

The background features a white horizontal band across the middle. Above and below this band are decorative, wavy green lines that create a sense of movement and flow. The overall color palette is green and white.

Energías Renovables. Energía Solar Fotovoltaica

Ing. Msc. Prof. José Rafael Pineda Briceño.

LA SOLUCION ES LA ENERGIA SOLAR

Solamente 10 minutos de irradiación solar sobre la superficie de la tierra, es igual al consumo humano total anual.

JUSTIFICACION POR EMISION DE CO₂, Y OTROS CONTAMINANTES

CO₂. Protocolo de Kyoto se creó en Río de Janeiro en 1992, en donde las diferentes naciones del mundo suscribieron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y así poner límites a las emisiones de gases invernadero (dióxido de carbono, gas metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre).

En 1995, Venezuela emitía aproximadamente **240 millones de toneladas de gas carbónico (CO₂)**. La mitad por el consumo de energía, y la otra mitad por la destrucción de los bosques naturales del país.

QUE HACER?

- Producción de electricidad mediante una fuente segura y no contaminante como es la energía solar.
- Existen dos grupos o conjuntos de procedimientos para la generación.

PRIMER GRUPO

SISTEMAS TERMOSOLARES

- SISTEMA DE CONVERSIÓN TERMODINÁMICA

SEGUNDO GRUPO

- SISTEMA DIRECTOS.

Interacción física de fotones de la radiación incidente y los electrones de los materiales sobre los que inciden **c**reciente número de aplicaciones prácticas (Efecto Fotovoltaico).

LA ENERGIA DEL SOL

La masa del sol es igual a la suma de 300.000 planetas iguales a la tierra.

Brilla desde hace 5.000 millones de años.

Cómo lo hace?. Se producen reacciones nucleares de hidrógeno (su elemento más abundante) para formar átomos de Helio, y al mismo tiempo una pequeña masa de dichos átomos se convierte en energía de acuerdo a $E = m c^2$, la cual fluye desde el interior hasta la superficie (fotosfera), y desde allí se irradia al espacio en todas direcciones.

LA ENERGIA DEL SOL cont.

Cómo se irradia ?

Se irradia en forma de ondas electromagnéticas (fotones) que viajan a 300.000 km/s, tardando 8 minutos en traspasar los 150 millones de km de distancia entre el sol y la tierra

Cada minuto el sol irradia en todas las direcciones del espacio una energía de 4×10^{26} julios, o sea genera una potencia de 4×10^{23} kW.

Cuánto es ésto?.

La suma de las potencias de todas las plantas generadoras del mundo juntas es 200 billones de veces más pequeña que esta energía.

LA ENERGIA DEL SOL (cont...)

En solo un segundo, el **s**ol irradia mucha más energía que la consumida por todo el genero humano desde sus albores hasta nuestros días.

LA RADIACIÓN SOLAR

- La mayor parte de los fotones emitidos por el Sol, tiene una longitud de onda comprendida entre 0.3 μm , 3 μm .
- Captadas por el ojo humano, las que van desde 0.4 μm a 0.7 μm . Lo que se llama luz visible.
- Qué pasa con el resto de radiación $< 0.4 \mu\text{m}$ y $> 0.7 \mu\text{m}$, ?(.)
- Aún no ha sido aprovechable.

LA CONSTANTE SOLAR

Si dividimos la potencia anterior por la superficie de la esfera de la tierra

- $I = P/S = 1.4 \text{ kW/m}^2$, siendo el r de la tierra de $r = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$.
- La medida por los satélites artificiales justamente por encima de la atmósfera es de 1.367 W/m^2 .

La Constante Solar sufre ligeras variaciones por la forma elíptica de la órbita terrestre. La constante es un poco mayor durante los meses de diciembre y enero, distancia sol a la tierra menor. La constante un poco menor durante los meses de junio y julio, en los que la distancia sol – tierra es máxima.

