



Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Investigación en Energía

CURSO-TALLER SISTEMAS FOTOVOLTAICOS



**SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS:
Dimensionamiento Básico
para la Electrificación Rural
FV y sus Aplicaciones en el
Sector Agropecuario**

AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ

www.cie.unam.mx



Objetivo



Centro de Investigación en Energía, UNAM



Proporcionar los elementos básicos de dimensionamiento y diseño de la tecnología fotovoltaica aplicada en la implementación de proyectos de electrificación rural.



Electrificación Rural



Centro de Investigación en Energía, UNAM





Usos Típicos: Iluminación Básica



Centro de Investigación en Energía, UNAM





Riego Agrícola



Centro de Investigación en Energía, UNAM





Abrevaderos



Centro de Investigación en Energía, UNAM





Refrigeración



Centro de Investigación en Energía, UNAM



Electrificación Doméstica



Centro de Investigación en Energía, UNAM





Bombeo de Agua



Centro de Investigación en Energía, UNAM





Sistemas Fotovoltaico



Un sistema fotovoltaico es un conjunto de elementos que permiten obtener electricidad a un voltaje específico a partir de la energía luminosa del Sol.

CLASIFICACIÓN

Sistemas
Autosustentados

Sistemas de CD

Sistemas en CA

Acoplamiento Directo

A. c/Seguidor de potencia

A. c/Inversor

A. c/Baterías/Controlador

A. c/Bat./Cont./Inversor



Sistemas Fotovoltaico



**Sistemas
Híbridos**

**Fotovoltaico/Motogenerador
Fotovoltaico/eolico
Fotovoltaico/Eólico/otogenerador**

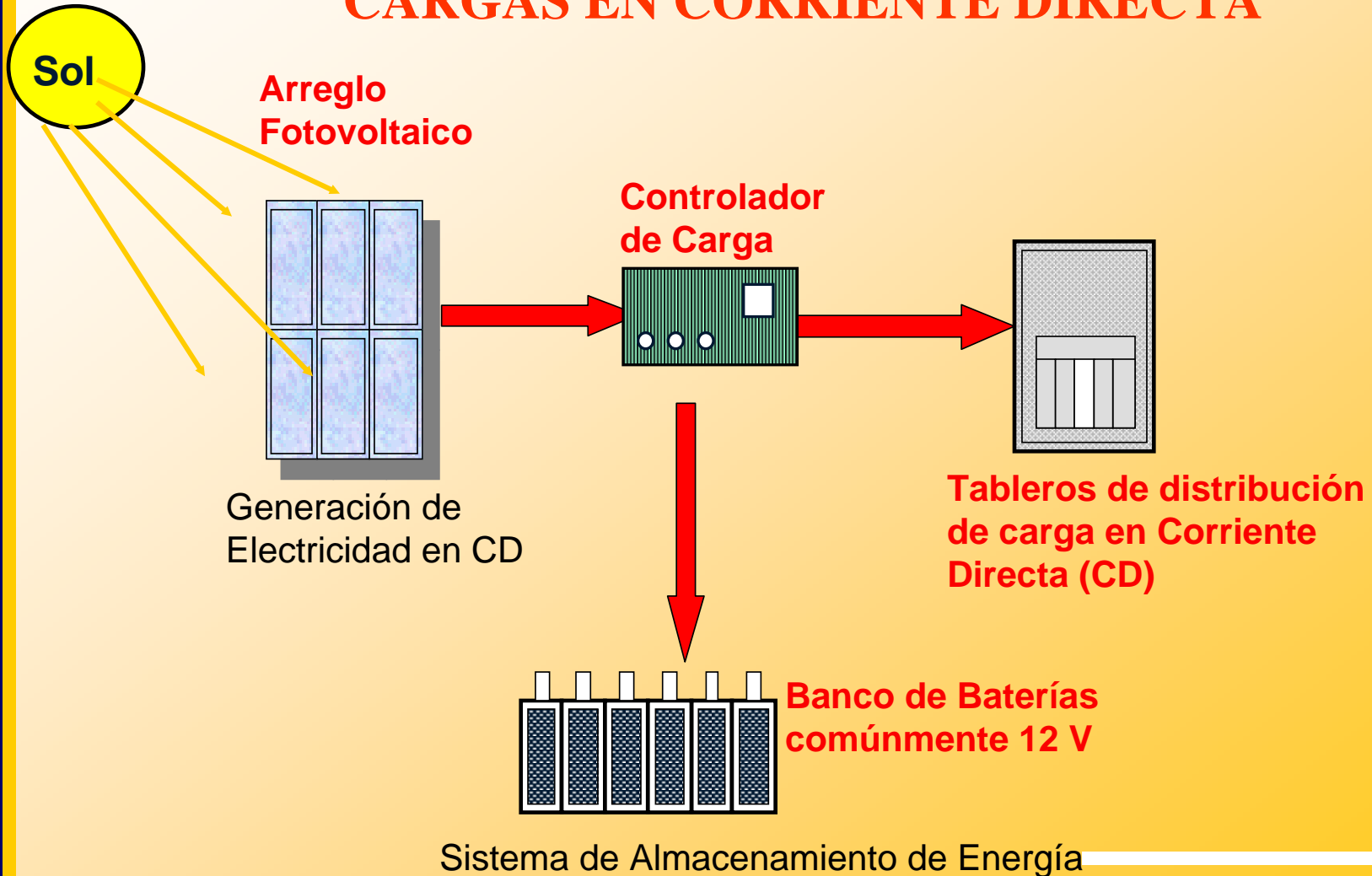
**Sistemas interactivos
con la red**

**FV/Baterías/Inversor/Red
FV/Inversor/Red**



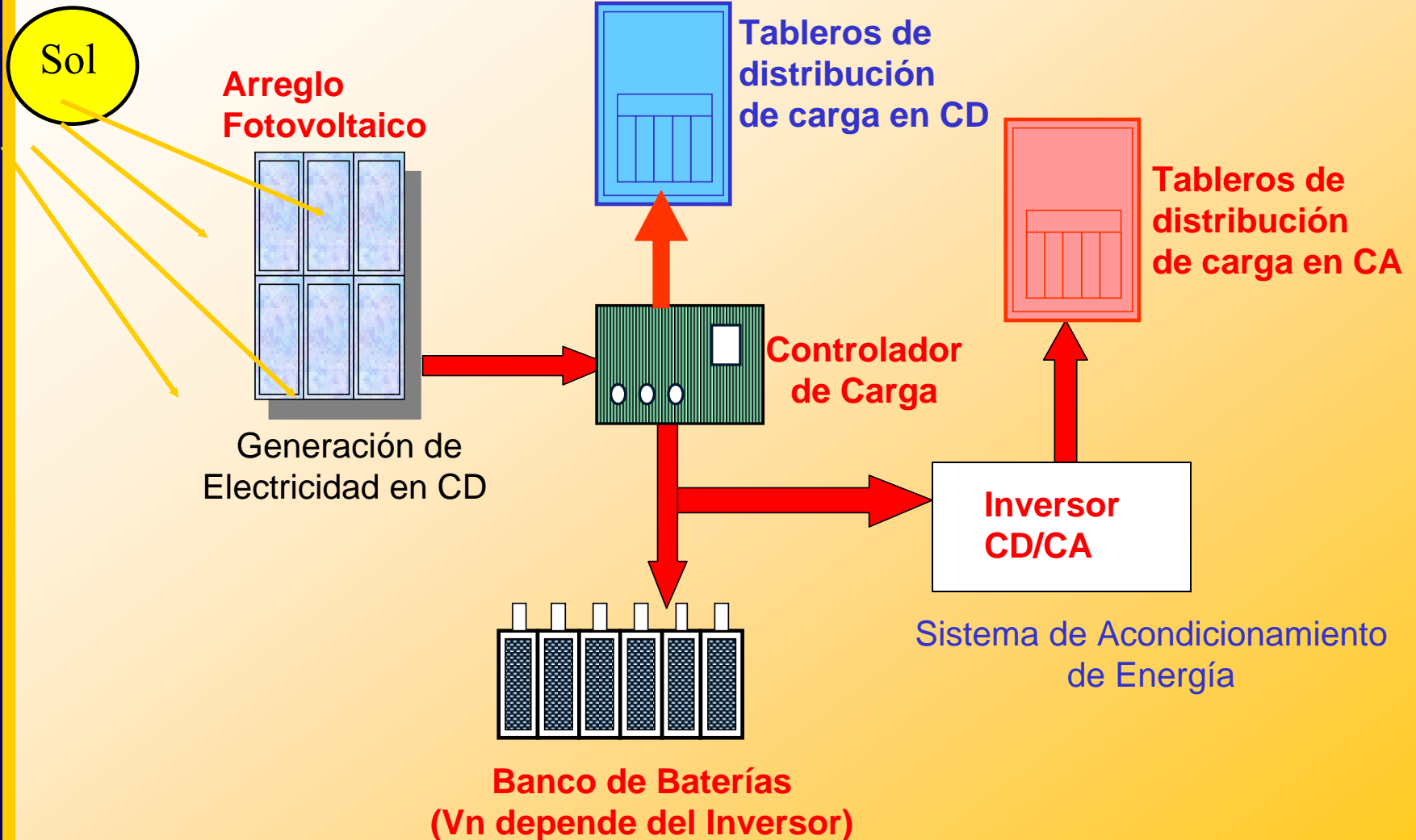
ILUMINACIÓN BÁSICA

CARGAS EN CORRIENTE DIRECTA





CARGAS EN CD Y CA





Dimensionamiento Fotovoltaico



Procedimiento a través del cual se determina la potencia pico óptima del arreglo FV que generará la energía necesaria para una aplicación específica en cierta localidad.

