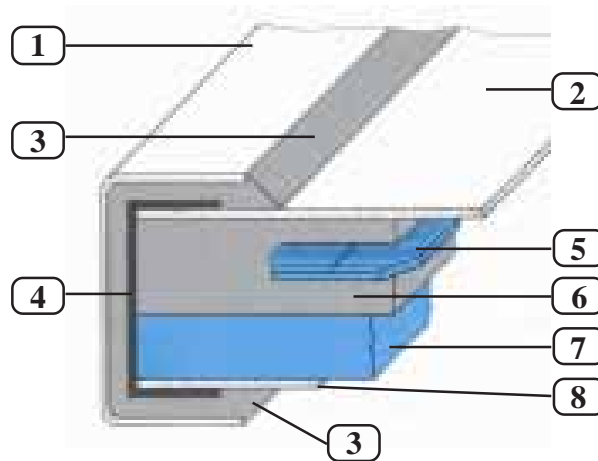


CAPITULO 4

EL PANEL FOTOVOLTAICO

Panel FV Debido a su fragilidad, las células FVs son vulnerables a la acción de los elementos naturales (lluvias, granizo, nieve, vientos, polvo, alta humedad, etc). Esta característica, sumada a la necesidad de ofrecer un voltaje de salida práctico (superior al $\frac{1}{2}V$), hacen necesario el uso de una estructura mecánica **rígida** y **hermética** que pueda contener un elevado número de células. El **panel fotovoltaico** cumple con ambos requisitos, facilitando además el transporte de las unidades, el conexión externo, y el montaje de la unidad a un sostén.

Estructura Cada fabricante adopta una empaquetadura diferente al construir el panel FV. Sin embargo, ciertas características son comunes a todos ellos, como el uso de una estructura “sandwich” (Figura 4.1), donde ambos lados de las células quedan mecánicamente protegidas.



Nota: Dimensiones no están en escala

Figura 4.1- Montaje típico de un panel FV

El marco del panel (1) está hecho de aluminio anodizado, para evitar su oxidación. Su rigidez provee la presión necesaria para mantener juntas las partes que integran el “sandwich”. Los marcos tienen extensiones en ángulo recto, con perforaciones a lo largo del perímetro, las que facilitan su montaje a un sostén.

La superficie colectora (2) tiene un vidrio templado o un plástico de alto impacto, con un alto valor de transmisividad para la luz incidente. Ambos materiales resisten severas granizadas y vientos portadores de arena o tierra. El uso del vidrio ofrece una acción auto-limpiante, ya que la suciedad tiende a adherirse menos a su superficie.

Un material esponjoso (3) cumple con una doble función: proteger los bordes del vidrio y proveer un cierre hermético para el panel a lo largo del perímetro de la estructura. Todos los materiales expuestos a la luz solar son **resistentes a la acción deteriorante de los rayos ultra-violetas**.

La junta selladora (4), colocada a lo largo del perímetro, contribuye a evitar la presencia de agua (humedad) dentro del panel, evitando que las conexiones internas se oxiden (mayor resistencia óhmica) o causen la apertura del contacto al semiconductor.

Las células FVs (5) son cubiertas con un material encapsulante (6) de alta transparencia. Es común el uso del acetato de etil-vinilo (*EVA*, en inglés), el que se aplica en capas muy finas que, al hornearse, se polimerizan solidificando la estructura.

La rigidez del panel se incrementa con el uso de un sostén rígido (7), plástico o metálico, al que se conoce como substracto.

La cara posterior del panel (8) tiene una superficie de sostén, que en algunos modelos es plástica (Tedlar®) y en otros metálica (aluminio). La versión metálica mejora la disipación del calor al exterior, un factor muy importante, como veremos al tratar la potencia de salida de un panel FV.

La vida útil de un panel trabajando como generador depende de la construcción del mismo y no de la vida útil de las células FVs, ya que no se conoce el límite de la vida útil de un semiconductor.

Los paneles que usan láminas plásticas en la **superficie colectora** suelen perder hasta un 20% del valor inicial de transmisividad después de muchos años de uso (aprox. 20), mientras que los que usan vidrio templado pierden sólo un 5%, ya que este material resiste mejor la acción deteriorante de los rayos ultra-violetas.

