

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL ESPOL

“ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA”

PROFESOR: ING. MSC. DOUGLAS AGUIRRE H.

2009

INTRODUCCIÓN

¿QUE ES LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA?

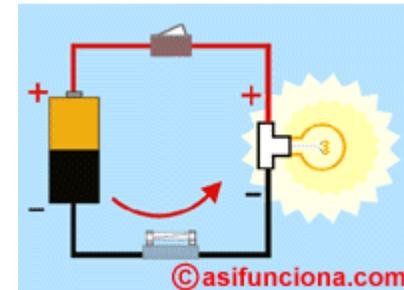
Se denomina energía solar fotovoltaica a una forma de obtención de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos.



INTRODUCCIÓN

¿QUE ES LA ENERGÍA ELÉCTRICA?

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos



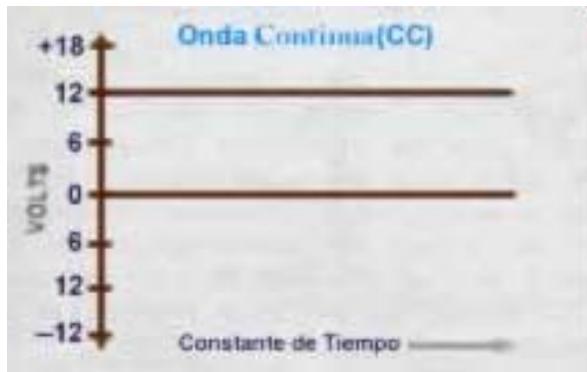
se manifiesta como corriente eléctrica, es decir, como el movimiento de cargas eléctricas negativas, o electrones, a través de un cable conductor metálico

INTRODUCCIÓN

ENERGÍA ELÉCTRICA

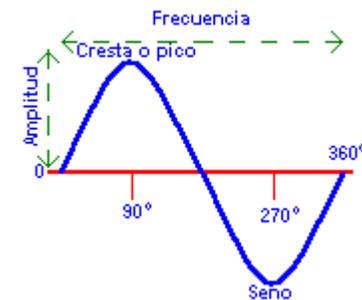
Existen dos tipos de corriente eléctrica:

- 1.- Corriente Continua
- 2.- Corriente Alterna



Corriente Continua.-al flujo de cargas eléctricas que no cambia de sentido con el tiempo

Representación de un ciclo de corriente alterna



Corriente Alterna.- a la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente

UNIDADES

Voltio (V, unidad de potencial eléctrico y fuerza electromotriz, “V”)

El voltio se define como la diferencia de potencial a lo largo de un conductor cuando una corriente con una intensidad de un amperio utiliza un vatio de potencia:

$$V = \frac{J}{C} = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^3 \cdot \text{A}}$$

Ohmio (Ω , unidad de resistencia eléctrica “R”)

Un ohmio es la resistencia eléctrica que existe entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia de potencial constante de 1 voltio aplicada entre estos dos puntos produce, en dicho conductor, una corriente de intensidad 1 amperio, cuando no haya fuerza electromotriz en el conductor:

$$\Omega = \frac{V}{A} = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^3 \cdot \text{A}^2}$$

UNIDADES

Corriente (A, "I")

La corriente o intensidad eléctrica es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe a un movimiento de los electrones en el interior del material:

$$I = C/s \text{ (columbios sobre segundos)}$$

Potencia Eléctrica (W, "P")

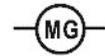
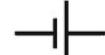
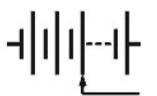
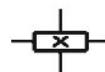
Se define como la cantidad de trabajo por unidad de tiempo realizado por una corriente eléctrica:

$$P = V \cdot I \rightarrow \text{en Corriente Directa o Continua}$$

$$P = V \cdot I \cdot \cos\theta \rightarrow \text{en Corriente Alterna}$$

SIMBOLOGÍA

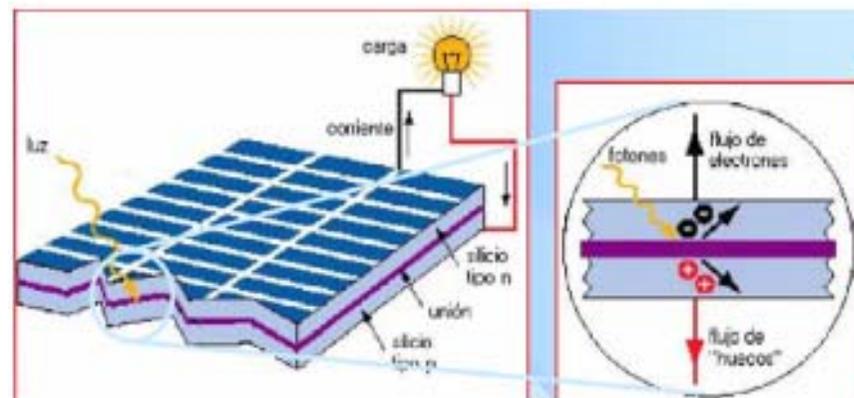
Pilas y generadores

	Generador símbolo general		Generador sinusoidal *
	Generador sinusoidal		Generador de corriente continua
	Generador de corriente		Generador de tensión
	Puede hacer de motor o generador		Pila *
	Pila		Pilas (batería)
	Batería con tensión regulable		Batería con conexión de tensión móvil
	Generador de resonancia		Indicador de batería
	Indicador de sobrecarga		

EFECTO FOTOVOLTAICO

- Proceso mediante el cual se convierte luz solar en electricidad.

