABLA 10: Datos de la temperatura ambiente y de la termocupla de Cobre-Constantan colocada en la célula solar según las condiciones de radiación.

I_s (W/m ²)	T_a (°C)	T_t (°C)
300	23.5	14.67
350	23.6	15.78
400	23.5	17.88
450	23.5	19.04
500	23.5	20.21
550	23.5	21.45
600	23.4	23.48
650	23.4	24.77
700	23.5	26.13
750	23.4	27.93
800	23.5	29.57

I_s : Intensidad de radiación solar.

T_a : Temperatura ambiente.

T_t : Temperatura de la termocupla.

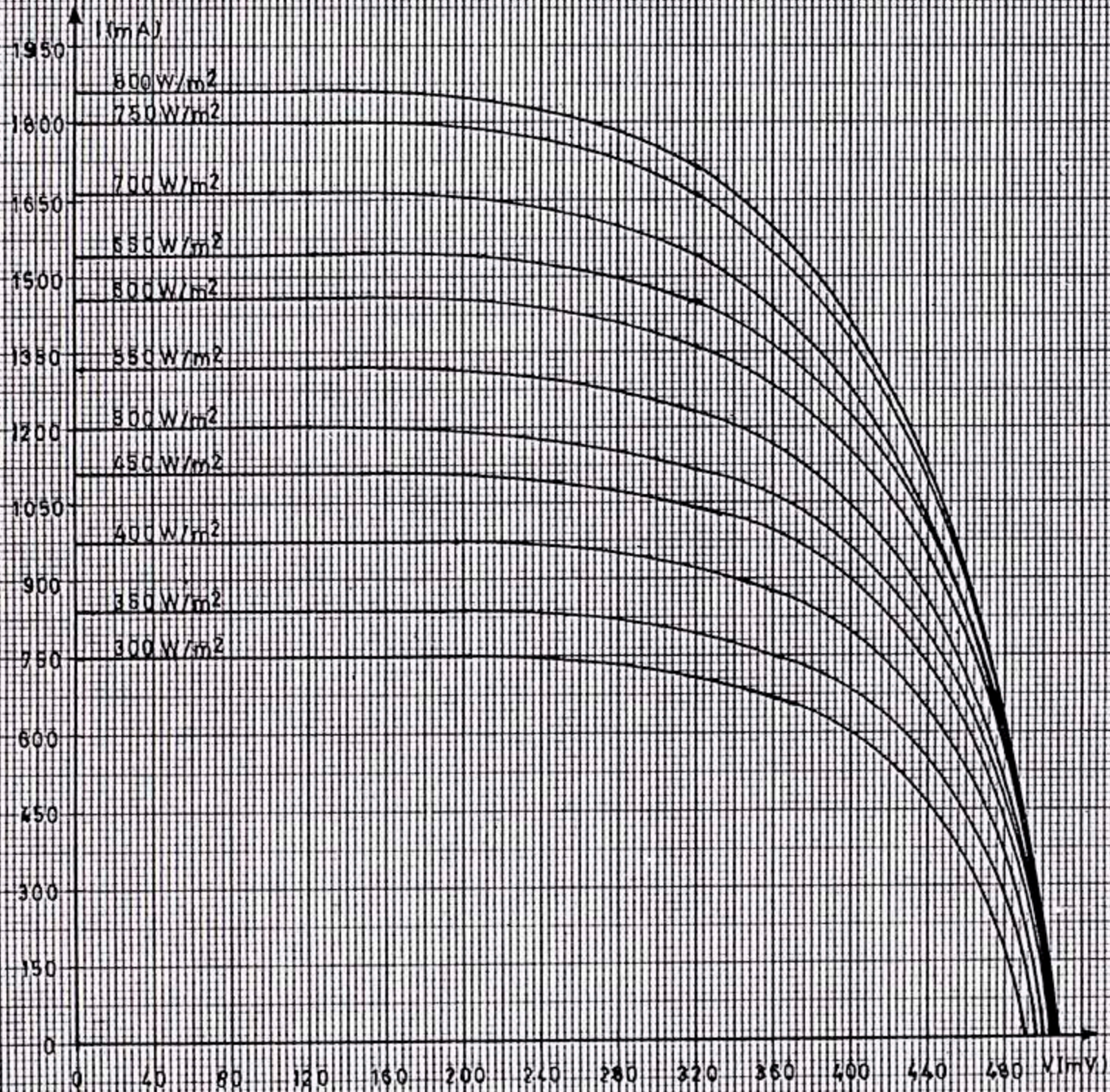


FIG. 19 | VARIACION EXPERIMENTAL DE LA CURVA $I(V)$: $|I|$ DE UNA CÉLULA SOLAR DE SILICIO MONOCRISTALINO SEGÚN LAS CONDICIONES DE RADIACIÓN.

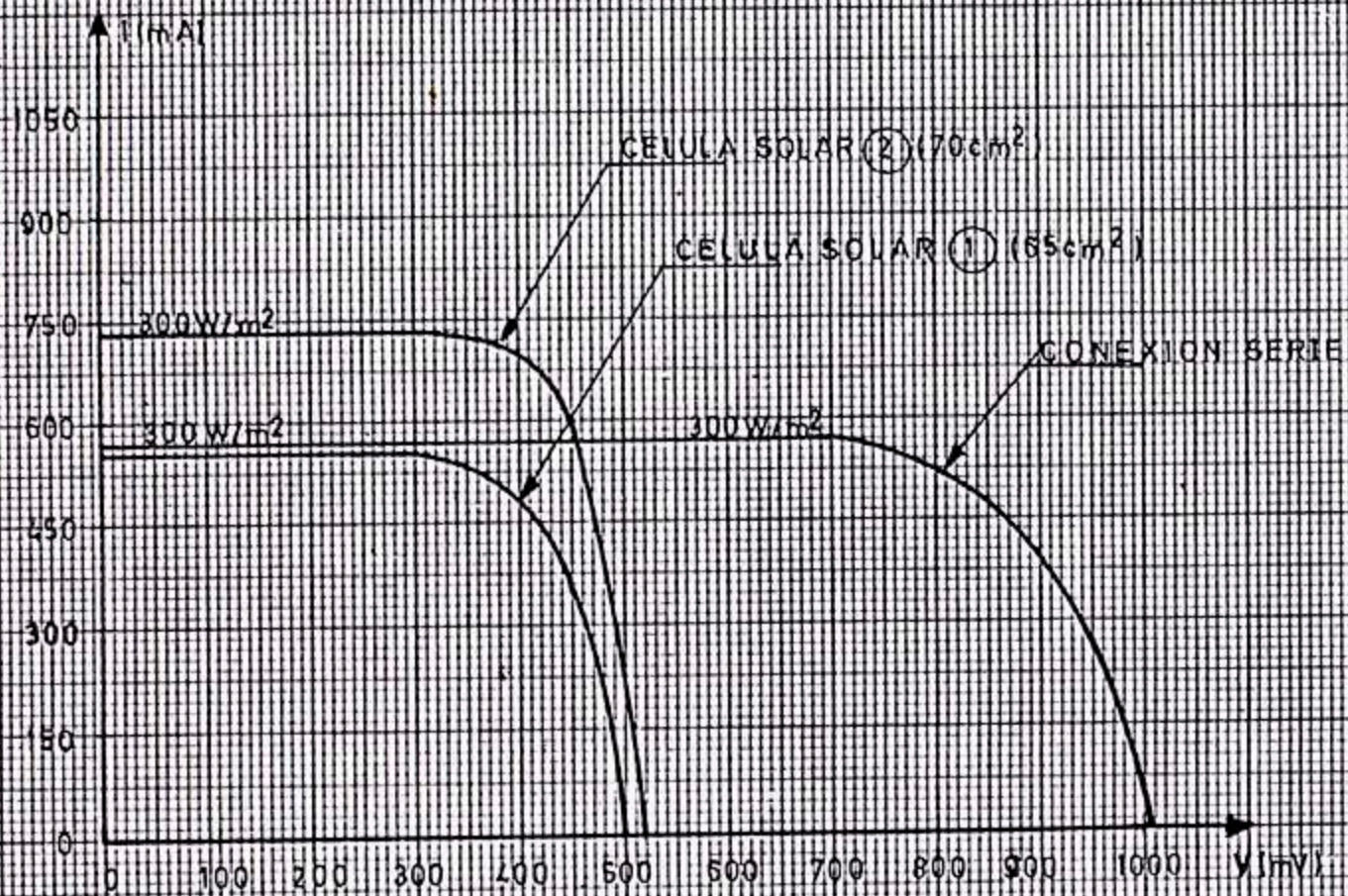


FIG. 20: VARIACION EXPERIMENTAL DE LA CURVA $I(V)$ DE DOS CELULAS SOLARES DE SILICIO MONOCRISTALINO DE DIFERENTE AREA PARA UNA MISMA RADIACION PRIMERO EN FORMA INDIVIDUAL Y LUEGO EN CONEXION SERIE.