Así mismo, determinar la capacidad del sistema de almacenamiento de energía en base a los requerimientos de autonomía requeridos.



Conocimientos Necesarios:



GEOGRÁFICOS



Localización del sitio,
Clima,
Conocimiento del sitio,
RECURSO SOLAR del
sitio

ENERGÉTICOS



Tipo de Cargas
Tiempo de uso
Potencia total
Energía total

TECNOLÓGICOS



Tipo de módulos
Tipo de controladores
Tipo de estructuras
Tipo de baterías
Tipo de inversor



Criterios Fundamentales para el Dimensionamiento FV



BALANCE ENERGÉTICO

**ENERGÍA GENERADA
AL DÍA**

\geq

**ENERGÍA TOTAL
CONSUMIDA POR DÍA**

**ENERGÍA
ALMACENDADA**

\geq

**3 VECES LA ENERGÍA
CONSUMIDA POR DÍA**

DE DISEÑO...

**CAÍDAS DE VOLTAJE
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

$=$

**3% DEL VOLTAJE
NOMINAL**

SIMPLICIDAD EN EL DISEÑO



Unidades y Términos Comunes

POTENCIA ELÉCTRICA (P): Producto del voltaje con la corriente

Unidad: Watt; Símbolo: W; equivalencia $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A}$

POTENCIA PICO (Pp): En un módulo FV es la potencia máxima generada bajo condiciones estándares de medición.

VOLTAJE NOMINAL (Vn): Es el voltaje de especificación comercial de una carga eléctrica, generador, batería, etc.

ENERGÍA ELÉCTRICA (E): Es la potencia eléctrica consumida, generada ó almacenada en un intervalo de tiempo dado.

$$E = P \times t$$

Si el tiempo se mide en horas (h),
la **unidad para E** es **Watt-hora (W-h)** en el periodo considerado



La energía consumida o producida en un día puede expresarse de manera indistinta mediante las siguientes unidades:

Watt-hora (W-h): Es la cantidad de energía producida o consumida por un equipo eléctrico.
 $1 \text{ kW-h} = 1,000 \text{ W-h}$

Amper-hora (A-h): Es la cantidad de energía consumida o producida por un equipo eléctrico a un voltaje nominal dado.

$$\begin{aligned} 1.2 \text{ kW-h} &= 1,200 \text{ W-h} \\ &= 100 \text{ A-h @ } 12\text{V} \\ &= 50 \text{ A-h @ } 24 \text{ V} \\ &= 25 \text{ A-h @ } 48 \text{ V} \end{aligned}$$



IRRADIANCIA: Potencia luminosa incidente en una unidad de área.