La alta calidad de los paneles ofrecidos a la venta se refleja en las amplias garantías ofrecidas por los fabricantes (limitadas a un uso correcto) las que se extienden entre 20 y 25 años de uso (ver las especificaciones al final de este capítulo).

Voltaje de salida

La industria de baterías precedió a la de los sistemas FVs, de manera que la adopción de 12V para el voltaje de salida del panel era una opción práctica. Por otra parte, este valor no demanda la conexión de un número excesivo de células en serie.

La industria de aparatos electrodomésticos usados en vehículos recreacionales (*RVs*, en inglés) adoptó asimismo el valor de 12V, de manera que el usuario de un sistema FV con este voltaje podrá incorporar electrodomésticos de CC diseñados para vehículos recreacionales en su sistema FV domiciliario.

Número de células

En principio, se necesitaría conectar un **mínimo** de 24 células **en serie** para alcanzar un voltaje nominal de salida de **12V**. Los paneles comerciales contienen un mayor número de ellas (36 o más). La explicación la tendrá el lector cuando se analice la curva I-V del panel.

Potencia de salida

La potencia máxima de salida (**potencia pico**) de un panel FV es, sin duda alguna, la característica eléctrica más importante del mismo. La implementación de un sistema FV doméstico requiere el uso de paneles con potencias de salidas entre 60 y 100 watts. El uso de paneles con baja potencia de salida (menor costo) no se justifica en muchos casos, ya que deberá usarse un mayor número de ellos.

La tendencia de la industria es ofrecer paneles con potencias de salida elevadas (60 W mínimo).

Ejemplos:

Compañía: **BP**

Modelo: **BP4170** (170W/24V)

Tipo: **cSi**

Compañía: **Kyocera**

Modelo: **KC167** (167W/12V)

Tipo: **pSi**.

Los paneles FVs que usan células de **cSi** son los más populares (60% del mercado). Los que usan células de **pSi** tienen un 35% del mercado. El resto corresponde a los paneles que usan material amorfo (**aSi**), los que, a pesar de su bajo costo, no alcanzan a competir con los dos tipos previamente mencionados ya que:

- ✓ Tienen un bajo nivel de conversión (50% por debajo de los otros modelos).
- ✓ Sufren variaciones importantes de la potencia de salida con el uso. El valor inicial sobrepasa el 15% del nominal, obligando a un sobre-diseño de varios componentes, encareciendo el sistema.
- ✓ Se ofrecen escasos modelos con 12V nominales de salida.

Dada su flexibilidad, el uso de estos paneles está restringido a instalaciones FVs emplazadas sobre los techos de las casas en sistemas de generación diurna conectados al sistema de distribución (*grid*, en inglés). Este uso se refleja en el voltaje de salida (115V CC) de los modelos con altos valores de potencia pico, lo que facilita su conversión a 115V CA (estándar domiciliario en los EEUU). Es por ello que he restringido el resto de este manual a los dos tipos de paneles FVs más populares y, por el momento, con mayor estabilidad.

Datos técnicos

Para poder entender los datos técnicos dados por el fabricante de un panel FV, he incluido, al final de este capítulo, las hojas de datos para tres paneles similares, los que usan células de pSi y tienen potencias de salida pico del mismo orden de magnitud. Uno está fabricado por **Kyocera Solar, Inc**, y los otros dos por **BP (British Petroleum)**.

La presentación de los datos es similar en ambos casos. La información genérica (tipo de célula FV, modelo, garantía, porcentaje de conversión, etc) precede a las especificaciones eléctricas y mecánicas para la unidad.

Para simplificar mi explicación elegiré el panel de Kyocera (KC70), haciendo hincapié en diferencias o similitudes entre éste, el BP375 o el BP380. Este ejercicio es importante, ya que desarrollará en el lector su capacidad de selección.

