



# TALLERINE: ENERGÍAS RENOVABLES

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### Parte II: Curvas de circuitos

AUTORES:

CARLOS BRIOZZO  
AGUSTÍN CASTELLANO

Versión 0.1

## Índice

<b>1. Curvas de circuitos</b>	<b>3</b>
1.1. Fuente de voltaje . . . . .	3
1.1.1. Fuente ideal . . . . .	3
1.1.2. Fuente real . . . . .	3
1.2. Fuente de corriente . . . . .	4
1.2.1. Fuente ideal . . . . .	4
1.2.2. Fuente real . . . . .	5
1.3. Resistencia . . . . .	5
1.4. Potencia en fuente de corriente . . . . .	6
1.4.1. Puntos de funcionamiento por intersección gráfica . . . . .	8
<b>2. El panel</b>	<b>10</b>
2.1. Irradiancia . . . . .	10
2.2. Curva característica . . . . .	10
2.2.1. Punto de operación de máxima potencia . . . . .	11
2.2.2. Operación del panel con carga resistiva . . . . .	11
2.2.3. Determinación del punto de máxima potencia . . . . .	13

NOTA: El presente trabajo se encuentra en versión borrador. Puede contener errores, cosas mal escritas o incompletas. Tome todo lo que lee acá (y en otros lados) con pinzas.

Por errores o sugerencias: [acastellano@fing.edu.uy](mailto:acastellano@fing.edu.uy)    [cbriozzo@fing.edu.uy](mailto:cbriozzo@fing.edu.uy)

## 1. Curvas de circuitos

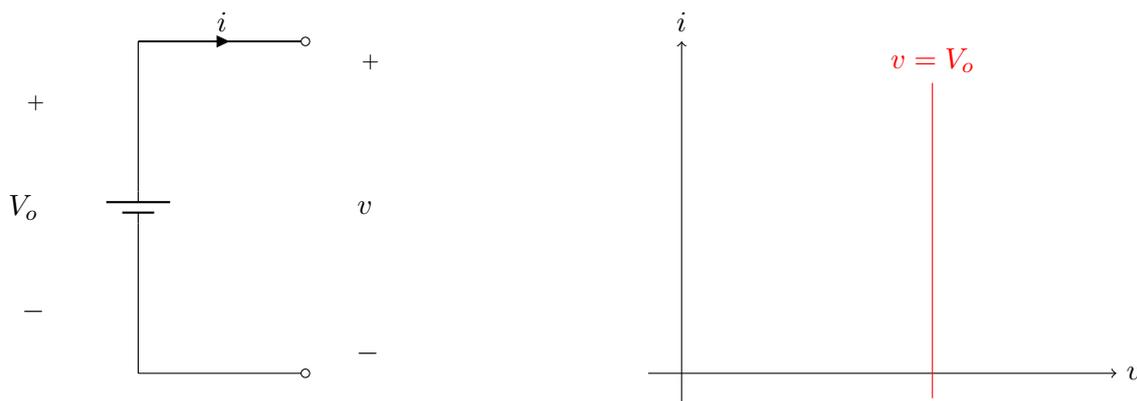
En esta sección se estudian (y repasan) las características de fuentes de tensión y corriente (ideales y reales), de resistencias y del panel solar. Junto a cada componente se muestra la curva característica corriente-voltaje. Finalmente, usando estas curvas, se introduce un método gráfico para ver el “punto de funcionamiento” de un circuito determinado al conectarlo a una carga arbitraria.

### 1.1. Fuente de voltaje

Como se vio anteriormente, una fuente de voltaje es un dispositivo que, idealmente, mantiene constante la diferencia de potencial entre sus bornes.

Sin embargo, en la práctica el voltaje de una fuente puede variar dependiendo a lo que se la conecte.