Unidad: W/m^2

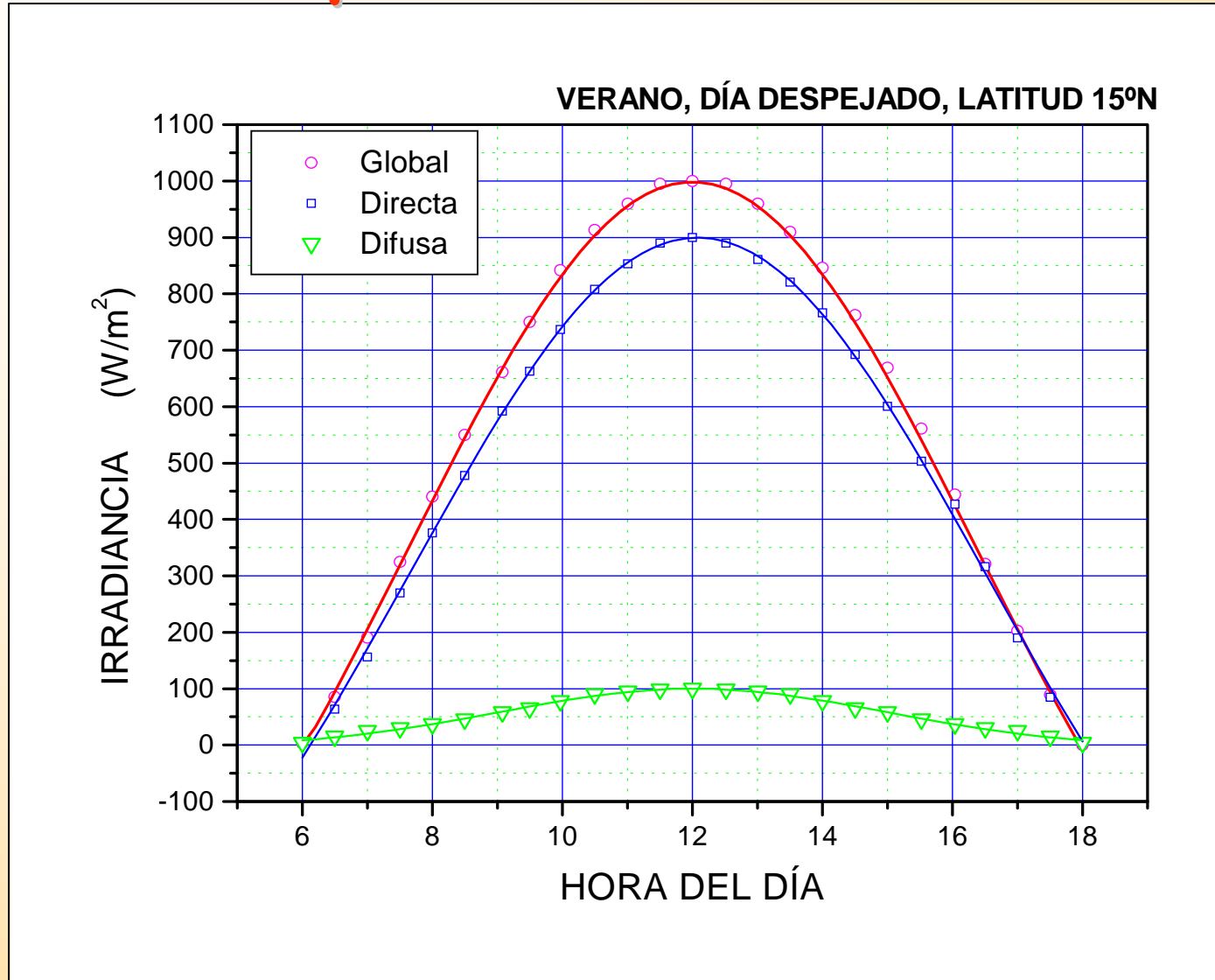
Máximo valor Irr directa= $1,000 W/m^2$

INSOLACIÓN: Irradiancia acumulada en un tiempo dado

Unidad: $W-h/m^2$

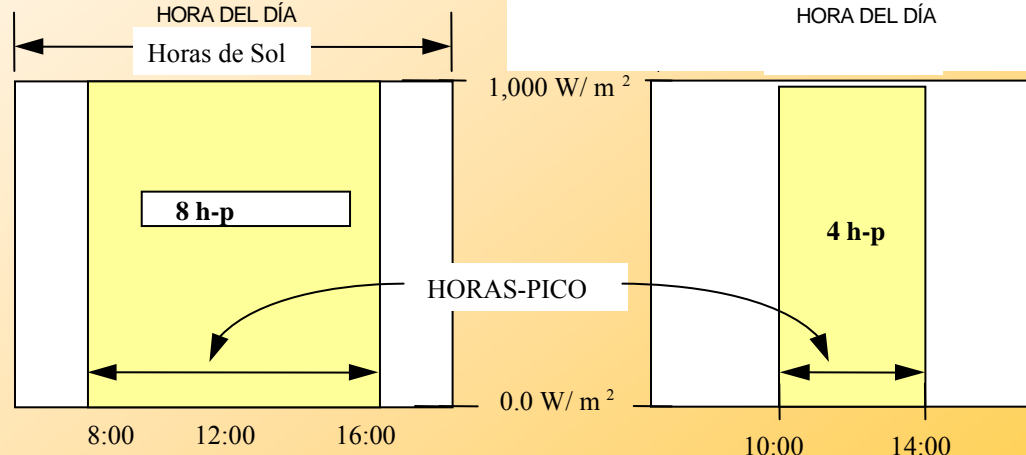
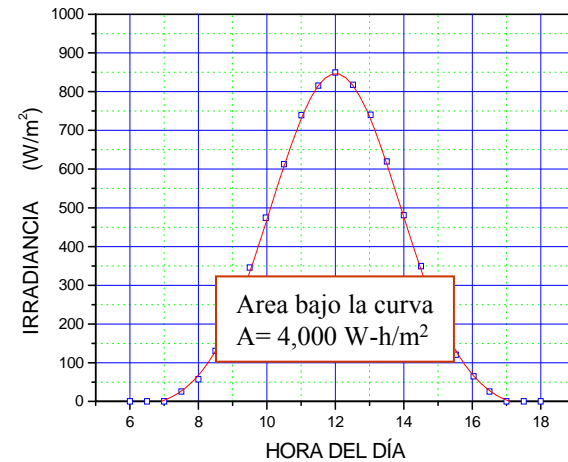
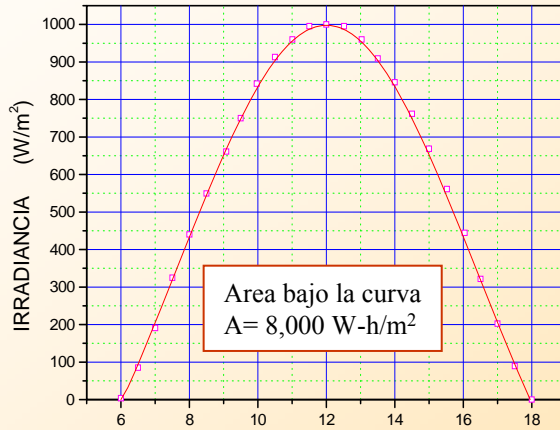


Energía Recibida en un Captador Horizontal





HORAS PICO H_p : Energía disponible del Sol obtenida por la integración de la irradiancia respecto del tiempo y expresado en horas de máxima irradiancia.

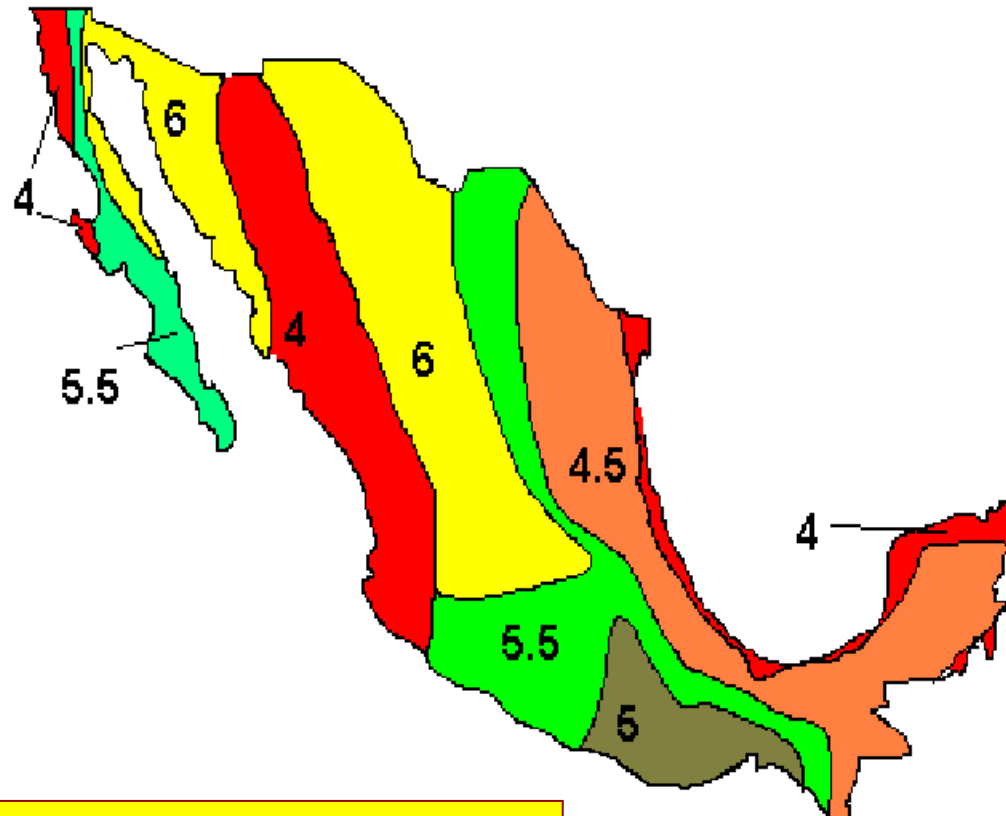


El concepto de horas-pico como una manera de trabajar la energía recibida en un captador