LA CONSTANTE SOLAR

- Para cada día del año, la constante solar es:

$$C = 1367 \times \{1 + (0.033 \cos(0.973 N))\}$$

- $N = 1$ el primero de Enero y $N = 365$ el 31 de Diciembre.

EFECTO DE LA ATMÓSFERA

- Fenómenos de atenuación de la energía solar:
 1. Reflexión de la parte superior de las nubes.
 2. Absorción parcial por las moléculas de aire atmosférico.

Este último fenómeno hace que la intensidad que llega a la superficie en días despejados y con atmósfera muy limpia sea de máximo 1.100 W/m^2 .

En la práctica rara vez se miden valores superiores a 1000 W/m^2 .

Para los efectos energéticos, no toda llega en línea recta, nos interesa la suma de tanto la energía directa como la difusa. (Un tercio de la total que se recibe a lo largo del año).

IRRADIACION DIRECTA SOBRE UNA SUPERFICIE

- Se llama *irradiación E*, la cantidad total de energía radiante que llega a una superficie determinada en un tiempo t .
- Hay otro término llamado *Intensidad radiante* o *irradiancia I*, que es la energía incidente por unidad de tiempo y de superficie, es decir:

$$I = E/St$$

- Esta intensidad I , puede variar dependiendo del ángulo (alfa) que forme el rayo incidente, y la superficie en la cual incide.
- $ID' = ID \times \cos(\text{alfa})$
- Por la misma razón, regiones de latitudes altas reciben mucho menos energía, que las más cercanas al ecuador.

IRRADIACION DIFUSA SOBRE UNA SUPERFICIE

- $IF' = IF \times (1 + \cos(\alpha))/2$
- Para medir la irradiación total que una superficie recibe, en un determinado número de días o meses, se emplean unos aparatos llamados piranómetros.

CONCEPTOS DE ASTRONOMIA DE POSICION SOLAR

- ALTURA SOLAR h es el ángulo que forman los rayos solares sobre la superficie horizontal.
- AZIMUT SOLAR A , o ángulo azimutal, es el ángulo de giro del Sol, medido sobre el plano horizontal mediante la proyección del rayo sobre dicho plano y tomando como origen el Sur. Se considera negativo cuando el Sol esta hacia el Este (por la mañana), y positivo cuando se sitúa hacia el Oeste (después del mediodía).
- Estos ángulos en un instante dado, son distintos para dos observadores situados en distintos lugares del planeta, por lo que deben ser calculadas para cada latitud geográfica.

CONCEPTOS DE ASTRONOMIA DE POSICIÓN SOLAR

H (grados)	I (W/m ²)
10	107
20	294
30	473
40	635
50	773
60	886
70	969

CONCEPTOS DE ASTRONOMIA DE POSICIÓN SOLAR (Cont...)

- Las estaciones solares. Son debidas al ángulo de inclinación de la tierra, y es el responsable de la diferente duración del día según la época del año. Un observador situado en el hemisferio Norte, tiene mucho más tiempo de sol en Junio que en Diciembre, ya que el Sol ilumina una zona más amplia en dicho hemisferio.
- Ángulo de inclinación de la tierra. El eje de rotación de la tierra, que une los Polos Norte y Sur, forma un ángulo de 23,5 grados con la normal al plano donde esta contenida la órbita terrestre, llamado Plano de la Eclíptica

CONCEPTOS DE ASTRONOMIA DE POSICIÓN SOLAR (Cont..)

- **Tiempo Solar Verdadero:** El tiempo que transcurre entre dos puntos consecutivos del Sol, por una misma posición angular en la bóveda celeste, el cual no es constante e igual a 24 horas, sino que experimenta fluctuaciones a lo largo del año.
- **Hora Normal o Civil:** La que marca el reloj, uniforme cada día del año, cada día debe tener 24 horas
- Existe un desfase variable a lo largo del año, entre la *tiempo civil* y el llamado *tiempo solar verdadero* ya que este último únicamente tiene en cuenta la posición real del Sol en la bóveda celeste.
- Esta diferencia es mucho mayor cuando mayor sea la diferencia entre el meridiano del lugar, y el que sirve como referencia (meridiano standard) para determinar la hora que se asigna a todo el país.