Kyocera KC70

Kyocera especifica la potencia de salida con un valor que denominan **típico**. El significado se explica a continuación. Cuando un producto es fabricado en serie existen variaciones paramétricas entre unidades. El valor **típico** de un parámetro representa el valor *más probable*, dentro de un *estrecho* margen de variación, para ese parámetro. Esto significa que si Ud compra un panel Kyocera KC70, es casi seguro que la potencia pico de salida de ese panel será de 70W mínimo, si lo evalúa usando las mismas condiciones usadas por el fabricante.

Nota: La compañía BP opta por dar el valor pico e incorporar notas complementarias. La Nota 4 nos dice que las células de menor rendimiento son utilizadas en el modelo BP375, y de ahí que éste tiene 5W menos que el BP380. La Nota 2, común a ambos, especifica que la salida **real** es el 97% del valor pico. Este valor porcentual nos dá, en efecto, el valor **típico** para cada panel.

Los valores **óptimos** para el voltaje (**V_o**) y la corriente de salida (**I_o**) para el KC70 (16,9V y 4,14A) son los que proporcionan el valor **típico** para la salida (69,9966W).

Este punto está situado en el comienzo de la zona de inflexión (“**codo**”) en la curva I-V (Figura 4.2).

Nota: Las dos compañías usan una nota para asegurar que las condiciones de medida son las estándar:

- Irradiación de un Sol (1KW/m²)
- Masa de aire de 1,5.
- Temperatura ambiente de 25°C,
- Viento de 1m/s (3,6 Km/h; 2,25 mph).

Por ahora ignoraré las dimensiones, a fin de concentrar nuestra atención en los valores eléctricos. Dos de ellos, la **tensión (voltaje) a circuito abierto (V_{ca})** y la **corriente de cortocircuito (I_{cc})**, se describen a continuación.

Curva I-V Todo generador tiene una curva típica para la potencia de salida en función de la corriente de carga. El panel FV no escapa esta regla. La curva I-V de un panel FV proporciona, **indirectamente**, la relación mencionada, ya que asocia los valores de V e I para diferentes cargas. La potencia de salida para una dada condición de trabajo está dada por el producto de los valores de **I** y **V** correspondientes.

Dos variables afectan la potencia de salida: la cantidad de irradiación (**W/m²**) y la temperatura de trabajo del panel (**°C**). La variación debida al nivel de irradiación sirve para estimar la acción de nubes pasajeras o de cielo totalmente nublado. Tenga presente, al respecto, que estas curvas contemplan la **irradiación total** (directa y reflejada) que recibe el panel. En la práctica, dependiendo del terreno, o de reflejos de la luz por otras nubes, el nivel de salida puede incrementarse temporariamente, en lugar de decrecer.

Kyocera muestra estas dos variaciones por separado, mientras que BP omite la relacionada al nivel de irradiación. Esto no resulta ser un problema serio para los paneles de nuestro ejemplo, ya que todos usan células de **pSi**, lo que asegura un comportamiento similar.

La Figura 4.2 muestra la curva I-V para el KC70 a 25°C. Esta curva es importante porque las especificaciones eléctricas se derivan de mediciones hechas a esa temperatura.