Mapa de Insolación Solar Global diaria promedio anual

Captador Horizontal

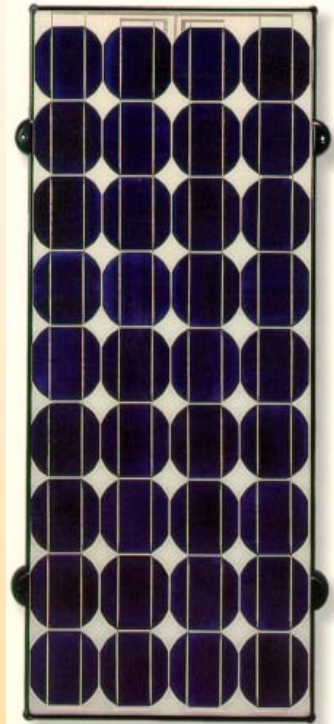


$$R_S(I) = R_S(H) / \cos(0.87L)$$

Unidades Horas-Pico



Módulos de Silicio Monocristalino



CARACTERÍSTICAS

MÓDULO SIEMENS SM55

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

No. Celdas: 36

$V_{ca} = 21.7 \text{ V}$

$V_m = 17.4 \text{ V}$

$I_{cc} = 3.45 \text{ A}$

$I_m = 3.15 \text{ A}$

Largo: 129.3 cm

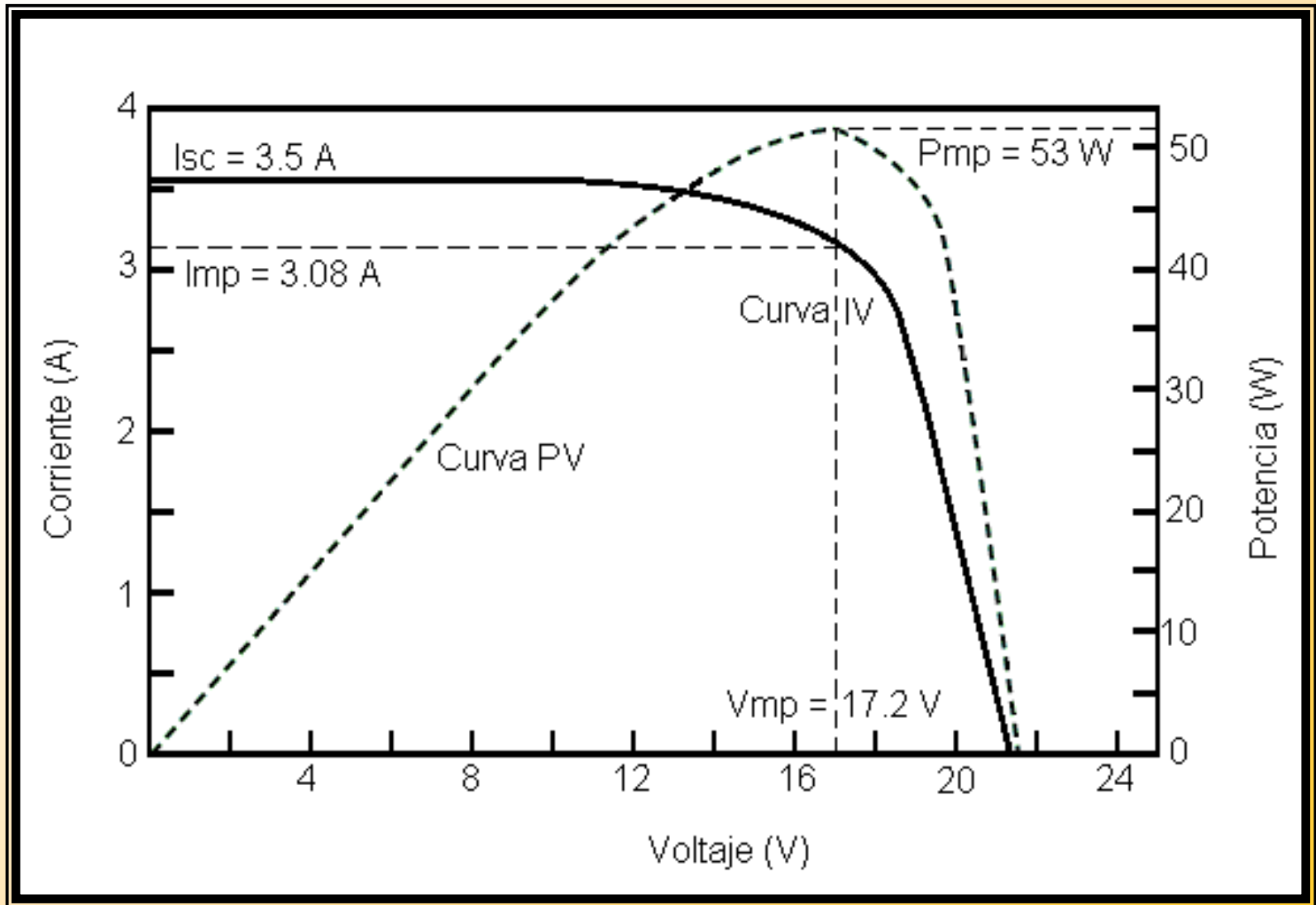
Ancho: 32.9 cm

Peso 5.5 kg

Espesor: 3.4 cm



El Módulo Fotovoltaico



Características eléctricas bajo condiciones NTC



Métodos de Dimensionamiento



AMPER-HORA: Método sencillo aplicable para sistemas FV's con voltajes nominales iguales o menores de 48 VCD.

Características:

El método asigna a los módulos de 33 y 36 celdas un voltaje nominal de 12 V CD, es decir, $V_n(\text{módulo}) = 12 \text{ V}$

El voltaje nominal requerido por las cargas, V_n , proporcionado por el fabricante, es obtenido al configurar módulos en serie.

No. de módulos en serie = $V_n / V_n(\text{módulo}) = V_n / 12$



La energía generada por el módulo (o un arreglo en serie hasta 48 V CD se obtiene de multiplicar I_m bajo STC con el Recurso Solar.

