

Modelos analíticos

Paneles solares

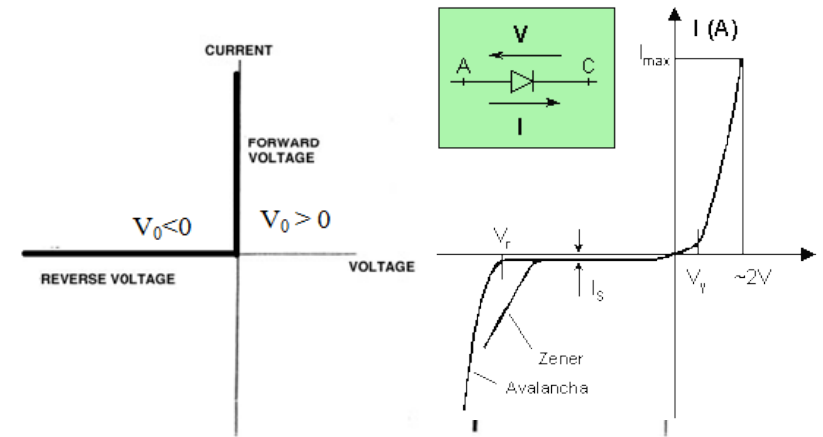
Fotodiodo

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja.

Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por la luz.

En oscuridad se comporta como un diodo normal. Cuando se ilumina la curva baja porque se energizan los electrones y se crea una corriente en dirección contraria a I_p .

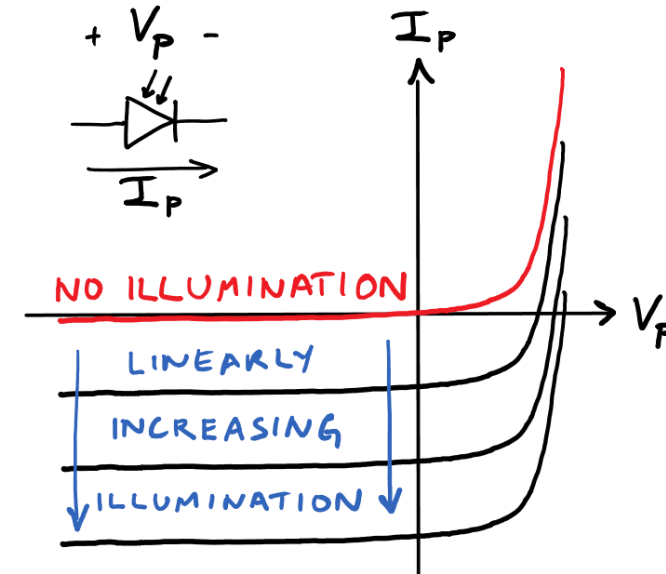
Diodo



Ecuación del diodo de Shockley

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{aV_T}\right) - 1 \right]$$

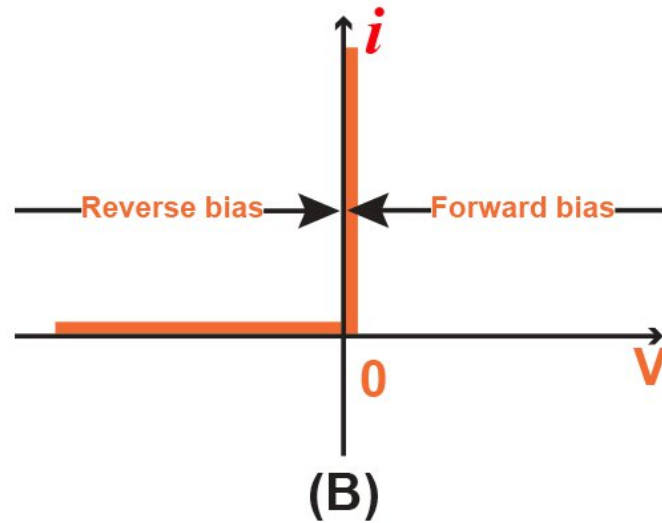
Fotodiodo



Diodo

Elemento semiconductor (union p-n) que permite la circulación de corriente en un solo sentido. Bloquea la circulación en sentido contrario.

Diodo ideal:



Ecuación de Shockley

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{aV_T}\right) - 1 \right]$$

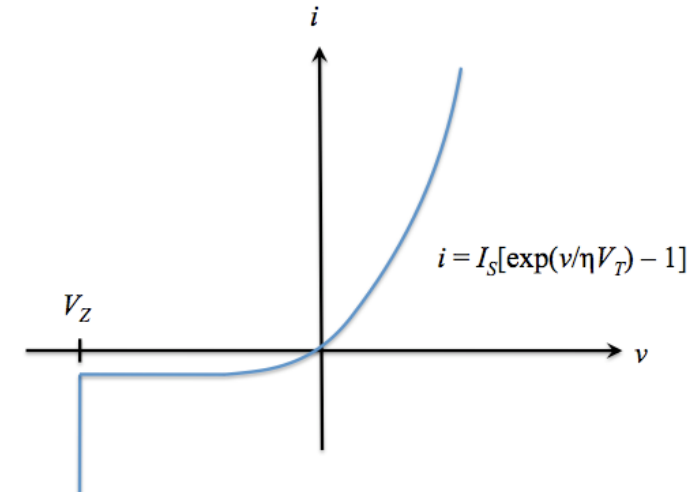
Voltaje Térmico (no es una incognita)

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

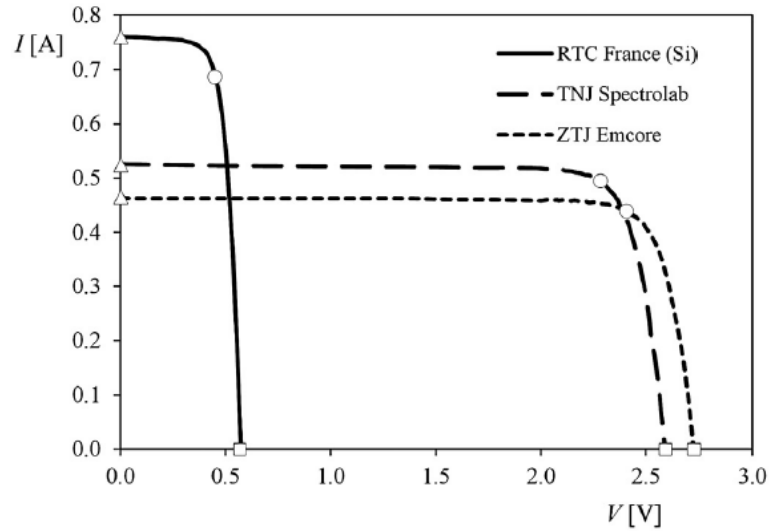
T: Temperatura

q: Carga electron

k: Constante de Boltzman

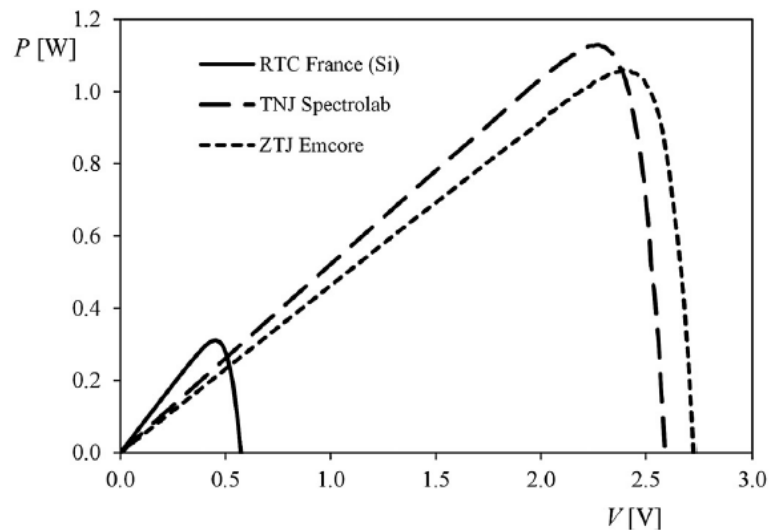


Funcionamiento de un panel solar



Curva típica de Intensidad-Voltaje I - V de un panel solar, cuarto cuadrante de un fotodiodo.