“Los paneles, módulos o colectores fotovoltaicos están formados por dispositivos semiconductores tipo diodo que, al recibir radiación solar, se excitan y provocan saltos electrónicos, generando una pequeña diferencia de potencial en sus extremos”.



SISTEMA FOTOVOLTAICO

Paneles.- Están formados por células elaboradas a base de silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos, siendo capaces de generar cada una de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 V.

Elementos:

Generador.- Conjunto de paneles o celdas.

Acumulador.- Almacena la energía.

Regulador de Cargas.- Protege el sistema ante sobrecargas o descargas eléctricas.

Inversor.- Convertidor de corriente continua en alterna.

VENTAJAS

MEDIO AMBIENTALES

- No contamina: No produce emisiones de CO₂ ni de otros gases contaminantes a la atmósfera.
- No consume combustibles.
- No genera residuos
- No produce ruidos
- Es inagotable

VENTAJAS

SOCIO-ECONÓMICAS

- Su instalación es simple
- Requiere poco mantenimiento
- Tienen una vida larga (20 años)
- Resiste condiciones climáticas extremas: granizo, viento, temperatura, humedad.
- No existe una dependencia de los países productores de combustibles.
- Instalación en zonas rurales → desarrollo tecnologías propias.
- Se utiliza en lugar de bajo consumo y en casas ubicadas en parajes rurales donde no llega la red eléctrica general
- Venta de excedentes de electricidad a una compañía eléctrica.
- Tolera aumentar la potencia mediante la incorporación de nuevos módulos fotovoltaicos.

DESVENTAJAS

- Su elevado coste (El kWp instalado cuesta alrededor de 7,000 - 10,000 USD)



Teoría de bandas

- Bandas de energía: agrupaciones de niveles energéticos permitidos
- Energía de band gap: cantidad de energía requerida para liberar de su órbita (en torno al núcleo a un electrón de la capa más exterior a un estado libre, y así moverlo desde un nivel de valencia a un nivel de conducción. Unidad: electronvoltios.
- Si: 1,1 eV
- GaAs: 1,42 eV

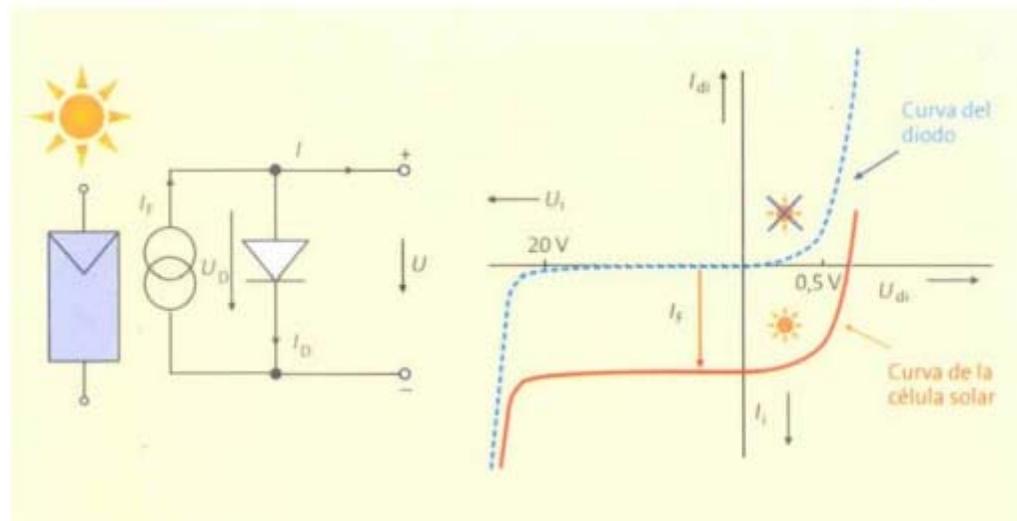
Energy Gap for Some Candidate
Materials for Photovoltaic Cells

Material	Bandgap (eV)
Si	1.11
SiC	2.60
CdAs ₂	1.00
CdTe	1.44
CdSe	1.74
CdS	2.42
CdSnO ₄	2.90
GaAs	1.40
GaP	2.24
Cu ₂ S	1.80
CuO	2.00
Cu ₂ Se	1.40
CuInS ₂	1.50
CuInSe ₂	1.01
CuInTe ₂	0.90
InP	1.27
In ₂ Te ₃	1.20
In ₂ O ₃	2.80
Zn ₃ P ₂	1.60
ZnTe	2.20
ZnSe	2.60
AlP	2.43
AlSb	1.63
As ₂ Se ₃	1.60
Sb ₂ Se ₃	1.20
Ge	0.67
Se	1.60