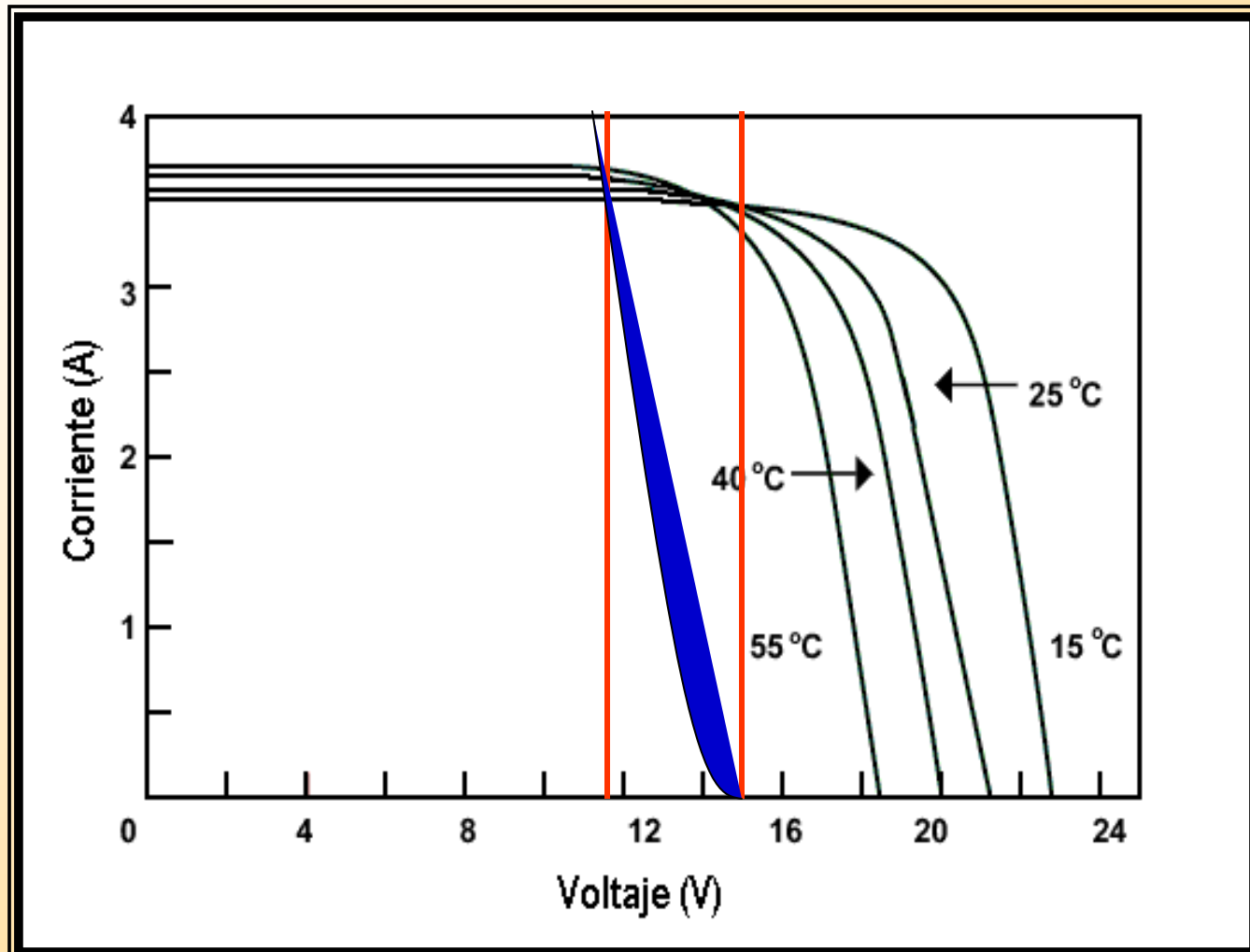
No se consideran variaciones de voltaje debido a la temperatura y a la irradiancia.



Efecto de la Temperatura



En el voltaje: reducción de $2.2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}/\text{celda}$
En la potencia: reducción del $0.35\%/^{\circ}\text{C}$



Método de Amper-hora

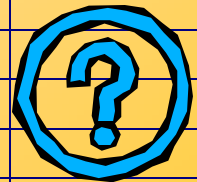


ENERGÍA GENERADA POR MÓDULOS

RECURSO SOLAR CONSIDERADO: $R_s = 5$ HORAS PICO = $5,000 \text{ W-h/m}^2$

NTC: 25°C , $1,000 \text{ W/m}^2$

MÓDULO	No. celdas	Pp (W)	Vm (V)	Im (A)	Vn	Eg
S-M55	36	53	17.4	3.4	12	
S-M75	33	48	15.9	3.02	12	
S-M65	30	43	14.5	2.95	12	
H-4810	36	48	17	2.8	12	
MSX-60	36	60	17.8	3.37	12	
MSX-53	36	53	17.8	3.0	12	
MSX-83	36	83	17.1	4.85	12	
MSX-120	36	120	17.1	7.0	12	
S-PC4J	36	75	17	4.4	12	
S-a-MSA-10	-	10	15	0.66	12	
US-a-328	-	32	16.5	1.94	12	
KC-80	36	80	16.9	4.73	12	





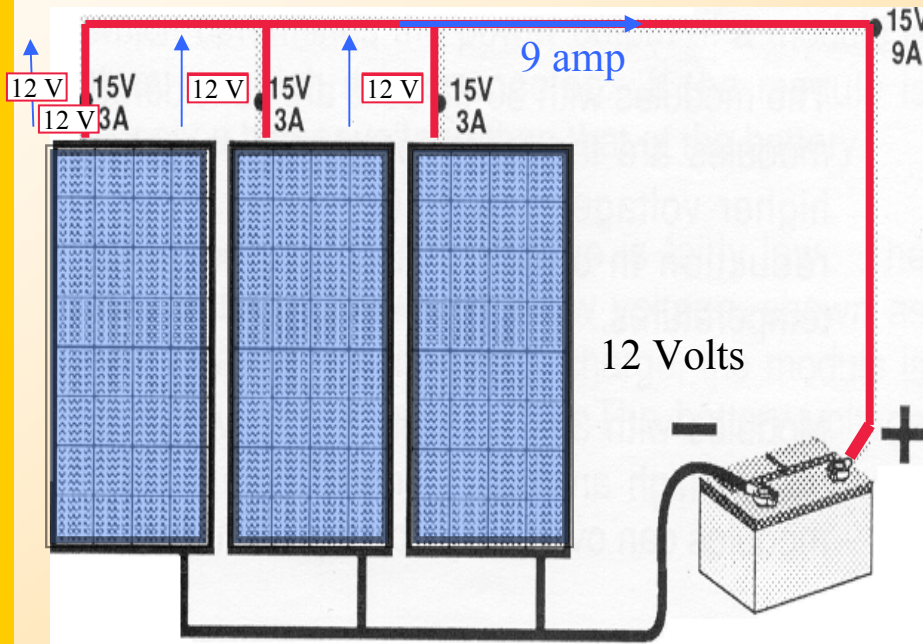
Módulos Fotovoltaicos

Conexiones Serie - Paralelo

Conexión Paralelo

AUMENTO DE CORRIENTE

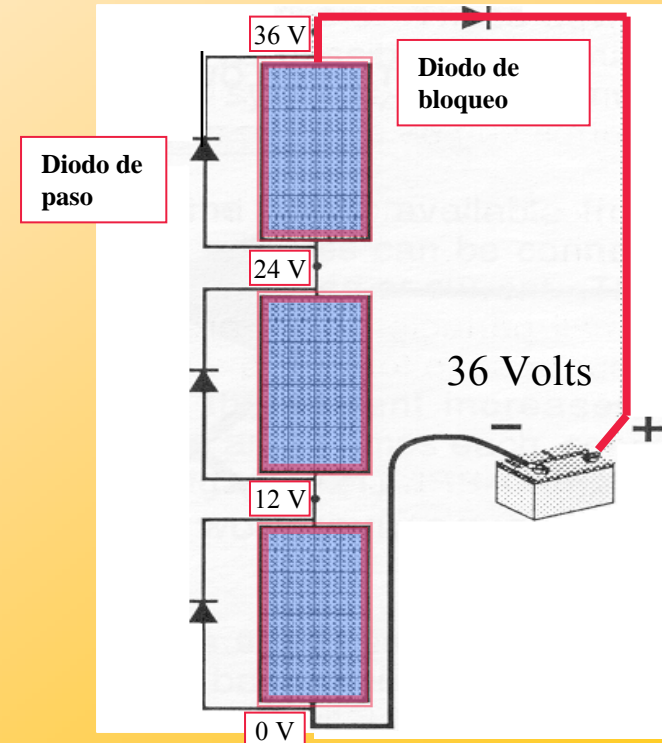
Tres módulos Conectados en paralelo



Conexión Serie

AUMENTA EL VOLTAJE

Tres módulos Conectados en serie





WATTS-HORA: Método que se aplica cuando el voltaje nominal del sistema FV es grande.