- La máxima intensidad es a voltaje cero, cortocircuito
- Presenta una parte de intensidad muy plana al inicio
- El voltaje máximo se produce a corriente nula, circuito abierto



Curva típica de Potencia-Voltaje P - V de un panel solar

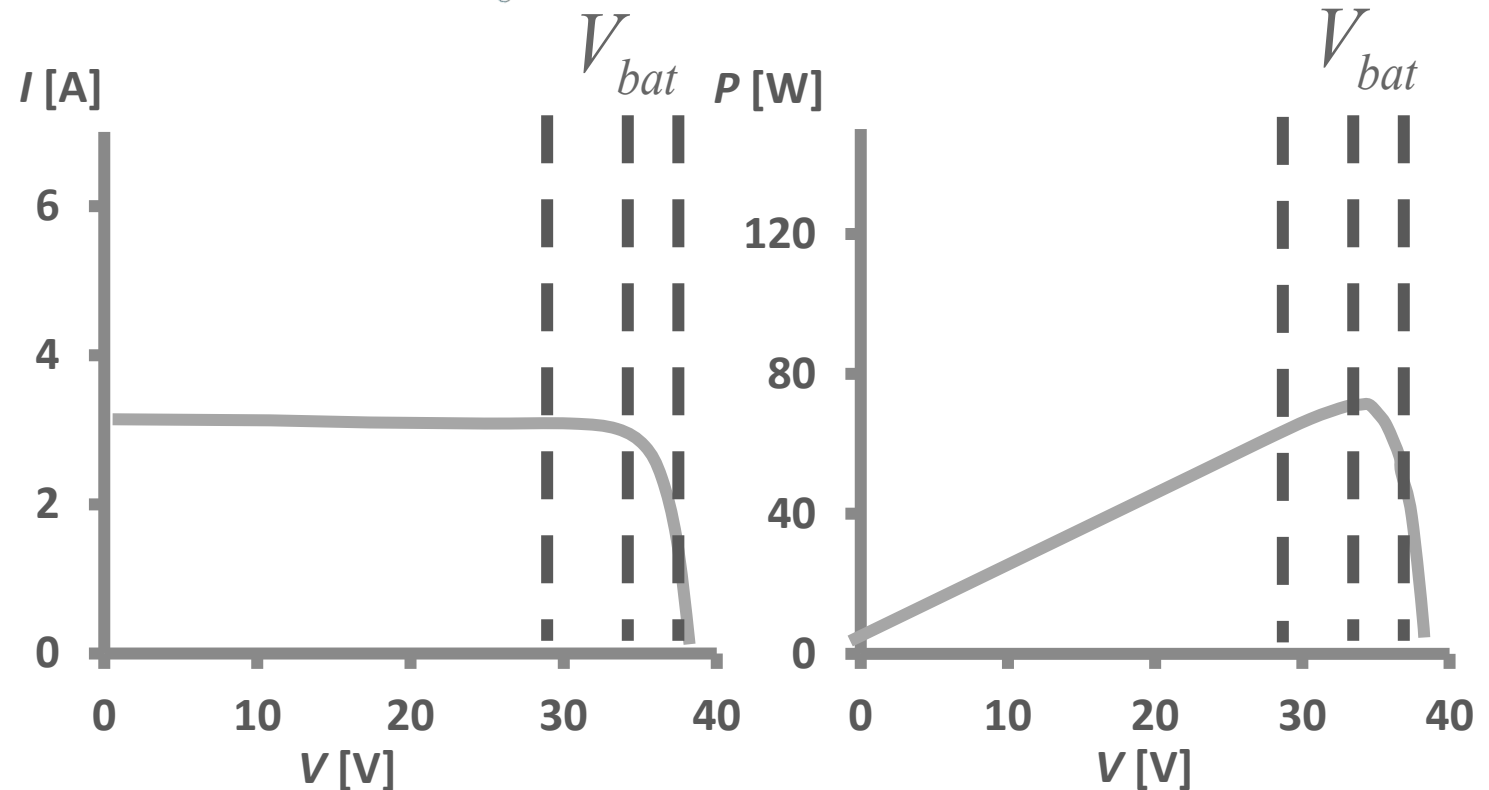
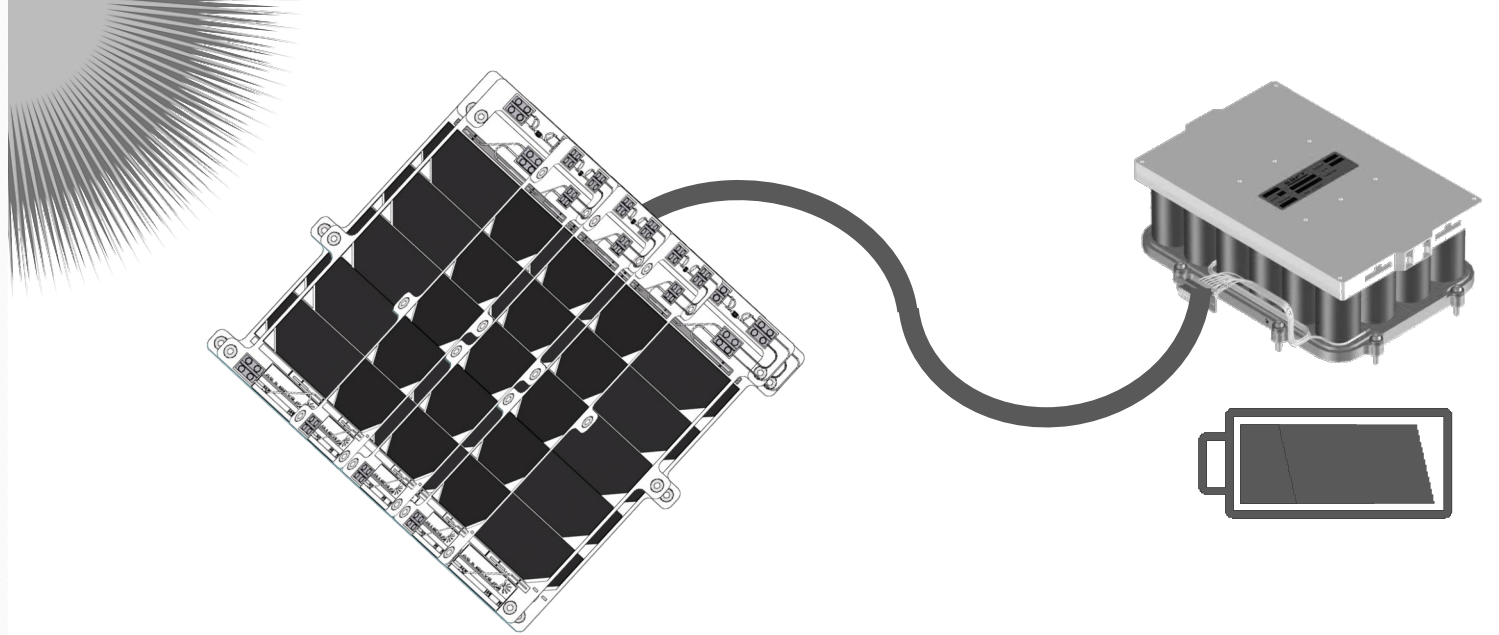
- En cortocircuito la potencia es nula
- La máxima potencia se produce en el entorno de $0.8V_{oc}$ esto es en el codo de la curva I - V
- En circuito abierto la potencia es nula

Generación de Potencia

La intensidad y potencia del panel solar dependen del voltaje de operación

Para sacar la máxima potencia de un panel hay que controlar el voltaje:
Maximum Power Peak Tracking
MPPT

Si el panel está directamente conectado a una fuente de voltaje variable (batería) no siempre operará en el punto óptimo de potencia.