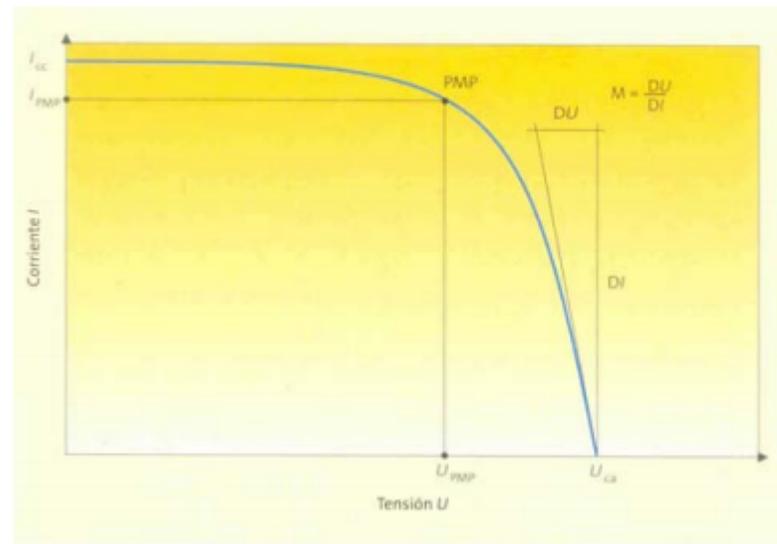
Evolución histórica

- 1839: Edmund Becquerel descubre el efecto fotovoltaico
- 1879: Adam y Day; efecto fotovoltaico en Sólidos. Selenio. Eficiencia 1%
- 1954: Chapin; Primer célula FV moderna. Silicio. Comercialización
- 1958; Vanguard I. Módulo de 5mW
- 1973: Crisis del petróleo; Aplicaciones terrestres
- 2010: 3 GWp en UE (?)

CELULA FOTOVOLTAICA

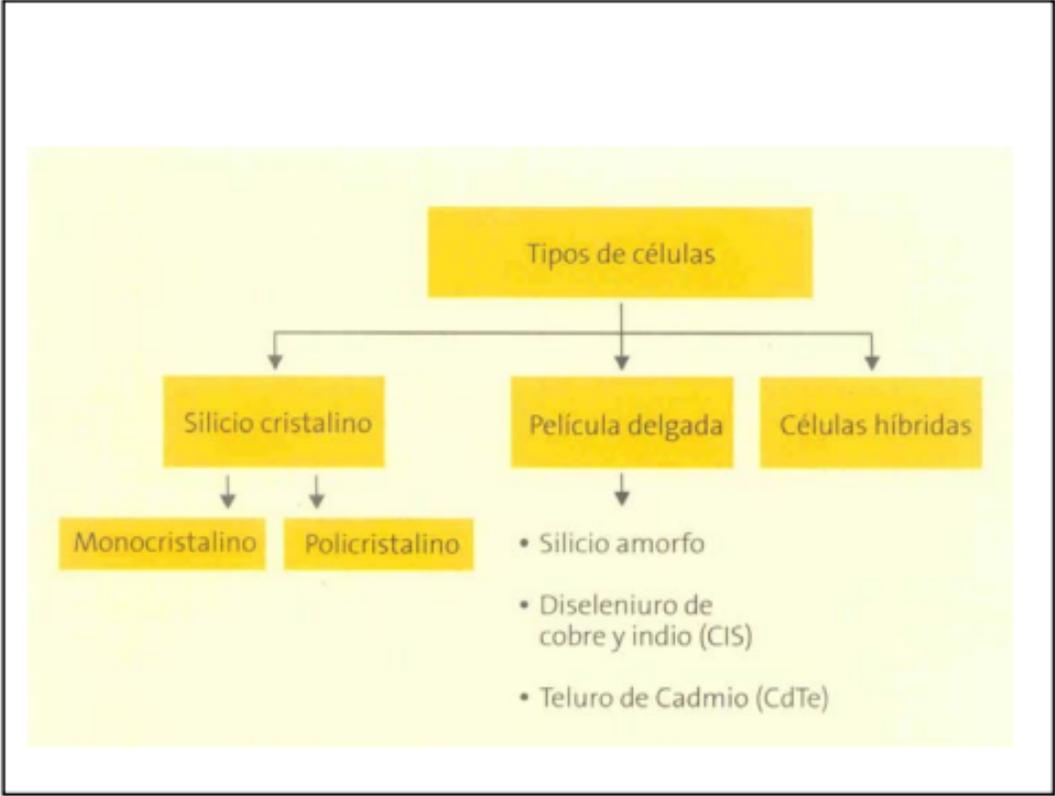


Curva característica (Curva V-I)



Tensión a circuito
Abierto, V_{oc}

Corriente de
Cortocircuito, I_{sc}



Materiales

- Tecnología dominante en la actualidad: Si cristalino (89,5%)
- Tecnologías de capa delgada (espesor: 1-5micras)
 - Si amorfo
 - Policristalino de capa delgada
 - CdTe
 - CuInSe₂
 - Otros (GaAs, GaAlAs, GaInAsP, InAs, InSb)

Silicio monocristalino

- Todos los átomos están perfectamente ordenados. En el proceso de cristalización los átomos se disponen en el mismo orden. Presentan un color azulado oscuro y con un cierto brillo metálico



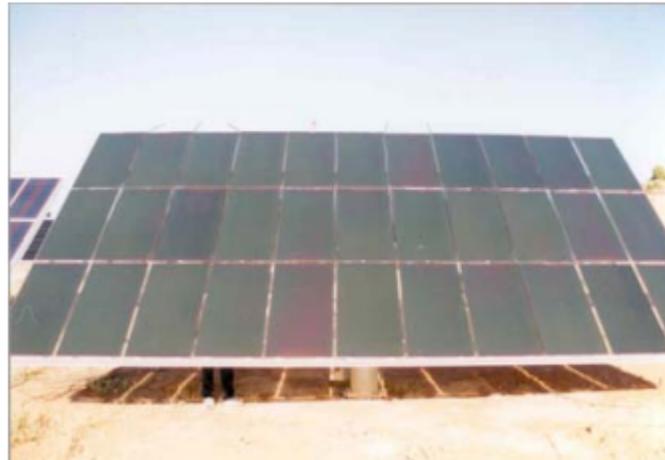
Silicio policristalino

Las direcciones de alineación van cambiando cada cierto tiempo durante el proceso de deposición.