Características:

- ▶ **Recomendado para voltajes mayores o iguales a 120 V DC.**
- ▶ **Es necesario establecer el Voltaje nominal V_n ; ó de Operación V_{op} , o el rango de voltajes que la carga en CD requiere.
Esta información proviene del fabricante**



- ▶ El método asigna para el cálculo del No. de módulos conectados en serie para dar el V_n de la carga en CD, el V_m del módulo bajo condiciones normales de operación NOCT.
- ▶ Para módulos de 36 celdas, $V_M \approx 15 \text{ V} @ T_m \sim 50^\circ\text{C}$.

$$\text{No. Módulos en Serie} = V_n / V_M$$

- ▶ Las pérdidas de energía deben ser conocidas explícitamente para el caso de sistemas autónomos y/o híbridos.
- ▶ Recomendado para sistemas interactivos con la red.



Incrementando Potencia

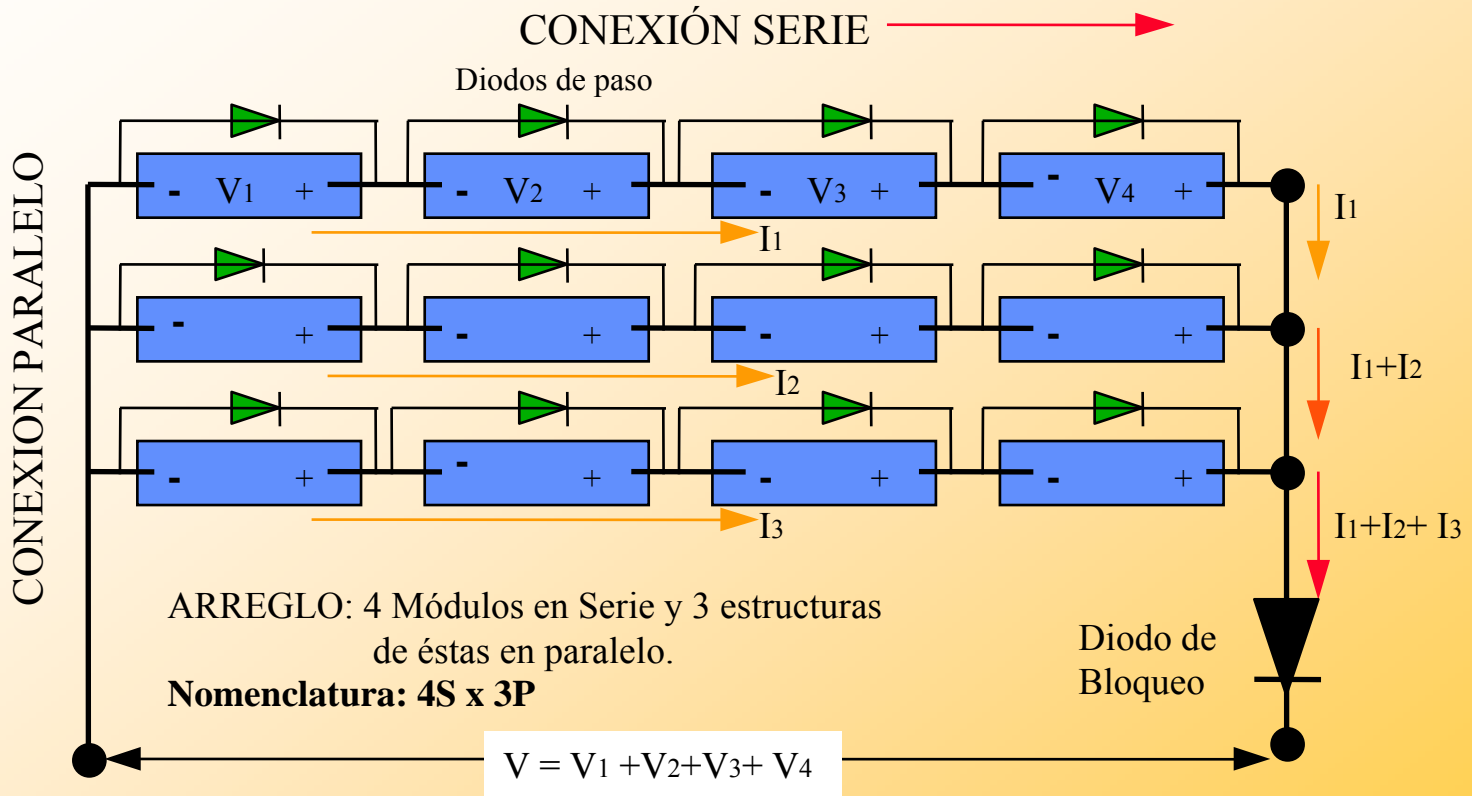


DIAGRAMA ESQUEMATICO DE CONEXION ENTRE MÓDULOS

EN SERIE: LOS VOLTAJES DE CADA MODULO SE SUMAN

EN PARALELO: LA CORRIENTE DE CADA MODULO SE SUMAN



Estimación de la energía generada por un arreglo Fotovoltaico NOC

Módulo Fotovoltaico

Irradiancia : 1000 W/ m²; AM1.5;

$T_m = 25^\circ\text{C}$ $P_p = 55 \text{ W}$

$T_m = 62^\circ\text{C}$ $P_p = 44 \text{ W}$

	Sonora	Sn. Cristobal	Tonalá	Unidades
Hrs - Pico	8	3.8	5.5	Al Día
Pot. C/ Módulo	44	44	44	Watts
Energía	352	167.2	242	W - h
Arreglo FV 5 Módulos	220	220	220	Watts
Energía Total	1 760	836	1 210	W - h

Maxima Generación por día (por año) = Rayos perpendiculares a los Módulos



Ruta de Dimensionamiento



EL QUE..., EL PARA QUE..., y EL COMO...

1º: IDENTIFICACIÓN DE CARGAS ELÉCTRICAS
Cargas en CD o en CA.

2º. ELABORAR UNA RELACIÓN DE CARGAS EN CD Y CARGAS EN CA.

3º. IDENTIFICACIÓN DEL VOLTAJE NOMINAL Y SU POTENCIA DE OPERACIÓN DE LAS CARGAS.
De preferencia, todas las cargas deben de operar al mismo V_n .



4°. IDENTIFICACIÓN DE LA POTENCIA NOMINAL Ó DE OPERACIÓN DE LAS CARGAS.

5°. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE OPERACIÓN DE CADA CARGA.

6°. CÁLCULO DE LA ENERGÍA ESTIMADA (parcial y total).