CONCEPTOS DE ASTRONOMIA DE POSICIÓN SOLAR (Cont..)

- Por razones prácticas se conviene en asignar una hora civil para todo el país, o una amplia zona del mismo (o tres como USA), a pesar de que la posición relativa del Sol en la bóveda celeste es diferente para cada punto, siendo el tiempo solar distinto para dos puntos no situados en el mismo meridiano.
- El problema es determinar exactamente el verdadero mediodía solar, o sea cuando el azimut solar vale cero, en un lugar concreto, ya que en este punto la elevación del Sol es máxima, las sombras mínimas, y la sombra sobre el suelo de una varilla vertical coincidiría con la dirección del meridiano (Sur- Norte), dirección precisa a determinar con exactitud, para orientar adecuadamente los captadores de una instalación.

CONCEPTOS DE ASTRONOMIA DE POSICIÓN SOLAR (Cont..)

- El mediodía solar verdadero, no coincide con el momento cuando el reloj marque las “doce del mediodía”, incluso prescindiendo de los habituales adelantos que algunos países oficializan para aprovechar mejor las horas de luz natural en relación con el horario laboral.
- La desviación $D = Et + AL/15$
- Donde Et es la llamada ecuación del tiempo, expresada en minutos
- $Et = -9.9 \text{ sen } (198 + 1.97 N) - 7.4 \text{ sen } (175 + 0.99 N)$
- $N = 1$, 1ro de Enero y $N = 365$, 31 Diciembre.

CONCEPTOS DE ASTRONOMIA DE POSICION SOLAR (Cont.)

- AL = Diferencia expresada en minutos del arco, entre la longitud geográfica (meridiano local) del punto considerado y el meridiano standard del país o zona, que sirve de referencia para fijar la hora legal por la cual se rige dicho país o zona. (Venezuela, meridiano standard 67 grados 30 minutos positivos hacia el Oeste).
- Esta diferencia calculada sobre Caracas es 2.48 minutos. Hora civil adelantada 2.48 minutos respecto a la hora solar. El mediodía solar se producirá a las 12 horas 2.48 minutos

CONCEPTOS DE ASTRONOMIA DE POSICION SOLAR cont.

- El método descrito tiene una precisión de un minuto, ya que la ecuación del tiempo NO es la misma para cada año.
- El método solo sirve para determinar el mediodía solar, y orientar bien un colector, no para hacer cálculos muy precisos, y su precisión es superior a utilizar una brújula convencional, incluso efectuando las correcciones necesarias.

CONVERSION DE LA ENERGIA SOLAR

EFECTO FOTOVOLTAICO (Cont.)

- Comportamiento de semiconductores [conjunto de sustancias con resistividad entre 10^{-6} y 10^8 ohm-m], bajo ciertas circunstancias, que son capaces de crear una fuerza electromotriz (voltaje).
- Dos Tipos de semiconductores
- Tipo N. Adicionándoles impurezas apropiadas, a tener exceso de electrones en determinadas posiciones
- Tipo P . Defecto de electrones, un exceso de “hueco” (lugares vacíos dejados por los electrones al emigrar estos a otras posiciones).
- Al colocar en contacto un cuerpo cristalino semiconductor tipo N, con otro del tipo P, se crea una unión P-N.

CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

UNION P-N (Cont.)