Silicio amorfo

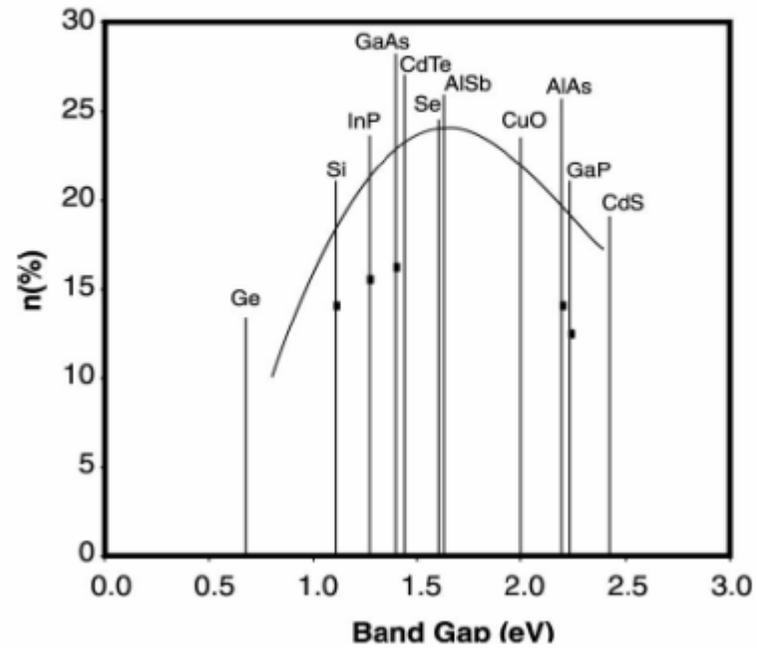
No existe estructura cristalina ordenada, y el silicio se ha depositado sobre un soporte transparente en forma de una capa fina. Presentan un color marrón y gris oscuro.



Eficiencias

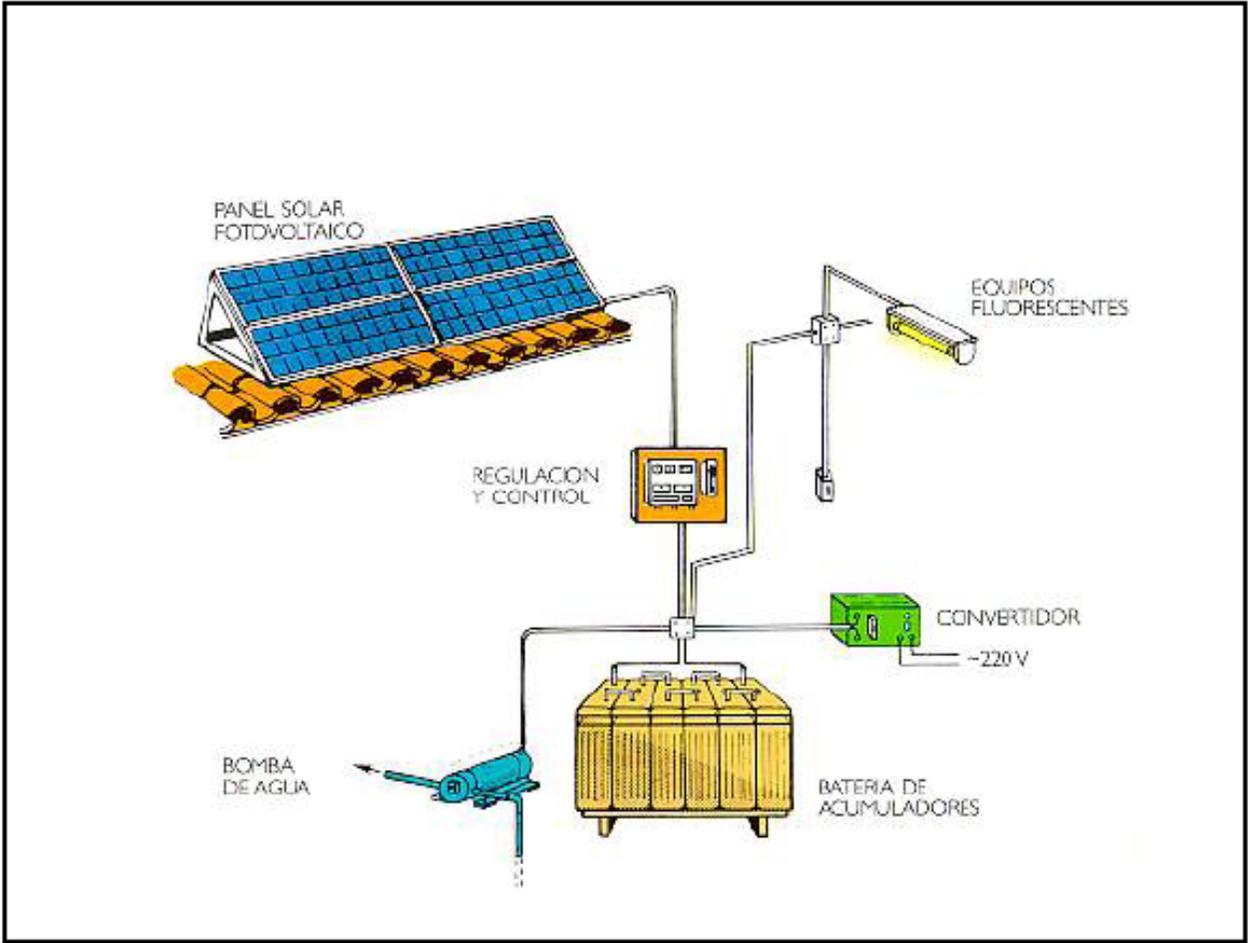
- Comerciales:
 - Si monocristalino: 14-15%
 - Si policristalino: 6-9%
 - Si amorfo: 5-6%
 - Capa delgada: 6-9%
- Laboratorio:
 - Si monocristalino: 24% (C= 1), 28,3% (C=140)
 - Si policristalino: 18.6%
 - Capa delgada: 15%
 - Tandem (multiunión): 34.2 % (GaAs/GaSb C=100)
 - Orgánicos: 1%