#### 1.1.1. Fuente ideal

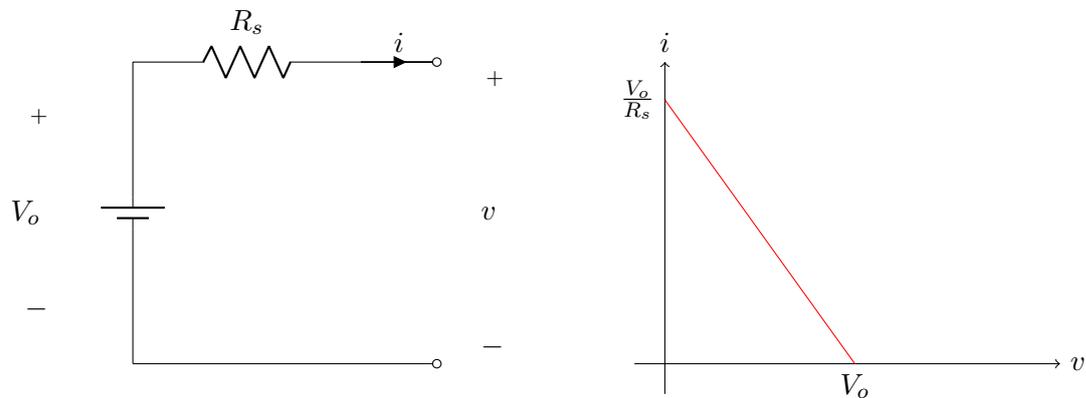


En la gráfica se evidencia que el voltaje entre los bornes de la fuente es constante, sin importar la corriente entregada por la fuente.

**Pregunta:** Estudiando la gráfica, ¿qué sucedería si se conecta un cable entre los dos bornes de la fuente?

#### 1.1.2. Fuente real

Una fuente de voltaje real se modela como la serie de una fuente ideal y una resistencia ( $R_s$  en la figura). En la práctica, la resistencia es bastante pequeña. Cuánto “más ideal” sea la fuente, más chica será  $R_s$ .



Observar que la curva tiende a “verticalizarse” cuánto más ideal sea la fuente (por qué?), pareciéndose a la gráfica anterior.

**Pregunta:** Estudiando la gráfica, ¿qué sucedería si se conecta un cable entre los dos bornes de la fuente?

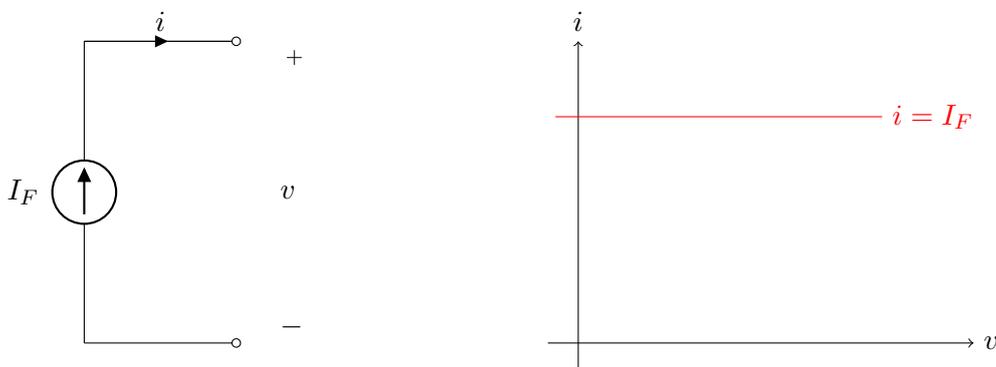
La corriente para la que se cumple  $v = 0$  se denomina corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ). En el ejemplo:

$$I_{cc} = \frac{V_o}{R_s}$$

## 1.2. Fuente de corriente

Similarmente, una fuente de corriente entrega, en principio, una corriente constante al circuito.