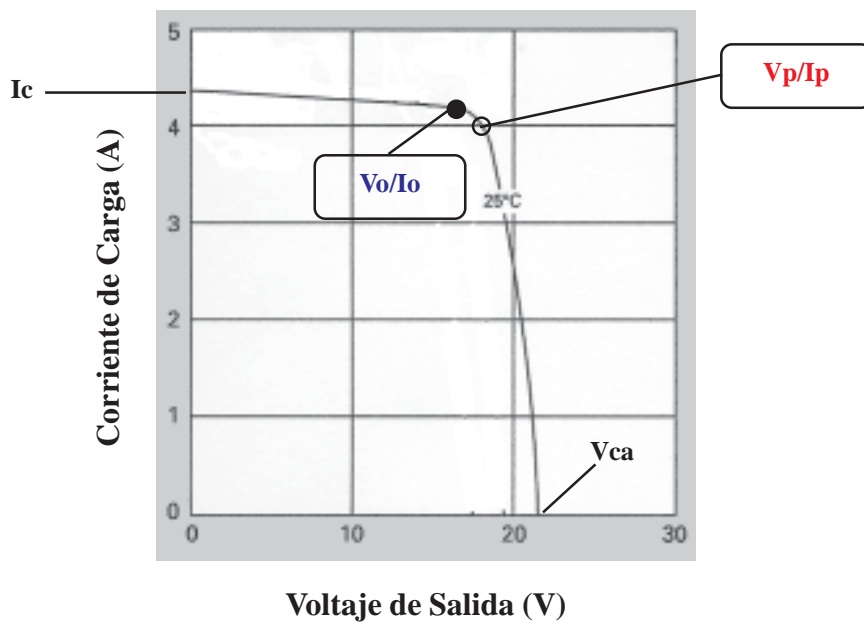


Figura 4.2- Curva I-V para el panel KC70 a 25°C

Vca, Icc y Wp Cuando el circuito exterior no está conectado (corriente nula), el voltaje de salida (**Vca**) alcanza el valor máximo (**Voltaje/tensión a circuito abierto**). Este máximo de voltaje corresponde a una corriente nula.

Cuando el voltaje de salida es nulo (**cortocircuito**) la corriente de salida alcanza su valor máximo (**Icc**). Para ambos puntos la potencia de salida es **nula**. Consecuentemente, un cortocircuito entre los terminales de salida del panel no dañará al mismo.

Entre estos dos valores, la potencia de salida alcanza el valor pico (**Wp**). Los valores de voltaje (**Vp**) y corriente (**Ip**) que generan el máximo a 25°C son llamados picos o máximos, dependiendo del fabricante. La Figura 4.3 muestra las curvas I-V para tres temperaturas de trabajo.

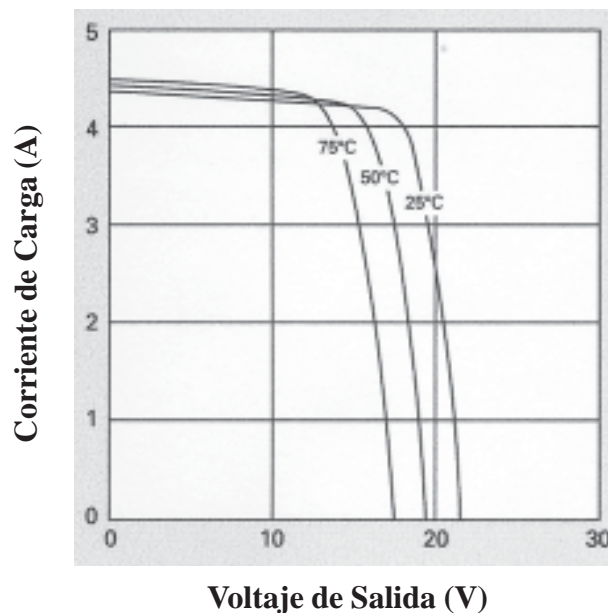


Figura 4.3- Curvas I-V vs. temperatura

Vca y Icc vs. temperatura

Se observa que cuando la temperatura de trabajo se incrementa, **Icc** se incrementa levemente, mientras que **Vca** disminuye sensiblemente. Como es importante que el panel sea capaz de mantener o incrementar la carga del banco de baterías cuando la temperatura de trabajo se eleva, se usan **36 (o más) células en serie** por panel, en lugar de las 24 derivadas por cálculo.

Un elevado valor para **Vca a 25°C** (más de 18V), garantiza que el voltaje de salida del bloque generador no cae por debajo del de baterías, cuando la temperatura ambiente es elevada.

Nota:

Nota: La compañía BP proporciona el valor de la corriente de cortocircuito a 50°C, lo que representa un valor intermedio entre 25 y 70°C. Una de las curvas I-V proporcionada por BP muestra el comportamiento del panel a 0°C. Esta curva no muy importante, como veremos al presentar el coeficiente de deterioro para la potencia.

La Figura 4.4 muestra la variación de la potencia de salida (Kyocera KC70) en función de la corriente de carga, para tres temperaturas de trabajo: 25, 50 y 75°C. El trazo en **rojo** es el comportamiento a 25°, el **negro** a 50° y el de **trazos en negro** a 75°C.