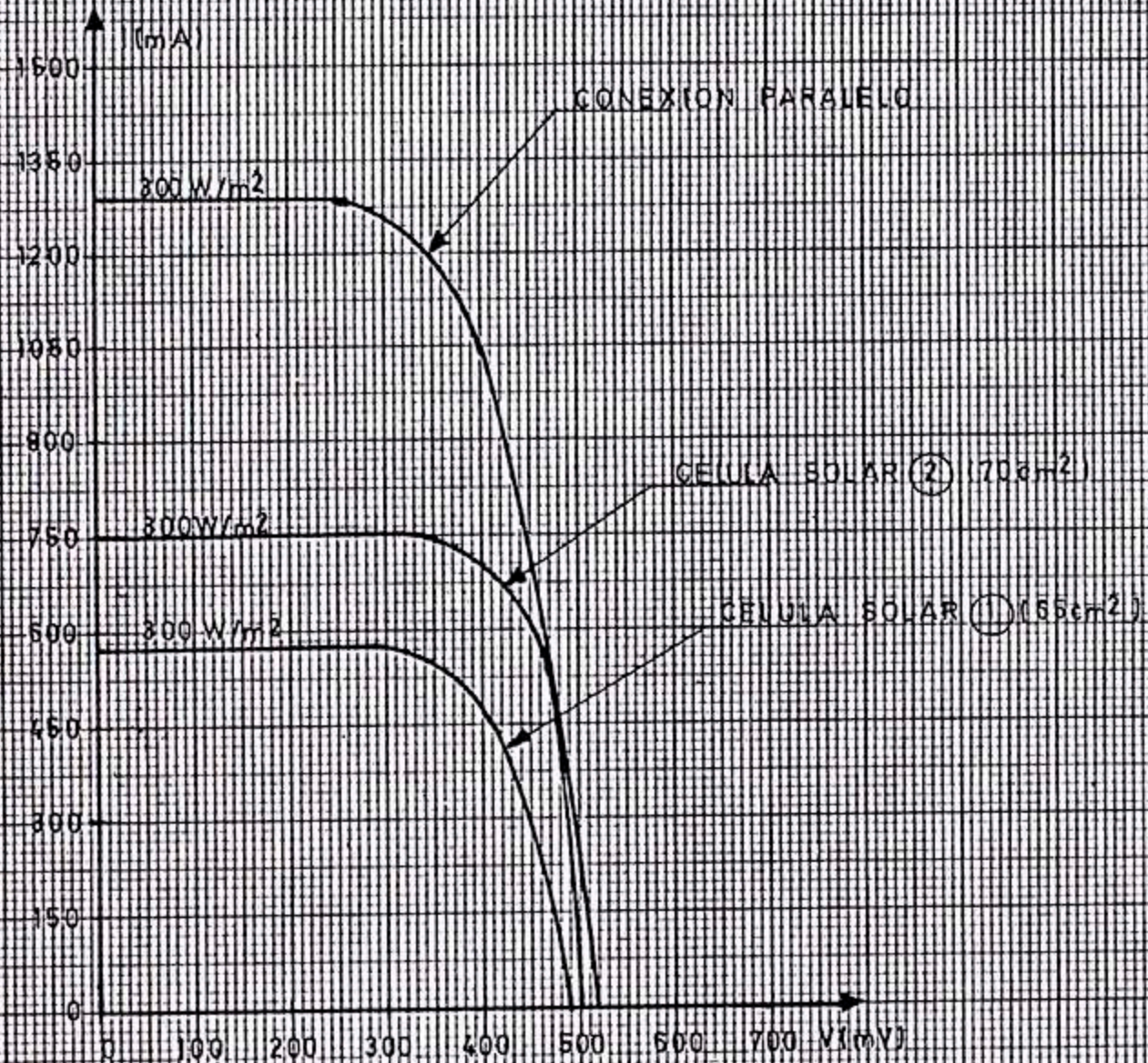


FIG. 2] VARIACION EXPERIMENTAL DE LA CURVA $I \cdot I \cdot (V)$ DE DOS CELULAS SOLARES DE SILICIO MONOCRISTALINO DE DIFERENTE AREA PARA UNA MISMA RADIACION, PRIMERO EN FORMA INDIVIDUAL Y LUEGO EN CONEXION PARALELO.

d) DATOS EXPERIMENTALES PARA LA EVALUACION DEL PANEL SOLAR DE 34 CELULAS SOLARES DE SILICIO MONOCRISTALINO

TABLA 11: Datos de temperatura de las 34 células solares de silicio monocristalino que conforman el panel usando un sensor de temperatura, para una radiación promedio de $600\text{W}/\text{m}^2$.

#Célula	T(°C)
1	38
2	39
3	38.2
4	39
5	38.8
6	37.6
7	38
8	40
9	38.5
10	39.8
11	37
12	39
13	38
14	40
15	37
16	38.5
17	37.1
18	37
19	36.5
20	38
21	36.8
22	36.8
23	36.5
24	35.7
25	36.1
26	36.2
27	37.2
28	36
29	35.9
30	36.1
31	36
32	36.4
33	37.3
34	37.1

TABLA 12: Datos de temperatura de 4 células solares de silicio monocristalino de las 34 que conforman el panel solar usando una termocupla de Cobre Constantan.

#Célula	Is (W/m ²)	Ta (°C)	Tt (°C)
1	872	25	29
2	868	26	28.5
3	870	26	29
4	867	26	28

Donde:

Is: Intensidad de radiación solar.

Ta: Temperatura ambiente.

Tt: Temperatura de la termocupla.

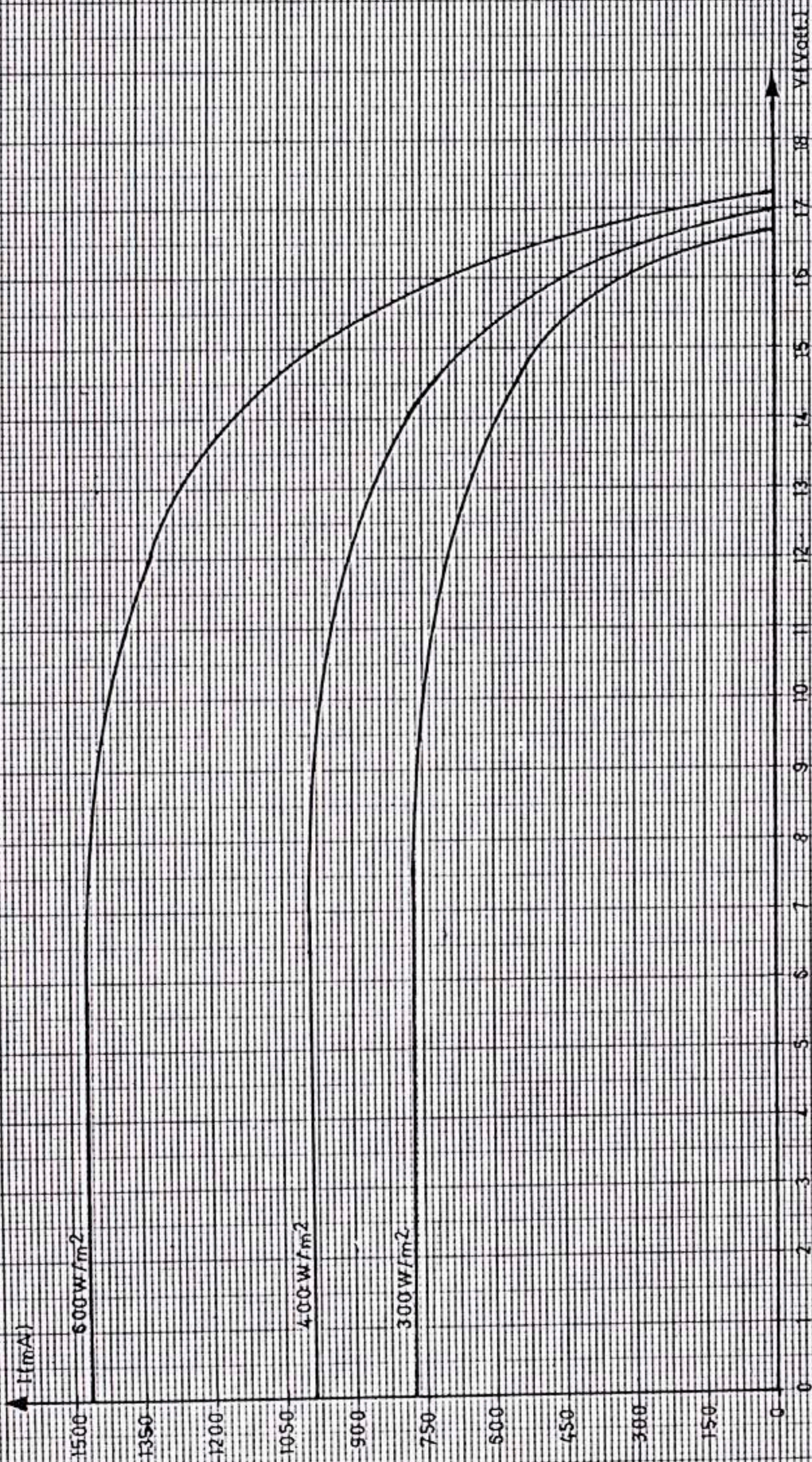


FIG. 22: VARIACION EXPERIMENTAL DE LA CURVA $I-V$ DEL PANEL SOLAR CONFORMADO POR 34 CELULAS DE SILICIO MONOCRISTALINO SEGUN LAS CONDICIONES DE RADIACION.

DATOS EXPERIMENTALES PARA LA EVALUACION DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO-PLOMO DE 70Ah-12V.

TABLA 13: Datos de la prueba de carga.

Tensión de carga= 13.0 V. Constante.

Tiempo (min.)	I (mA)	Vb (Volt.)
0	300	11.000
60	800	11.893
120	1300	12.045
180	1700	12.156
240	2000	12.245
300	2100	12.300
360	2100	12.342
420	2000	12.392
480	1700	12.386
540	1300	12.378
600	800	12.368
660	300	12.306
720	0	12.188 *

Vb: Tensión de la batería.

I: Corriente de carga.

* Se desconecta la fuente de alimentación.

Después de 24 horas de la prueba de carga la tensión de la batería de acumuladores de ácido-plomo a circuito abierto es de 11.913V.

TABLA 14: Datos de la prueba de descarga.

Resistencia de carga= 12 ohms. Constante.

Tiempo (min.)	Vb (Volt.)
0	11.80
60	11.77
120	11.73
180	11.69
240	11.64
300	11.60
360	11.54
420	11.50
480	11.46
540	11.41
600	11.37
660	11.32
720	11.26
780	11.19
840	11.11
900	11.04
914	11.00 *

Vb: Tensión de la batería.

* Se desconecta la carga de la batería por medio del regulador automático de descarga.

Después de 24 horas de quitarle la resistencia de carga la tensión de la batería a circuito abierto fue de 11.4V.

TABLA 15: Datos para la determinación de la resistencia interna de la batería de acumuladores de ácido plomo de 70Ah-12V.

Ro (ohms)	V1 (Volt.)	I (Amper)	V/I (ohms)
11	12.38	1.02	12.10
8	12.36	1.41	8.75
7	12.35	1.76	7.65
6	12.34	1.90	6.50
5	12.32	2.24	5.50
4	12.30	2.80	4.40
3	12.26	4.09	3.25
2	12.20	6.10	2.30

CURVAS EXPERIMENTALES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO:

PANEL SOLAR-BATERIA-REGULADOR DE DESCARGA-CARGA.

He querido mostrar el comportamiento del sistema fotovoltaico (Panel Solar- Bateria- Regulador- Carga) en un día cualquiera, pero lamentablemente el voltímetro registrador de 12 canales marca LINSEIS, que nos iba a graficar el comportamiento de cada componente del sistema fotovoltaico a lo largo del día se ha malogrado y su reparación requiere un tiempo que depende de cuan rápido se consigue el repuesto y éste se encuentra en trámite.

Sin embargo voy a mostrar las curvas de comportamiento del sistema fotovoltaico en un día de "buen sol", cuyas tendencias serían aproximadamente iguales a las que se obtendrían en un día normal cualquiera.

