

Tallerine Energías Renovables: Paneles Fotovoltaicos



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Temario



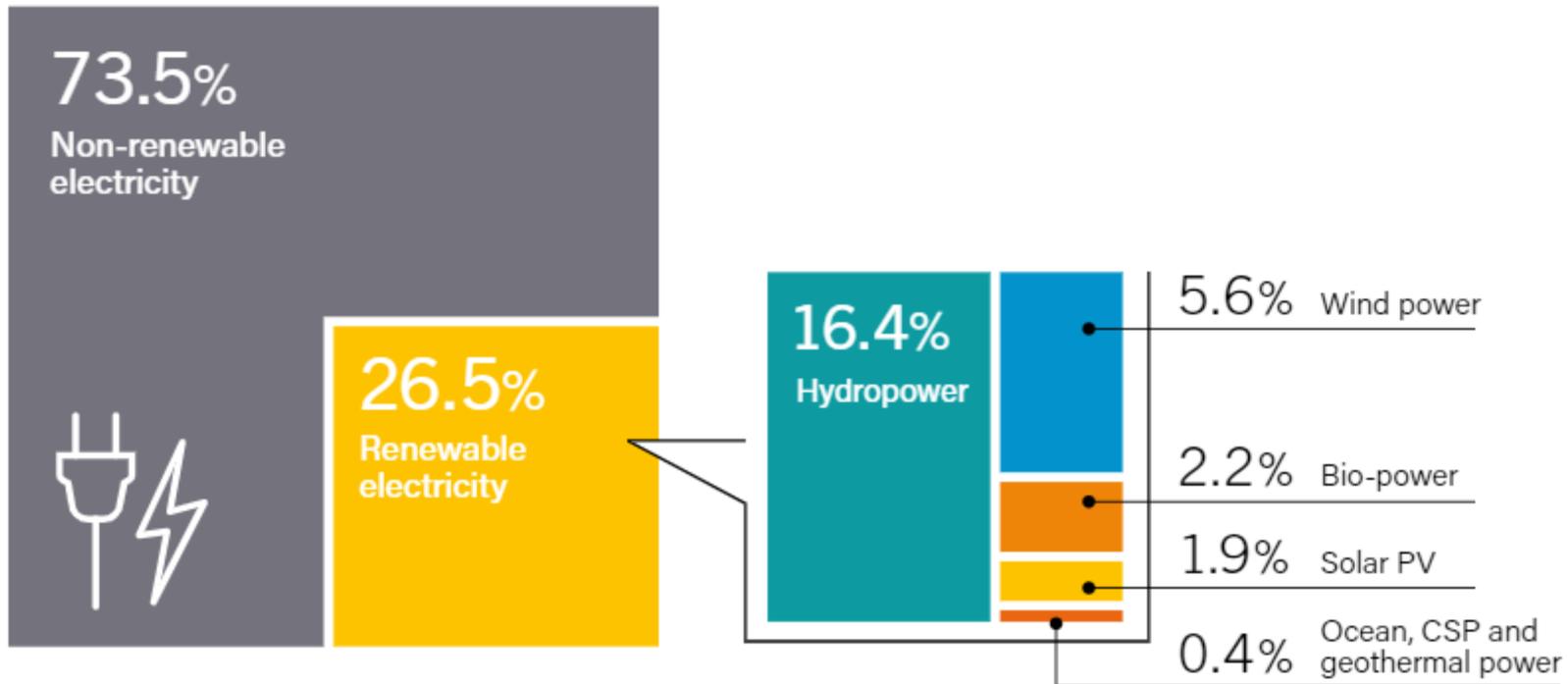
- Energía renovable
- Evolución de la fotovoltaica
- Recurso solar
- Inversores
- Seguimiento



Introducción



Generación eléctrica global



Source: See endnote 188 for this chapter.

Fuente: REN 21 2018

¿Por qué Renovables en URUGUAY ?

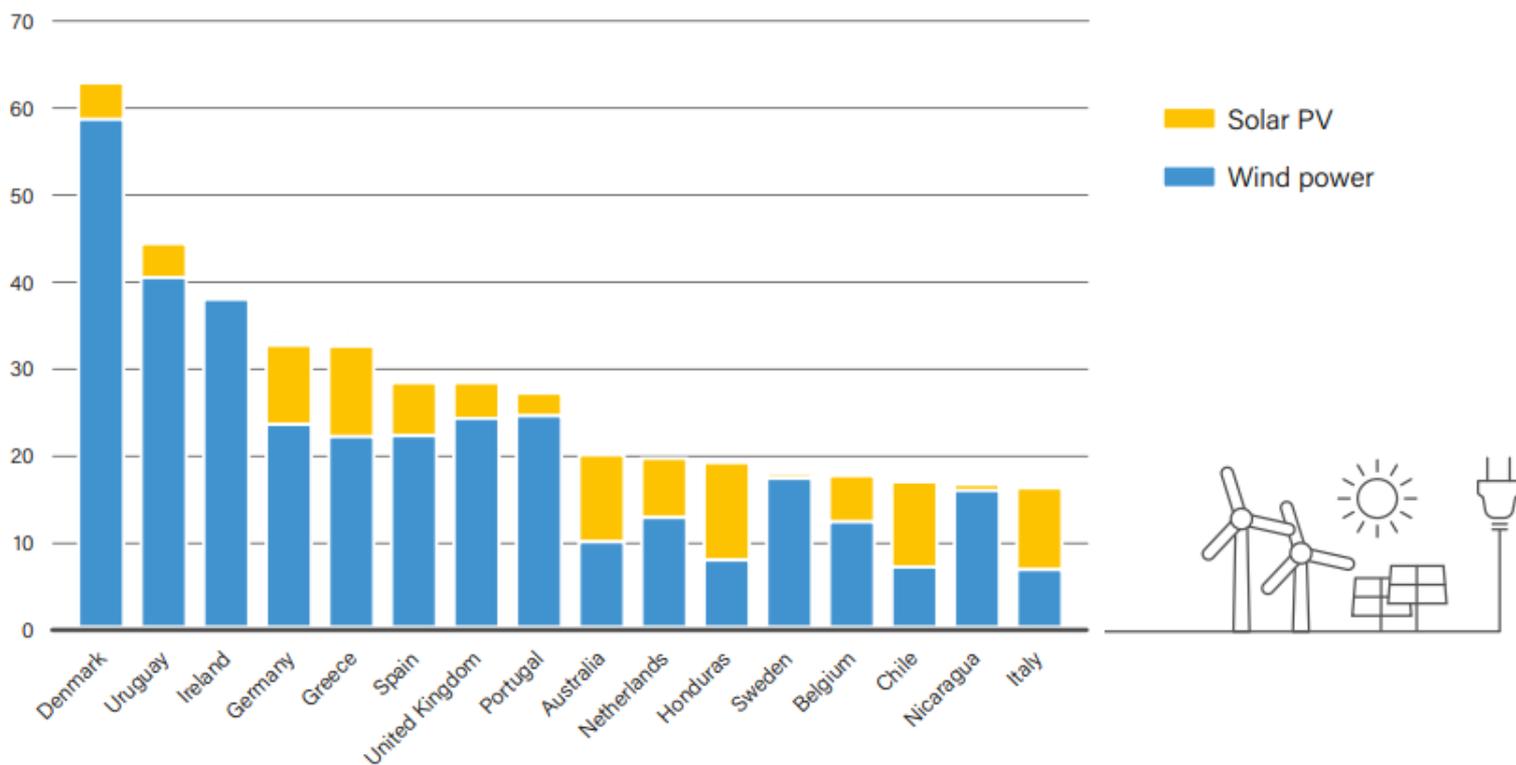
- Mantienen bajo nivel de emisiones de GEI
- Evitan importación de combustibles
- Reducen y estabilizan precios de energía
- Permiten desarrollar de capacidades locales
- Crean soberanía energética
- **PORQUE DISPONEMOS DEL RECURSO!!**



Generación eléctrica global

 **FIGURE 52.**
Share of Electricity Generation from Variable Renewable Energy, Top Countries, 2020

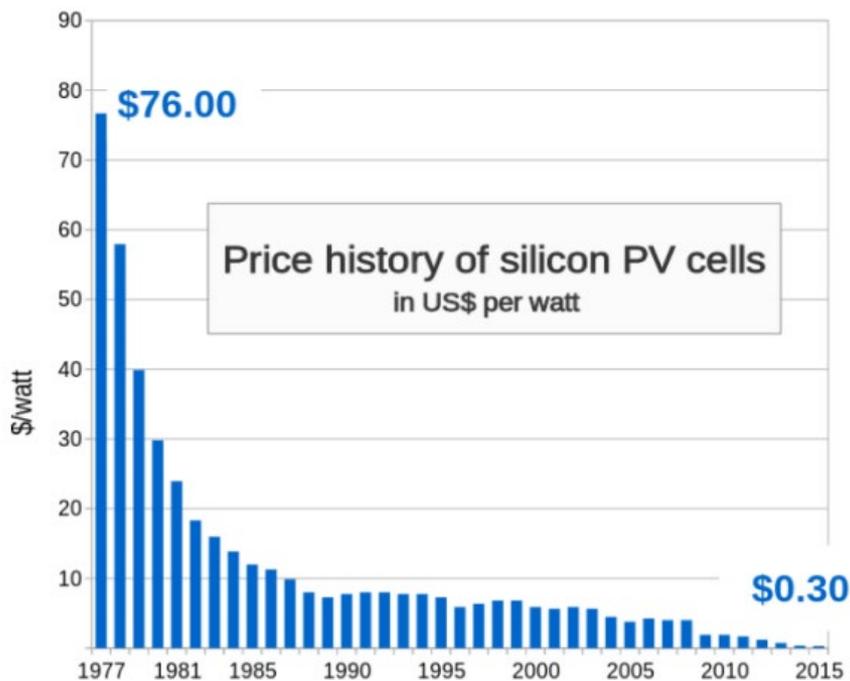
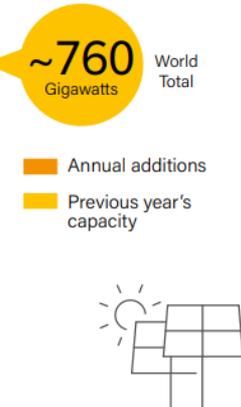
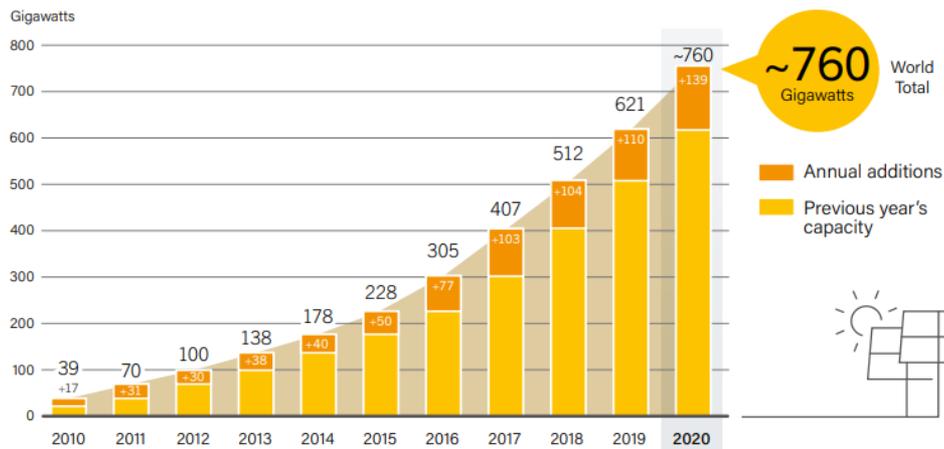
Share of total generation (%)