- Los electrones en exceso de N, y los “huecos” de P, tienden a difundirse a través de la superficie común de separación, penetrando un poco al otro lado de dicha frontera.
- Como cada semiconductor es eléctricamente neutro, el semiconductor tipo N se carga positivamente, y el P se carga negativamente.
- Se establece una diferencia de potencia de unas décimas de voltio, la cual da lugar a un campo eléctrico que restablece el equilibrio.
- Si incide luz sobre la zona de la unión, los fotones de la misma liberaran electrones adicionales y al mismo tiempo dejaran huecos en su lugar.

CONVERSION DE LA ENERGIA SOLAR

UNION P-N (Cont.)

- Estos pares electrón-hueco, por efecto del campo eléctrico, adquieren movimiento (energía), que puede ser recogida mediante un conductor: aparece una corriente eléctrica.
- Si el fotón no está presente, la corriente cesa.
- Materiales usados para la obtención de electricidad, el silicio, el selenio, y el galio, así como otros elementos, monocristalinos, policristalinos e incluso amorfos.
- Las células fotovoltaicas suministran un voltaje que es proporcional a la intensidad de la radiación incidente, y aprovechando solo las longitudes de onda para el silicio por ejemplo entre 3000 Å y 11.000 Å, con una eficiencia máxima en 8.000 Å (Å = Angstrom)

HISTORIA

- SISTEMA TERMOSOLARES.
- En 1954 Bell Telephone en New Jersey
- (GaAs) Arseniuro de Galio
- SCd Sulfuro de Cobre
- Silicio Monocristalino
- Silicio Policristalino
- Silicio Amorfo
- Películas Finas (Capa Delgada)
- Células Bifaciales (aprovechamiento de las dos caras usando lentes de Fresnel)

EFEECTO FOTOVOLTAICO

- Fotón incide sobre el material semiconductor, liberando electrones (producción de un calor inútil) por los choques con la estructura atómica.



EFECTO FOTOVOLTAICO (Cont..)

- Ventas anuales de Modelos en el 2007: 3300 MW 80 % térmicos.
- La clave es sacar los electrones tan rápido sea posible, antes de que se re combinen con los “huecos” (lugares vacíos que dejan los electrones)

EFECTO FOTOVOLTAICO (Cont.)

- Longitudes de Onda o frecuencias del fotón incidente
- 350 – 1100 nm 800 nm max
- 350 – 800 nm 520 max amorfo
- Luz Solar (mezcla de fotones a frecuencias diferentes)
- Respuesta Espectral para cada frecuencia.

CELULAS – TIPOS DE CELULAS

- Metodo Czochralski (Cz)
- Otras energías como la Energía Eólica (Viento – Diferencia de temperatura producida por la energía solar sobre la atmósfera.)

PANEL SOLAR

- Una célula solar de 1 o 2 W, produce 0.5 V
- Hay módulos de 6V, 12V, 24V, para configurar otro panel más grande o Modulo Fotovoltaico
- Un panel de 12V contiene 30 a 40 células aprox.
- Componentes del Panel (formado por un “sándwich”)
 1. Vidrio templado
 2. EVA (Ethylene Vinyl Acetato)
 3. Célula Solar
 4. EVA
 5. Tedlar
 6. Poliéster
 7. Tedlar

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS PANELES SOLARES

- Forma rectangular o cuadrada desde 0.1 m^2 – 1 m^2
- Grueso total 3 cms (sin incluir el marco protector)
- Ejemplo: Panel de 0.5 m^2 pesa de 6 a 7 Kg.

CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS DE UN PANEL

- **Isc:** Intensidad máxima de la corriente que se puede obtener de un panel bajo condiciones normalizadas, a través de un amperímetro de resistencia nula provocando un cortocircuito, caída de potencial cero.
- **Voc:** Es el voltaje máximo que se podría medir con un voltímetro, sin permitir que pase corriente alguna entre los bornes de un panel.
- **Corriente i a un determinado voltaje V .** Operación práctica de un panel, corriente i que fluye, a través de un circuito externo que une los bornes del mismo y que presenta una resistencia R que define la característica eléctrica del circuito (curva intensidad vs voltaje) cuya intersección con la propia curva del panel, fija el voltaje de operación del mismo, y la intensidad que se entrega al circuito. (Punto de Operación).

CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS DE UN PANEL

- P_m : producto de $i \times V$, que sera máxima para un cierto par de valores (i y V) en principio desconocidos.
- Un panel trabaja en condiciones de potencia máxima cuando la resistencia del circuito externo es tal que determina unos valores de i_M y V_M tales que su producto sea máximo. Normalmente el panel no trabaja en condiciones de potencia máxima, ya que la resistencia exterior esta fijada por las características propias del circuito, aunque existe la posibilidad de utilizar dispositivos electrónicos “seguidores del punto de máxima potencia”, esto supone un coste adicional.
- Rendimiento N – Potencia eléctrica Producida/Potencia de radiación incidente
- FF – $P_m / (i_{sc} \times V_{oc}) = i_m \times V_m / (i_{sc} \times V_{oc})$

CURVA I – V DE UN PANEL SOLAR

- Punto A de operación normal de trabajo
- Punto B Max. (no trabaja en este punto)

CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS DE UN PANEL SOLAR (Cont.)

- El área del rectángulo $i_m \times V_m$ es el mayor rectángulo posible
- $V_m = 0.8 V_{oc}$
- $FF = \text{área B} / \text{área C}$
- Si se quiere usar un panel para cargar una batería de 12 V, $V = 13$ (un poco mayor)
- Ecuación de Comportamiento
- $I = i_{sc} [1 - e(B(V - V_{oc} + A_i))]]$
- $V = V_{oc} - A_i + (1/b) \ln (1 - i/i_{sc})$

A y B son parámetros del modulo, de sus características y de las condiciones a la que este sometido.

CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE UN PANEL SOLAR (Cont.)

- La intensidad radiante incidente sobre el panel, o la temperatura, son las variables que más influencia tienen en la respuesta eléctrica del panel.
- El voltaje disminuye a razón de 0.0023 volt por cada célula del panel por cada grado centígrado por encima de 25 grados °C.
- La corriente aumenta a razón de 15 uA por cada centímetro de célula y grado °C de temperatura por encima de 25 grados °C.
- En la práctica la potencia del panel disminuye aproximadamente un 0.5 % por cada grado °C de aumento por encima de 25 grados °C.

A título orientativo

- $A_t = 0.034 \times \text{Intensidad media de la radiación solar} - 4.$

CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE UN PANEL SOLAR (Cont.)

- Potencia Nominal Pico

Es la proporcionada al recibir el panel una radiación de 1000 W/m^2 cuando la temperatura es de $25 \text{ grados } ^\circ\text{C}$.

El nombre “pico” constituye un pico máximo en las medidas reales de la intensidad radiante (irradiación obtenida en un día claro de sol cercano al Cenit).

* Por lo general la potencia real producida por el panel, es inferior a la nominal pico.

Potencia Nominales de Paneles más usuales

5 W, 10W, 20W, 35 E, 40W, 60 W y 100 W.

Paneles de 18 células 6 V, 36 células 12 V.

INTERCONEXION DE PANELES.

Los paneles deben conectarse usando las mismas características $i - V$, a fin de evitar descompensaciones

- Módulos conectados en serie tienen un diodo by-pass o de derivación conectados en paralelo entre sus terminales.

INTERCONEXION DE PANELES

- Ejemplo: Se requieren 100 kW instalados

Se establecen 20 ramas de 5 kW c/u, para obtener los 100 kW.

Cada panel contara con 20 paneles de 250 W c/u. para obtener los 5 kW.

DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Dependiendo del tipo de sistema se clasifican en:

- Aislados
- Conectados a la Red

COMPONENTES DE UNA INSTALACION FOTOVOLTAICA

- **Acumuladores.**

Es necesaria su presencia en los momentos en que no existe incidencia luminosa o esta es débil, cumple dos importantes misiones:

1.- Suministrar una potencia instantánea, superior a la que el campo de paneles puede generar, durante un tiempo limitado, caso : arranque de motores

2.- Mantener un nivel de tensión estable, ya que proporciona un voltaje estable y constante (dentro de un cierto rango Ej. 11 a 15 V), independiente de la incidencia luminosa.

- **Baterías**

- **Reguladores**

- **Convertidores o inversores**

- **Otros Elementos**

DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO

- Criterios y estudios de necesidades a cubrir.
- Cálculo de la capacidad y determinación del acumulador.
- Cálculo de la potencia de los paneles.
- Cálculo del regulador.
- Cálculo del inversor.

EJEMPLO DEL DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO

EJEMPLO:

**EDIFICIO DE EDUCACIÓN PRIMARIA DEL
COLEGIO SANTO TOMAS DE VILLANUEVA.
CARACAS**

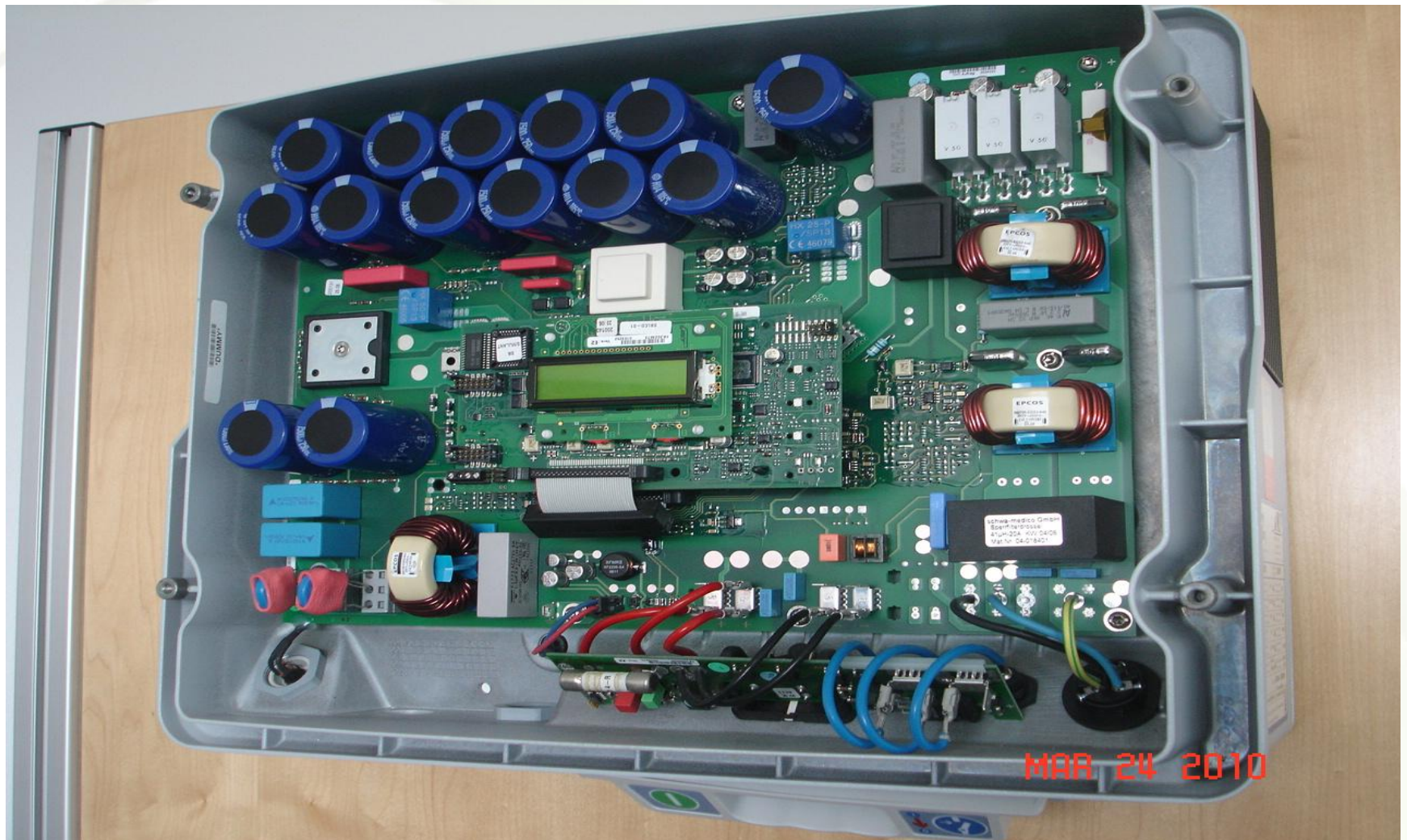
DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED



DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED

- Criterios y estudios de necesidades a cubrir.
- Cálculo de la potencia de los paneles.
- Cálculo del regulador.
- Cálculo del inversor.

Vista interior de un Inversor



ESTUDIO DE VIABILIDAD

CARACTERISTICAS FISICAS REQUERIDAS SISTEMA AISLADO

1000 W de electricidad producida caben en menos de 10 m² 9.29 m² para un sistema de silicio cristalino.

1000 W de electricidad producida caben en 16.25 m² para un sistema de capa fina.

El techo debe soportar 1.36 a 2.7 kg por 0.09 m²(3 – 5 libras / ft²)

GARANTIAS

Garantía del Sistema: 25 años

Garantía del Inversor: 10 años

PRODUCCION ESTIMADA

1000 W producen unos 1400 – 1700 kWh/año

5000 W produce unos 7000 – 8500 kWh/año

VIDA UTIL DEL SISTEMA

Duración 30 años, retorno de la inversión cuando hay incentivos en 5 años.

SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO

Rentabilidad económica:

Ejemplo de ahorros y aumento del valor de la propiedad por un sistema eléctrico solar.

Promedio mensual de la factura de electricidad \$100 al mes.

Tamaño estimado requerido 448 kW.

Costo del Sistema (a \$9 por watt promedio nacional USA) \$40,320

Costo Estimado del sistema luego de los créditos de impuestos y reembolsos (Colorado) \$12,544

Ahorro estimado en el 1er año, de la factura de electricidad \$518 to \$988

Valor estimado de incremento del valor de la propiedad \$10,360*

Pago mensual estimado del sistema (65% interés Anual, 30 años) \$79

*Si se toma como base el ahorro de electricidad promedio sobre 25 años, de \$869 a \$1,658, el aumento del valor de la propiedad es de \$17,380.

PARQUES FOTOVOLTAICOS

– Rentabilidad económica

$$In = [f E_g p_c (1+t_c)^n + (1-f) E_g p_v (1+t_v)^n] / (1+e)^n$$

Donde:

In = ingresos en el año, referiados al primer año.

n = número de años

e = Interes del dinero

t_v = Tasa de variación del precio de venta de la electricidad

t_c = Tasa de variación del precio de compra de la electricidad

p_c = precio al cual se compra la electricidad

p_v = precio al cual se vende la electricidad

E_g = Energía anual generada

f = Porcentaje de autoconsumo en tanto por uno

MANTENIMIENTO DE UNA INSTALACION FOTOVOLTAICA

- Mantenimiento: Se recomienda un mantenimiento de revisión anual del sistema, además de las instrucciones mostradas en el manual del mantenimiento del sistema suministrado.
- Los sistemas con componentes eléctricos generalmente requieren reemplazar partes después de 10 años de funcionamiento.
- Los paneles solares solo puede necesitar ser limpiados en climas con lluvia escasa.