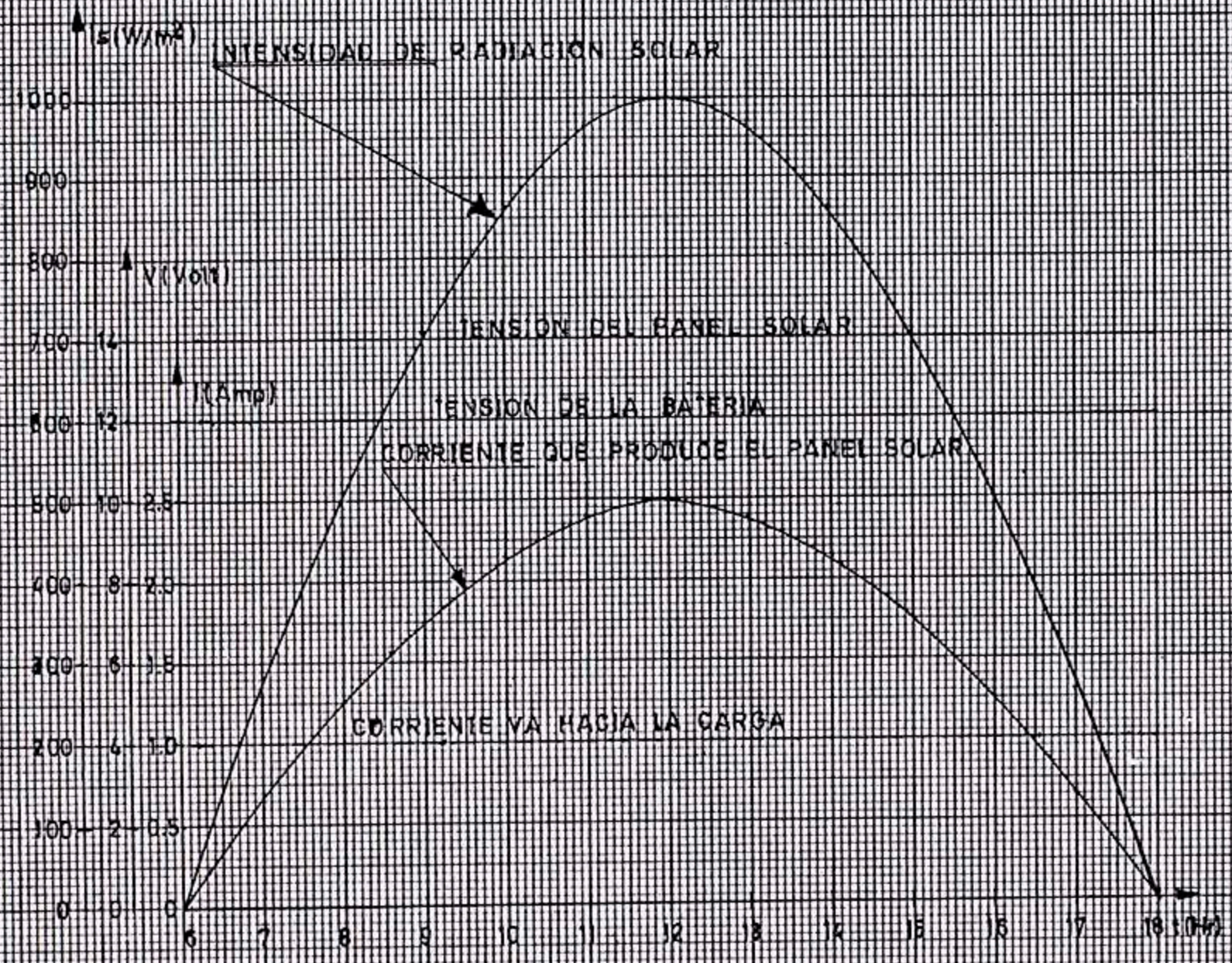


FIG. 233. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO A LO LARGO DE UN DIA DE BUEN SOL.

5.2 EVALUACION DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

a) EVALUACION DE LA CELULA SOLAR INDIVIDUAL

TABLA 16: Temperatura de trabajo de la célula solar de silicio monocristalino según las condiciones de radiación.

I_s (W/m ²)	T_{cs} (°C)
300	38.17
350	39.38
400	41.38
450	42.54
500	43.71
550	44.91
600	46.98
650	48.27
700	49.63
750	51.43
800	53.07

I_s : Intensidad de radiación solar.

T_{cs} : Temperatura de la célula solar.

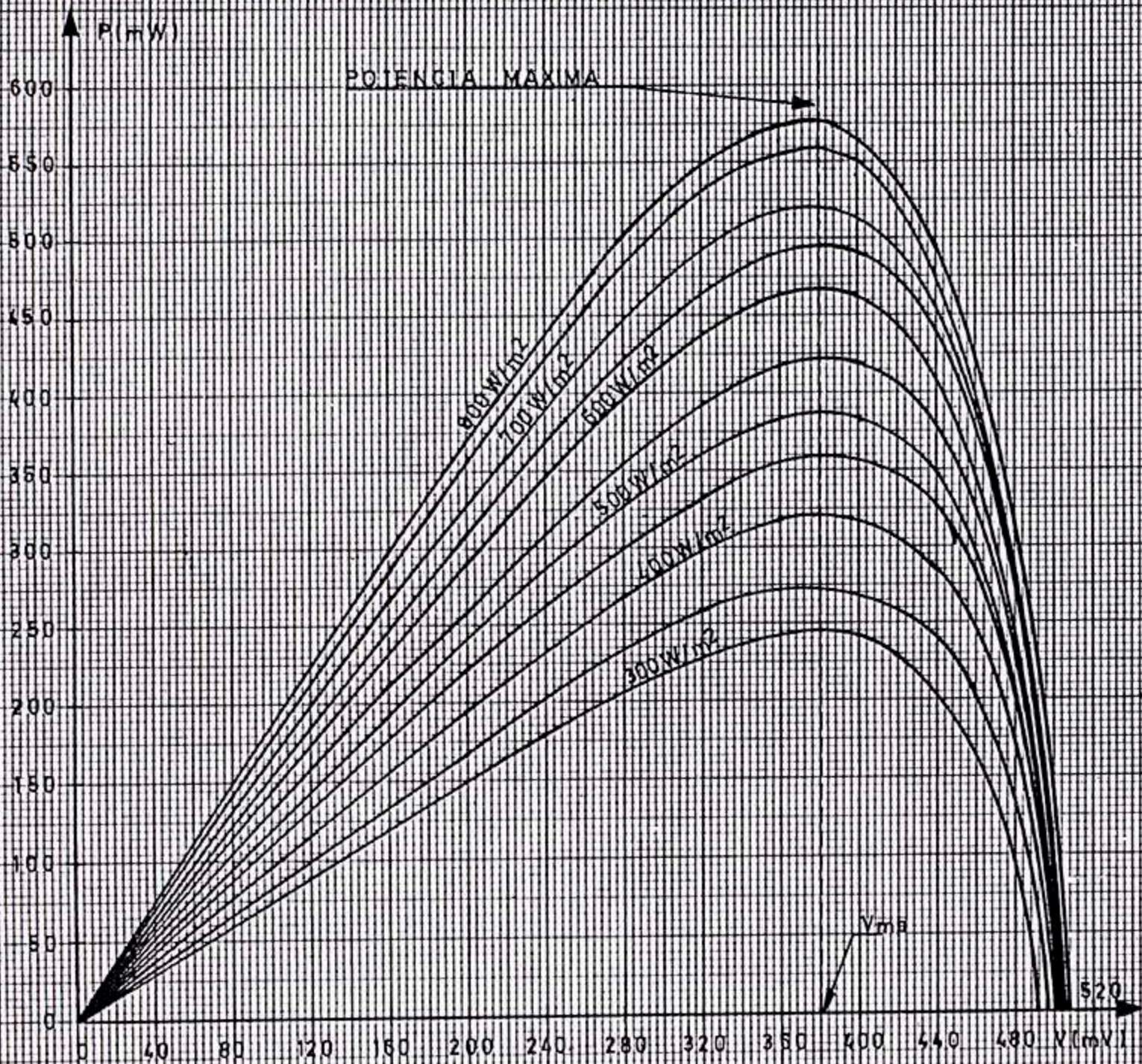


FIG. 24: VARIACION DE LA CURVA DE POTENCIA: $P = P(V)$ DE UNA CELULA SOLAR DE SILICIO MONOCRISTALINO DE 70 cm² DE AREA SEGUN LAS CONDICIONES DE RADIACION.

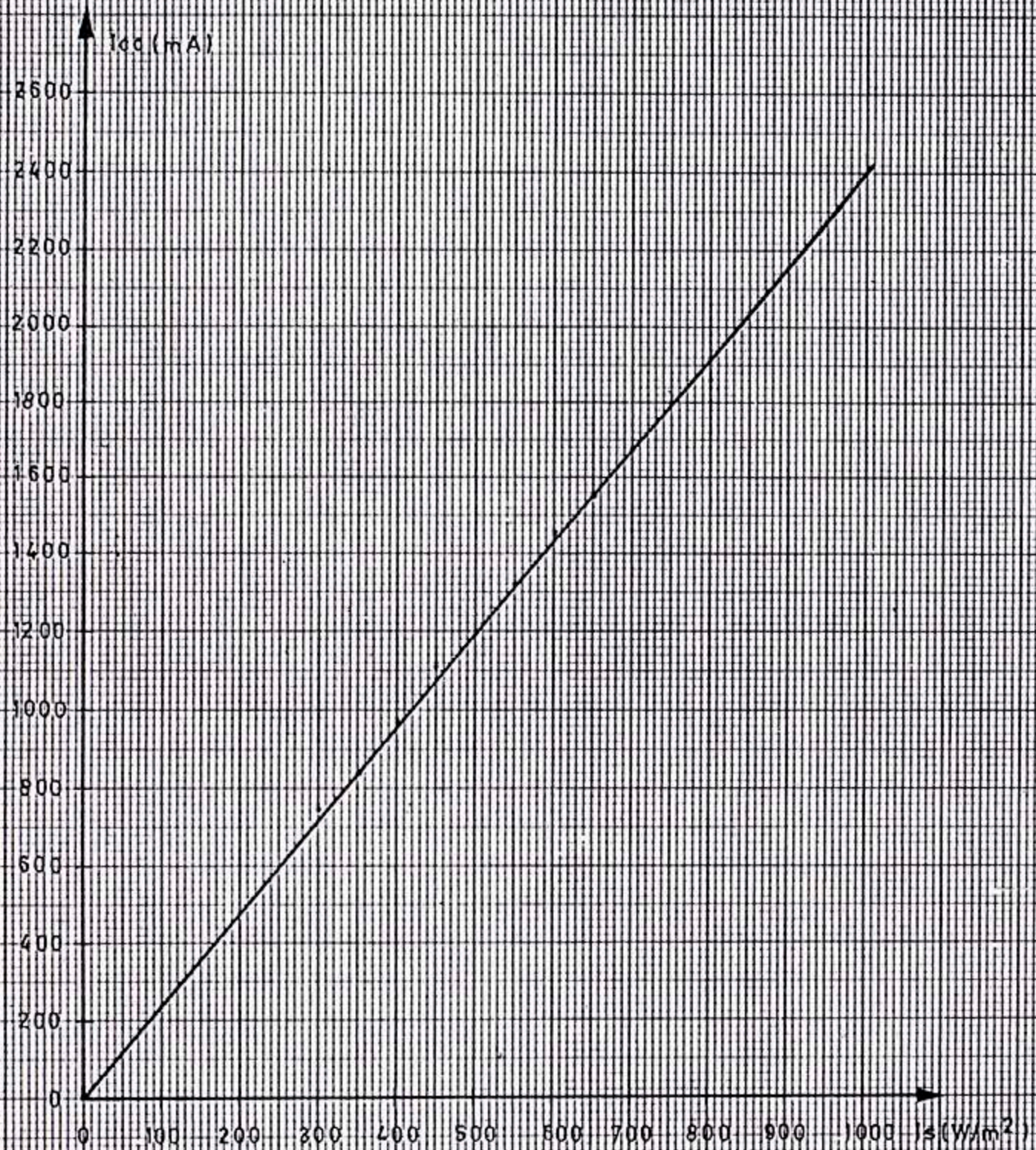


FIG. 25: VARIACION DE LA CORRIENTE DE CORTO-CIRCUITO DE UNA CELULA SOLAR DE SILICIO MONOCRISTALINO SEGUN LAS CONDICIONES DE RADIACION.