Fuente: REN 21 2021
Año 2020

Evolución de la fotovoltaica

FIGURE 25.
Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2010-2020



fuelle: REN21 – 2018

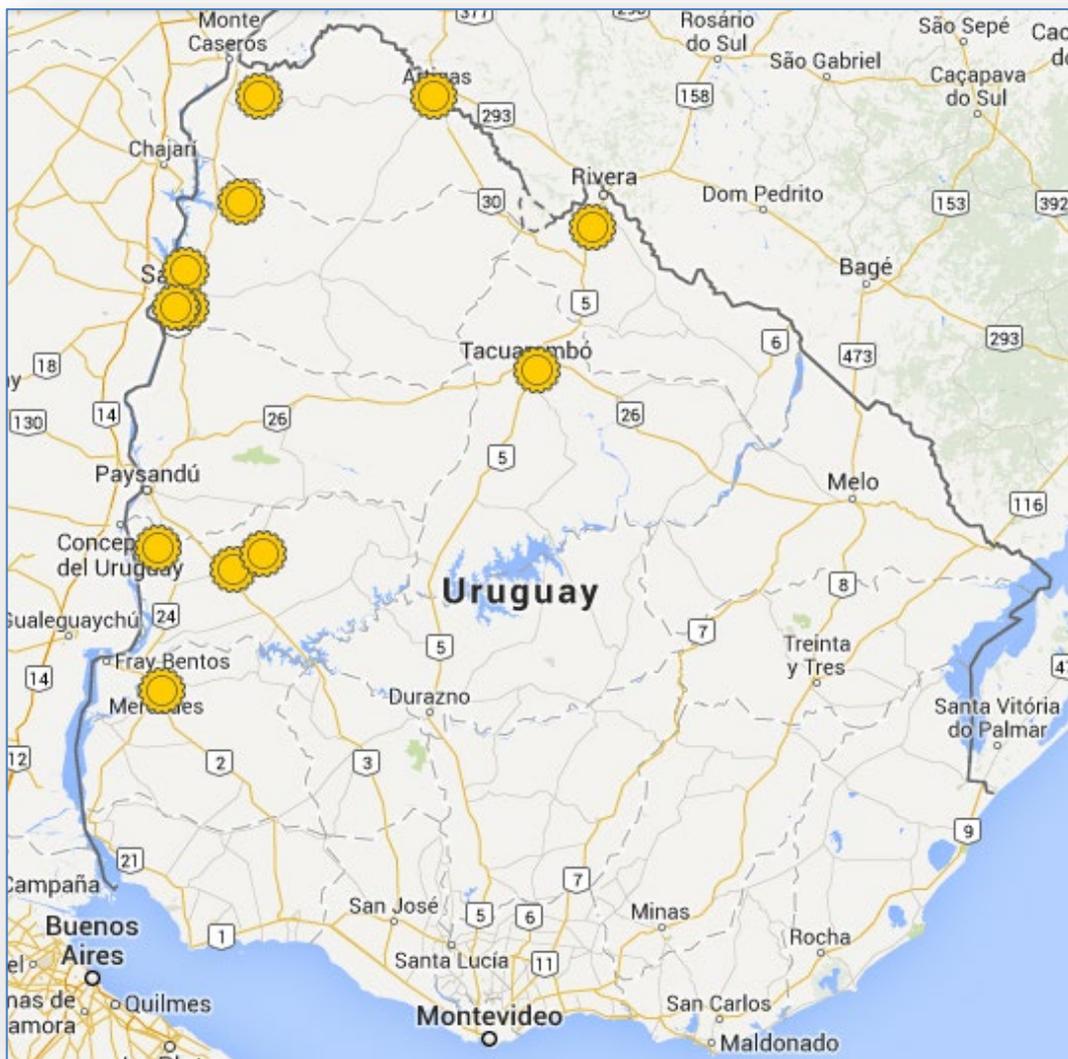
fuelle: The Economist - Science and Technology - Sunny Uplands





Revista "Muy Interesante" Octubre 1990

Fotovoltaica en Uruguay



GENERADOR	DEPARTAMENTO	POTENCIA (MW)
El Naranjal	Salto	50
La Jacinta	Salto	50
Menafra	Río Negro	20
Alto Cielo	Artigas	20
Del Litoral	Salto	16
Dicano	Paysandú	11.25
Arapey	Salto	10
Yarnel	Río Negro	9.5
Natelu	Soriano	9.5
Fenima	Paysandú	9.5
Petilcoran	Paysandú	9.5
Raditon	Paysandú	8
Casalko	Paysandú	1.75
Gilpyn	Paysandú	1
Cernal	Paysandú	1
Vingano	Paysandú	1
Asahi	Salto	0.5
	Total	228.5





Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
© 2016 Google

Modalidades de generación de energía

1) MICROGENERACIÓN

Decreto 173/010



2) AUTOCONSUMO INDUSTRIAL

Decreto 114/014

3) MACROGENERACIÓN

Decreto 133/013



Microgeneración

- Permite conectar generación de origen renovable en BT.
- Cliente intercambia bidireccionalmente energía con la red.
- UTE le compra toda la energía que le entregue al precio por energía como consumidor.
- Limite a la potencia instalar – consumo bi-direccional de energía.

Autoconsumo Industrial

- Son instalaciones de generación conectadas en MT sin límites de potencia, pero con la imposibilidad de volcar los excedentes a la red de UTE.

Macrogeneración

- Son grandes plantas, se realizan para abastecer la energía demandada en el Sistema Interconectado Nacional.



Recurso Solar



Características del Recurso Solar

Ventajas

- Inagotable.
- Libre de costo.
- Disponible.

Desventajas

- Intermitencia. Depende de la hora y el clima.
- Baja densidad de potencia ($\sim 1 \text{ kW/m}^2$ en días claros).