EJEMPLO:

CUADRO DE CARGAS DE UN PROBLEMA HIPOTÉTICO

RELACIÓN DE CARGAS EN CD (o CA) A USAR Y SUS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Tipo de Carga	Vn (V)	Pn (W)	Ic (A)	Cant.	P _{ST} (W)	Tiempo uso diario (h)	Ec1 (A-h)	Ec1 (W-h)
Lámp. Flores.	12	20	1.6	5	100	4	32.0	400
Lamp. PL	12	13	1.2	4	52	6	28.8	312
Lamp.PL	12	18	1.8	4	72	2	14.4	144
Bomba Shur	12	70	4	1	70	4	16.0	280
TV	12	50	4.5	1	50	4	18.0	200
TOTAL					344		109.2	1336



ELECCIÓN DEL VOLTAJE NOMINAL DEL SISTEMA FV

RECOMENDACIONES:

- a) **Cargas únicamente en CD:** Se elige como voltaje nominal del sistema $V_n(S)$ el V_n de la carga que tenga el máximo voltaje nominal.

Por lo cual: $V_n(S) = V_n(\text{máximo de la carga}) = V_{n_{AFV}} = V_{n_B}$

- b) **Cargas en CA:** Las cargas en corriente alterna requieren de un inversor CD/CA. De aquí que el voltaje nominal del sistema $V_n(S)$ estará definido por el voltaje nominal del inversor seleccionado, V_{n_I} .

Por lo que: $V_n(S) = V_{n_I} = V_{n_{AFV}} = V_{n_B}$



Cálculo del Tamaño del Arreglo

Criterio Amper-hora



No. de módulos en serie= un panel

$$N_s = V_n(S)/12$$

siendo 12 V el voltaje nominal del módulo

No. de paneles

en paralelo N_p : Se calcula considerando el balance de energía y considerando las pérdidas de energía por el manejo y almacenamiento de ésta.

$$N_p = \frac{E_c \cdot F_s}{H_p \cdot I_m \cdot \eta_w \cdot \eta_c \cdot \eta_I \cdot \eta_{cB}}$$



◀ **E_c es la energía total a consumir por las cargas, expresada en **amper-hora** (dividir la Energía en Watt-hora entre el voltaje nominal del sistema).**

◀ **F_s es el factor de sobredimensionamiento (5% al 10%).**

◀ **H_p recurso solar disponible en horas-pico.**

◀ **I_m corriente del módulo en el punto de máxima potencia bajo STC (proporcionado por el fabricante)**

◀ **η_T es la eficiencia total en el manejo de energía:**

η_W eficiencia en las líneas de transmisión (97%),

η_C eficiencia en el controlador (97%),

η_I eficiencia en el inversor (95%),

η_{cB} eficiencia coulombica en batería (95%).



EJEMPLO:



Consideremos el cuadro de cargas anterior, y se desea calcular cuantos módulos en serie y en paralelo se requieren para generar la energía requerida en una localidad que tiene:

a) Un recurso solar promedio diario anual de 6,000 W-h/m² al día.

b) Un recurso solar mínimo promedio diario mensual de 3.5 H_p

Solución

Datos: $E_c = 109.2 \text{ A-h @ } 12\text{VCD}$;

¿Cual es el $V_n(S)$?

¿Cual es el voltaje del banco de baterías?

Seleccionen módulo. ¿Cual es el voltaje nominal del módulo a usar?

¿Cuantos módulos se requieren en serie para dar $V_n(S)$?

¿Cual es el recurso de la localidad en H_p

Calculen N_p para (a) y para (b)



Cálculo de la Capacidad de Almacenamiento

La capacidad de un banco de baterías, C_B , se dimensiona en función de la energía consumida diariamente por las cargas eléctricas y la autonomía requerida en el sistema.

En un sistema FV la autonomía del banco de baterías se define como el número de días que funcionarán las cargas eléctricas con cero insolación.

Unidad de medición: **amper-hora @ Vn**



Baterías Comerciales para Sistemas FV



UNAM

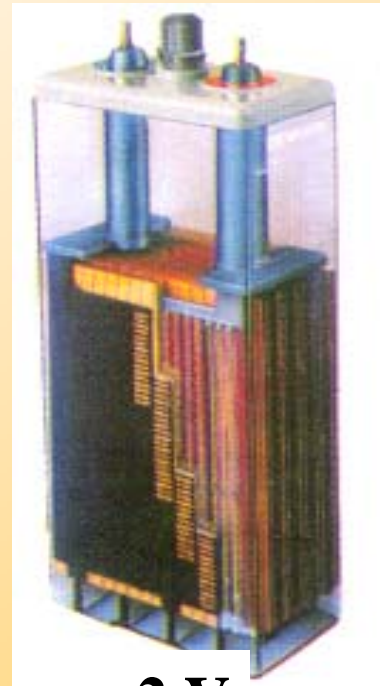
Centr



6 V



12 V



2 V



6 V



Características eléctricas de un acumulador Pb-ácido

**$V_n = 12V$; voltaje nominal
 $V_{oc} = 12.8V$ @ 100% carga;
 $V_{oc} = 11.4V$ @ 0% carga
 $V_{oc} < 11.0 V$ muerta**

**Voltaje máximo de carga $V_M = 15.2 V$
Voltaje mínimo de descarga $V_m = 11.8 V$ @ 80% DOD**

**Eficiencia en el proceso carga/descarga: 92% al 98%.
Eficiencia en voltaje de carga y descarga: 88%
Eficiencia global: 84%**



Cálculo de la Capacidad



$$C_B = \frac{E_c \cdot A_u}{V_{n_B} \cdot f_u \cdot F_i}$$

E_c es la energía consumida expresada en W-h.

A_u es la autonomía del sistema expresada en días.

V_{n_B} es el voltaje nominal del banco de baterías (igual al $V_n(S)$).

f_u es el factor de uso de la batería,

$f_u = 0.5$ para placas delgadas y $f_u = 0.8$ para placas gruesas.

F_i es el factor de incremento en la capacidad debido a una razón de descarga mas lenta,

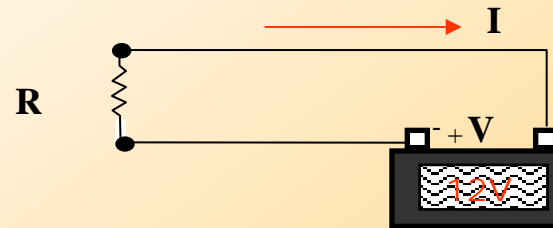
$F_i = 1.05$ para placa delgada y $F_i = 1.35$ para placa gruesa.