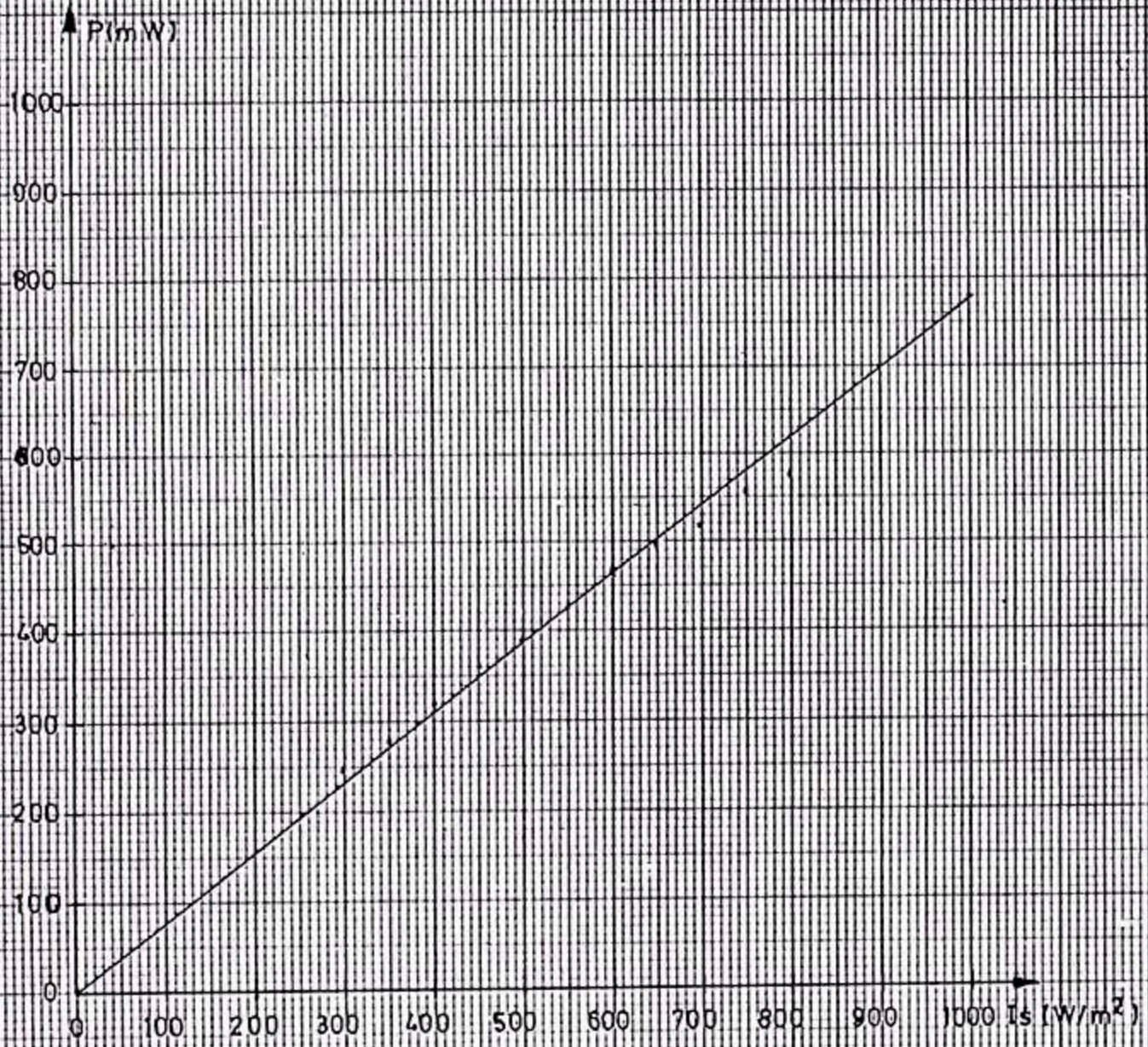


FIG. 26: VARIACION DE LA POTENCIA MAXIMA DE UNA CELULA SOLAR DE SILICIO MONOCRISTALINO DE 70cm^2 , SEGUN LAS CONDICIONES DE RADIACION.

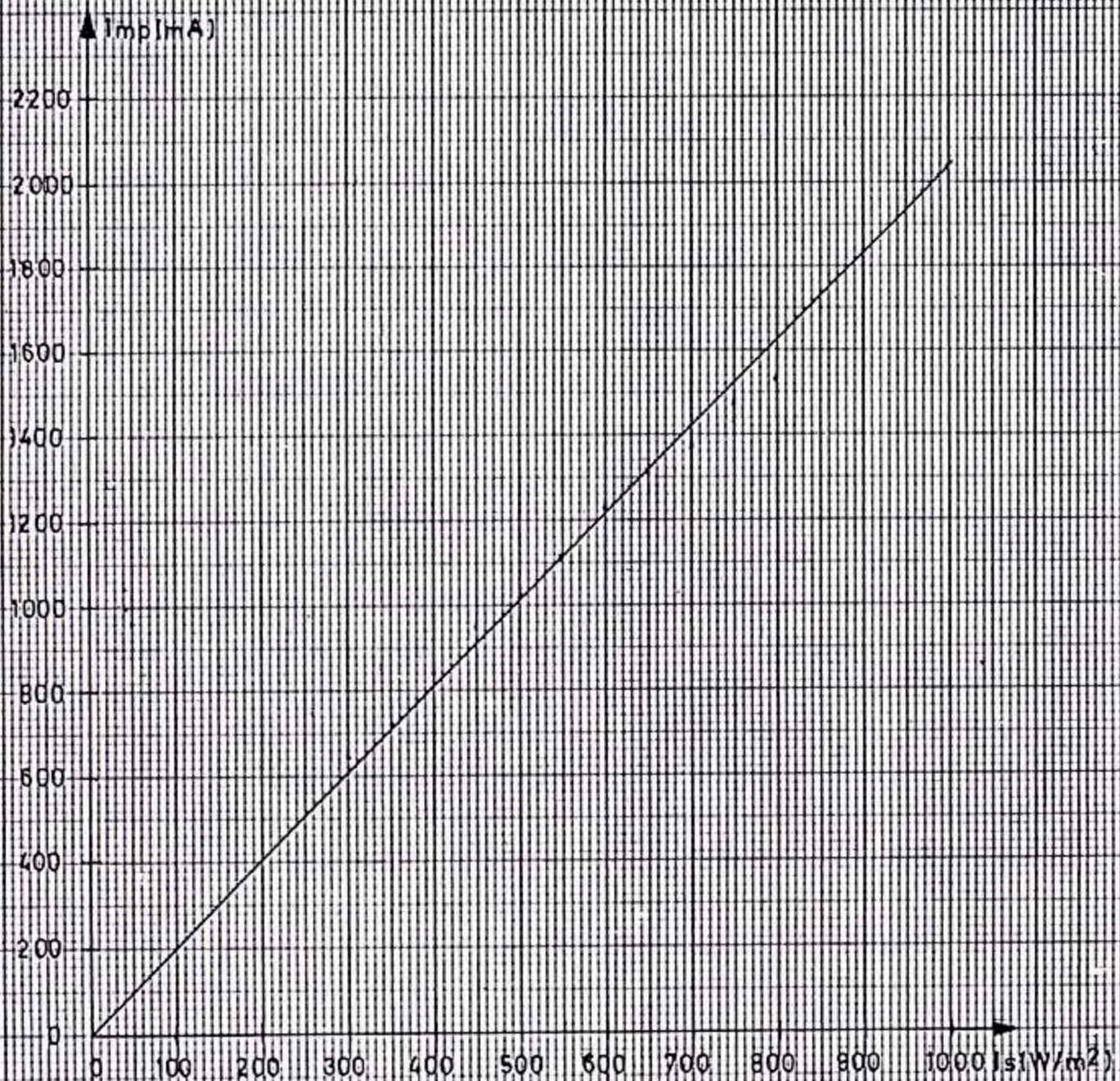


FIG. 27: VARIACION DE LA CORRIENTE PARA MÁXIMA POTENCIA DE UNA CELULA SOLAR DE SILICIO MONOCRISTALINO DE $70cm^2$, SEGUN LAS CONDICIONES DE RADIACION.

TABLA 17: Datos característicos experimentales de una célula solar de silicio monocristalino de 70cm^2 de área según las condiciones de radiación.

Is	800	700	600	500	400	300
Tcs	53.07	49.63	46.98	43.71	41.38	38.17
Pmax	575.7	518.4	467.4	387.6	319.2	245.1
Vmp	380	380	380	380	380	380
Icc	1860	1665	1455	1200	975	750
Vca	508	508	508	504	500	492
Efic.	10.28	10.59	11.13	11.07	11.40	11.67
FF	74.80	74.80	74.80	75.40	76.00	77.24

Eficiencia promedio (%): 11.02

Factor de relleno promedio (%): 75.40

Donde:

Is: Intensidad de radiación solar (W/m^2).

Tcs: Temperatura de la célula solar ($^{\circ}\text{C}$).

Pmáx: Potencia máxima (mW).

Vmp: Tensión a máxima potencia (mV).

Icc: Corriente de corto circuito (mA).

Vca: Tensión a circuito abierto (mV).

Efic.: Eficiencia (%).

FF: Factor de relleno (%).