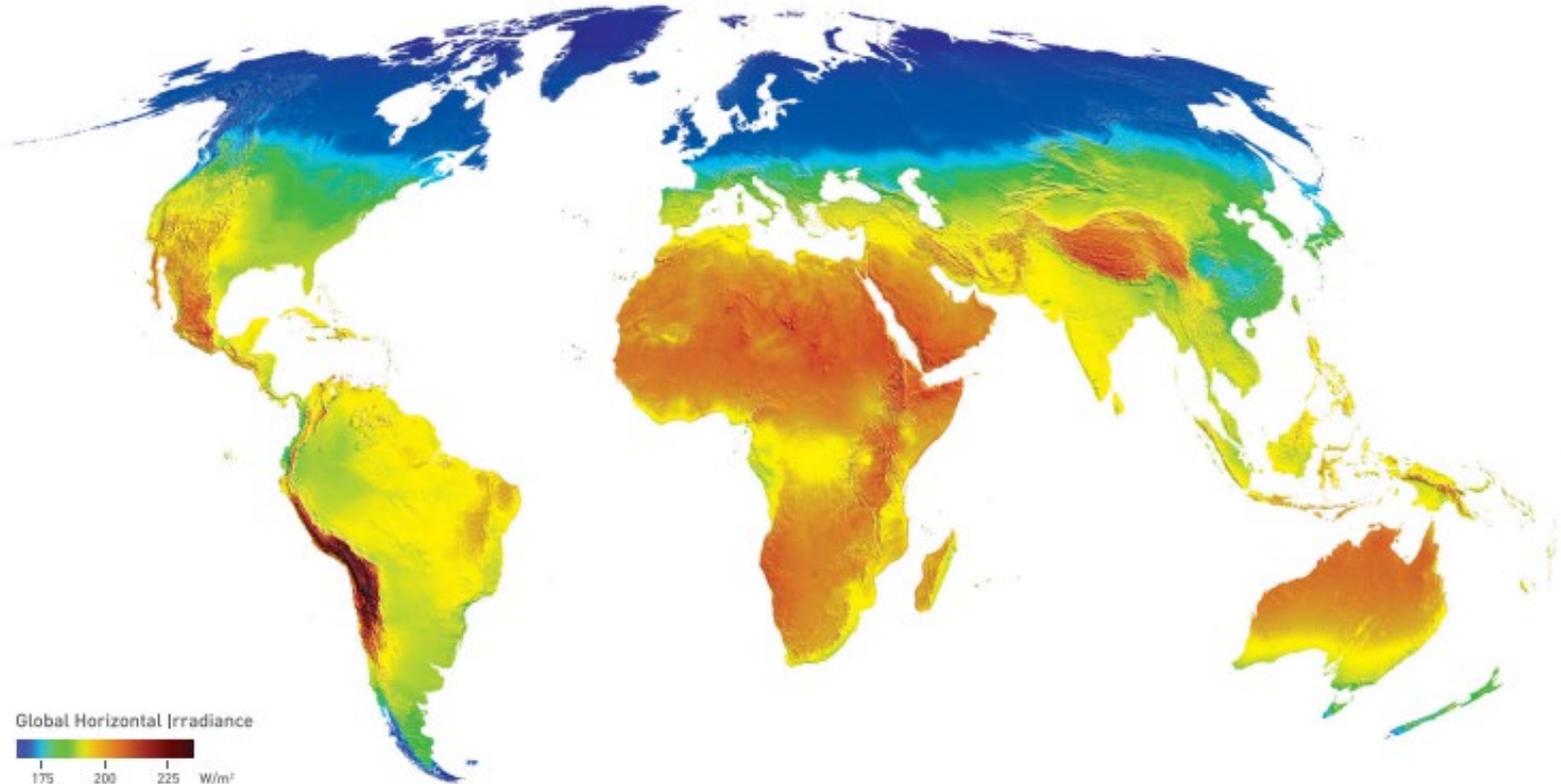
Variabilidad espacial



Global Mean Solar Irradiance



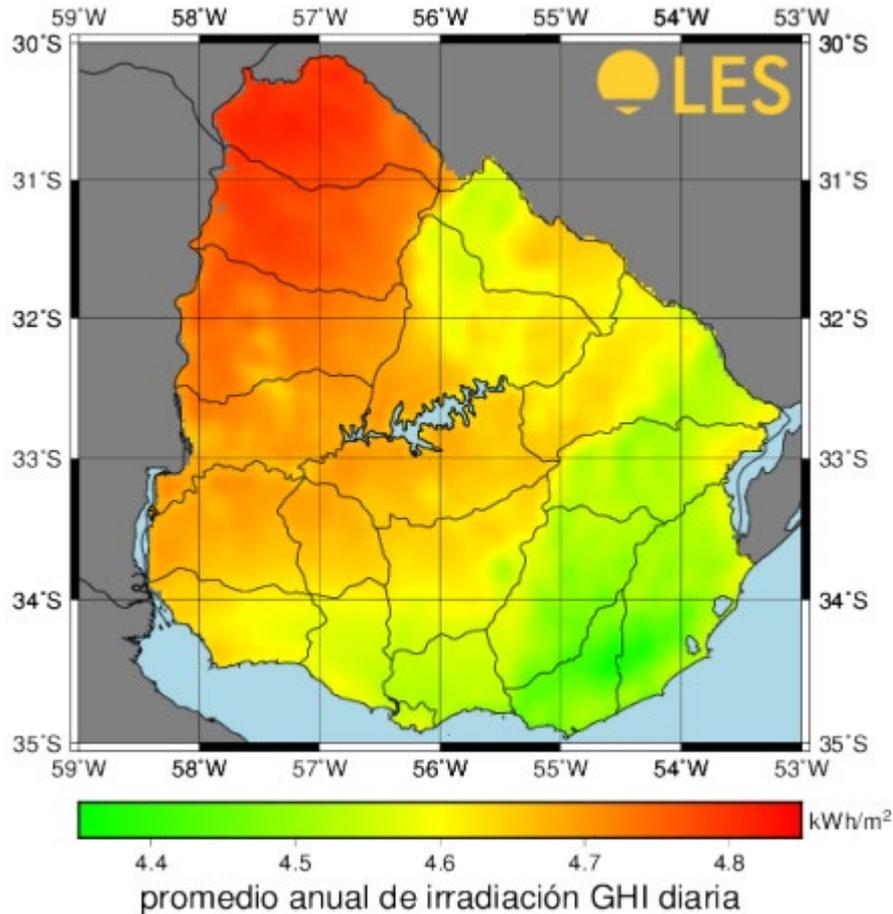
3TIER
by Vaisala



Global Horizontal Irradiance
175 200 225 W/m²

www.3tier.com | © 2014 3TIER by Vaisala

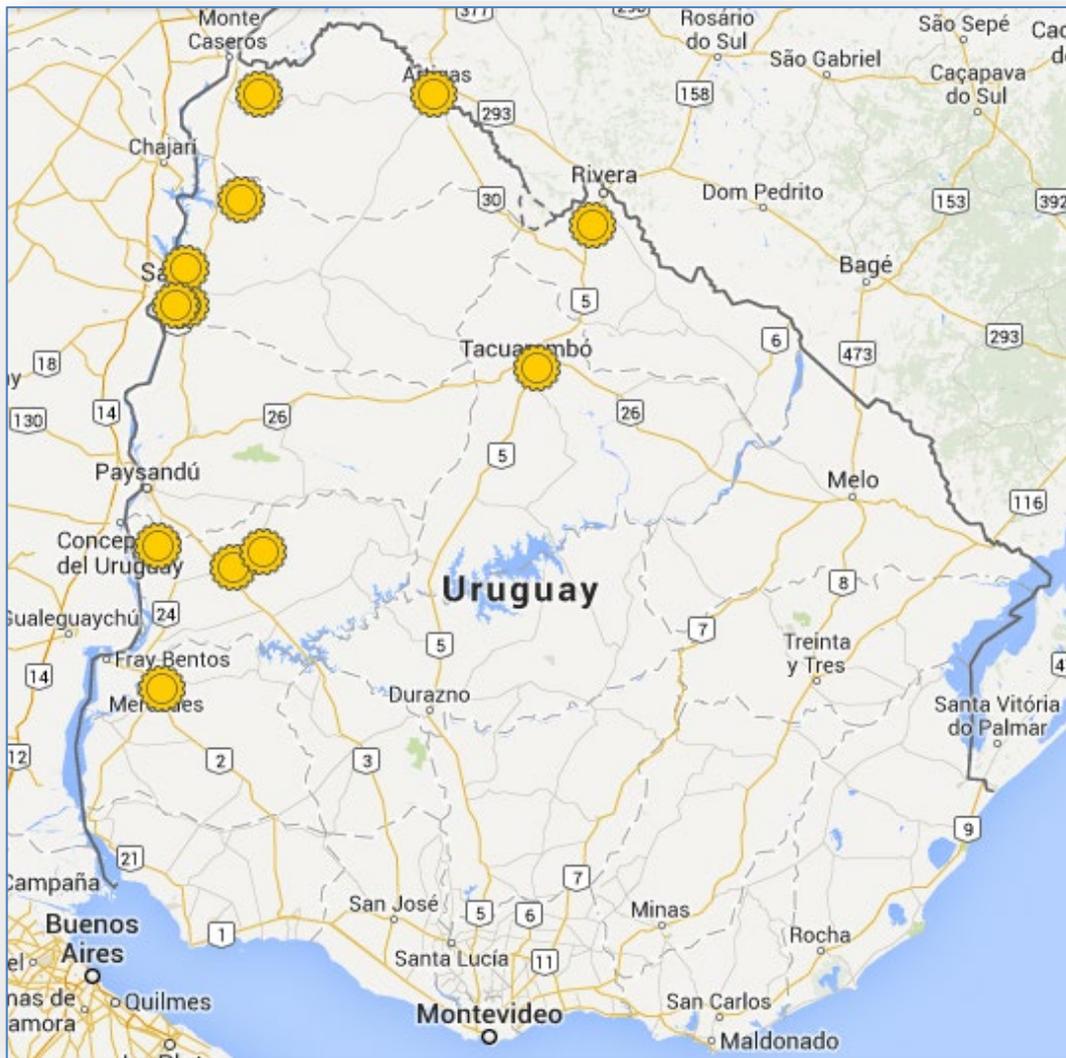
Variabilidad espacial



- Mapa solar Uruguayo

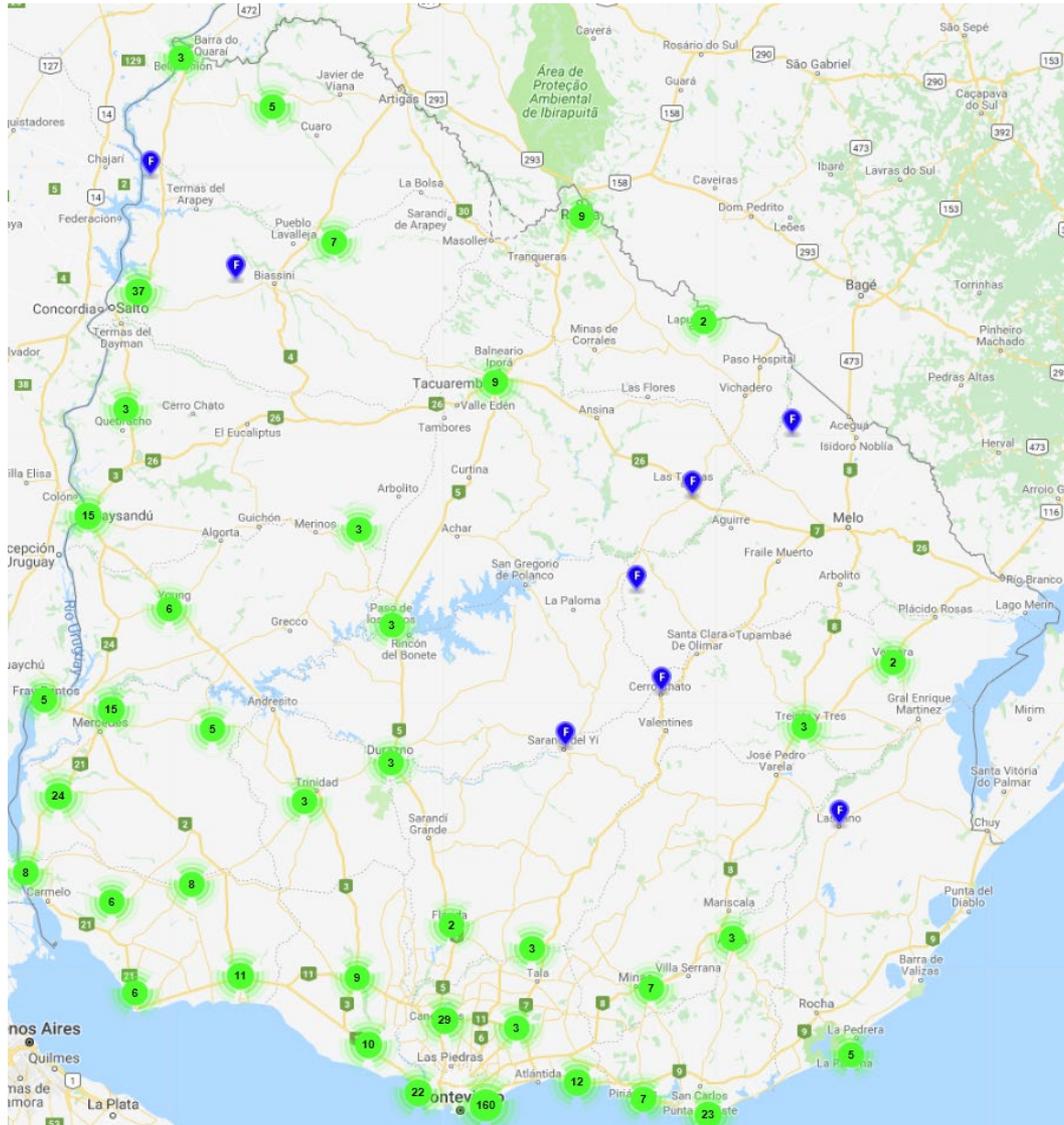
<http://les.edu.uy/>

Variabilidad espacial



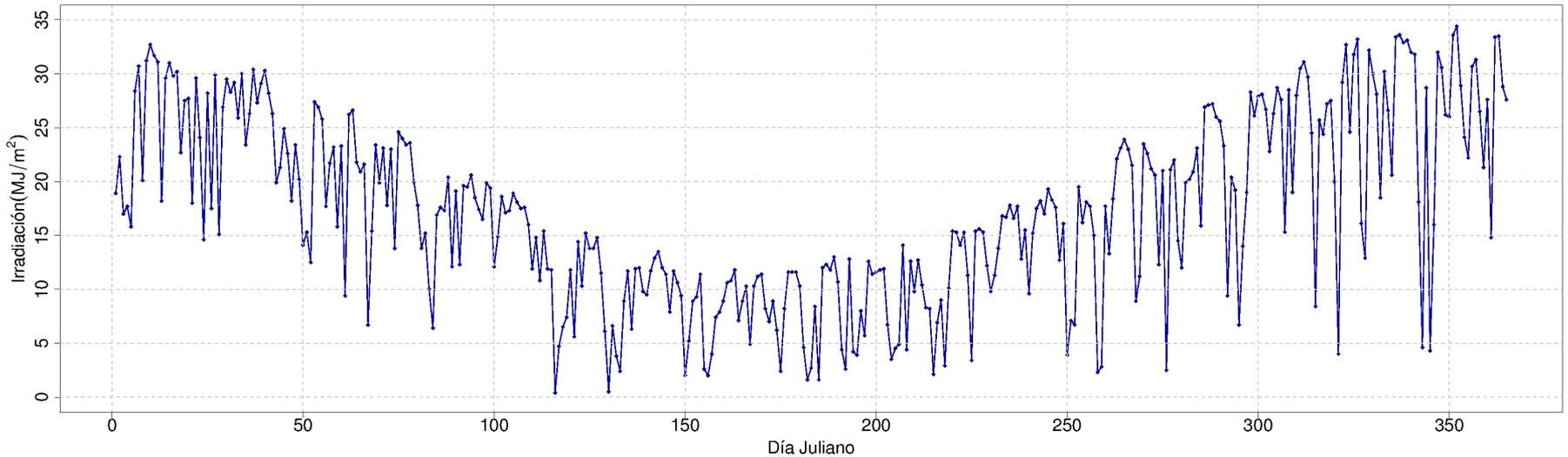
GENERADOR	DEPARTAMENTO	POTENCIA (MW)
El Naranjal	Salto	50
La Jacinta	Salto	50
Menafra	Río Negro	20
Alto Cielo	Artigas	20
Del Litoral	Salto	16
Dicano	Paysandú	11.25
Arapey	Salto	10
Yarnel	Río Negro	9.5
Natelu	Soriano	9.5
Fenima	Paysandú	9.5
Petilcoran	Paysandú	9.5
Raditon	Paysandú	8
Casalko	Paysandú	1.75
Gilpyn	Paysandú	1
Cernal	Paysandú	1
Vingano	Paysandú	1
Asahi	Salto	0.5
	Total	228.5

Variabilidad espacial

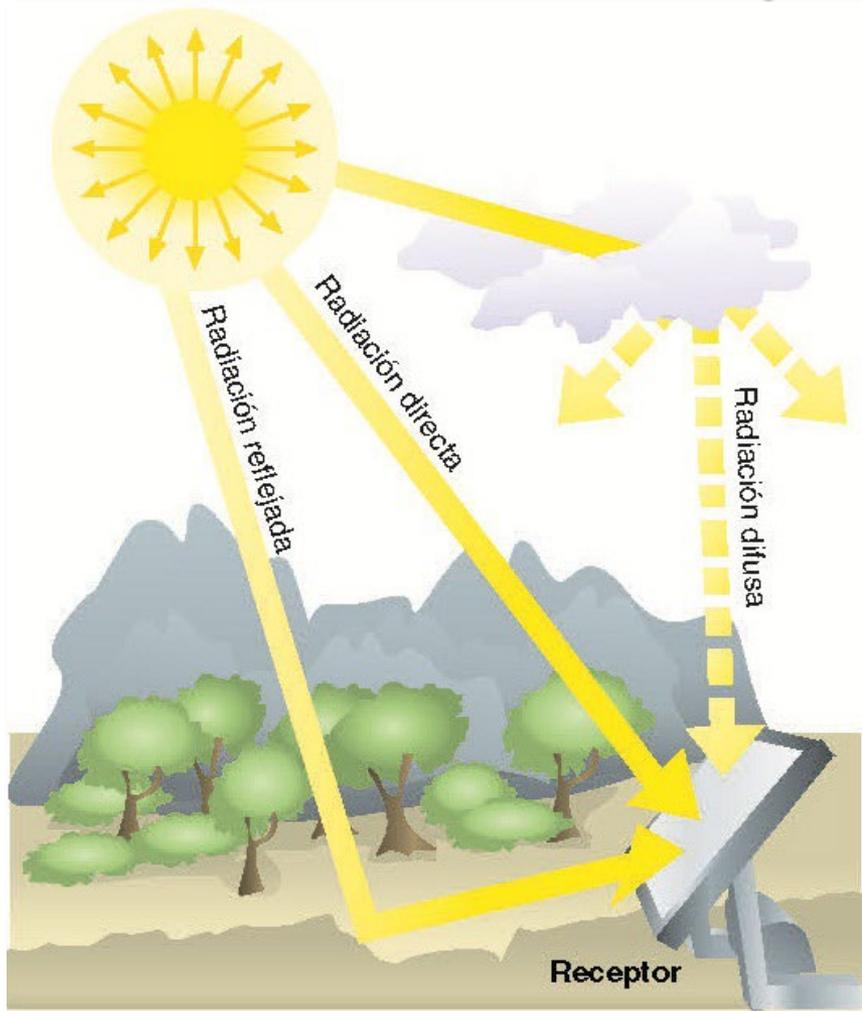


Variabilidad temporal

Irradiación global en plano horizontal a escala diaria



Irradiancia directa, difusa y reflejada



- **Directa:**
Colineal a la línea Tierra-Sol
- **Difusa:**
Todas las direcciones
- **Reflejada:**
Reflejada por superficies
- **Global:**
Suma de las anteriores

fuelle: <http://calculationsolar.com/>

¿Cómo se mide la irradiancia?