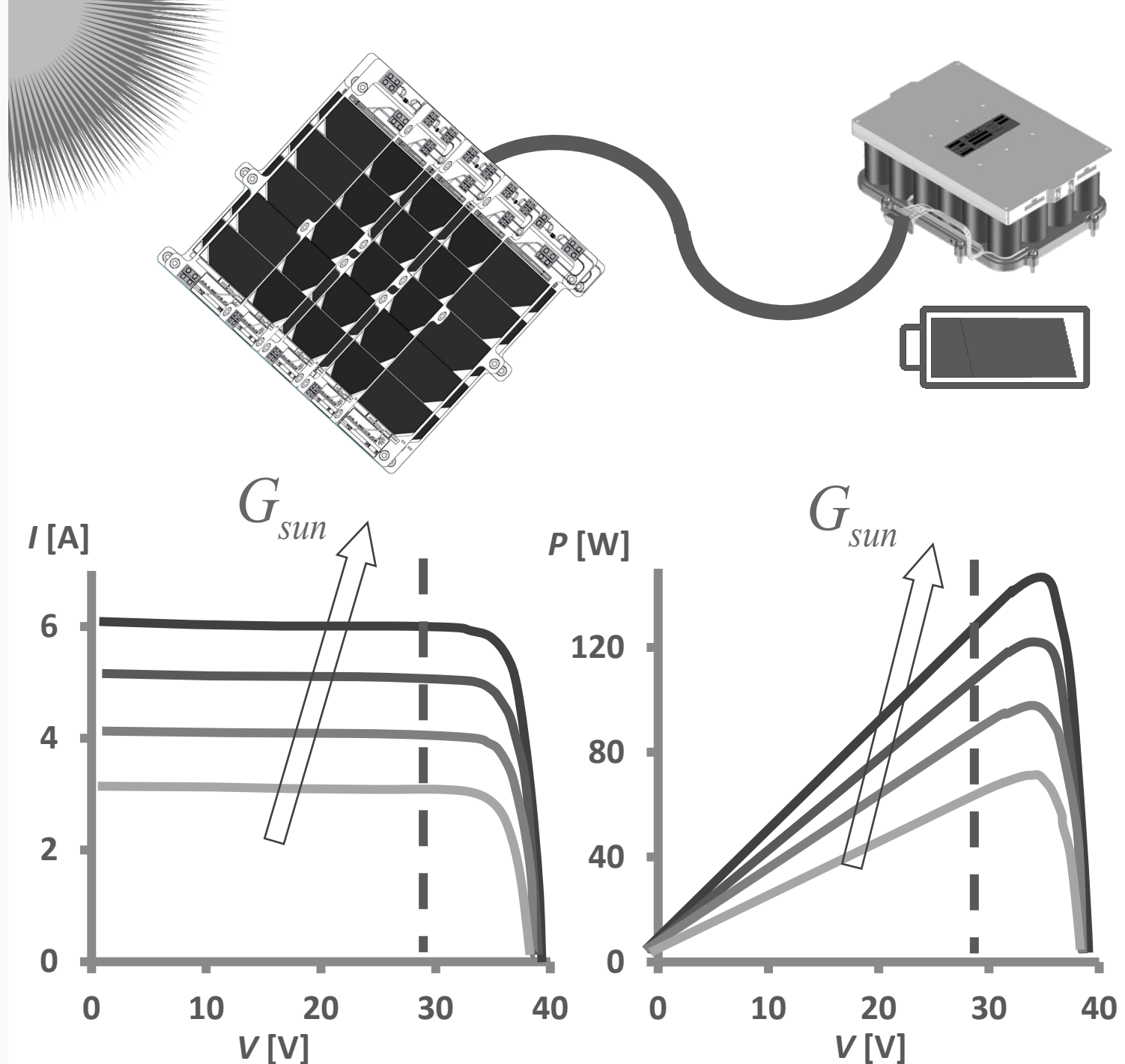


Generación de Potencia

La intensidad y potencia del panel solar dependen de la irradiancia del panel (ángulo de incidencia)

En primera aproximación, se puede considerar que la intensidad y la potencia son proporcionales a la irradiancia (curvas proporcionales)

Por tanto, el voltaje de Circuito Abierto y el voltaje de máxima potencia no varían.



Generación de Potencia

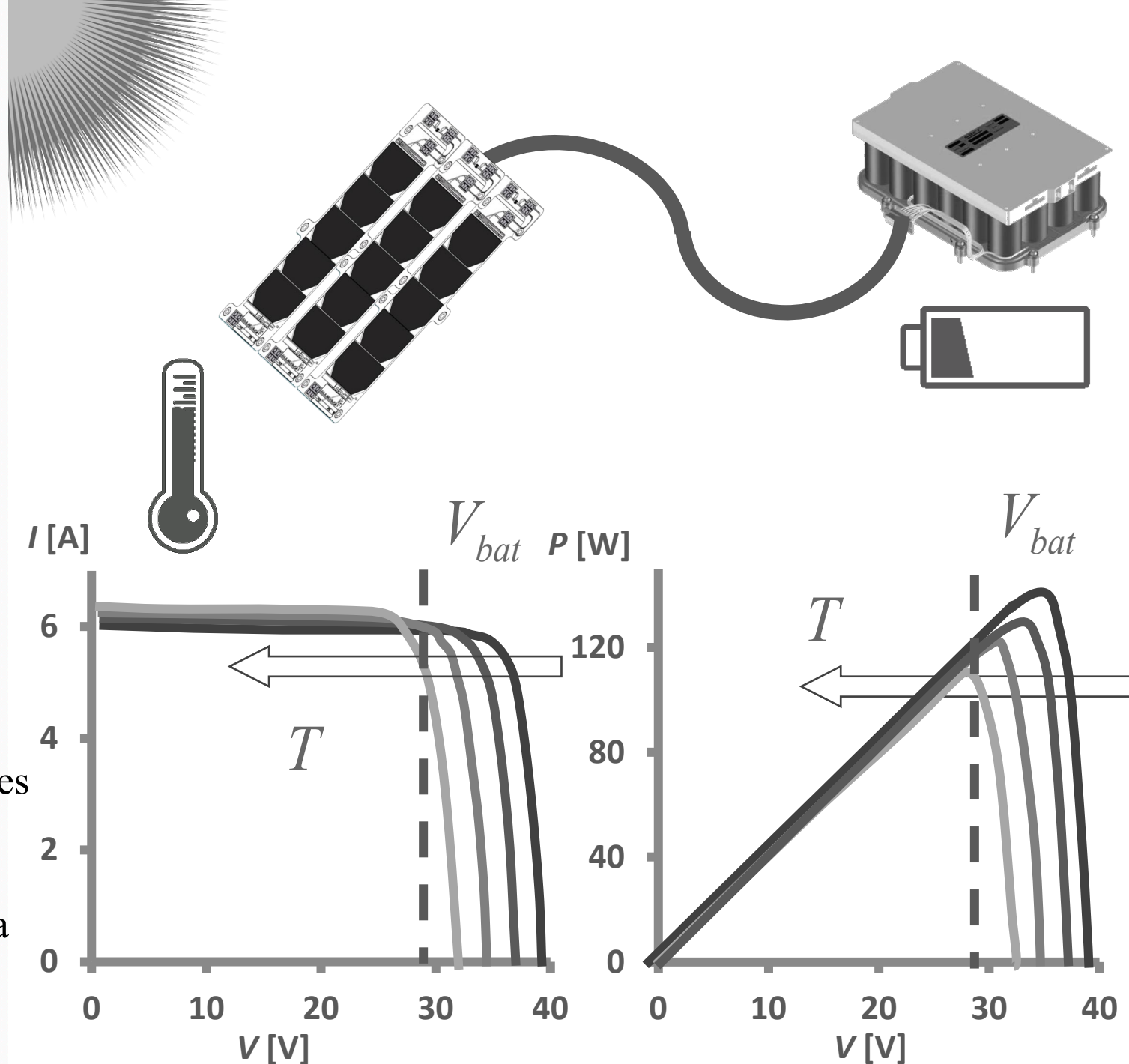
La intensidad y potencia del panel solar dependen de la temperatura del panel