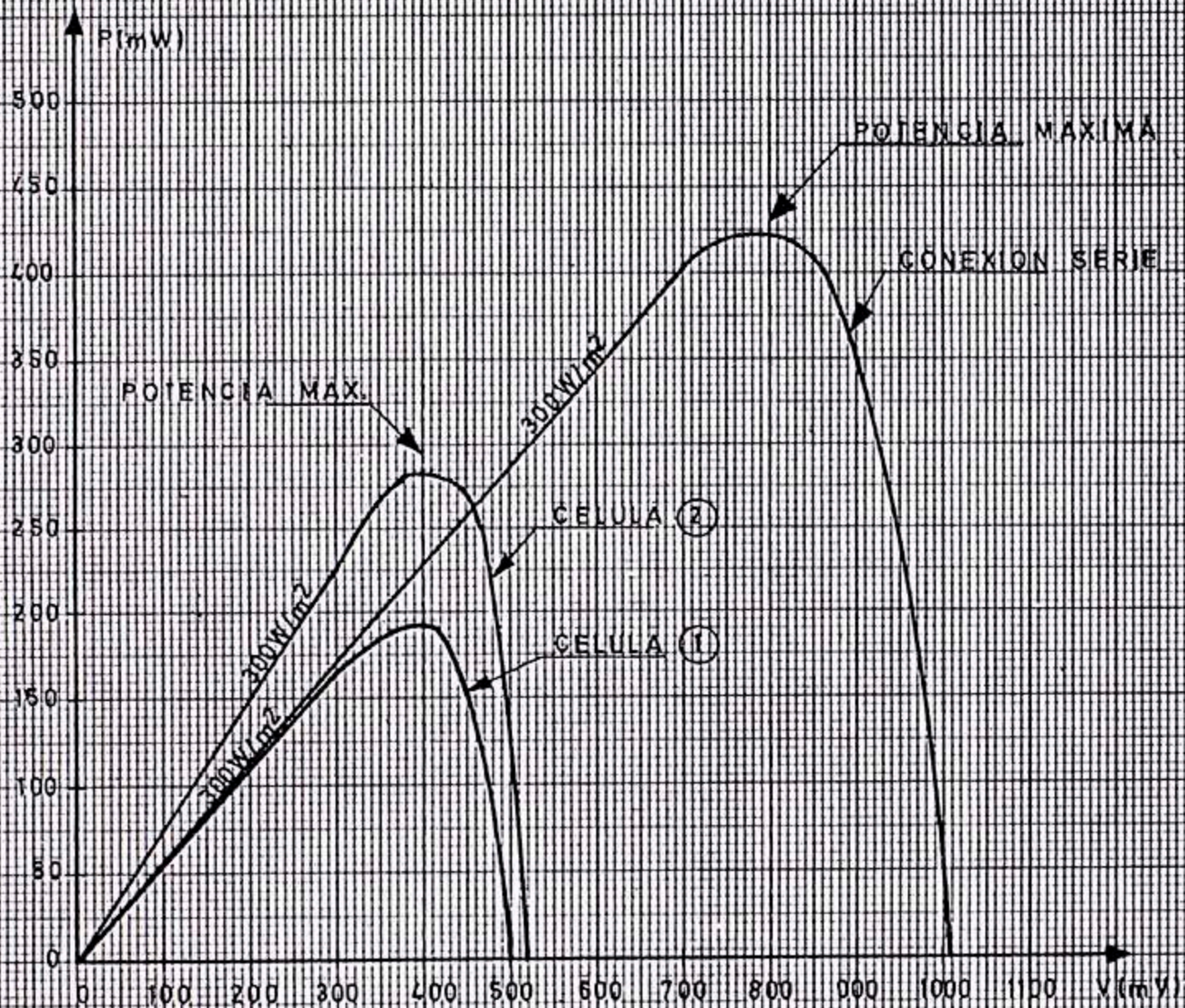


FIG. 2B VARIACION DE LA POTENCIA P (mW) DE DOS CELULAS SOLARES DE SILICIO MONOCRISTALINO DE DIFERENTE AREA PARA UNA MISMA RADIACION. PRIMERO EN FORMA INDIVIDUAL Y LUEGO EN CONEXION SERIE.

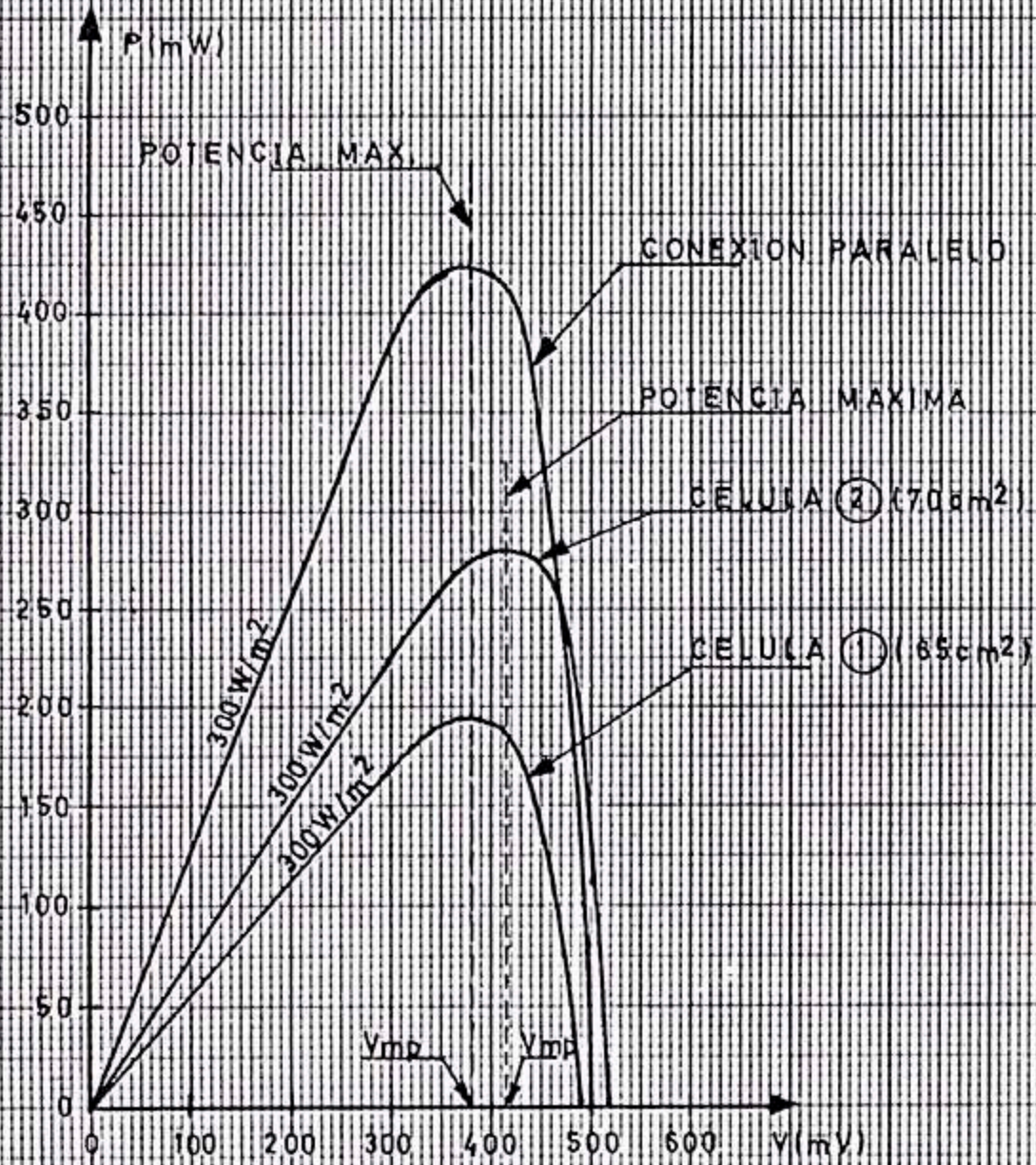


FIG. 29: VARIACION DE LA POTENCIA $P=P(V)$ DE DOS CELULAS SOLARES DE SILICIO MONOCRISTALINO DE DIFERENTE AREA PARA UNA MISMA RADIACION PRIMERO EN FORMA INDIVIDUAL Y LUEGO EN CONEXION PARALELO.

EVALUACION DEL PANEL SOLAR DE 34 CELULAS SOLARES DE SILICIO MONOCRISTALINO

Temperatura promedio de funcionamiento de las células solares que conforman el panel solar para una radiación promedio de 600 W/m^2 medidas usando un sensor de temperatura.

Aplicando:

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{n}$$

Reemplazando los datos de la Tabla 11 tenemos:

$$\bar{T} = \frac{1275.10}{34} = 37.50$$

TABLA 18: Temperatura de trabajo de 4 células solares de las 34 que conforman el panel solar, usando para la medición una termocupla de Cobre Constantan.

#Célula	$I_s (\text{W/m}^2)$	$T_{cs} (^{\circ}\text{C})$
1	872	54.0
2	863	54.5
3	870	55.0
4	867	54.0

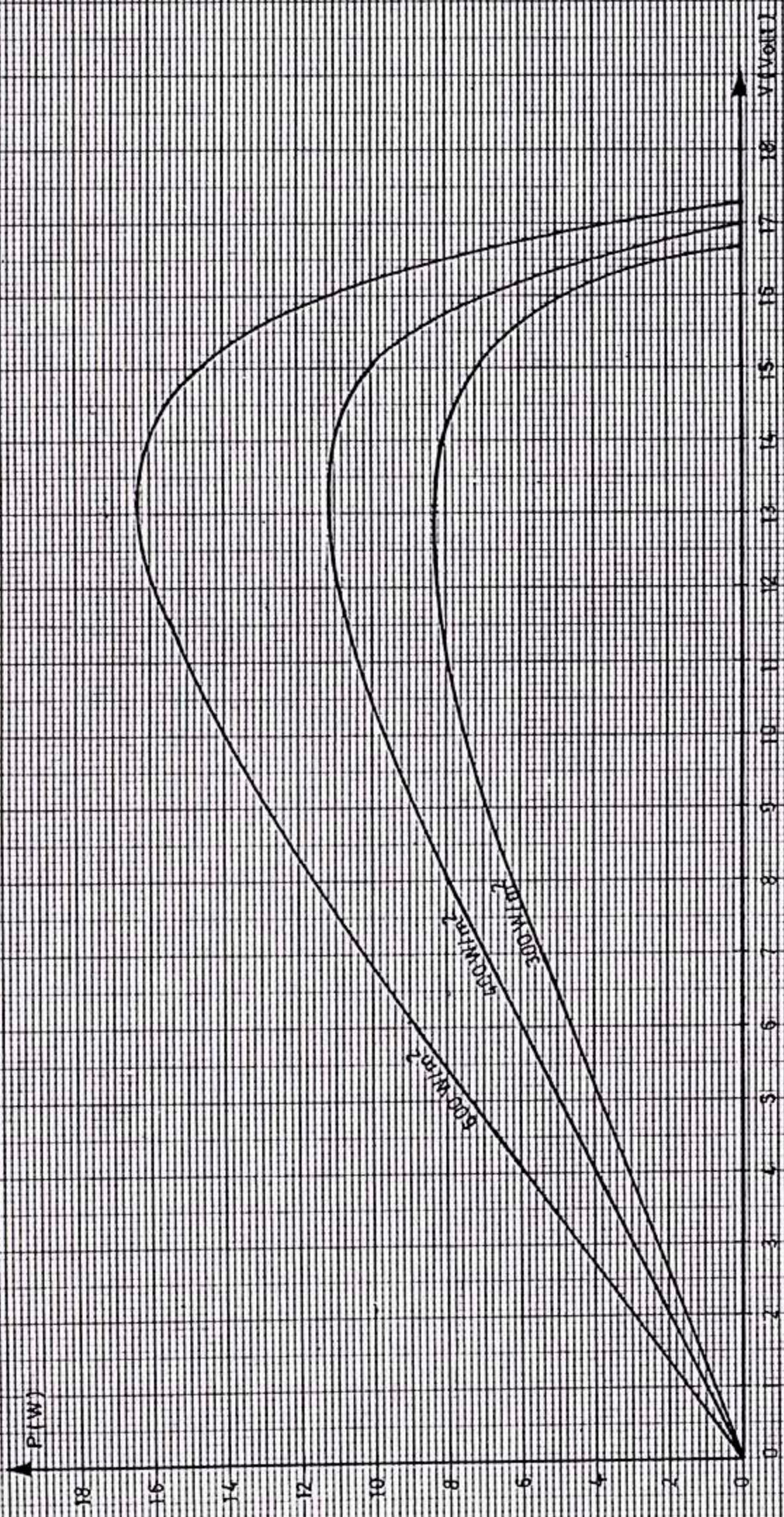


FIG. 10: VARIACION DE LA CURVA DE POTENCIA DEL PANEL SOLAR DE 34 CELULAS DE SILICIO MONOCRISTALINO PARA TRES CONDICIONES DE RADIACION SOLAR.