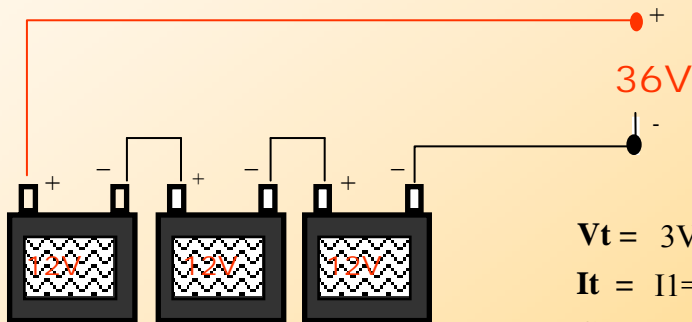
Sistema de Almacenamiento de Energía



- V** Voltaje
- I** Corriente
- R** Resistencia (carga)
- C** Capacidad en AH



Una Batería

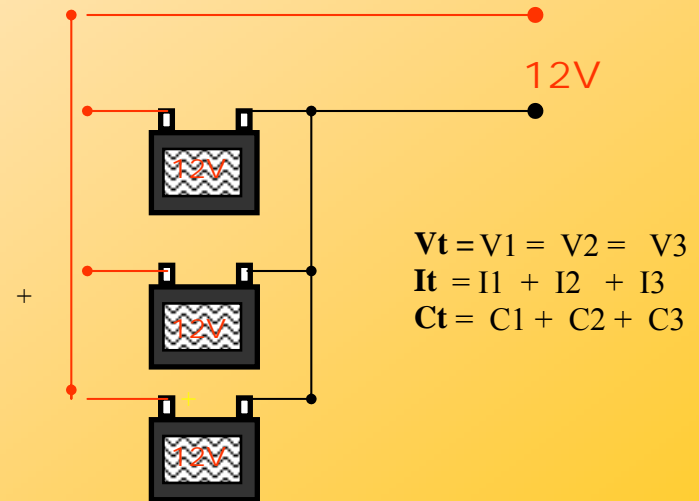


Baterías conectadas en Serie

$$V_t = 3V$$

$$I_t = I_1 = I_2 = I_3$$

$$C_t = C_1 = C_2 = C_3$$



Baterías conectadas en Paralelo

$$V_t = V_1 = V_2 = V_3$$

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3$$

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3$$



Sistemas Fotovoltaicos

Estructuras para Paneles FV

Centro de Investigación en Energía, UNAM



Sistemas Fotovoltaicos con seguidor solar Horizontal



Sistemas Fotovoltaicos con Seguidor Solar



Centro de Investigación en Energía, UNAM





Controladores



Dispositivo electrónico cuya función es el de mantener el estado de carga adecuado en el banco de baterías.

Características:

1. Evitar la sobrecarga.
2. Evitar la descarga fuera de los rangos establecidos.

Puntos de Control:

1. Desconexión de módulos FV: de 14.0 a 15.5 V.
2. Voltaje de flotación: de 13.5 a 14.0 V
3. Reconexión de módulos FV: de 12.8 a 13.4 V
4. Desconexión de cargas por bajo voltaje: de 11.4 a 11.8 V
5. Reconexión de cargas: de 13.2 a 13.8 V



Controlador de carga



Controlador de carga - Medidor

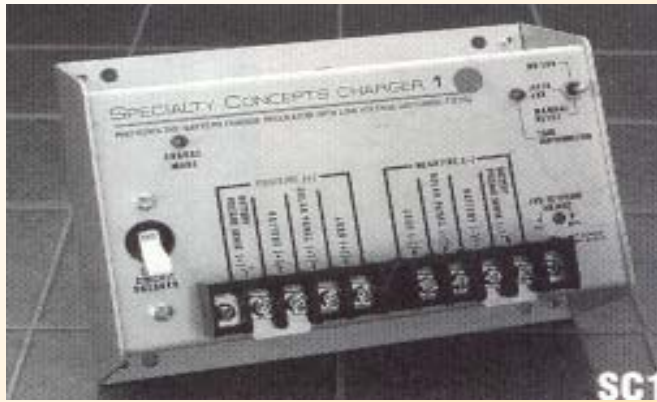
para sistemas fotovoltaicos Modelo CMCX -
12/15/20



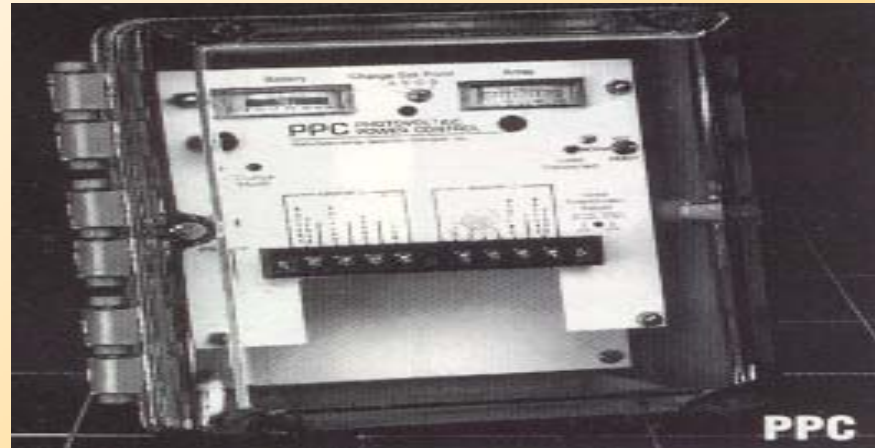
Controladores de carga



Centro de Investigación en Energía, UNAM



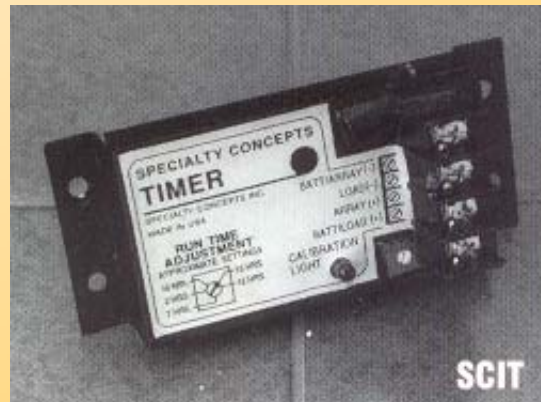
SC1



PPC



ASC-E



SCIT



SC3/15



INVERSORES



Dispositivo electrónico que transforma la electricidad en Corriente Directa a Corriente Alterna.

La entrada de alimentación es con voltajes nominales desde 12, 24, 36, 48 hasta 120, 240 VCD.

La salida de la electricidad es de 120/240 VAC nominales con ondas tipo cuadrada, semisenoidal y senoidal pura con frecuencias de 50 o 60 Hz.

Se especifican por la potencia nominal dada por el fabricante (desde 100 W hasta ...) y se seleccionan por la potencia necesaria para satisfacer la potencia de un conjunto de cargas.



Inversores



Centro de Investigación en Energía, UNAM



UPG 400/700/1300



Características Fundamentales de un Inversor



- ✘ 4000 watts de potencia continua
- ✘ baja distorsión, Señal de salida de onda perfecta
- ✘ 94% de eficiencia pico
- ✘ Construido para cargar, 120 amperes, para baterías
- ✘ Conexión automática del generador
- ✘ User programmable setpoints
- ✘ Large, LCD digital meter



- ✘ 1500 watts de potencia continua
- ✘ Señal de salida de onda modificada
- ✘ 94% de eficiencia pico
- ✘ Construido para cargar, 120 amperes, para baterías
- ✘ Capacidad de 3500 watts en un instante
- ✘ User programmable setpoints
- ✘ Protección, automática para bajo estado de carga de baterías.



Bibliografía Recomendada



1. Lasneir F. And Ang T.G., *“Photovoltaic Engineering Handbook”*, IOP Publishing Ltd 1990, Edit by Adam Hilger, New York.
2. Strong S.T. and Scheller W.G., *“The Solar Electric House”*, Edit by Sustainability Press, 1993, Massachusetts.
3. Markvart T., *“Solar Electricity”*, second edition, Edit by John Wiley and Sons, 2000, New York.
4. New England Solar Electric Inc., *“The Solar Electric Independent Home”*, 4th Editio, 1998, Worthington, Ma.



Gracias

asj@cie.unam.mx

www.cie.unam.mx