El V_{oc} desciende con la temperature (linealmente)

El I_{sc} aumenta con la temperature (linealmente)

La potencia tambien desciende con la temperatura, porque la bajada de voltaje es mayor que la subida de intensidad.

Una subida de temperature puede llevar a una bajada brusca de potencia



Circuito equivalente

El modelo más usado para paneles solares es el circuito equivalente

- 1 La curva I-V de una célula puede aproximarse como un fuente de corriente conectada a una unión p-n

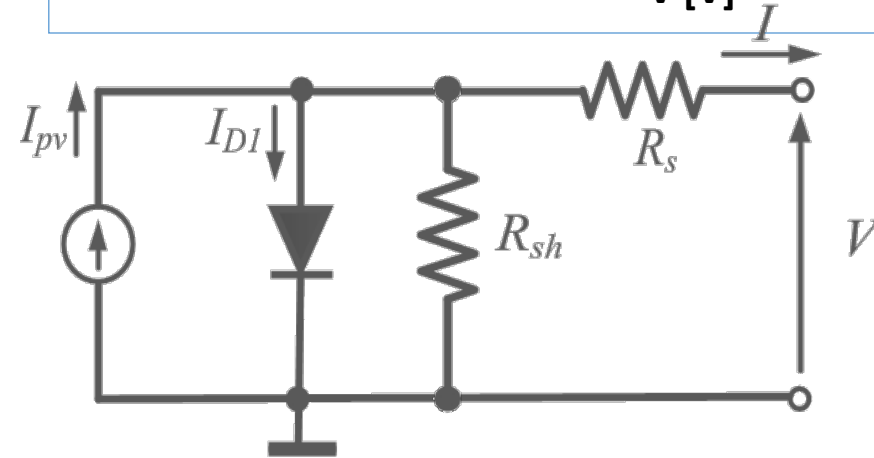
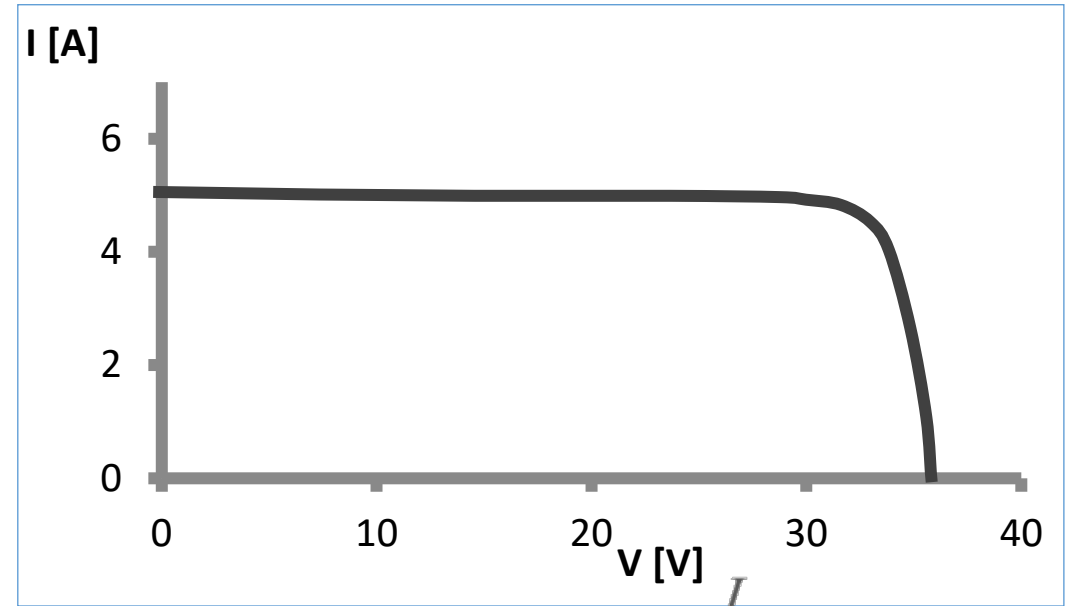
Ecuación del diodo de Shockley

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{aV_T}\right) - 1 \right]$$

- 2 Las pérdidas en las soldaduras, uniones, interconexiones... se representan como una resistencia en serie, R_s

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{aV_T}\right) - 1 \right]$$

- 3 Las pérdidas a través de la unión p-n se pueden representar como una Resistencia en paralelo, R_{sh}



$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{aV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