TABLA 19: Datos característicos experimentales de funcionamiento del panel solar compuesta por 34 células de silicio monocristalino de 70cm^2 de área cada uno, según las condiciones de radiación.

Is	600	400	300
Tcsp	37.5	-	-
Pmax	16.38	11.11	8.39
Vmp	13.0	13.0	13.0
Icc	1470	990	780
Vca	17.3	17.0	16.7
Efic.	11.47	11.68	11.74
FF	64.41	66.04	64.37

Eficiencia promedio (%): 11.63

Factor de relleno promedio (%): 64.94

Donde:

Is: Intensidad de radiación solar (W/m^2).

Tcsp: Temperatura promedio de trabajo de las células solares ($^{\circ}\text{C}$).

Pmax: Potencia máxima (W).

Vmp: Tensión a máxima potencia (V).

Icc: Corriente de corto circuito (mA).

Vca: Tensión a circuito abierto (V).

Efic.: Eficiencia (%).

FF: Factor de relleno (%).

EVALUACION DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO-PLOMO

a) Energía suministrada a la batería de acumuladores de ácido-plomo durante el proceso de carga.

Se sabe que:

$$Whc = \sum_{i=1}^n (V \cdot I_i \cdot t)_i$$

Para nuestro caso:

$V = 13.0$ Volt. Constante.

$t = 60$ minutos. Constante.

Entonces:

$$Whc = V \cdot t \sum_{i=1}^n I_i$$

Reemplazando datos de la Tabla 13 se obtiene:

$Whc = 231.20$ Wh.

Tensión promedio durante el proceso de carga:

$$V_{mc} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{n}$$

Reemplazando datos de la Tabla 13 se obtiene:

$V_{mc} = 12.15$ V.

b) Energía suministrada por la batería de acumuladores de ácido-plomo a la resistencia de 12 ohms durante el proceso de descarga.

Se sabe que:

$$Whd = \sum_{i=1}^n (V \cdot I \cdot t)_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V^2}{R} \cdot t \right)_i$$

Para nuestro caso:

$R = 12$ ohms. Constante.



FIG. 31) VARIACION DE LA TENSION DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO PLOMO DURANTE EL PROCESO DE CARGA.

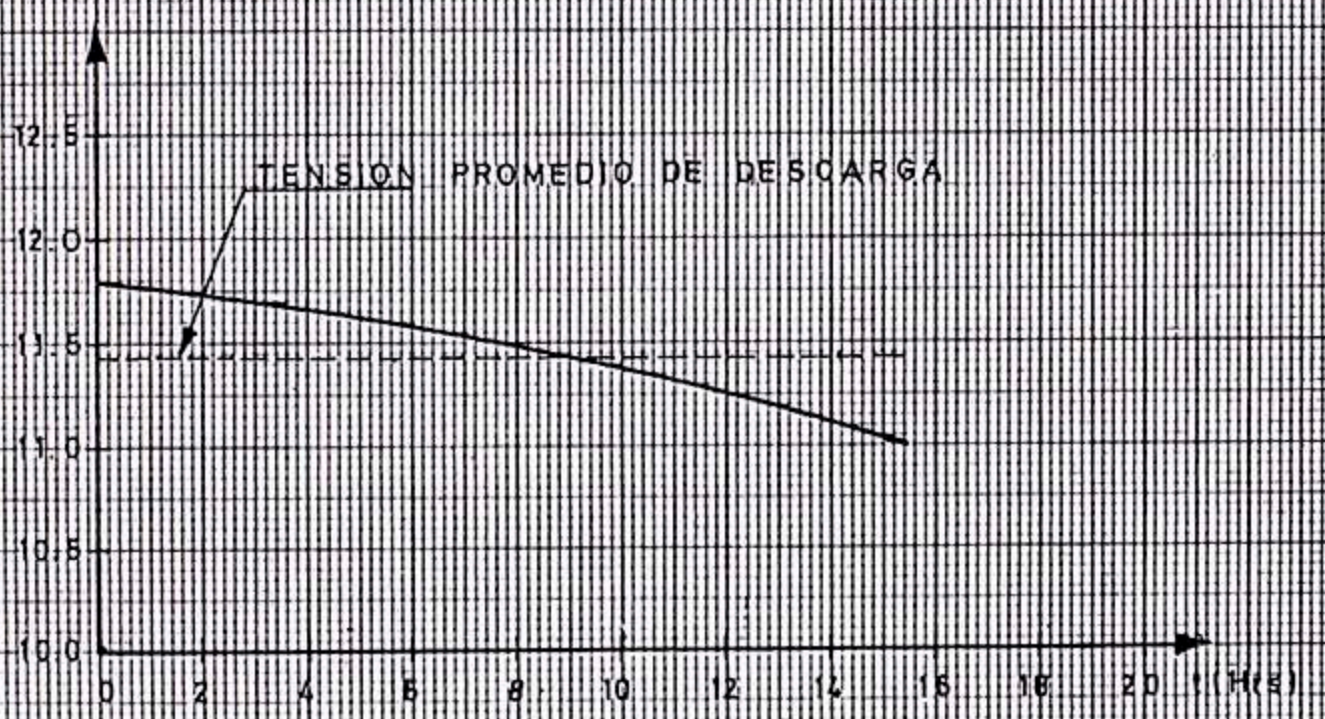


FIG. 32) VARIACION DE LA TENSION DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO PLOMO DURANTE EL PROCESO DE DESCARGA.

t= 1 hora. Constante hasta el intervalo 15 y
t= 14 minutos en el intervalo 16.

Entonces:

$$Whd = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{15} V_i^2 + \frac{14}{12 \cdot 60} V_{16}^2$$

Reemplazando datos de la Tabla 14 se obtiene:

Whd= 167.53 Wh.

Tensión promedio durante el proceso de descarga:

$$V_{md} = \sum \frac{V_i}{n}$$

Reemplazando datos de la Tabla 14 se obtiene:

Vmd= 11.44 Volt.

De los cálculos obtenidos en a) y b) obtenemos los siguientes rendimientos:

- Rendimiento energético:

$$n_E = \frac{Whd}{Whc} = \frac{167,53 \times 100}{231,20} = 78.58\%$$

- Rendimiento de tensión:

$$n_V = \frac{V_{md}}{V_{mc}} = \frac{11,44 \times 100}{12,15} = 94.16\%$$

Debido a que en forma gráfica no se puede visualizar muy bien la resistencia interna de la batería, he decidido obtener el valor de esta resistencia interna por el método de la curva de ajuste por mínimos cuadrados.

Determinación de la curva de ajuste por mínimos cuadrados



FIG. 33: GRAFICO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA INTERNA DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO-PLOMO DE 70Ah-12V.

para determinar la resistencia interna de la batería de acumuladores de ácido-plomo de 70Ah-12V.

La recta mínimo cuadrática que ajusta el conjunto de puntos

$$(R_{01}, V/I_1), (R_{02}, V/I_2) \dots, (R_{0n}, V/I_n)$$

tiene por ecuación:

$$V/I = a_0 + a_1 R_0$$

donde las constantes a_0 y a_1 son determinadas resolviendo las siguientes ecuaciones llamadas "ecuaciones normales".

$$1) \sum_{i=1}^n (V/I)_i = a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n R_{0i}$$

$$2) \sum_{i=1}^n (R_{0i} \cdot V/I)_i = a_0 \sum_{i=1}^n R_{0i} + a_1 \sum_{i=1}^n R_{0i}^2$$

Entonces:

R_0	V/I	$R_0 \cdot V/I$	R_0^2
11	12.1	133.10	121
8	8.75	70.00	64
7	7.65	53.55	49
6	6.50	39.00	36
5	5.50	27.50	25
4	4.40	17.60	16
3	3.25	9.75	9
2	2.30	4.60	4
46	50.45	355.10	324

Reemplazando en las "ecuaciones normales" tenemos:

$$1) 50.45 = 8a_0 + 46a_1$$

$$2) 355.10 = 46a_0 + 324a_1$$

multiplicando la primera ecuación por 46 y la segunda por 8 obtenemos:

$$3) 2320.70 = 368a_0 + 2116a_1$$

$$4) 2840.80 = 368a_0 + 2592a_1$$

restando (3) de (4)

$$520.10 = 476a_1$$

Entonces:

$$a_1 = 1.09$$

reemplazando en (1) se obtiene:

$$a_0 = 0.04$$

Luego la recta mínimo cuadrática será:

$$V/I = a_0 + a_1 R_0$$

$$V/I = 0.04 + 1.09 R_0$$

Cuando: $R_0 = 0$

$$V/I = 0.04$$

Por lo tanto la resistencia interna de la batería de acumuladores de ácido-plomo de 70Ah-12V. es de 0.04 ohms.

CAPITULO 6

6.- PAUTAS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE UNA INSTALACION FOTOVOLTAICA

6.1 CARACTERISTICAS GEOGRAFICAS Y CLIMATOLOGICAS DEL LUGAR DONDE SE VA A INSTALAR EL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

Las características geográficas serán necesarias para la mejor orientación de los paneles solares, de modo que se pueda aprovechar la máxima energía solar.

Para poder aconsejar la orientación más adecuada que deben tener los paneles solares estamos experimentando actualmente con los paneles de células solares de silicio monocristalino contruidos en la Universidad Nacional de Ingeniería.

La influencia de los datos climatológicos como la temperatura máxima y mínima en el lugar de emplazamiento, están siendo estudiadas por el Bachiller en Ingeniería Mecánica-Eléctrica Domingo Salinas López.