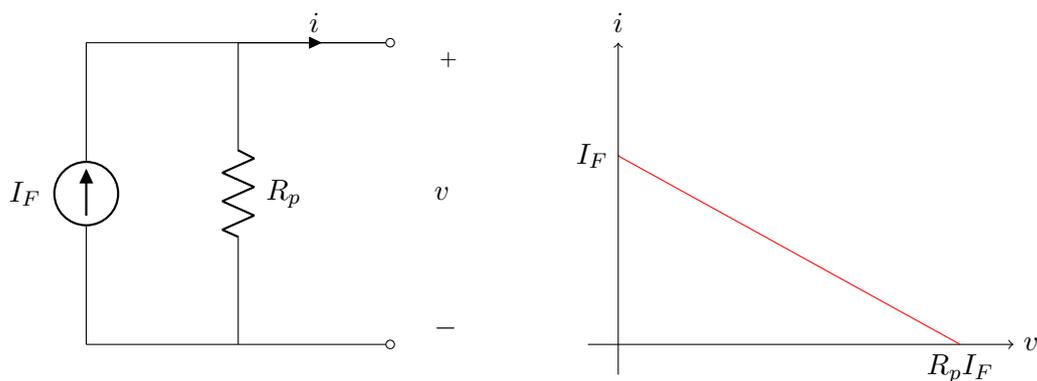
### 1.2.1. Fuente ideal



**Pregunta:** ¿Por dónde fluye la corriente en una fuente ideal si no se conecta nada entre sus bornes?

### 1.2.2. Fuente real

Una fuente de corriente real se modela como el paralelo de una fuente de corriente ideal con una resistencia ( $R_p$  en el diagrama).  $R_p$  es una resistencia grande. Notar que, cuánto más grande sea  $R_p$ , más parecida será la fuente a una ideal.



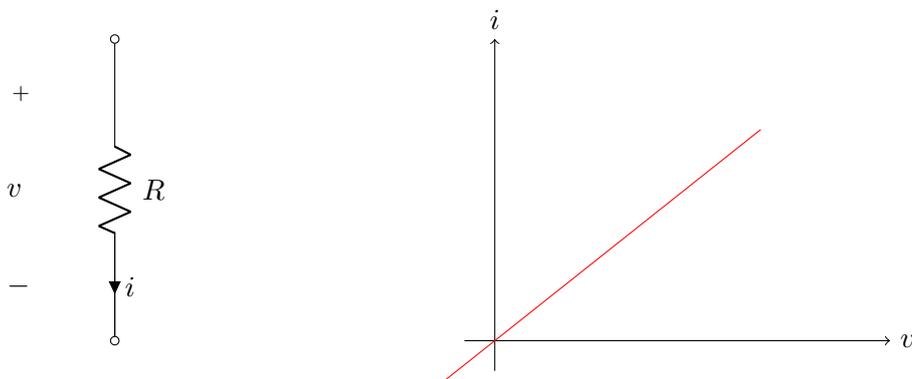
**Pregunta:** ¿Por dónde fluye la corriente en una fuente real si no se conecta nada entre sus bornes?

El voltaje para el cual la corriente “de salida”  $i$  es nula se llama voltaje de circuito abierto ( $v_{ca}$ ). En el ejemplo:

$$v_{ca} = R_p I_F$$

### 1.3. Resistencia

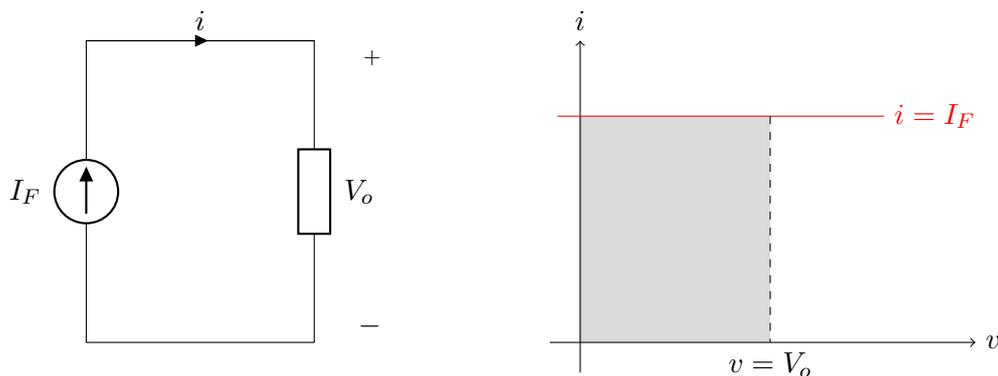
En la sección anterior se vio que las resistencias tienen la particularidad de cumplir la Ley de Ohm