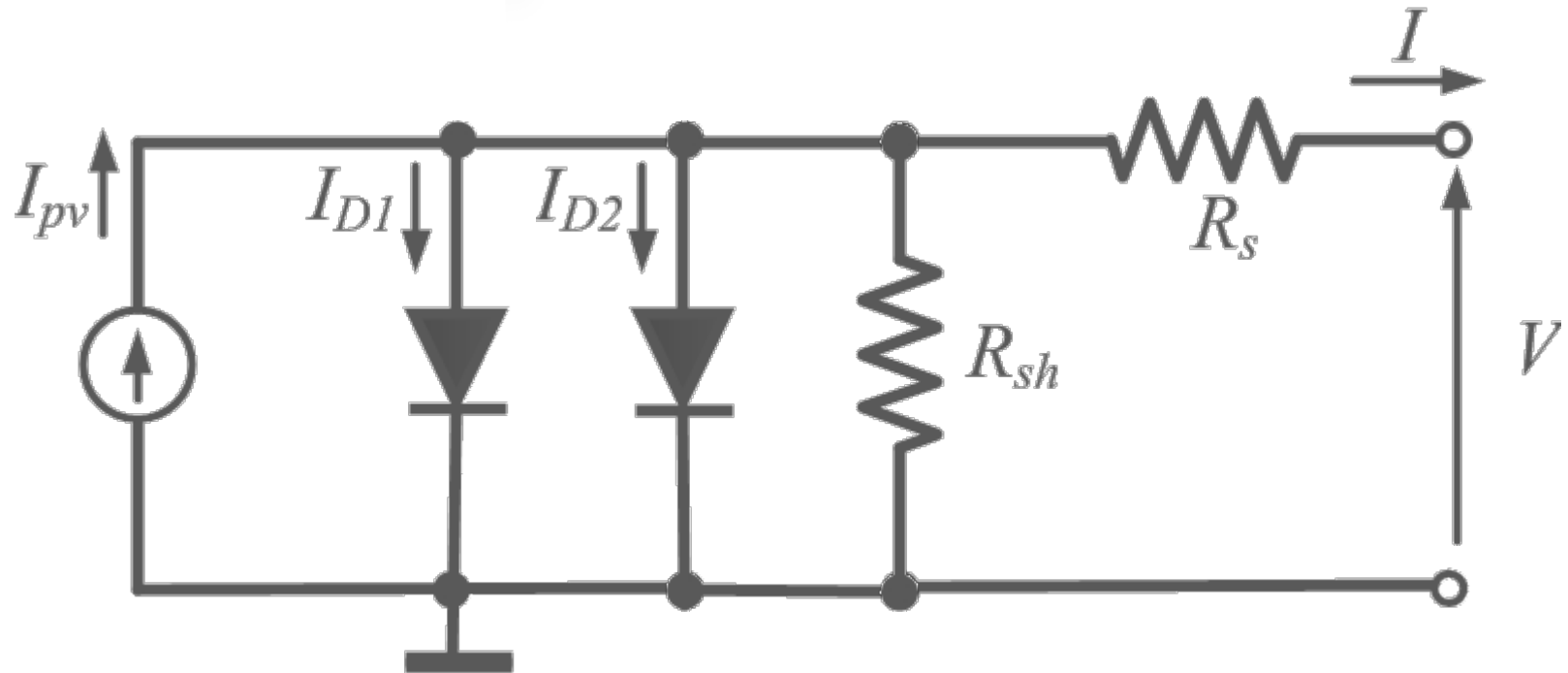
Circuito equivalente

El modelo más usado para paneles solares es el circuito equivalente

Dos Diodos

A veces se incluye un Segundo diodo que representa la recombinación de los electrones en la region de “depletion region”

$$I = I_{pv} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a_1 V_T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a_2 V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$



Modelo de célula solar

La tarea más compleja es el cálculo de los parámetros del circuito

$$I_{pv}, a, I_0, R_s, R_{sh}$$

Alternativas:

1 Cálculo Numérico

- Multiples puntos experimentales

- Ajuste numérico (puede requerir inicialización)

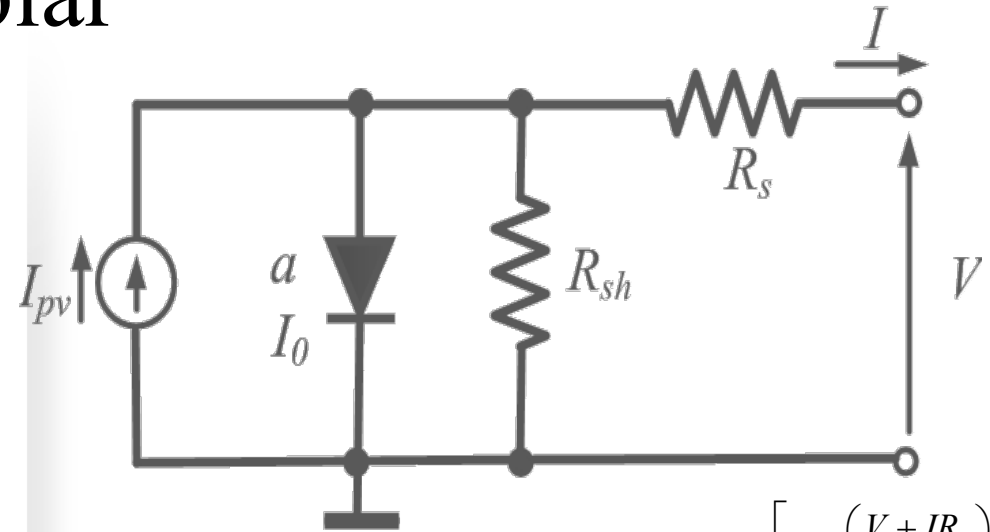
- Preciso pero complejo, multiples iteraciones

2 Cálculo Analítico

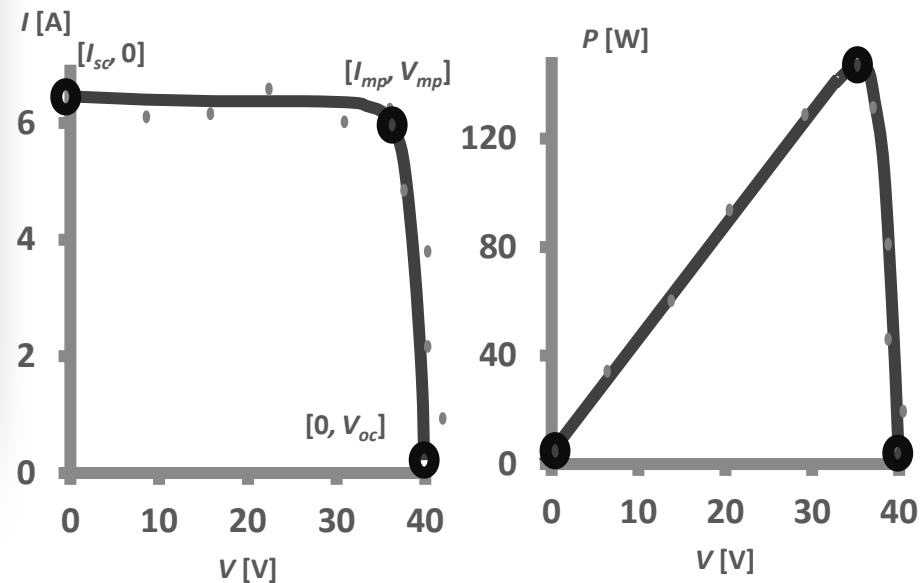
- Cálculo resolviendo sistema de ecuaciones

- Puntos característicos

- Simple pero poco preciso. Difícil de obtener ecuaciones explícitas.



$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$



Método numérico

Para una serie de mediciones experimentales encontramos la curva que mejor se ajuste.

Para definir “el mejor ajuste” hay que definir el error, y minimizarlo. Por ejemplo el RMSD raíz de la desviación cuadrática media:

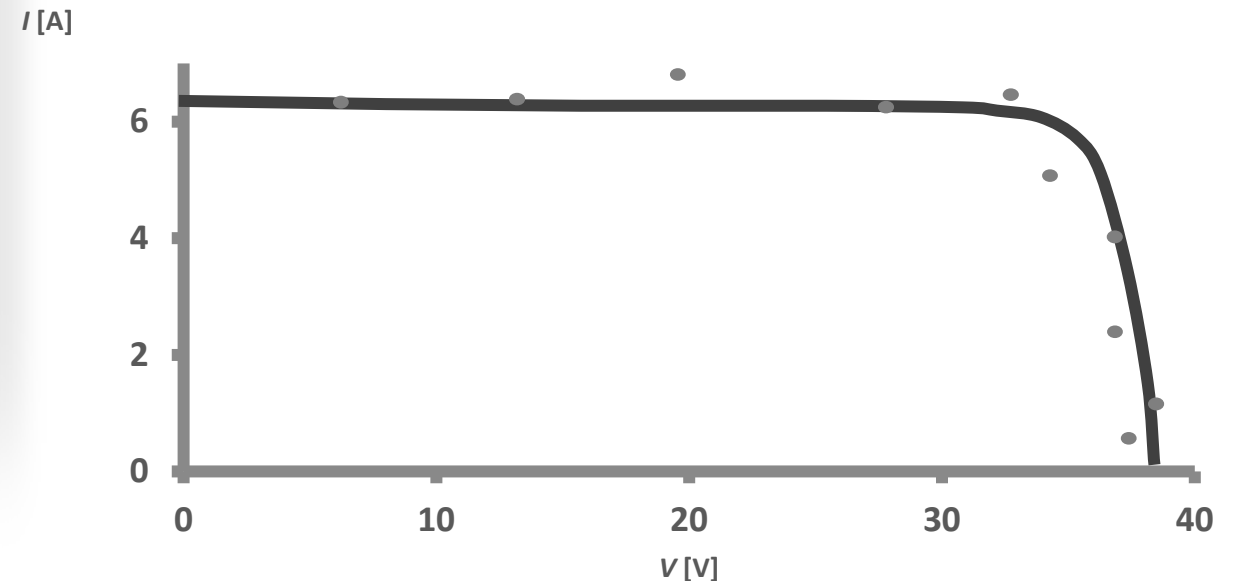
$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum (I_{\text{exp}_i} - I_{\text{mod}_i})^2}{n}}$$