6.2 ESTIMADO DEL CONSUMO DIARIO DE ENERGIA

Este es uno de los datos imprescindibles para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Los datos que debe especificar el consumidor son los siguientes:

a) Descripción

Indicando las características eléctricas de todos los equipos que se va a alimentar.

b) Tensión de utilización

$V + a$ (a: (+%V) ó (-%V))

c) Alimentación en:

Corriente Continua.....
Corriente Alterna.....

d) Factor de potencia:

$\cos\theta$

e) Potencia requerida y a que horas:

.....W de las.....hasta las.....horas
.....W de las.....hasta las.....horas

El óptimo consumo de la carga, permite una mejor fiabilidad de funcionamiento, menos paneles solares para la alimentación y menos batería para la autonomía, abaratando el costo de la instalación.

6.3 ESTIMADO DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE SOBRE EL PANEL

Este es otro de los datos necesarios para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Estos datos pueden tomarse de los proporcionados por SENAHMI, que tienen los valores promedios diarios de energía solar por metro cuadrado sobre una superficie horizontal, evaluados mensualmente para diferentes lugares del Perú, como les muestro en las tablas incluidas en esta Tesis.

Es necesario tener una historia de la radiación solar del lugar donde se desea instalar el sistema fotovoltaico para evitar el sobredimensionamiento o el subdimensionamiento del sistema.

6.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA BATERIA DE ACUMULADORES DE ACIDO-PLOMO

La batería de acumuladores es el elemento que nos prestará la energía para el buen funcionamiento del sistema fotovoltaico, cuando la producción de energía del panel solar es insuficiente y recuperará la energía prestada cuando hay un exceso de energía producida por el panel solar.

Para una mejor fiabilidad del sistema fotovoltaico es necesario otorgarle una autonomía de funcionamiento a la batería de acumuladores, de modo que ésta se encuentre en todo momento en condiciones de prestar energía al sistema, sobre todo en los días de poca radiación solar.

El dimensionamiento de la batería de acumuladores se hará considerando los días de autonomía.

6.5 SELECCION DE CONTROLES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para garantizar el buen funcionamiento del sistema fotovoltaico es necesario tener controles.

Si la producción máxima del panel solar es 40W ó menos, no será necesario tener un regulador de carga para la batería.

Para potencias mayores sí será necesario contar el regulador de carga, para evitar la sobrecarga de la batería de acumuladores.

En todos los casos será necesario contar con un regulador de descarga, uso que nos permitirá proteger a la batería de la sulfatación.

Si la alimentación de la carga se hace en corriente alterna se tendrá que hacer uso de un inversor de CC/CA.

6.6 DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL SOLAR DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

Aquí presento un programa para el dimensionamiento del panel solar del sistema fotovoltaico.

Este programa tiene que ser perfeccionado conforme se vaya avanzando en la investigación del aprovechamiento de la energía solar en la conversión fotovoltaica.

```

5 rem "PROGRAMA DE DIMENSIONAMIENTO FOTOVOLTAICO"
10 dim x(98,12)
15 for i= 1 to 36
20 for j= 1 to 12
25 read x(i,j)
30 next j,i
35 rem "MINIMA RADIACION DIARIA PROMEDIO DE 10 DIAS"
40 r=x(1,1)
45 for i= 1 to 3
50 for j= 1 to 12
55 if r > x(i,j) then r= x(i,j)
60 next j,i
65 rem "MAXIMO CONSUMO DIARIO"
70 c= x(4,1)
75 for j= 1 to 12
80 if c < x(4,j) then c= x(4,j)
85 next j
90 rem "DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL"
95 cah= c/x(5,1)
100 h= r/1000
105 i= cah/h
110 fsi= 1.2*i
115 ncs= x(5,1)/x(5,2)
120 ncs%= x(5,1)/x(5,2)
125 if ncs <> ncs% then ncs= ncs%+1
130 ngcs= fsi/x(5,3)
135 ngcs%= fsi/x(5,3)
140 if ngcs <> ngcs% then ngcs= ngcs%+1
145 ntc= ncs*ngcs
150 ap= x(5,4)*ntc*0.0001
155 rem "PRODUCCION DIARIA DEL SISTEMA"
160 for i= 6 to 36

```

```

165 for j= 1 to 12
170 x(i+31,j)= x(i,j)*ap*x(5,6)
175 next j,i
180 rem "BALANCE DIARIO DEL SISTEMA"
185 for i= 37 to 67
190 for j= 1 to 12
195 x(i+31,j)= x(i,j)-x(4,j)
200 next j,i
205 rem "VALORES PARA EL DIMENSIONAMIENTO"
210 print "MINIMA RADIACION DIARIA PROMEDIO
(Wh/m2/DIA)=";r
215 print "MAXIMO CONSUMO DIARIO (Wh/DIA)=";c
220 print "NUMERO DE CELULAS EN SERIE=";ncs
215 print "NUMERO DE GRUPOS DE CELULAS EN SERIE=";ngcs
230 print "AREA DEL PANEL (m2)=";ap
235 print "DATOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL
SOLAR"
240 print "Vp Vc Ic Ac EFS"
245 for j= 1 to 12
250 print x(5,j)
255 next j
260 print "ENERGIA SOLAR GLOBAL RECIBIDA SOBRE UNA
SUPERFICIE HORIZONTAL EN LA ESTACION DE HUANCAYO EN 1974"
265 print "VALORES PROMEDIADOS SOBRE 10 DIAS EN
(Wh/m2/DIA)"
270 print "ENE. FEB. MAR. ABR. MAYO JUN. JUL. AGO. SET.
OCT. NOV. DIC."
275 for i= 1 to 3
280 for j= 1 to 12
285 print x(i,j)
290 next j,i
295 print "CONSUMO PROMEDIO DIARIO (Wh/DIA)"
300 print "ENE. FEB. MAR. ABR. MAYO JUN. JUL. AGO. SET.
OCT. NOV. DIC."
305 for j= 1 to 12
310 print x(4,j)
315 next j
320 print "ENERGIA SOLAR GLOBAL DIARIA RECIBIDA SOBRE UNA
SUPERFICIE HORIZONTAL EN LA ESTACION DE HUANCAYO EN 1974
(Wh/m2/DIA)"
325 print "ENE. FEB. MAR. ABR. MAYO JUN. JUL. AGO. SET.
OCT. NOV. DIC."
330 for i= 1 to 36
335 for j= 1 to 12
340 print x(i,j)
345 next j,i
350 print "PRODUCCION DIARIA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO
(Wh/DIA)"
355 print "ENE. FEB. MAR. ABR. MAYO JUN. JUL. AGO. SET.
OCT. NOV. DIC."
360 for i= 37 to 67
365 for j= 1 to 12
370 print x(i,j)
375 next j,i
380 print "BALANCE ENERGETICO DIARIO DEL SISTEMA

```

```

FOTOVOLTAICO (Wh/DIA)"
385 print "ENE. FEB. MAR. ABR. MAYO JUN. JUL. AGO. SET.
OCT. NOV. DIC."
390 for i= 68 to 98
395 for j= 1 to 12
400 print x(i,j)
405 next j,i
410 end

```

Se le dan los datos conforme pide el programa.

La nomenclatura usada tiene la siguiente descripción:

r: mínima radiación promedio diaria (Wh/m²/DIA).
c: máximo consumo diario (Wh/DIA).
Vp: Tensión nominal del panel (V).
Vc: Tensión de una célula solar a máxima potencia (V).
Ic: Corriente de una célula solar a máxima potencia (A).
Ac: Area de una célula solar (cm²).
EFS: Eficiencia del sistema.
cah: Carga media del sistema (Ah).
h: Número diario de horas equivalentes de sol nominal
(hr)(*).
i: Capacidad necesaria del panel (A).
fsi: Corriente para el diseño del panel (A).
ncs: Número de células solares en serie.
ngcs: Número de grupos de células solares en serie.
ntc: Número total de células solares.
ap: Area del panel.

(*) Se considera sol nominal en usos terrestres la radiación con espectro AM 1,5 e intensidad de 1 kW/m.

ENERGIA SOLAR GLOBAL DIARIA RECIBIDA SOBRE UNA SUPERFICIE
HORIZONTAL EN LA ESTACION DE HUANCAYO EN 1974 (Wh/m²/DIA)

ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
3889	5952	4586	6029	6209	5975	5263	6494	6033	6935	7706	7911
3996	5100	5825	3958	6587	5855	4496	6494	4469	7606	8214	8318
5990	5461	6290	5390	6432	5573	2877	6101	4533	6763	7372	8292
4774	4763	6652	5468	6617	5975	5662	6494	6454	7580	6669	6781
5007	6631	6707	5561	6271	4867	5261	6146	4957	7879	5089	5961
5621	4992	4870	5557	6293	5520	4802	4707	3303	6742	5863	5485
5341	5252	6086	6179	6227	3931	4042	4816	4929	7544	7080	7142
5153	7050	4569	6434	5289	5105	5896	3937	4929	7544	7080	7142
6979	5498	6489	5471	5647	5789	5948	4377	5716	7032	7625	5353
5448	5583	7076	6064	6201	2618	5948	5564	7167	7086	7867	6580
3505	7545	4683	5000	6334	3762	6057	5357	7557	6369	7632	7692
5492	4613	5657	5628	6334	4666	6057	5054	7386	5426	7408	7720
4404	6784	4106	5774	6276	4229	6057	5295	7395	7160	6633	7904
3786	6080	5738	6642	6334	4774	6057	6202	6587	6915	7916	5891
3348	4075	7104	6449	6334	5744	5869	6093	7036	7906	7016	7461
5068	6038	4322	4774	6334	5836	5227	5210	6978	7528	7317	4978
6714	3753	6202	4455	6291	5852	6031	3735	6592	7122	6060	7319
4718	6048	5948	5737	6306	5607	5869	4924	6890	6940	6415	4534
3837	5932	6174	5410	6334	5728	4852	5609	3926	4860	8287	5121
4399	4964	7523	5935	5610	5020	3806	6592	7268	3998	7710	5206
7540	5418	7100	4052	5699	4459	5642	5170	7411	6167	7214	6903
6301	5428	7712	4983	5707	4344	5759	6725	7287	7922	6254	5483
4312	4736	7249	6819	5642	5789	4374	6360	4710	5990	6448	5183
5995	5999	6002	6902	5642	5876	5775	5968	3879	7678	8183	4958
5214	3547	7379	6869	5671	5876	6265	5322	4123	8140	6870	7364
6655	6334	5537	3681	5929	5789	6265	6138	6825	7498	6390	7295
6991	5525	6922	6145	4973	5752	6265	6735	7287	4692	7152	8018
4138	6721	7502	5752	4105	5838	6265	7011	7175	5418	6452	7594
6100	0	7608	6522	6121	5324	6265	3812	6239	6009	5610	7141
4715	0	5247	6786	6178	3492	6265	5185	5837	7582	6305	8318
7978	0	6057	0	6151	0	6265	6085	0	7434	0	7234