**Pregunta:** ¿Cuánto vale la pendiente de la curva del diagrama?

#### 1.4. Potencia en fuente de corriente

Considerar el siguiente ejemplo, donde se tiene una fuente de corriente ideal  $I_F$  que “alimenta” a cierto componente, de forma tal que la diferencia de potencial entre sus bornes es  $V_o$ .



La potencia entregada por la fuente (o, lo que es lo mismo, consumida por el componente) vale:

$$P = vi = V_o I_F$$

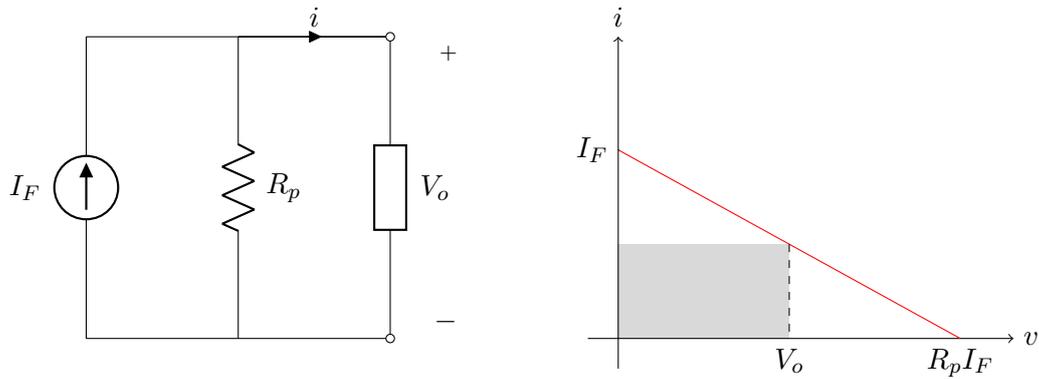
En términos gráficos, esta potencia es equivalente al área debajo del rectángulo de la figura.

En una fuente de corriente ideal, la potencia que se le puede extraer es, en principio, infinita:

$$P_{max} = \infty$$

**Pregunta:** ¿Por qué?

Este último resultado no es trasladable a fuentes de corriente reales. En una fuente real, la potencia máxima extraíble vendrá dada gráficamente por el rectángulo de mayor área que tenga uno de sus vértices en la curva característica de la fuente.



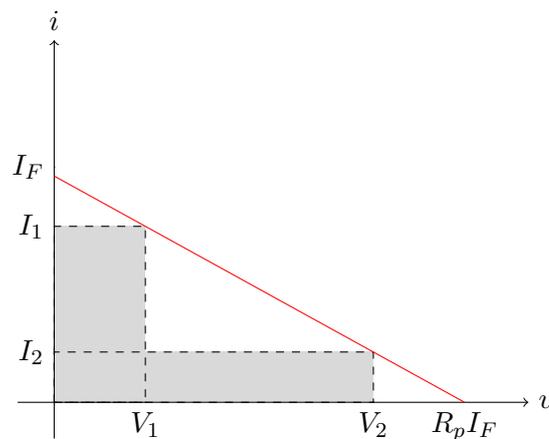
Puede demostrarse que el punto de operación de máxima potencia ( $P_{max}$ ) es:

$$(v, i) |_{P_{max}} = \left( \frac{R_p I_F}{2}, \frac{I_F}{2} \right)$$

Este punto, además, es único.