Este es el método más sencillo, unos mínimos cuadrados. Pero hay muchos algoritmos de optimización.

Un ejemplo es la función `fminsearch` de Matlab (ver documento)

Calculadora Online

<http://pvmodel.umh.es/>



Método analítico

Cinco parámetros, al menos 5 ecuaciones, o completar con estimaciones.

$$I_{pv}, a, I_0, R_s, R_{sh}$$

Alternativas fáciles de obtener del fabricante:

Punto de cortocircuito $[I_{sc}, 0]$

Punto de circuito abierto $[0, V_{oc}]$

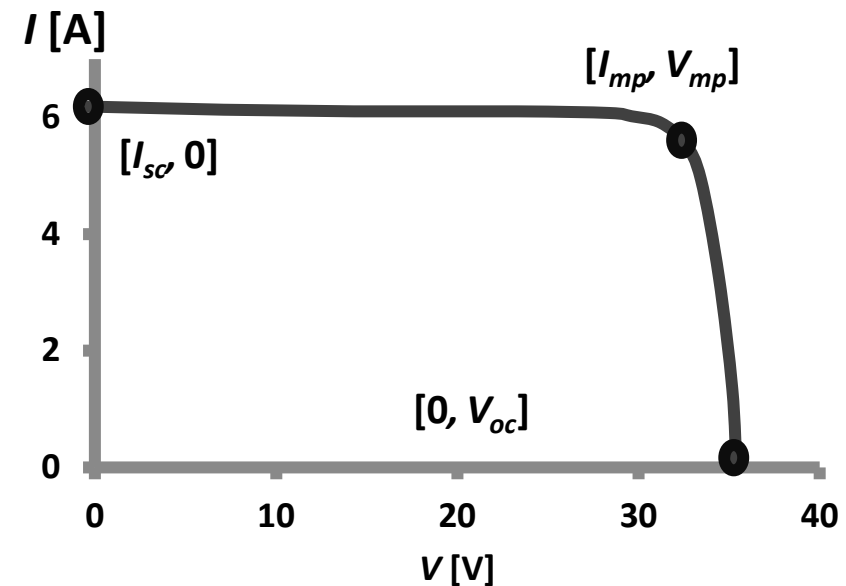
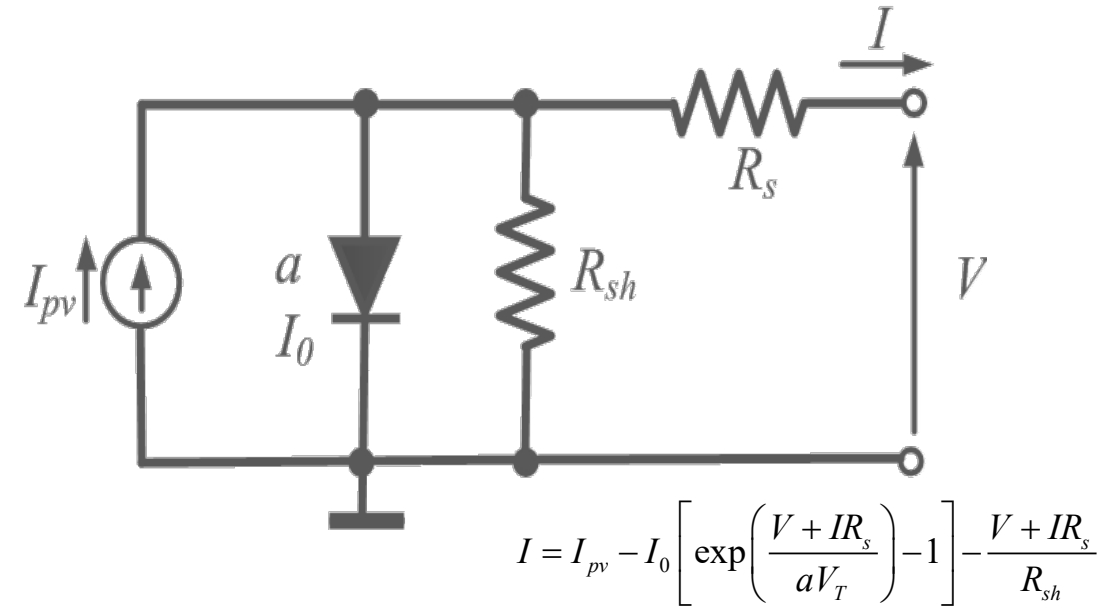
Punto de máxima potencia $[I_{mp}, V_{mp}]$

Derivada nula en máxima potencia $dP_{mp}/dV=0$

Otras condiciones de contorno comunes

Pendiente en cortocircuito $\partial I / \partial V|_{sc} = -1/R_{sh0}$

Pendiente en circuito abierto $\partial I / \partial V|_{oc} = -1/R_{s0}$



El parámetro del diodo a

Afecta a la curvatura de la curva I - V . Da una idea de lo ideal que es el diodo, siendo 1 el valor de un diodo ideal.

Normalmente su valor está acotado entre 1 y 2, por cada *célula en serie del panel*.

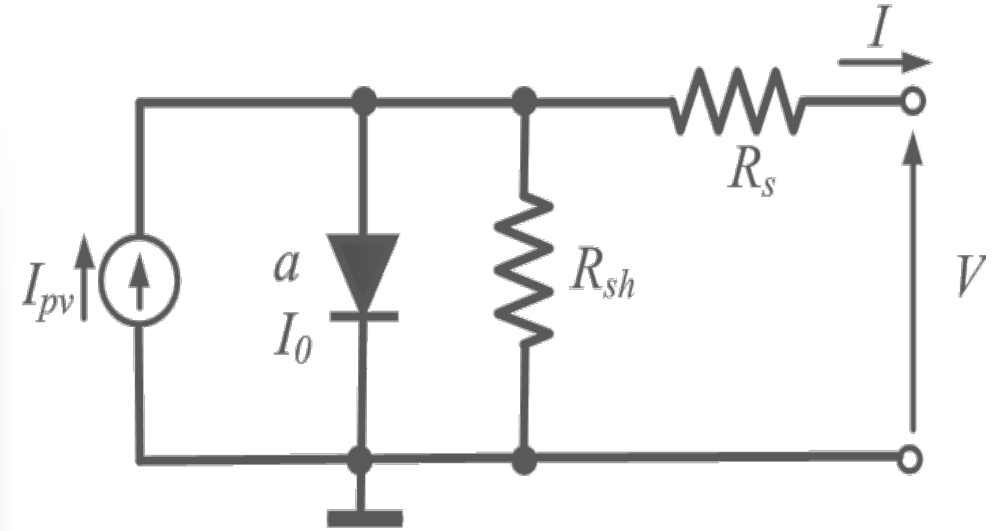
A veces se escribe la ecuación sacando el número de células n del parámetro a :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{anV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