Piranómetro:

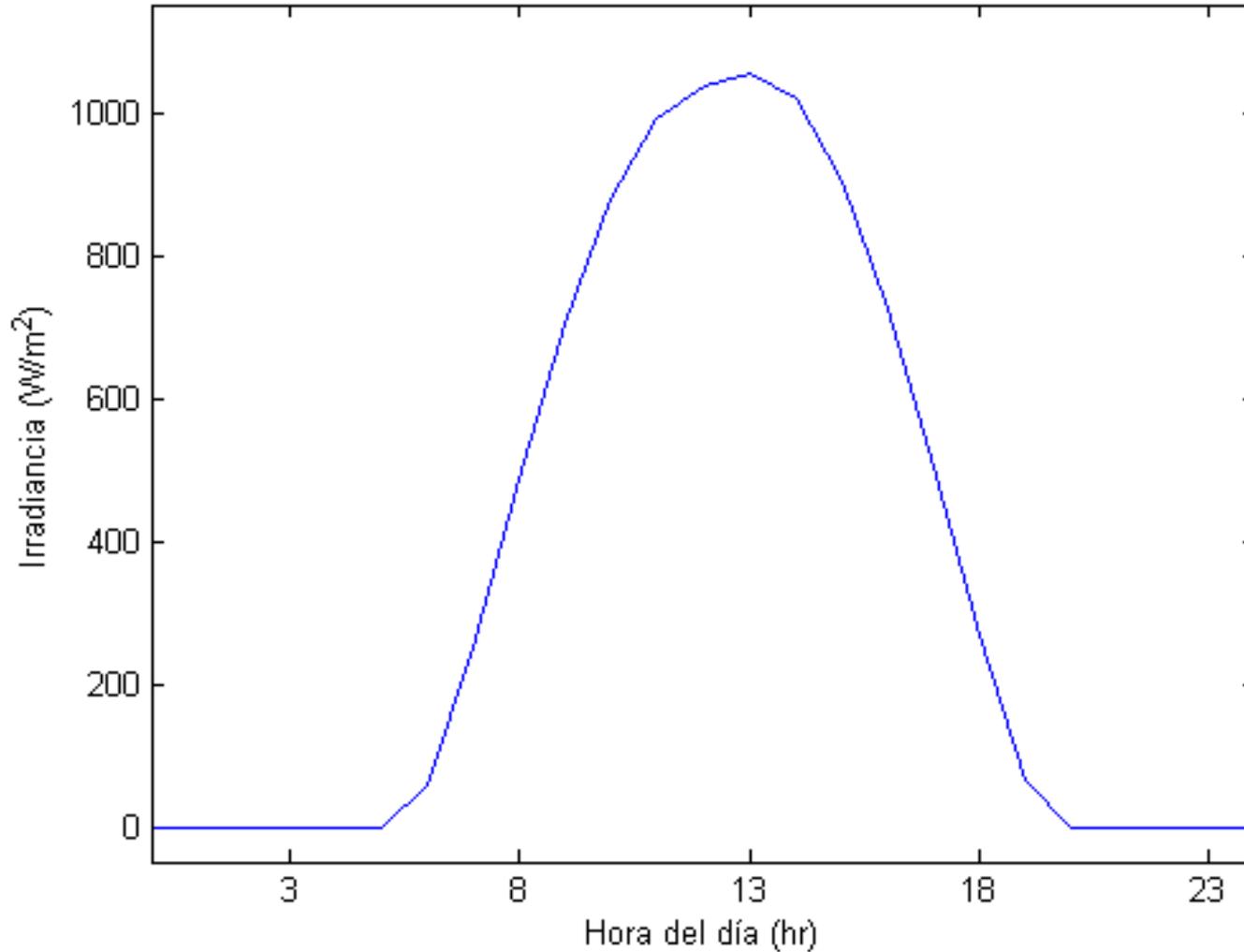
Dispositivo capaz de medir en forma precisa la **irradiancia global** Incidente en un plano.

Pueden ser usados para medir difusa, bloqueando la fuente irradiante en forma puntual con una pantalla.



Curva típica de irradiancia

Irradiancia horaria típica en plano horizontal (verano)



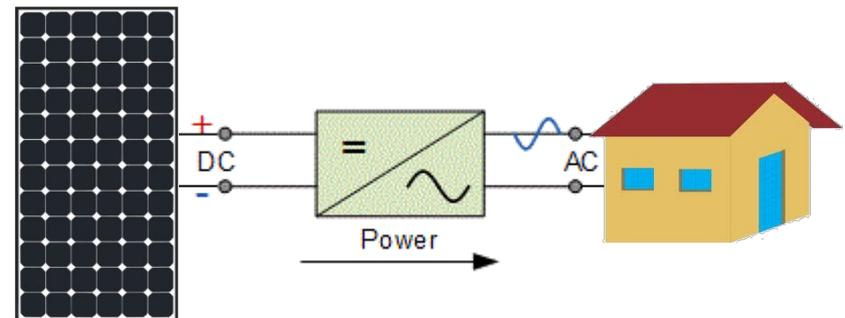
Central Fotovoltaica



Inversores

Funciones principales:

- Conversión de la energía continua (DC o CC) que generan los paneles fotovoltaicos a corriente alterna (AC o CA), de manera que la energía pueda ser inyectada a la red.
- Establecer en forma continua el punto de funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, imponiendo el voltaje necesario que maximice la potencia en todo instante de tiempo (MPPT).



Seguimiento



Introducción

Seguidores Solares:

Dispositivos mecánicos capaces de orientar a los paneles fotovoltaicos de forma de minimizar el ángulo de incidencia y así maximizar la energía generada.

Pueden ser programados en base a ecuaciones astronómicas, o pueden tener sensores de luminosidad.

Existen distintas configuraciones según el eje de rotación.



Configuración de la superficie de paneles

Orientación: γ
Inclinación: β

- Paneles fijos
- Seguimiento
 - En un eje
 - » Horizontal
 - » Acimutal
 - » Polar
 - En dos ejes



Paneles fijos (sin seguimiento)



- Orientación al Norte
- Inclinação fija igual a la latitud
- Es la opción más económica

Seguidores – Un eje



ACIMUTAL

Eje vertical y su superficie está inclinada un ángulo igual a la latitud.



HORIZONTAL

Eje orientado N-S y paralelo a la superficie del suelo.



POLAR

Eje orientado N-S y su superficie está inclinada un ángulo igual a la latitud.

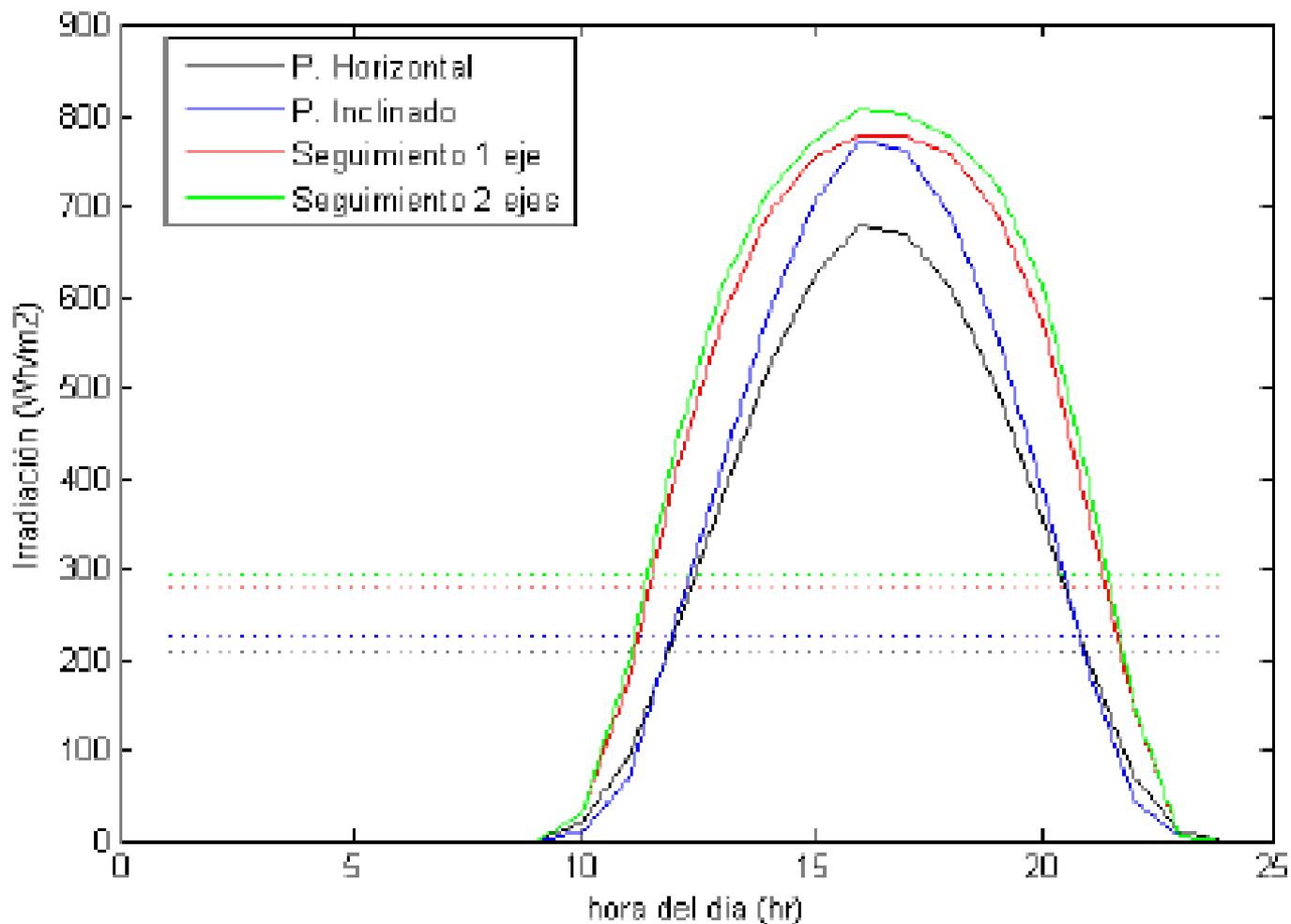
Seguidores – Dos ejes



Al tener 2 ejes es capaz de seguir totalmente al sol, recibiendo la irradiación siempre en forma perpendicular.

Es el que capta más recurso de los seguidores, pero también es más caro.

Ganancia según seguimiento



Ganancia según seguimiento

Configuración	Ganancia (vs 0°)	Ganancia (vs 28°)
Paneles Fijos (28 °)	9 %	-
Seguimiento Horizontal	30 %	19 %
Seguimiento Acimutal	35 %	24 %
Seguimiento en Dos Ejes	44 %	32 %



Paneles fotovoltaicos



Paneles Fotovoltaicos

Son dispositivos capaces de transformar energía radiante directamente en eléctrica, por medio del efecto fotoeléctrico.