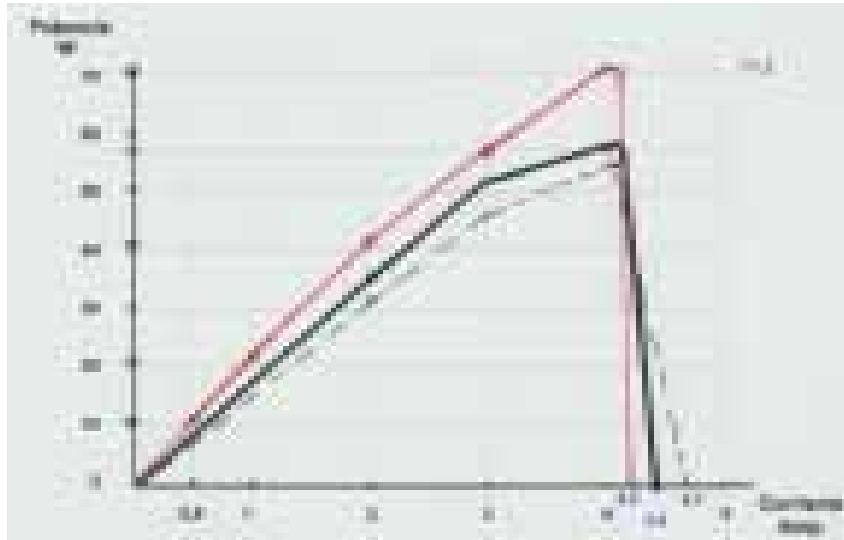


Figura 4.4- Potencia de salida vs. corriente de carga

Notas: Los valores de la Figura 4.4 no fueron proporcionados por el fabricante, sino que los calculé leyendo los valores para *V* e *I* usando las respectivas curvas I-V, magnificadas varias veces a fin de obtener valores más fiables (Tabla I). Los valores están afectados por imprecisiones de lectura, sobre todo en el área donde la corriente es prácticamente constante.

Tabla I- Potencia de salida vs. temperatura

Rojo: Wp; Azul: Icc

Corriente (A)	Potencia 25°C (Watts)	Potencia 50°C (Watts)	Potencia 75°C (Watts)
0	0	0	0
0,5	10,7		
1,0	21,1		
2,0	41,0	36,7	32,4
3,0	57,0	52,2	45,7
4,0	71,2	60,8	55,1
4,1	70,1	62,9	
4,15			55,3
4,2	0	59,6	
4,4		0	36,7
4,7			0

Dos características son evidentes:

- La potencia pico de salida sufre una degradación cuando la temperatura de trabajo se incrementa (irradiación constante).
- La potencia de salida disminuye abruptamente cuando la corriente de carga se incrementa levemente por sobre su valor pico (zona a la izquierda del “codo” en las curvas I-V).

Coefficiente de Degradación (Cd)

En la práctica son muy escasos los lugares donde la temperatura máxima para el verano alcanza sólo 25°C (77°F) y por lo tanto la potencia de salida nunca alcanza el valor pico especificado por el fabricante.

La Tabla I muestra que el panel KC70 tiene una potencia pico de **71,2W** a 25°C, la que se reduce a **55,3W** a 75°C. De estos valores se deduce que el coeficiente de degradación porcentual (Cd) es cercano a **-0,45 %/°C**. Como el incremento por sobre los 25°C de medida es de 50°C, se verifica, con un pequeño error porcentual (0,18%), que:

$$W(75^\circ\text{C}) = 71,2 (1 - 50 \times 0,0045) = 55,2 \text{ W}$$

o, en forma genérica,

$$W(T) = W_p (1 - \Delta \times Cd/100)$$

donde **T** es la temperatura de trabajo para el panel en °C, **Δ** es el incremento por sobre los 25°C y **Cd** es el valor porcentual del **coeficiente de degradación** a usarse.

Notas: La compañía Kyocera no dá en sus especificaciones un coeficiente de degradación de potencia, el que posiblemente pueda obtenerse del representante de venta. La compañía BP dá lo que llaman un “coeficiente de temperatura de la potencia” el que, en el peor de los casos, alcanzaría un valor de **-0,55 %/°C** por sobre los 25°C.