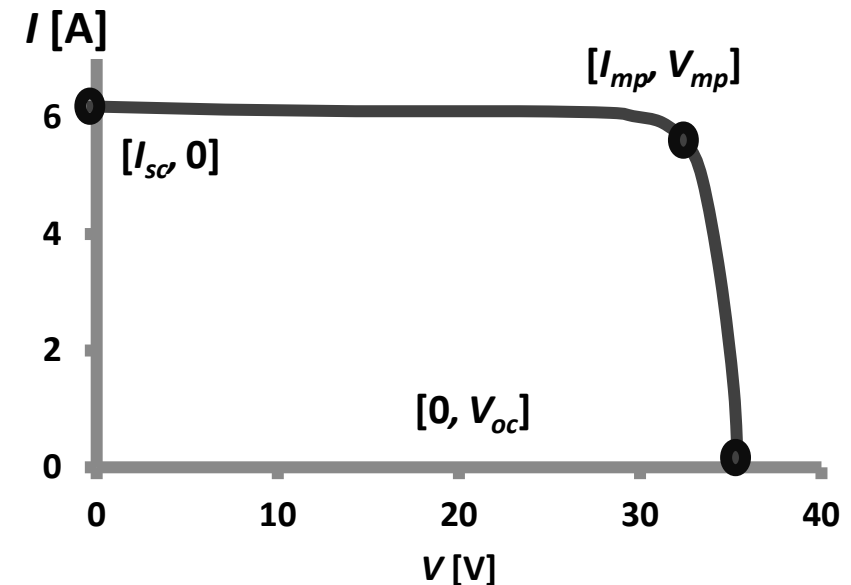
En ese caso a valdrá entre 1 y 2. Si no se saca n , entonces a puede valer entre n y $2n$. Para las tecnologías típicas Una aproximación válida es 1.2 ó 1.3.

Una célula triple-union se comporta como 3 en serie, desde el punto de vista del valor de a .

Cuidado, en la ecuación siempre va con V_T , a veces n se esconde dentro de la definición de V_T !!



$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$



Método de Cálculo

1 Short Circuit Equation [I_{sc} , 0]

$$I_{sc} = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{a V_T} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}}$$

2 Open Circuit Equation [0, V_{oc}]

$$0 = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{a V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

3 Maximum Power Point [I_{mp} , V_{mp}]

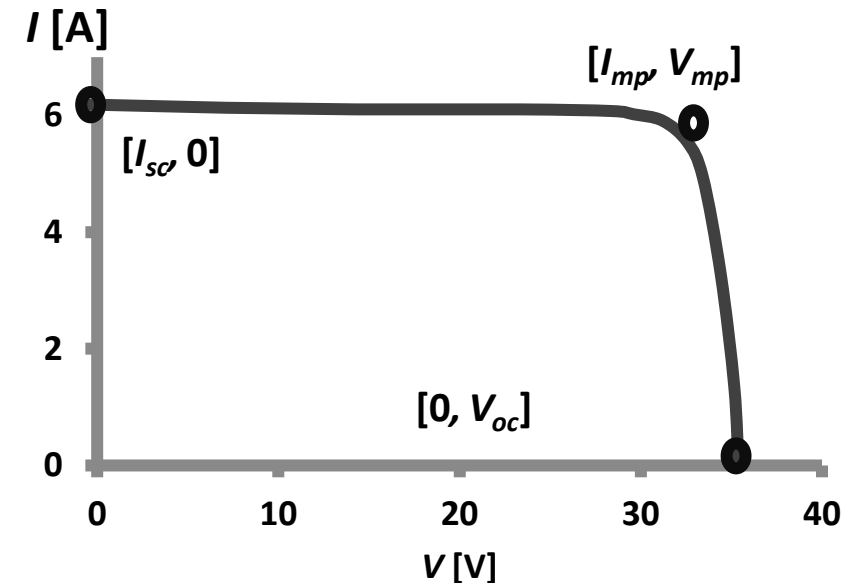
$$I_{mp} = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_{sh}}$$

4 Zero derivative $dP_{mp}/dV=0$

$$-\frac{I_{mp}}{V_{mp}} = -\frac{I_0}{a V_T} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right) \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a V_T} \right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right)$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{a V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}}$$

$$\left(\frac{\partial I}{\partial V} \right) \bigg|_{[I_{mp}, V_{mp}]} = -\frac{I_{mp}}{V_{mp}}$$



Variaciones ambientales

La dependencia de los puntos característicos con la temperature suele ser lineal:

$$V_{oc} = V_{ocref} + \alpha_{oc} (T - T_{ref})$$

$$I_{sc} = I_{scref} + \beta_{sc} (T - T_{ref})$$

$$V_{mp} = V_{mpref} + \alpha_{mp} (T - T_{ref})$$

$$I_{mp} = I_{mpref} + \beta_{mp} (T - T_{ref})$$

A veces no dan todos, podemos asumir que:

$$\alpha_{oc} \approx \alpha_{mp}$$

$$\beta_{sc} \approx \beta_{mp}$$

A veces lo dan porcentual

$$V_{oc} = \left(1 + \frac{\alpha_{oc}}{100} (T - T_{ref}) \right) V_{ocref}$$

$$I_{sc} = \left(1 + \frac{\beta_{sc}}{100} (T - T_{ref}) \right) I_{scref}$$

$$V_{mp} = \left(1 + \frac{\alpha_{mp}}{100} (T - T_{ref}) \right) V_{mpref}$$

$$I_{mp} = \left(1 + \frac{\beta_{mp}}{100} (T - T_{ref}) \right) I_{mpref}$$

A veces dan en potencia

$$P_{mp} = \left(1 + \frac{\gamma_{mp}}{100} (T - T_{ref}) \right) P_{mpref}$$

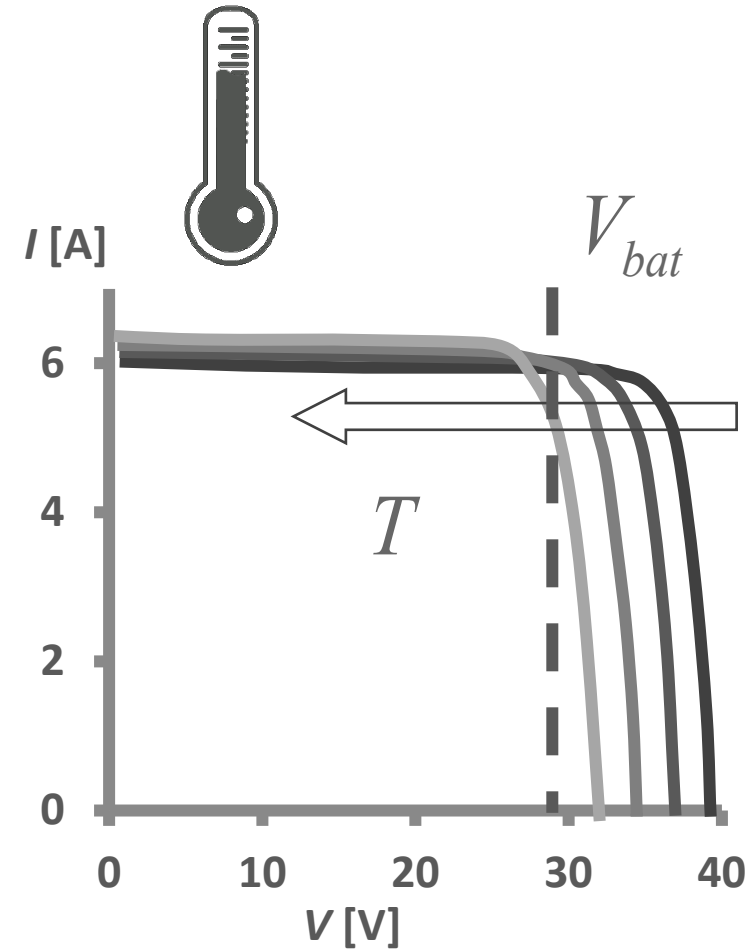
Variaciones ambientales

Dependencia de la temperatura

La dependencia con la temperatura puede introducirse recalculando el modelo a nuevas temperaturas.