Eficiencias



APLICACIONES

- Electrificación de viviendas rurales
- Suministro de agua a poblaciones
- Bombeo de agua / riegos
- Naves ganaderas
- Pastores eléctricos
- Telecomunicaciones: repetidores de señal, telefonía móvil y rural
- Tratamiento de aguas: desalinización, cloración
- Señalizaciones (marítima, ferroviaria, terrestre y aérea) y alumbrado público
- Conexión a la red
- Protección catódica
- Sistemas de telecontrol vía satélite, detección de incendios



Subsistema de almacenamiento Baterías

- Almacenan la energía eléctrica generada durante las horas de radiación para su utilización posterior
- Fiabilidad de la instalación depende del sistema de acumulación

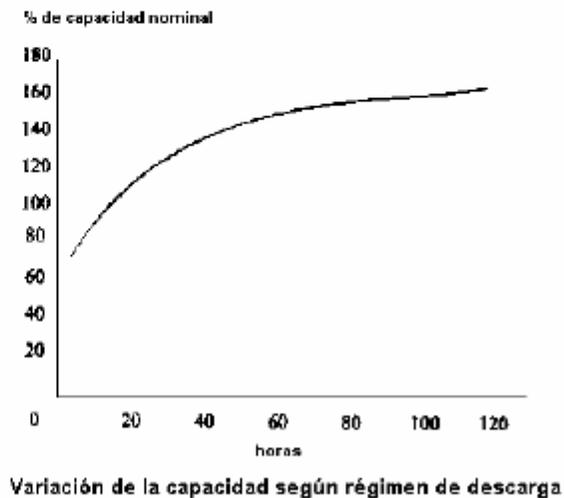


Parámetros característicos

- Capacidad nominal
- Tensión
- Autodescarga
- Profundidad de descarga
- Densidad de electrolito

Capacidad nominal, C_b

- Cantidad de electricidad que puede obtenerse mediante la descarga total de una batería inicialmente cargada al máximo
- Se mide en Ah para un determinado tiempo de descarga:
- El valor de C_b debe venir referenciado con el tiempo de descarga, dado que aumenta a medida que la descarga es más lenta, y disminuye cuando esta es más rápida.



Código	Modelo	Tensión (V)	C100 (Ah)	C24 (Ah)	C10 (Ah)	Medidas (mm)	Peso (Kg)
2273260	2HOPzS	12	260	216	200	285x199x605	99
2273312	3HOPzS	12	312	259,2	240	393x199x505	116
2273390	3HOPzS	12	390	324	300	393x199x605	138
2273520	4HOPzS	12	520	432	400	501x199x605	179
2273650	5HOPzS	12	650	540	500	609x199x605	212
2273780	6HOPzS	12	780	648	600	717x199x605	253
2273910	7HOPzS	12	910	756	700	825x199x605	292
2273914	8HOPzS	12	1040	864	800	933x199x605	331
2273930	10HOPzS	12	1300	1080	1000	1149x199x605	408

Autodescarga

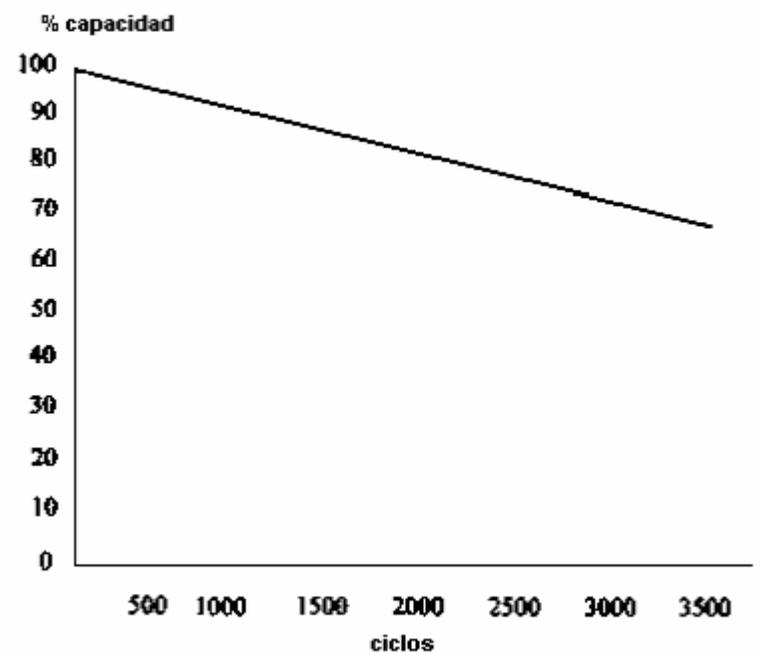
- Pérdida de carga de la batería cuando ésta permanece en circuito abierto. Habitualmente se expresa como porcentaje de la capacidad nominal, medida durante un mes, y a una temperatura de 20 °C.
- Depende del tipo de batería y muy directamente de la temperatura, aumentando con esta.
- La autodescarga hay que considerarla como un consumo adicional, que demanda un cierto porcentaje de energía almacenada. Su valor es aproximadamente de un 0,5 a un 1% diario en baterías de Pb - ácido.