PRODUCCION DIARIA DE ENERGIA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO (Wh/DIA)

ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
74.0	113.	87.3	114.	118.	113.	100.	123.	114.	132.	146.	150.
76.0	97.1	110.	75.3	125.	111.	85.6	123.	85.0	144.	156.	158.
114.	103.	119.	102.	122.	106.	54.7	116.	86.3	128.	140.	157.
90.8	90.6	126.	104.	125.	113.	107.	123.	122.	144.	126.	129.
95.3	126.	127.	105.	119.	92.6	100.	117.	94.3	150.	96.8	113.
107.	95.0	92.7	105.	119.	105.	91.4	89.6	62.8	120.	111.	104.
101.	99.9	115.	117.	118.	74.8	76.9	91.6	93.8	143.	134.	135.
98.1	134.	86.9	122.	100.	97.1	112.	74.9	93.8	143.	134.	135.
132.	104.	123.	104.	107.	110.	113.	83.3	108.	133.	145.	101.
103.	106.	134.	115.	110.	49.8	113.	105.	136.	134.	149.	125.
66.7	143.	89.1	95.2	120.	71.6	115.	101.	143.	121.	145.	146.
104.	87.8	107.	107.	120.	88.8	115.	96.2	140.	103.	141.	146.
83.8	129.	78.1	109.	119.	80.5	115.	100.	140.	136.	126.	150.
72.0	115.	109.	126.	120.	90.8	115.	118.	125.	131.	150.	112.
63.7	77.5	135.	122.	120.	109.	111.	116.	133.	150.	133.	142.
96.4	114.	82.2	90.8	120.	111.	99.5	99.1	132.	143.	139.	94.7
127.	71.4	118.	84.8	119.	111.	114.	71.1	125.	135.	115.	139.
89.8	115.	113.	109.	120.	106.	111.	93.7	131.	132.	122.	86.3
73.0	112.	117.	103.	120.	109.	92.3	106.	74.7	92.5	157.	97.5
83.7	94.5	143.	113.	106.	95.5	72.4	125.	138.	76.1	146.	99.1
143.	103.	135.	77.1	108.	84.8	107.	98.4	141.	117.	137.	131.
119.	103.	146.	94.8	108.	82.7	109.	128.	138.	150.	119.	104.
82.1	90.1	138.	129.	107.	110.	83.2	121.	89.6	114.	122.	98.6
114.	114.	114.	131.	107.	111.	109.	113.	73.8	146.	155.	94.4
99.2	67.5	140.	130.	107.	111.	119.	101.	78.5	154.	130.	140.
126.	120.	105.	70.0	112.	110.	119.	116.	129.	142.	121.	138.
133.	105.	131.	117.	94.6	109.	119.	128.	138.	89.3	136.	152.
78.7	127.	142.	109.	78.1	111.	119.	133.	136.	103.	122.	144.
116.	0	144.	124.	116.	101.	119.	72.5	118.	114.	106.	135.
89.7	0	99.9	129.	117.	66.4	119.	98.7	111.	144.	120.	158.
151.	0	115.	0	117.	0	119.	115.	0	141.	0	137.

BALANCE ENERGETICO DIARIO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO (Wh/DIA)

ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
-17.9	21.3	-4.68	22.7	26.2	21.7	8.20	31.6	22.8	40.0	54.7	58.6
-15.9	5.10	18.9	-16.6	33.4	19.4	-6.39	31.6	-6.91	52.8	64.3	66.3
22.0	11.9	27.7	10.6	30.4	14.1	-37.2	24.1	-5.69	36.7	48.3	65.8
-1.10	-1.31	34.6	12.1	33.9	21.7	15.8	31.6	30.8	52.3	34.9	37.1
3.33	34.2	35.7	13.8	27.3	.667	8.16	25.0	2.38	58.0	4.89	21.4
15.0	3.04	.724	13.8	27.8	13.1	-.569	-2.37	-29.1	36.3	19.6	12.4
9.69	7.99	23.8	25.6	26.5	-17.1	-15.0	-.303	1.84	51.6	42.8	43.9
6.11	42.2	-5.00	30.5	8.70	5.19	20.2	-17.0	1.84	51.6	42.8	43.9
40.8	12.6	31.5	12.1	15.5	18.2	21.2	-8.66	16.8	41.8	53.1	9.92
11.7	14.3	42.7	23.4	26.0	-42.1	21.2	13.9	44.4	42.9	57.7	33.2
-25.2	51.6	-2.83	3.20	28.5	-20.3	23.3	9.99	51.8	29.2	53.3	54.2
12.5	-4.16	15.7	15.1	28.5	-3.15	23.3	4.22	48.6	11.3	49.0	54.9
-8.14	37.1	-13.8	17.9	27.4	-11.4	23.3	8.81	48.8	44.3	34.2	58.4
-19.9	23.7	17.2	34.4	28.5	-1.10	23.3	26.0	33.4	39.6	58.7	20.1
-28.2	-14.4	43.2	30.7	28.5	17.3	19.7	24.0	41.9	58.5	41.5	50.0
4.49	22.9	-9.70	-1.10	28.5	19.1	7.52	7.19	40.8	51.3	47.3	2.78
35.8	-20.5	26.0	-7.17	27.7	19.4	22.8	-20.8	33.5	43.6	23.3	47.3
-2.16	23.1	21.2	17.2	28.0	14.7	19.7	1.75	39.1	40.1	30.1	-5.67
-18.9	20.9	25.5	11.0	28.5	17.0	.382	14.7	-17.2	.534	65.7	5.50
-8.24	2.51	51.2	21.0	14.8	3.58	-19.5	33.5	46.3	-15.8	54.7	7.12
51.5	11.1	43.1	-14.8	16.5	-7.10	15.4	6.43	49.1	25.4	45.3	39.4
27.9	11.3	54.8	2.87	16.6	-9.29	17.6	36.0	46.7	58.8	27.0	12.3
-9.89	-1.82	46.0	37.8	15.4	18.2	-8.71	29.0	-2.32	22.0	30.7	6.68
22.1	22.2	22.2	39.4	15.4	19.8	17.9	21.6	-18.1	54.1	63.8	2.40
7.27	-24.4	48.4	38.7	15.9	19.8	27.2	9.33	-13.4	62.9	38.8	48.2
34.7	28.5	13.4	-21.9	20.8	18.2	27.2	24.8	37.9	50.7	29.6	46.8
41.1	13.1	39.7	25.0	2.68	17.5	27.2	36.2	46.7	-2.66	44.1	60.6
-13.2	35.9	50.8	17.5	-13.8	19.1	27.2	41.4	44.6	11.1	30.8	52.5
24.1	-92	52.8	32.1	24.5	9.36	27.2	-19.4	26.7	22.4	14.8	43.9
-2.22	-92	7.90	37.2	25.6	-25.5	27.2	6.72	19.1	52.3	28.0	66.3
59.9	-92	23.3	-92	25.1	-92	27.2	23.8	-92	49.5	-92	45.7

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

- Expuesta a un flujo de fotones (presencia de luz), una célula solar puede ser considerada como una fuente de intensidad variable y de tensión fija.
- Colocando una resistencia de carga variable entre los bornes de la célula solar, se van a dar valores simultáneos de voltaje y corriente, que van a definir la curva IV de ésta.
- La curva IV de una célula solar es la principal caracterización de ésta y también la que finalmente decide su valor económico.
- El rendimiento de una célula solar está dada por la potencia eléctrica que ésta pueda suministrar.
- Considerando siempre una intensidad de radiación solar I_s , la curva de potencia toma valores nulos en $V=0$ y en $V=V_{ca}$, pero no así en cualquier otro punto intermedio, llegando a tener un valor máximo en $V=V_{mp}$, $I=I_{mp}$, en donde $I_{mp}V_{mp}=P_{máx}$.
- $P_{máx}$ es así la máxima potencia obtenible de la célula solar. Es en base a esta potencia máxima, que se define el factor de eficiencia de una célula solar, como la relación de la máxima potencia fotovoltaica a la potencia solar incidente:

$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_s A}$$

- El punto de potencia máxima es el punto en el cual debería trabajar una célula solar en el caso óptimo, es por esto que se le denomina "el punto de trabajo".
- Una definición adicional, usada también frecuentemente es la del "factor de llenado" FF, por medio del cual se expresa la potencia máxima en función de la corriente y voltaje máximos:

$$P_{máx} = I_{mp} V_{mp} = FF I_{cc} V_{ca}$$

- La característica principal de un panel solar es nuevamente su curva IV, la que se mide del mismo modo que a una célula solar.
- Si todas las células solares de que consta el panel, tienen la misma característica IV, la curva IV del panel resulta proporcionalmente idéntica a la de las células solares individuales.

- Si las células solares del panel, difieren en su característica IV, esto va a producir perturbaciones locales que con el tiempo la destruyen.
- Una de las fallas más comunes en la conexión serie, es la del "Hot Spot" ó "disco caliente". La cual ha sido simulada en la evaluación de dos células solares de diferente área conectados en serie. En la cual una célula solar de menor área ó célula defectuosa (célula solar 1 figura 20) es conectada en serie con una célula de mayor área ó célula buena (célula solar 2). La composición de las curvas IV individuales, da la curva IV del conjunto, en donde se ha tomado un punto de trabajo (I,V).

Se observa que para este punto de trabajo la conexión otorga una potencia IV menor que la potencia que daría la célula solar 2 a la misma corriente: IV_2 .

De la figura 20 también se puede observar que para una corriente I de la conexión, la célula defectuosa (célula solar 1) está trabajando en el lado negativo de voltajes, consumiendo por lo tanto la potencia restante: $IV_2 - IV$.

La disipación de energía se lleva a cabo en forma de calor, la que recalienta los contactos, terminando por malograrla más aún.

- El voltaje de trabajo del panel solar se mantiene más o menos constante alrededor del punto de potencia óptima, para los niveles de radiación útiles y se fija con el número de células solares que son conectadas en serie.
- La corriente que suministra el panel va a variar según las condiciones de radiación.
- Las posibles aplicaciones con el sistema de conversión fotovoltaica son en:
 - a) Iluminación.
 - b) Bombeo de agua.
 - c) Refrigeración.
 - d) Sistemas de comunicación.
- El costo del Watt-pico de una célula solar en la década del '60 era del orden de \$. 100.00, actualmente gracias al desarrollo tecnológico de producción el precio del Watt-pico por célula es de \$10.00.
- Considerando la eventual implementación de una casa familiar, cuyo consumo diario es de aproximadamente

5kWhr y suponiendo que en el lugar a instalarse el sistema fotovoltaico tenga una radiación de 5kWhr/m², se debe instalar un área de aproximadamente 10 metros cuadrados de paneles solares, al costo actual de aproximadamente de \$. 10,000.00.

- Por lo tanto, para aplicaciones masivas, el precio del Watt-fotovoltaico es aún elevado, rentándose sólo en casos especiales, por ejemplo en lugares que sea muy costoso el transporte de las energías convencionales.