Ver:

New Method for Analytical Photovoltaic
Parameters Identification: Meeting Manufacturer's
Datasheet for Different Ambient Conditions



Variaciones ambientales

Dependencia de la irradiancia.

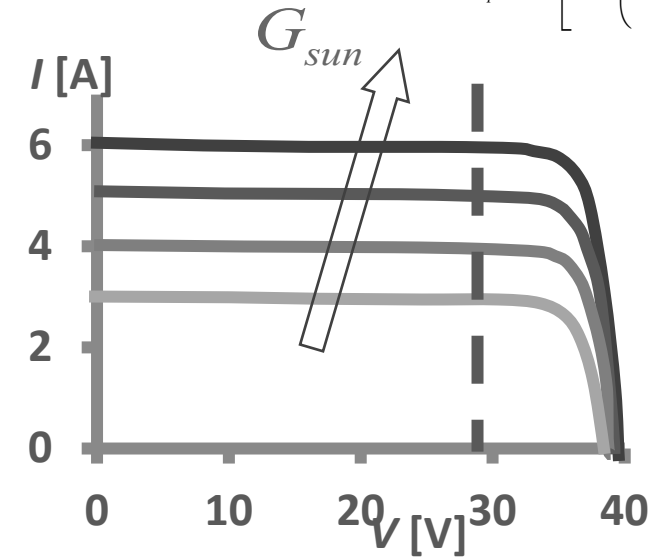
Se considera que la intensidad es proporcional a la irradiancia. Por ese motivo, en primera aproximación, para el circuito equivalente bastaría con ajustar la intensidad de la fuente:

$$I_{pv} = I_{pvref} \frac{G}{G_{ref}}$$

Una alternativa más precisa sería recalcular todo el circuito, teniendo en cuenta que las intensidades variarían linealmente y los voltajes exponencialmente con la irradiancia, como:

$$V_{oc} = V_{ocref} + aV_t \ln \frac{G}{G_{ref}}$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$



Variaciones ambientales

$$I_{sc} = \frac{G}{G_0} [I_{sc0} + \alpha_{I_{sc}} (T - T_0)],$$

$$I_{mp} = \frac{G}{G_0} [I_{mp0} + \alpha_{I_{mp}} (T - T_0)],$$

$$V_{oc} = V_{oc0} + aV_t \ln \frac{G}{G_0} + \alpha_{V_{oc}} (T - T_0),$$

$$V_{mp} = V_{mp0} + aV_t \ln \frac{G}{G_0} + \alpha_{V_{mp}} (T - T_0),$$

Formulación explícita:

En ocasiones puede ser necesario expresar una ecuación implícita, de manera explícita. En el caso de la función del circuito equivalente puede hacerse gracias a la función de Lambert.

La función del circuito equivalente es:

$$z = W(z) \exp(W(z)) \quad X = Ye^Y \Leftrightarrow Y = W(X)$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{aV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Utilizando la función de Lambert, puede expresarse como:

$$I = \frac{R_{sh}(I_{pv} + I_0) - V}{R_s + R_{sh}} - \frac{aV_T}{R_s} W_0 \left(\frac{R_s R_{sh} I_0}{aV_T (R_s + R_{sh})} \exp \left(\frac{R_{sh}(R_s I_{pv} + R_s I_0 + V)}{aV_T (R_s + R_{sh})} \right) \right)$$

D.A. Barry et al. / Mathematics and Computers in Simulation 53 (2000) 95–103

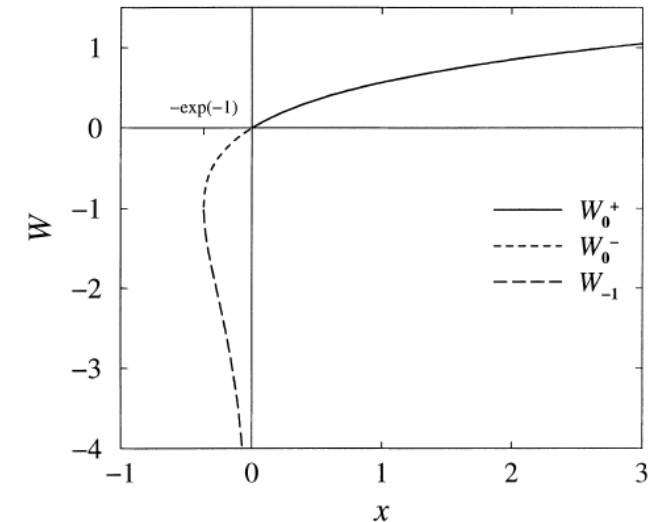


Fig. 1. Branches of the W -function, showing the division into W_{-1} , W_0^- and W_0^+ .

Formulación explícita:

La función de Lambert puede aproximarse por:

$$W_0^-(x) = -1 + \frac{\sqrt{\varphi}}{1 + \left((N_1 \sqrt{\varphi}) / (N_2 + \sqrt{\varphi}) \right)}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= 2(1 + ex) \\ N_1 &= \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) (N_2 + \sqrt{2}) \\ N_2 &= 3\sqrt{2} + 6 - \frac{(2237 + 1457\sqrt{2})e - 4108\sqrt{2} - 5764}{(215 + 199\sqrt{2})e - 430\sqrt{2} - 796} \varphi \end{aligned}$$

$$W_0^+(x) = 1.4586887 \ln \left(\frac{1.2x}{\ln(2.4x / \ln(1 + 2.4x))} \right) - 0.4586887 \ln \left(\frac{2x}{\ln(1 + 2x)} \right)$$

$$W_{-1}(x) = -1 - \sigma - 5.95061 \left(1 - \frac{1}{1 + f(\sigma)} \right)$$

$$\begin{aligned} f(\sigma) &= \frac{0.23766\sqrt{\sigma}}{1 - 0.0042\sigma \exp(-0.0201\sqrt{\sigma})} \\ \sigma &= -1 - \ln(-x) \end{aligned}$$

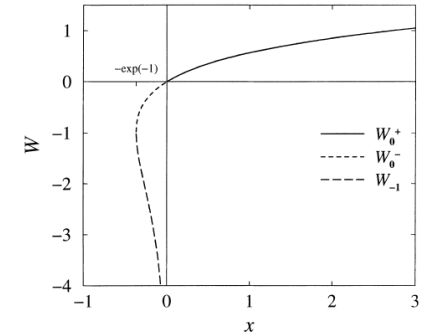


Fig. 1. Branches of the W -function, showing the division into W_{-1} , W_0^- and W_0^+ .