Profundidad de descarga

- Es el valor, en tanto por ciento, de la energía que se ha extraído de un acumulador plenamente cargado en una descarga. Como ejemplo, si tenemos una batería de 100 Ah y la sometemos a una descarga de 20 Ah, esto representa una profundidad de descarga del 20 %.

Ciclos de carga y descarga

- El proceso de carga-descarga se denomina ciclo.
- No es totalmente reversible, ya que el material de las placas se va deteriorando. En consecuencia, pequeña disminución de la capacidad.
- La batería diseñada para el almacenamiento de la energía solar fotovoltaica deben tener un buen comportamiento frente a los ciclos de carga y descarga y una larga duración



Variación de la capacidad según número de ciclos

Conexión

Tres acumuladores de plomo-ácido de 90 amperios-hora y 2,1 voltios pueden conectarse en serie para obtener una batería de 6,3 voltios y de 90 amperios-hora.

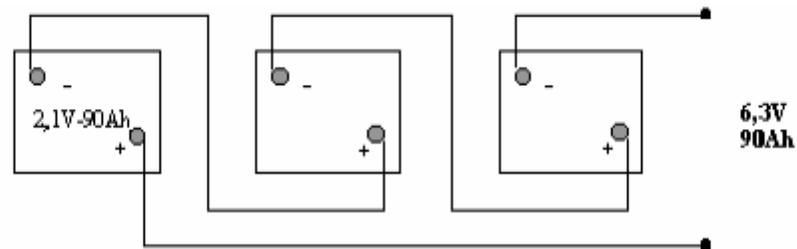


Figura 1: Acumuladores asociados en serie

Los mismos elementos pueden conectarse en paralelo para producir una batería de 2,1 voltios y 270 amperios-hora.

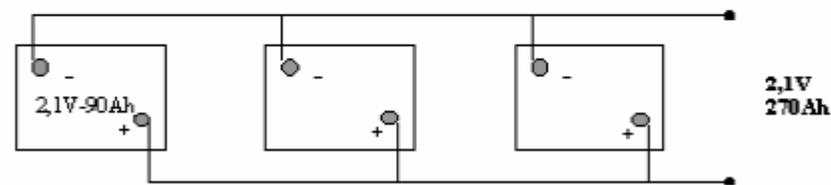


Figura 2: Acumuladores asociados en paralelo

Baterías

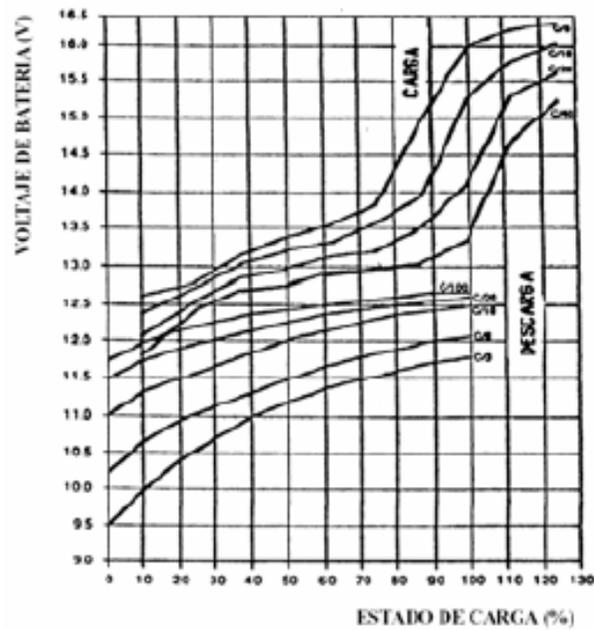
- Se aprovecha mejor la energía fotogenerada
- Puede hacer disminuir la potencia pico del generador
- Mantiene estable la tensión del motor, independientemente de la radiación
- Motor opera en condiciones nominales
- Disminuye la fiabilidad del sistema
- Mantenimiento
- Aumentan el coste (sistemas de bombeo)



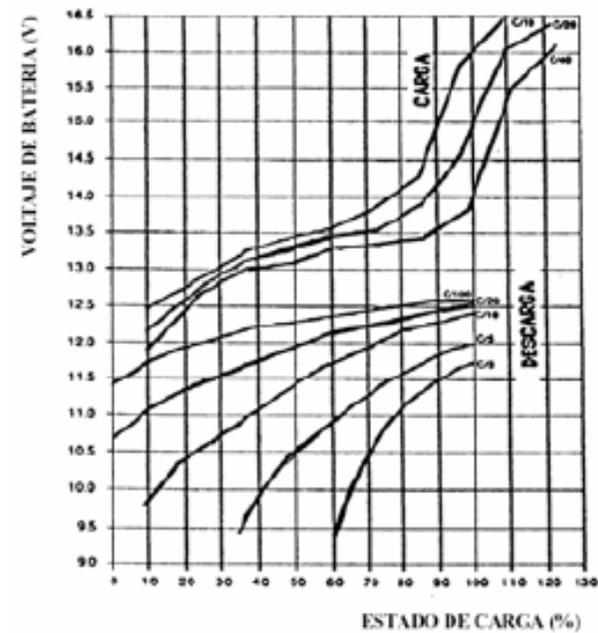


Curvas de carga y descarga

VARIACION EN EL VOLTAJE
DE UNA BATERIA DE Pb-ACIDO DE 12V
Temperatura del Electrolyto: 25°C



VARIACION EN EL VOLTAJE
DE UNA BATERIA DE Pb-ACIDO DE 12V
Temperatura del Electrolyto: 1°C



CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

- 1.- Selección del sitio
- 2.- Identificar el uso: vivienda, conectada a la red, bombeo etc...
- 3.- Calcular el consumo eléctrico.
- 4.- Definir las horas de autonomía
- 5.- Obtener los datos de radiación dependiendo de la inclinación, azimut, y sombras.
- 6.- Seleccionar el panel a utilizar dependiendo de su rendimiento, tamaño, potencia y precio.

DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

Numero máximo de módulos por ramal

El valor máximo de la tensión de entrada al inversor corresponde a la tensión de circuito abierto del generador fotovoltaico cuando la temperatura del módulo es mínima; a una irradiancia mínima de 100 W/m².

$$T_p = T_a + \left[\frac{T_{ONC} - 20}{800} \right] * I$$

$$V_{CA(T \min)} = V_{CA(STC)} - [(25^\circ C + T_p) * \Delta V]$$

$$N_{\max} = \frac{V_{\max(inv)}}{V_{CA(T \min)}}$$

Donde:

T_p : Temperatura del módulo [°C]

T_a : Temperatura ambiente [°C]

T_{ONC} : Temperatura nominal de funcionamiento de la célula [49° C]

I : Irradiancia [100 W/m²]

$V_{CA(STC)}$: Voltaje en circuito abierto del módulo [V] ???

ΔV : Variación del voltaje [V/°C]

V_{\max} : Valor de Voltaje máxima de entrada en el inversor

V_{CA} : Valor del voltaje en circuito abierto a la temperatura mínima

Se redondea a la baja el N_{\max}

DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

Numero mínimo de módulos por ramal

El número mínimo de módulos por ramal viene limitado por la tensión mínima de entrada al inversor y la tensión en el punto de máxima potencia del módulo a una temperatura de 85° C.

Donde:

$V_{PMP(STC)}$: Voltaje de máxima potencia del módulo

ΔV : Variación del Voltaje [V/oC]

$V_{PMP(inv)}$: Voltaje mínimo de seguimiento del punto de máxima potencia

$V_{PMP(T_{max})}$: Voltaje de máxima potencia a la temperatura máxima del módulo

$$V_{PMP(T_{max})} = V_{PMP(STC)} + [(T_{max} - 25^{\circ}C) * \Delta V]$$

$$N_{min} = \frac{V_{PMP(inv)}}{V_{PMP(T_{max})}}$$

[Valor inmediato inferior]

DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

Numero de ramales en paralelo

El número de ramales en paralelo debe cumplir que la corriente de cortocircuito máxima de un ramal por el número de ramales conectados en paralelo sea menor que la corriente máxima admisible de entrada al inversor.

Donde

$I_{\max(inv)}$: Intensidad máxima de entrada al inversor

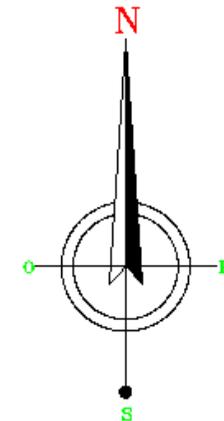
$I_{CC(ramal)}$: intensidad de cortocircuito de cada ramal

$$N_{ramales} = \frac{I_{\max(inv)}}{I_{CC(ramal)}} \quad [\text{Valor inmediato inferior}]$$

DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

Sitios	Numero de Paneles	Área Disponible (m ²)	Área Utilizada (m ²)	Potencia Pico (kWp)
Lugar 1				N*Au
Lugar 2				N*Au
Lugar 3				N*Au
Total →	Σ	Σ	Σ	Σ

Sitios	Azimut con respecto al Sur (γ) [grados]	Inclinación con respecto a la Horizontal (β) [grados]
Lugar 1		
Lugar 2		
Lugar 3		



DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

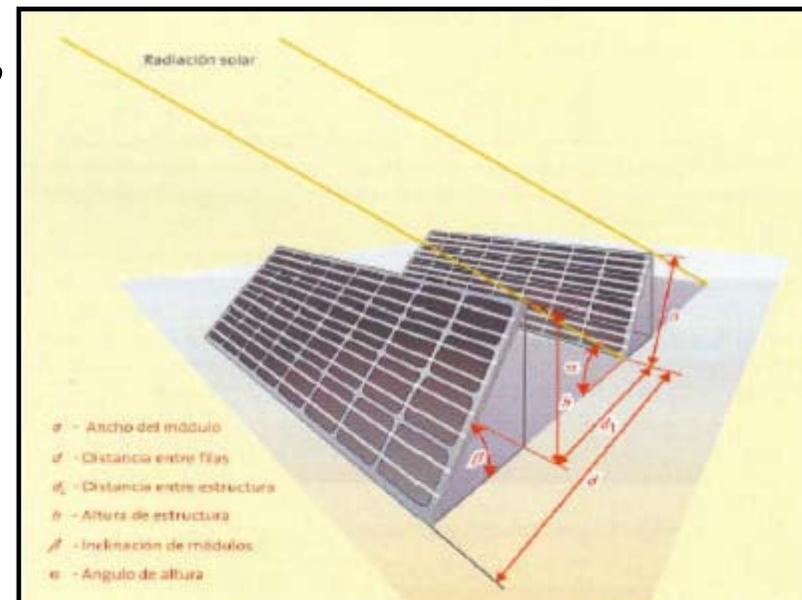
β	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
h (m)													
d_1 (m)													
d (m)													