Son modulares: constituidos por varios elementos básicos denominados celdas, las cuales se pueden interconectar en serie o en paralelo.



Celda



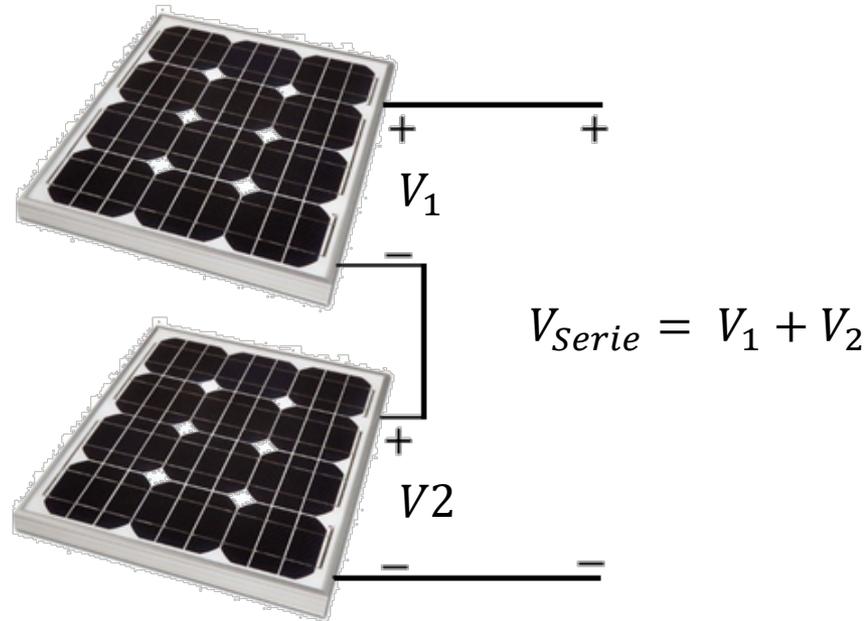
Módulo o panel

Idealmente, ¿Qué sucede si conecto las celdas en serie o en paralelo?

Serie: se suman los voltajes de cada celda y se mantiene la corriente

Paralelo: se suman las corrientes de cada celda y se mantiene el voltaje

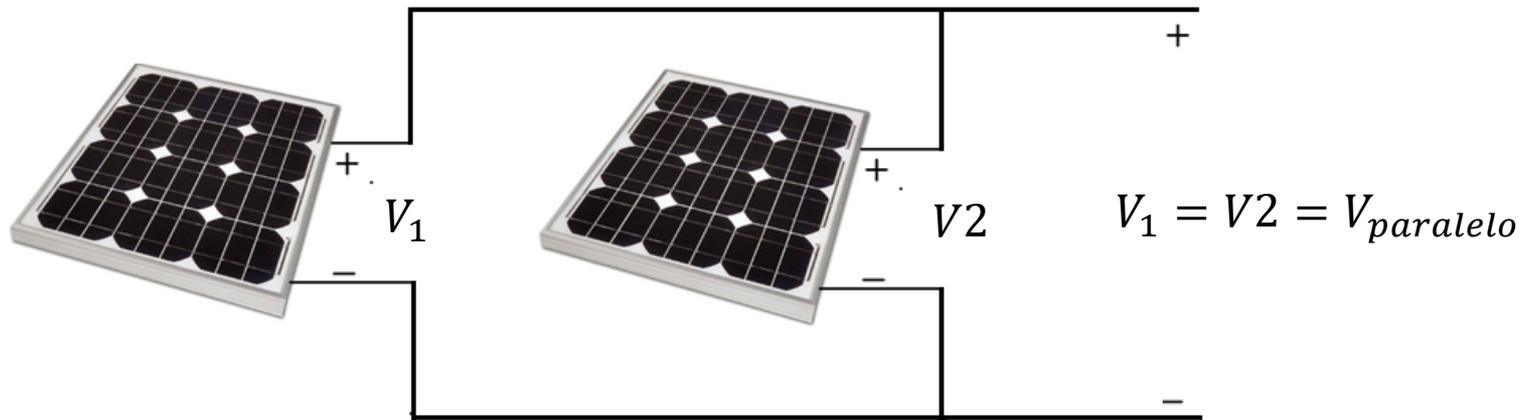
Paneles Fotovoltaicos



Idealmente, ¿Qué sucede si conecto las celdas en serie o en paralelo?

Serie: se suman los voltajes de cada celda y se mantiene la corriente

Paneles Fotovoltaicos



Idealmente, ¿Qué sucede si conecto las celdas en serie o en paralelo?

Paralelo: se suman las corrientes de cada celda y se mantiene el voltaje

Parámetros básicos de un panel PV

- I_{mpp} : Corriente de máxima potencia
- V_{mpp} : Tensión de máxima potencia
- I_{sc} : Corriente de cortocircuito
- V_{oc} : Tensión de circuito abierto

Potencia STC (Condiciones estándares de prueba): Potencia que el panel es capaz de entregar en ciertas condiciones de operación (irradiancia y temperatura). Se mide en Wp (Watt pico).

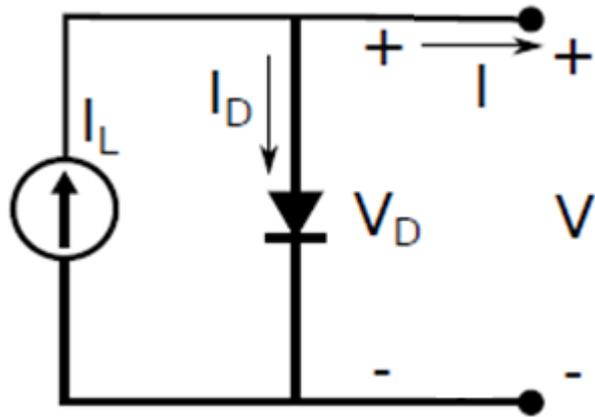
Esta potencia **no** es la máxima que puede entregar el panel.

Modelo eléctrico

The chalkboard contains the following content:

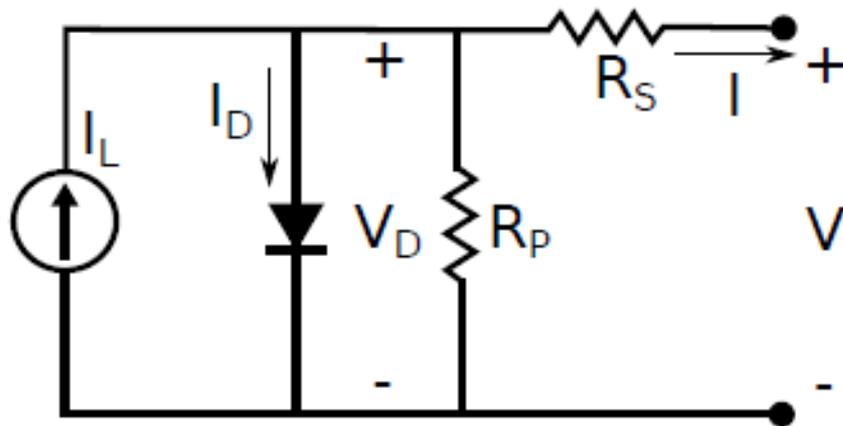
- $Q = mc\Delta T$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{(1+x)^n - 1}{x} = n$
- $v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$
- $T = \frac{2\pi}{\omega}$
- $V = v_0 + at$
- $P = mV$
- $v = \omega r$
- $\sin^2 + \cos^2 = 1$
- $F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$
- $E = mc^2$
- $PV = nRT$
- $P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2 R$
- $V = IR$
- $\Delta P = \rho g \Delta h$
- $K_{eq} = \frac{[H_2O]^2}{[H_2]^2 [O_2]}$
- $\Delta E = h\nu$
- $F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$
- $\omega = 2\pi f$
- $y = x^2 + a$
- $v = f\lambda$
- $v = \frac{\Delta p}{\Delta t}$
- $\frac{a^2}{b^2} - 2abc \cos r = c^2$
- $\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}$
- $\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} = \frac{1}{c^2}$
- $E_k = \frac{1}{2}mv^2$
- $\log_a(x)$
- $\log_a(x)$
- $v = v_0 + at$
- $T = \frac{2\pi}{\omega}$
- $P = mV$
- $v = \omega r$
- $\sin^2 + \cos^2 = 1$
- $F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$
- $E = mc^2$
- $PV = nRT$
- $P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2 R$
- $V = IR$
- $\Delta P = \rho g \Delta h$
- $K_{eq} = \frac{[H_2O]^2}{[H_2]^2 [O_2]}$
- $\Delta E = h\nu$
- $F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$
- $\omega = 2\pi f$
- $y = x^2 + a$
- $v = f\lambda$
- $v = \frac{\Delta p}{\Delta t}$
- $\frac{a^2}{b^2} - 2abc \cos r = c^2$
- $\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}$
- $\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} = \frac{1}{c^2}$
- $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

Modelo eléctrico ideal – celda solar



- Modelada como una fuente de corriente en paralelo con un diodo. El valor de la fuente de corriente depende de la irradiancia que incide en la celda fotovoltaica.

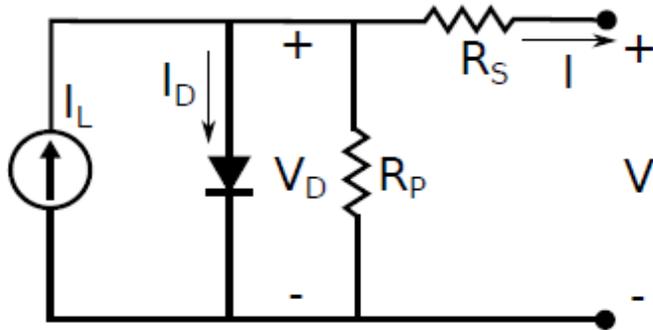
Modelo eléctrico – celda solar



- **R_s** : Resistencia debida a los contactos eléctricos en la construcción de la celda.
- **R_p** : representa las fugas de corriente, los posibles cortocircuitos metálicos no deseados.



Modelo eléctrico – celda solar

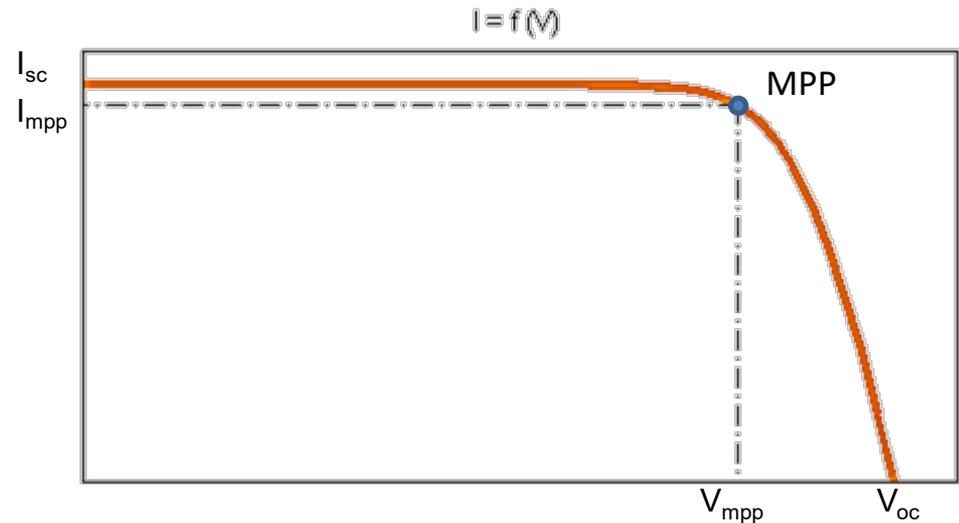


$$I = I_L - I_S(e^{(V+I.R_S)/V_{th}} - 1) - \frac{(V + I.R_S)}{R_P}$$

Ecuación característica

Parámetros fundamentales:

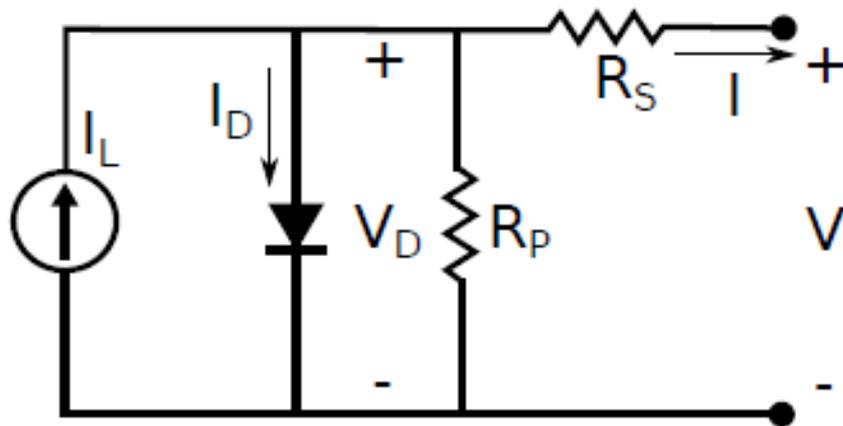
- I_L : corriente fotogenerada (dependiente de la irradiación)
- I_S : corriente de saturación inversa del panel
- R_s : resistencia serie del panel
- R_p : resistencia shunt del panel
- m : factor de idealidad del diodo del modelo



Curva característica I-V

Modelo basado en paper académico: “PV panel model based on datasheet values”

Modelo eléctrico – celda solar



$$I = I_L - I_D(V_D) - \frac{V_D}{R_P}$$

$$I_D(V_D) = I_S \cdot (e^{(V_D/V_{th})} - 1)$$

$$V_{th} = \frac{\bar{m} \cdot k \cdot T}{q}$$

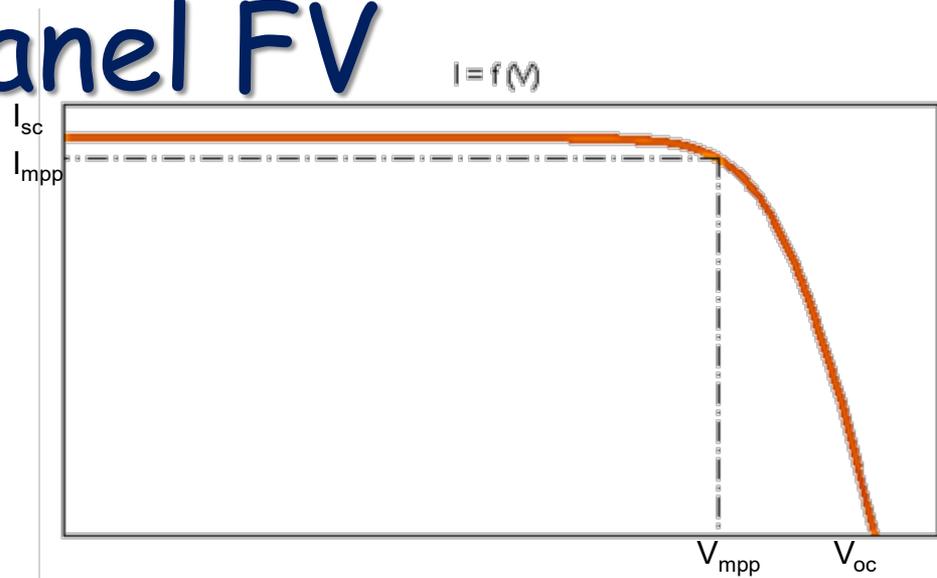
$$I = I_L - I_S \left(e^{(V + I \cdot R_S)/V_{th}} - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_S)}{R_P}$$

Ecuación característica – celda solar

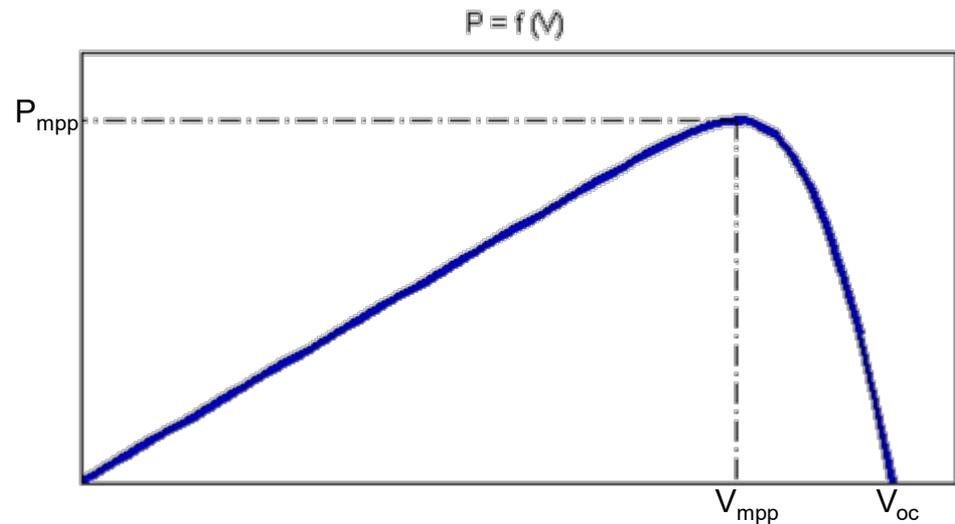


Curva característica de un panel FV

Curva característica
Corriente vs Tensión



Curva de Potencia vs Tensión



Curva característica de un panel FV

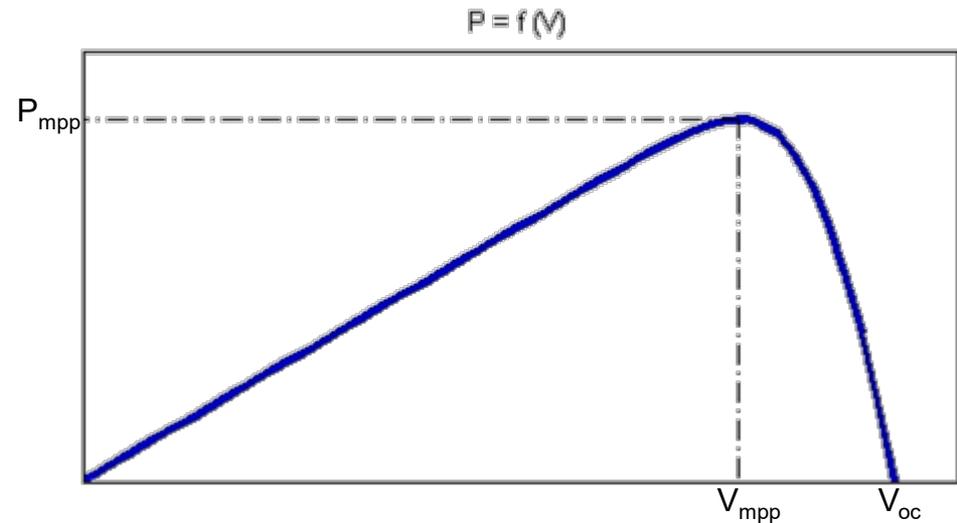
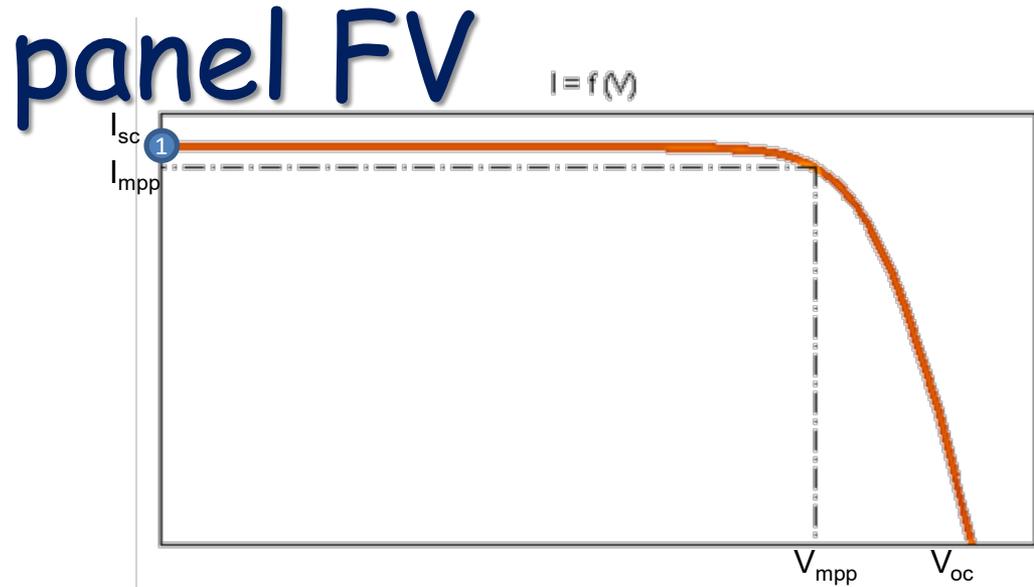
Puntos relevantes:

1) Cortocircuito (SC):

$$V = 0$$

$$I = I_{sc}$$

I_{sc} corriente de cortocircuito



Curva característica de un panel FV

Puntos relevantes:

1) Cortocircuito (SC):

$$V = 0$$

$$I = I_{sc}$$

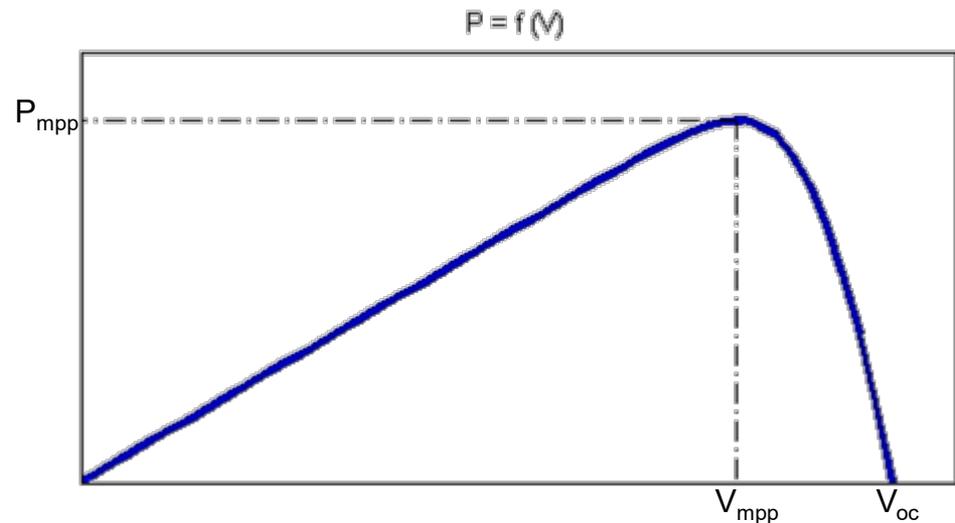
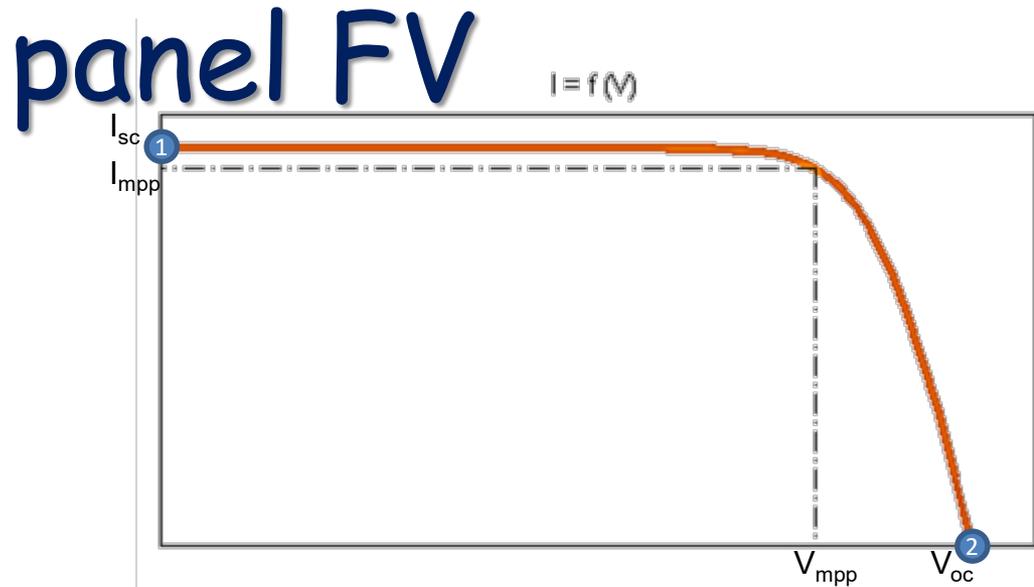
I_{sc} corriente de cortocircuito