**Ejercicio:** Demostrar la existencia y unicidad del punto de máxima potencia de dos formas: geométrica y analítica.

¿Qué sucede, en cambio, si se desea extraer del circuito una potencia  $P < P_{max}$ ?



Observar cómo para cualquier potencia  $P_o < P_{max}$  existen dos parejas de puntos  $(V_1, I_1)$ ,  $(V_2, I_2)$  que verifican

$$P_o = V_1 I_1 = V_2 I_2$$

Esto equivale, en términos gráficos, a decir que los dos rectángulos de la gráfica tienen igual área.

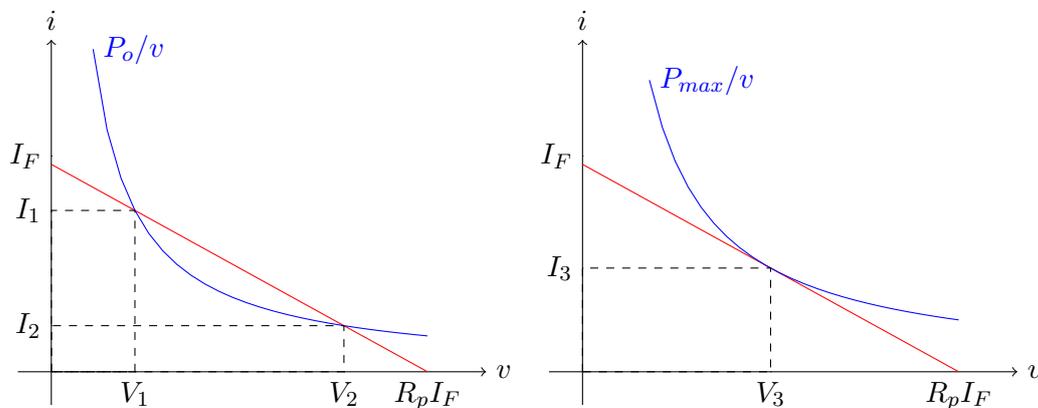
#### 1.4.1. Puntos de funcionamiento por intersección gráfica

Existen entonces dos puntos de funcionamiento de la fuente de corriente real para cualquier potencia  $P_o < P_{max}$ . Un punto con voltaje grande y corriente chica, el otro con voltaje chico y corriente grande.

Cualquier pareja de puntos voltaje-corriente para la cual se tiene una potencia  $P_o$  verifica la igualdad:

$$P_o = vi \implies i(v) = \frac{P_o}{v}$$

En otras palabras, el lugar geométrico de los puntos voltaje-corriente para los cuales se tiene una potencia  $P_o$  es una hipérbola. Si además se quiere que esa potencia sea entregada por una fuente de corriente real conocida, basta con intersectar las dos curvas para obtener los puntos de funcionamiento deseados:



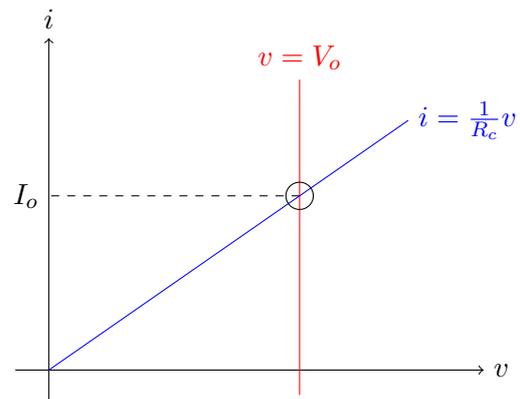
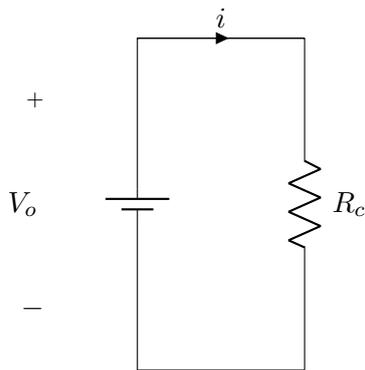
Observar que en el caso particular en que se quiere una potencia  $P = P_{max}$  la curva de la fuente es tangente a la curva de potencia en  $(V_3, I_3)$