Valores prácticos

Si en la región donde Ud vive no hay brisas diurnas sostenidas durante el verano, las que ayudan a disipar el calor, y la temperatura ambiente alcanza los **35 a 40°C** (95 a 104°F) use un Cd de **0,8 %** (0,008) para esa estación.

Para temperaturas ambientes de verano de **hasta 30°C** (86°F) use un Cd de **0,6 %**.

Si la temperatura ambiente durante el verano **no supera los 25°C**, o la invierno es cercana o por debajo de los **0°C**, use el valor de la **potencia pico** para el diseño.

Contactos de salida

Los primeros paneles FVs tenían en su parte exterior terminales de conexión sin protección ambiental. Esta realización no existe hoy día ya que ha sido remplazada por el uso de cajas ambientales (herméticas), donde se ubican los dos terminales. La tendencia en los modelos más modernos es el uso de cables de salida con conectores en el extremo libre diseñados para simplificar el conecionado entre paneles a un simple enchufado de los conectores. Este diseño evita el uso de herramientas especializadas y proporciona protección ambiental al conecionado externo..

Nota: *El lector debe leer toda la información dada por el fabricante. Por ejemplo la compañía BP define dos tipos (A y B) para la caja de conexión. Si aún tiene dudas sobre un parámetro o detalle, contacte al representante.*

Conjunto FV

La evolución de célula a panel FV es no sólo un paso lógico sino **inevitable**, como expliqué al comienzo de este capítulo. El panel pasa a convertirse en el elemento **primario** de la parte generadora.

Cuando el consumo se incrementa, el valor de la la corriente de carga requiere cables de mayor diámetro, los que son más costosos y difíciles de conectar. La solución es incrementar el voltaje de salida del sistema, conectando varios paneles usando una combinación **serie**. Si con el nuevo voltaje el consumo demanda un incremento de corriente, entonces deberán conectarse grupos de igual voltaje de salida en **paralelo**.

Al agrupamiento **serie-paralelo** de paneles se lo denomina **conjunto FV** (*array*, en inglés). La Figura 4.5 muestra, en forma gráfica, los pasos de esta evolución. Volveremos a este tema durante el proceso de diseño.

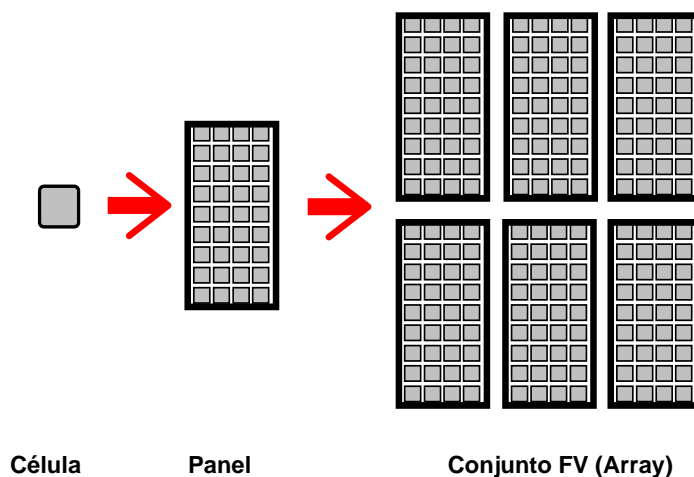


Figura 4.5- Célula, Panel y Conjunto FV

Hojas de datos

Hojas de datos

A continuación se muestran, en detalle, las hojas de especificaciones para los paneles que he usado como ejemplo, las que obtuve de las páginas en la internet:

THE FUTURE OF POWER

MULTI-JUNCTION

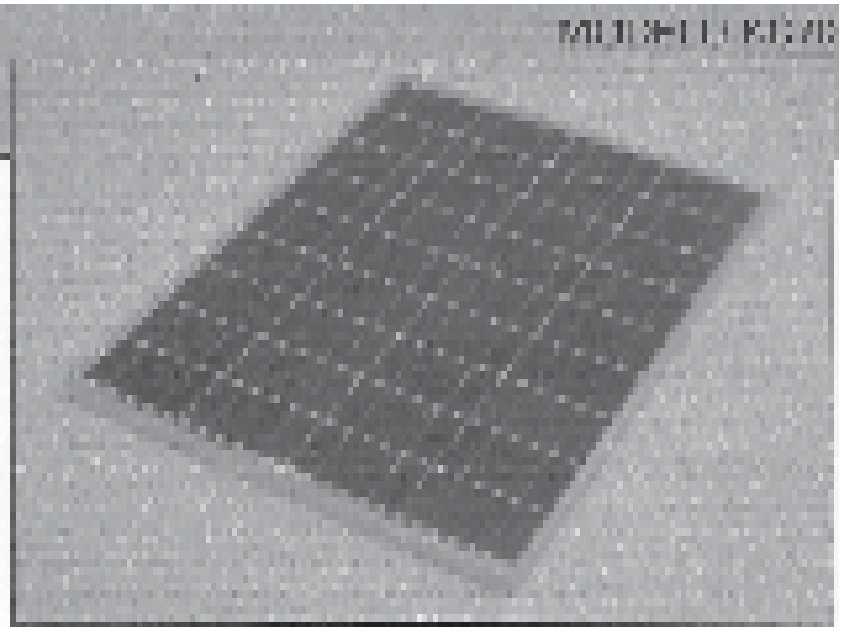

KYOCERA

KC70

**MÓDULO
FOTOVOLTAICO
MULTIJUNCIÓN
DE ALTO
RENDIMIENTO**

300 WATT PER M²

25 AÑOS DE GARANTÍA



CARACTERÍSTICAS SOPRESALIENTES

- La máxima intensidad de radiación solar (1000 W/m²) está diseñada para proporcionar el máximo rendimiento en condiciones reales de campo. Incluye un coeficiente de temperatura del P_{max} de -0,33%/°C.
- Los paneles se conectan en serie para proporcionar un voltaje de funcionamiento más alto y una mayor compatibilidad con los inversores monofásicos de voltaje variable con tecnología de potencia de salida constante (MPPT).
- La máxima eficiencia de conversión de energía es de 23,5% (en condiciones de prueba de laboratorio) y el coeficiente de temperatura de la eficiencia es de -0,002%/°C.

USOS TÍPICOS

- Edificios comerciales con alta densidad de potencia
- Iluminación de zonas con poca luz
- Instalaciones de energía de reserva
- Cargas de alta potencia, como calentadores
- Instalaciones de energía fotovoltaica de reserva de energía
- Instalaciones de alta potencia de reserva de energía de reserva de energía
- Energía de reserva para sistemas de energía de reserva de energía
- Iluminación de zonas con poca luz
- Iluminación de zonas con poca luz
- Iluminación de zonas con poca luz
- Iluminación de zonas con poca luz
- Iluminación de zonas con poca luz
- Iluminación de zonas con poca luz
- Iluminación de zonas con poca luz
- Iluminación de zonas con poca luz

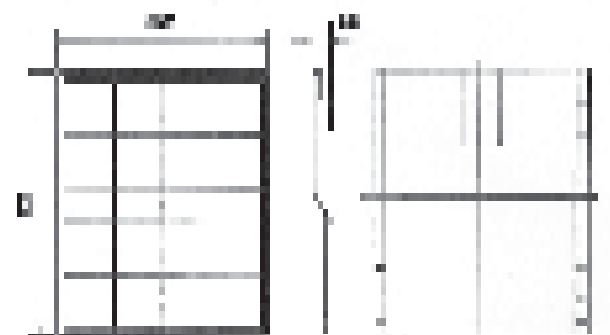
ESPECIFICACIONES

■ Características Mecánicas

MÓDULO	KC70
Formato del módulo	164 x 600 mm
Formato del cable	164 x 600 mm
Cable de conexión	2,5 mm ² por cable
Tamaño del alfiler de montaje	4,8 x 16 mm
Cantidad de alfileres de montaje	4 alfileres por módulo
Peso	10,5 kg (23,2 lb) por módulo
Acabado	200 Zamac por módulo
Material	Aluminio anodizado
Color	Color negro estándar

NOTA: Las especificaciones técnicas pueden cambiar sin previo aviso. Consulte el sitio web de Kyocera para obtener más información.

■ Dimensiones del Módulo



mm