2) Circuito abierto (OC):

$$V = V_{oc}$$

$$I = 0$$

V_{oc} tensión de circuito abierto



Curva característica de un panel FV

Puntos relevantes:

1) Cortocircuito (SC):

$$V = 0$$

$$I = I_{sc}$$

I_{sc} corriente de cortocircuito

2) Circuito abierto (OC):

$$V = V_{oc}$$

$$I = 0$$

V_{oc} tensión de circuito abierto

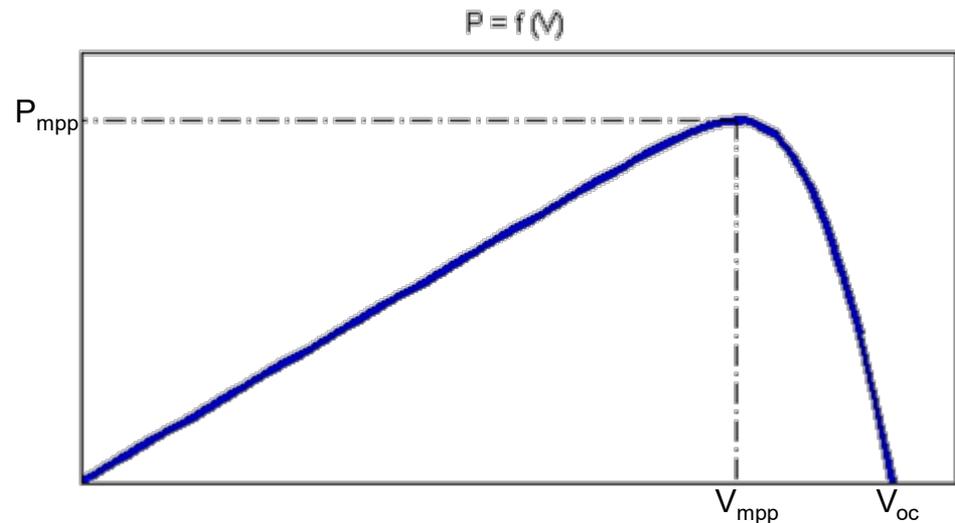
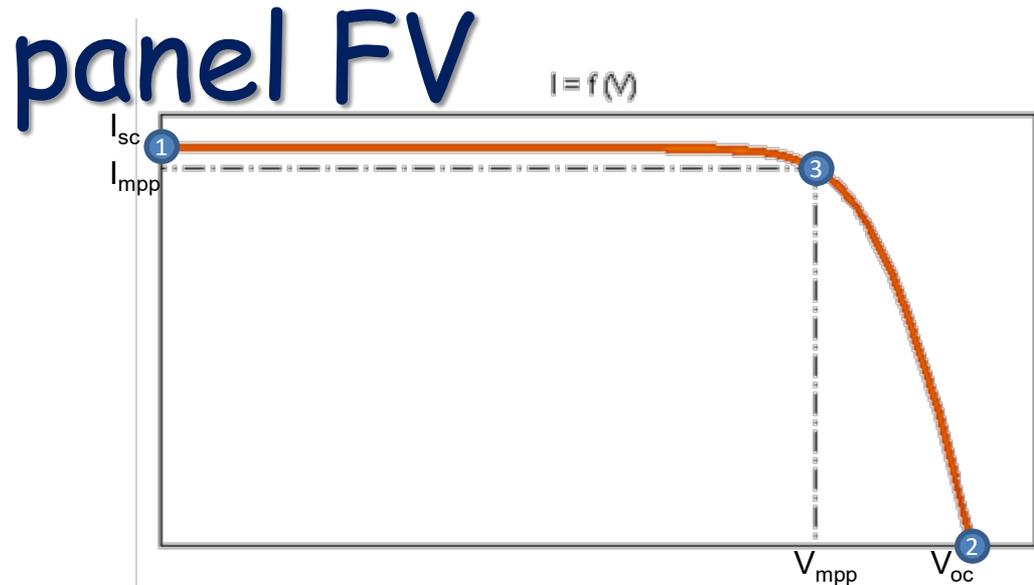
3) Punto de máxima potencia (MPP):

$$V = V_{mpp}$$

$$I = I_{mpp}$$

I_{mpp} corriente de máxima potencia

V_{mpp} tensión de máxima potencia



¿En qué condiciones se puede trazar la curva característica?

Condiciones estándar de prueba (STC):

Los datos proporcionados por los fabricantes son ensayados en condiciones de irradiancia y temperatura de celda normalizada:

- $G = 1000 \text{ W/m}^2$ → Misma irradiancia
- $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ → Misma temperatura de celda

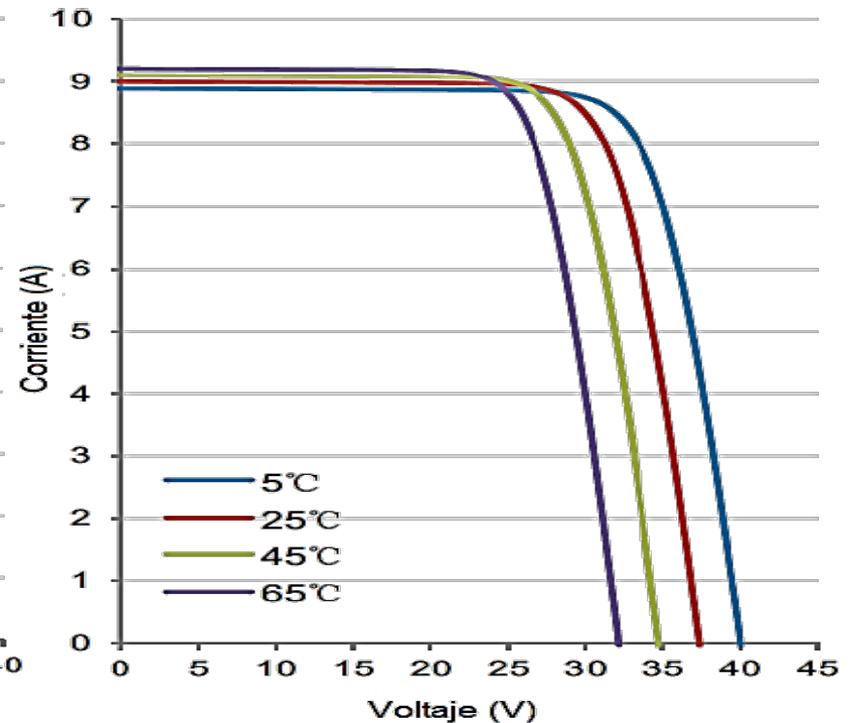
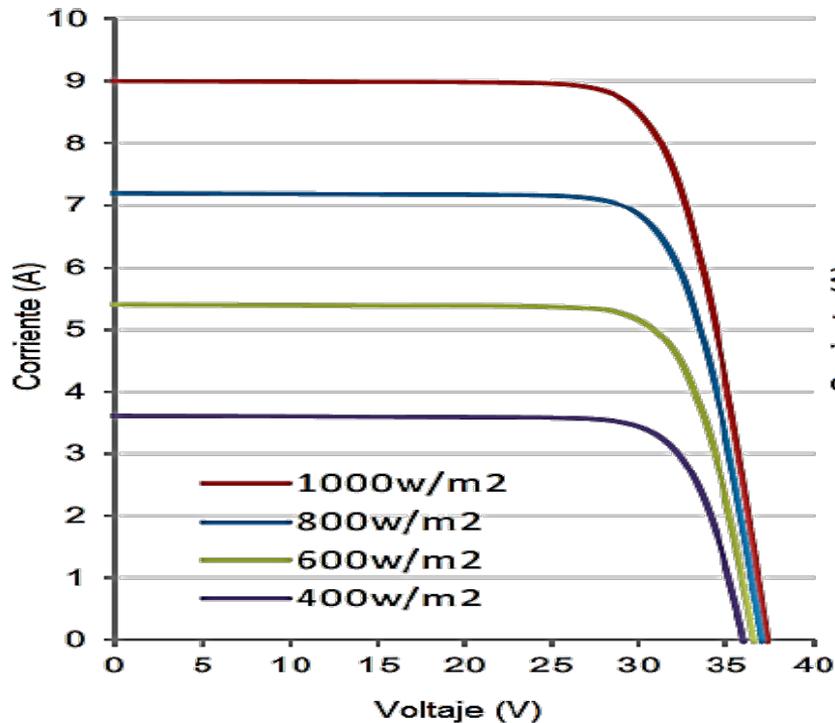
¿Por qué?

Porque ambos factores afectan directamente la performance del panel aunque el voltaje o la corriente se mantengan constantes.

¿Cómo la afectan?



Variación de la curva característica con la irradiación y la temperatura



G afecta fundamentalmente a I_{SC}

T_C afecta fundamentalmente a V_{OC}

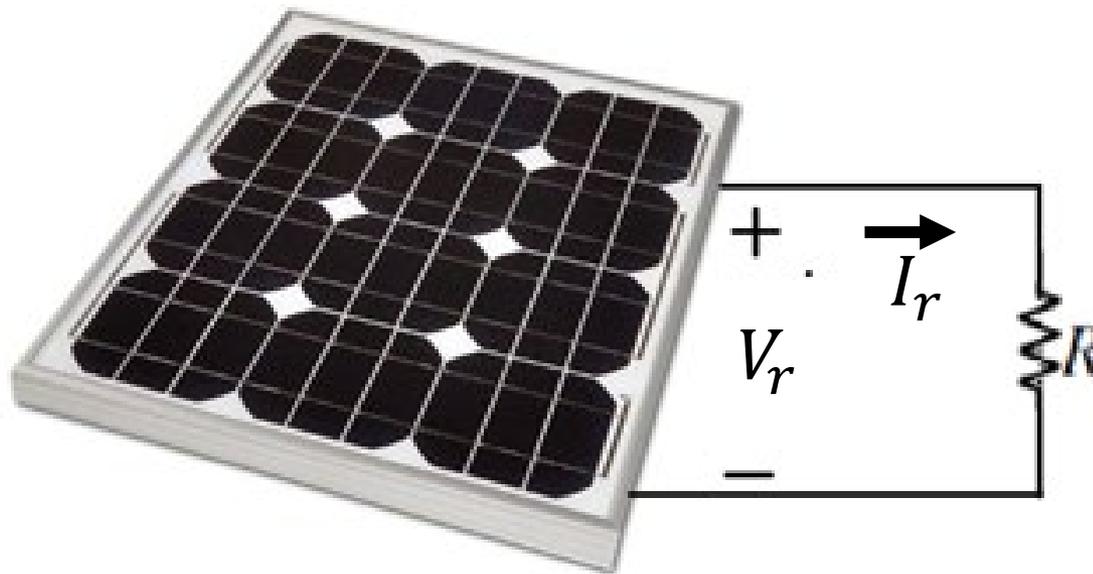
¿Para qué sirve conocer la curva característica de un panel?

Cuando se conecta un panel fotovoltaico a una carga cualquiera (resistencia, batería, etc.), la misma puede imponer un voltaje, una corriente o su curva característica (relación $i(v)$).