- σ Ancho del módulo solar
- d Distancia mínima entre filas
- d_1 Distancia mínima entre estructuras
- h Altura de estructura
- β Inclinación de módulos
- α Angulo de altura mínima en el año

$$h = \sigma * \text{sen}\beta$$

$$d_1 = \frac{h * \cos(\alpha)}{\text{sen}(\alpha)}$$

$$d = \sigma * \cos(\beta) + d_1$$



DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

Sitio 1			
	Radiación solar diaria Inclinada (kWh/m ² /d)	Numero de días por Mes	Radiación solar Mensual (kWh/m ²)
Enero			
Febrero			
Marzo			
Abril			
Mayo			
Junio			
Julio			
Agosto			
Setiembre			
Octubre			
Noviembre			
Diciembre			
Total			

DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

$$Perd_{Temp} = \beta_P * (T_C - T_{ref}) \quad T_C = T_a + \frac{(219 + 832 * K_t) * (NOCT - 20)}{800}$$

$Perd_{Tem}$ p Perdidas promedio anuales por temperatura

p

T_C Temperatura del módulo solar [grados centígrados]

T_{ref} Temperatura de Referencia del módulo solar [grados centígrados]

T_a Temperatura ambiente promedio del sitio [grados centígrados]

NOCT Temperatura de operación nominal del módulo [grados centígrados]

β_p Coeficiente de Temperatura [%/grados centígrados]

K_t Índice de aclaramiento promedio anual [unidad]

	K_t	T_a
Enero	0.35	26.7
Febrero	0.44	26.7
Marzo	0.32	27.1
Abril	0.44	27.1
Mayo	0.44	26.4
Junio	0.39	25.2
Julio	0.45	24.4
Agosto	0.36	24.3
Setiembre	0.57	24.8
Octubre	0.40	24.9
Noviembre	0.36	25.4
Diciembre	0.45	26.4
Promedio →	0.41	25.78

Guayaquil

NOCT	49° C
K_t	0.41
β_p	0.4%/°C
T_{ref}	25° C
T_c	46.22
$Perd_{Temp}$	< 10%

DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

Perdidas por temperaturas, polvo, suciedad y Sombramiento

Se consideran alrededor del 2% de la Energía Fotovoltaica Ideal.

Perdidas en las líneas de Corriente Continua CC y AC

Se consideran por debajo del 3% de la Energía Disponible.

Pérdidas del Inversor

Basada en el rendimiento que es de alrededor del 95%

DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED

$$H_A = \sum_1^{12} H_{Mn} * D_n$$

H_A Radiación Solar Anual Disponible

H_{Mn} Radiación Mensual en el mes n

n Numero del Mes

D_n Días del Mes n

$$E_{AD} = A_N * H_A * \eta_{Fot}$$

E_{AD} Energía Anual Disponible

H_A Radiación Solar Anual Disponible

A_N Área Neta

η_{Fot} Eficiencia de Absorción del módulo solar

$$E_{ER} = E_{DA} * \eta_{inv} * (1 - Perd_{suci}) * (1 - Perd_{cable})$$

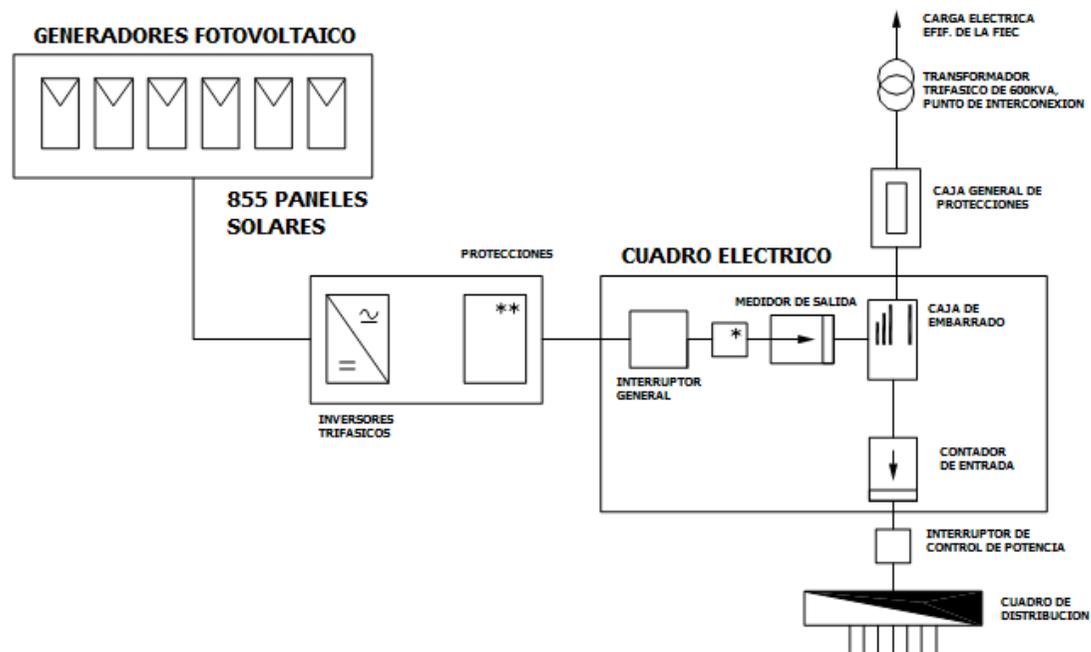
E_{ER} : Energía entregada a la Red

$Perd_{suc}$: perdidas por suciedad

$Perd_{cable}$: Perdidas en el cable por corriente DC y AC

η_{inv} : eficiencia o rendimiento del inversor

DIMENSIONAMIENTO CONECTADA A LA RED



* Dispositivo que impida la entrada de energía o en su defecto medidor de entrada o un nuevo medidor que mida en ambos sentidos

** Las protecciones podrán estar integradas al inversor