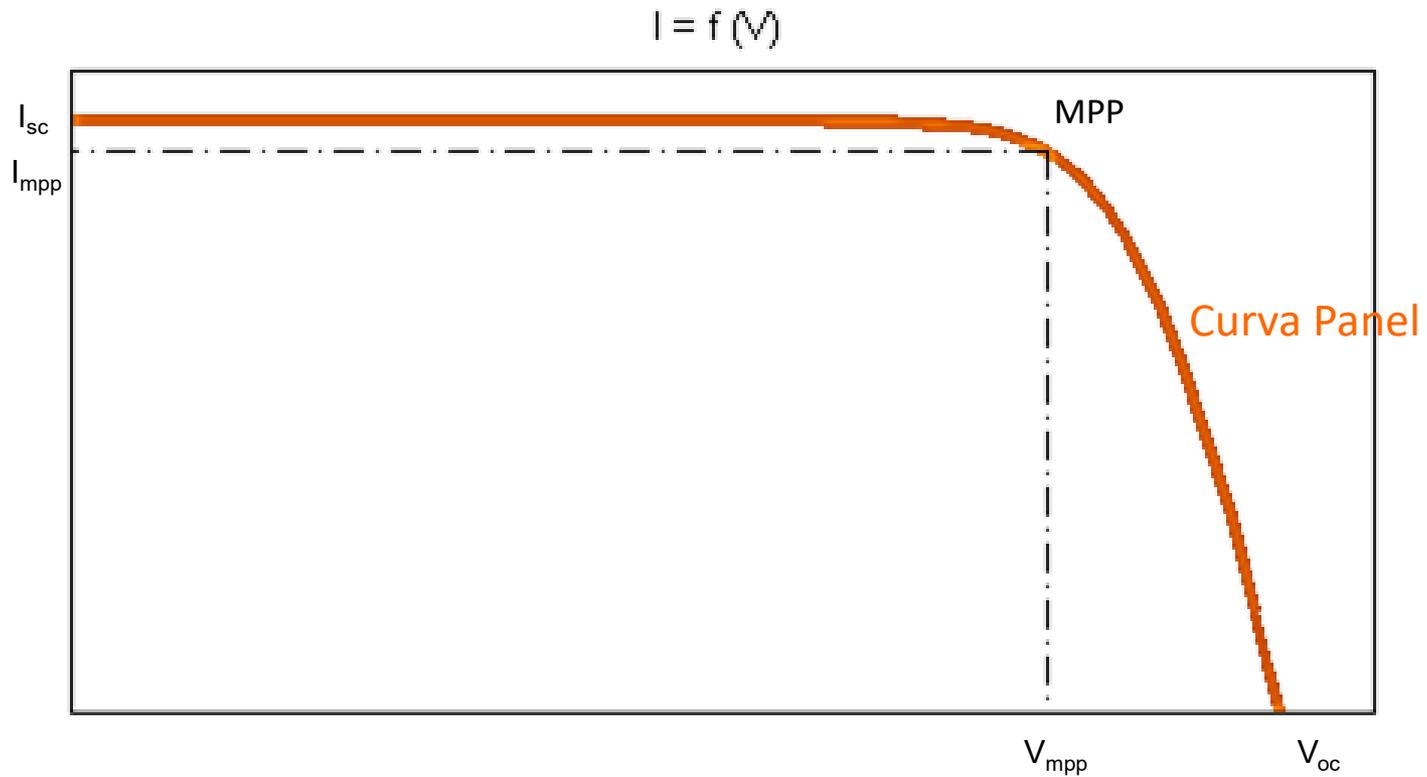
A partir de la corriente de trabajo, se puede obtener el voltaje conociendo la curva $i(v)$, y por lo tanto la potencia. Lo mismo sucede si conozco el voltaje y quiero calcular la corriente.



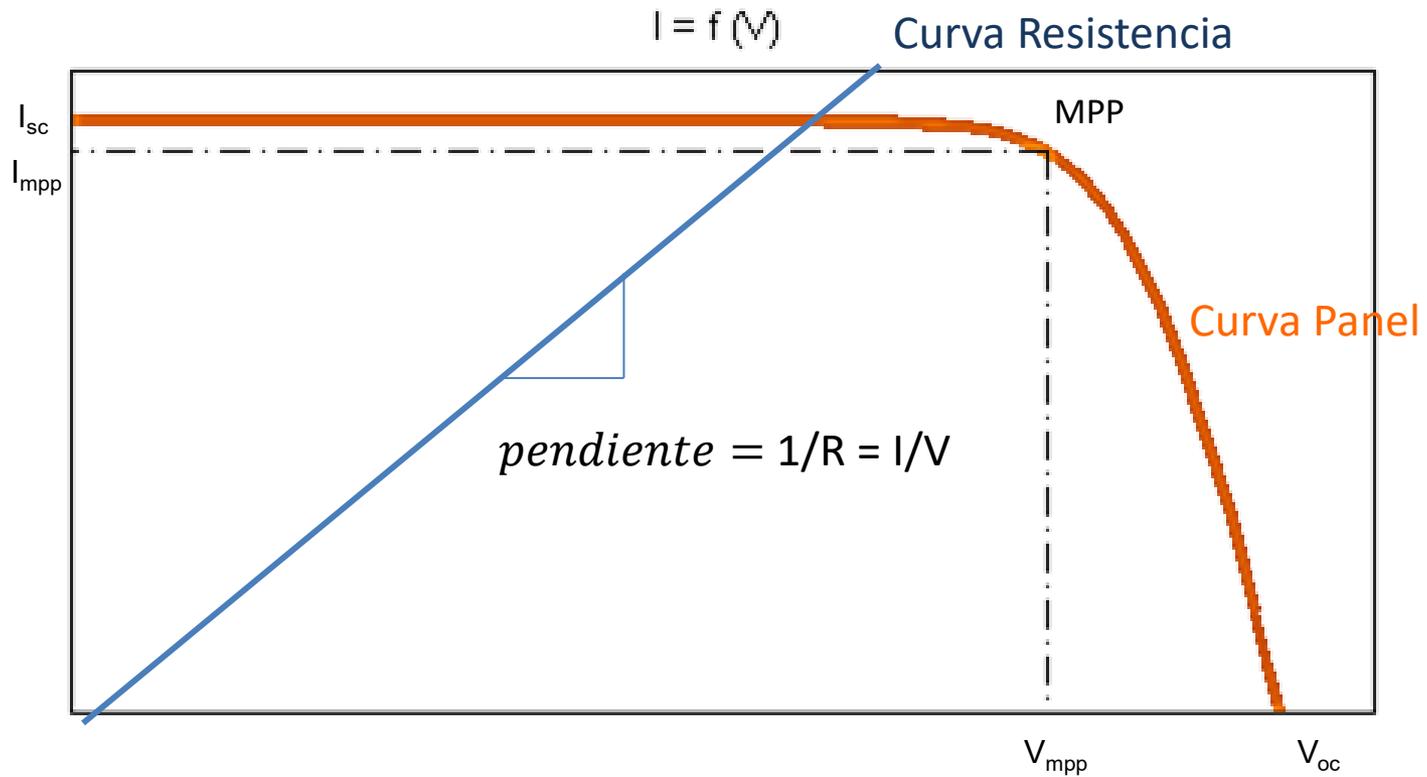
Ejercicio: Determinar que sucede si conectamos como carga al panel fotovoltaico una resistencia?



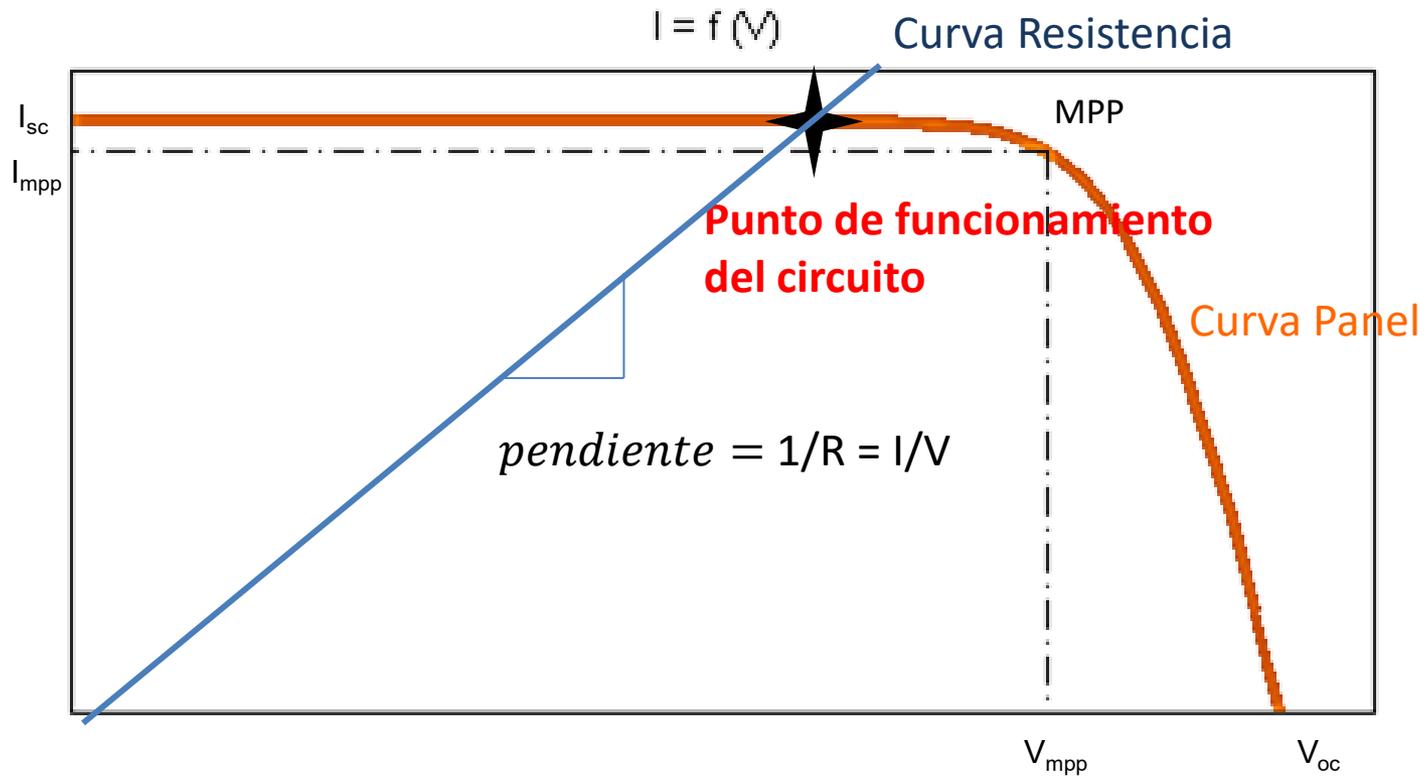
Ejercicio: Determinar que sucede si conectamos como carga al panel fotovoltaico una resistencia?



Ejercicio: Determinar que sucede si conectamos como carga al panel fotovoltaico una resistencia?



Ejercicio: Determinar que sucede si conectamos como carga al panel fotovoltaico una resistencia?

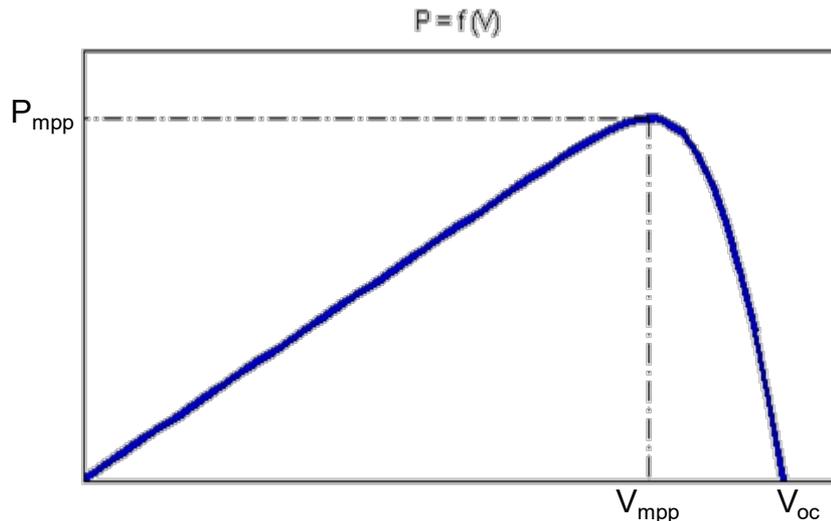


MPPT

Maximum Power Point Tracking

Objetivo: maximizar en todo momento la potencia entregada por el panel.

Existen diversas estrategias para lograr este objetivo. La más común es el algoritmo de perturbar y observar (P&O).



Curva característica potencia-tensión

Se aprovecha la forma particular de la curva $P(V)$ del panel.

¿preguntas?