#### Ejercicio:

- ¿Cómo se vinculan en la gráfica de la derecha  $P_{max}$ ,  $R_p$  e  $I_F$ ?
- Demostrar que la curva de la fuente es tangente a la hipérbola en el punto  $(V_3, I_3)$

**Otro ejemplo**

El método visto recién es útil para “resolver un circuito”. Considerar el siguiente ejemplo, donde se tiene una fuente de voltaje ideal conectada a una resistencia de valor conocido. Se desea encontrar, por este método gráfico, la corriente que circula por el circuito.



Una vez más, el punto de funcionamiento del circuito se obtiene intersectando las dos curvas. Se concluye que la corriente que circula por el circuito es  $i = I_o$ .

## 2. El panel

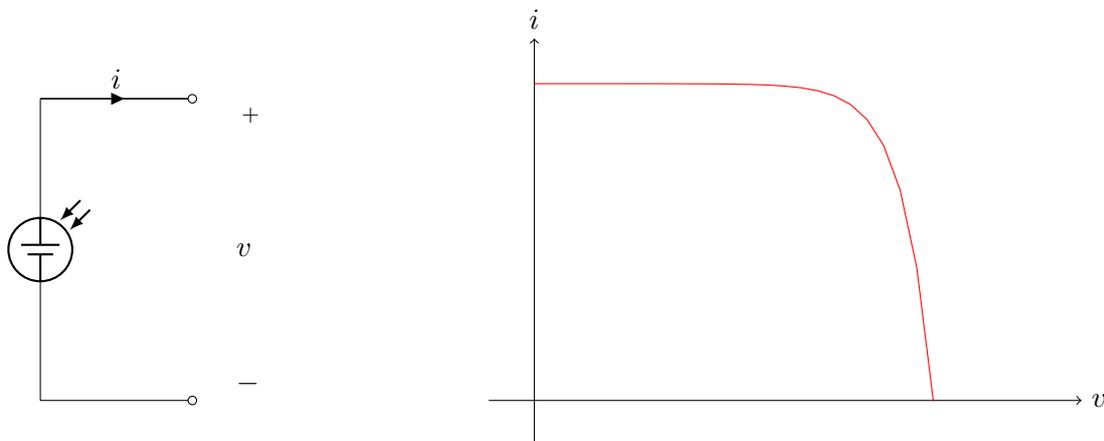
### 2.1. Irradiancia

Cualitativamente, la irradiancia es una medida de cuánta luz llega al panel. Es intuitivo pensar que, cuánto más iluminado esté el panel, más potencia se puede extraer del mismo.

La irradiancia se mide en  $W/m^2$ , o sea que tiene unidades de Potencia/Superficie.

De aquí en más se asumirá la hipótesis de que la luz que llega al panel lo hace de manera uniforme (cada fotocelda “iluminada” con la misma intensidad). Durante el curso se verá que pasa cuándo esta hipótesis no se cumple.

### 2.2. Curva característica



LA curva característica del panel es única. Se releva en “condiciones de laboratorio”, fijando convenientemente varios parámetros. Para los paneles a usar durante el curso, por ejemplo, el fabricante presenta una curva para:

- Irradiancia  $I_{rr} = 1000W/m^2$
- Temperatura  $T_o = 25^{\circ}C$
- Cierta distribución espectral de luz solar según estándar *AM 1.5*

El vínculo entre corriente y voltaje del panel es altamente sensible a estos (y otros) parámetros. Por ejemplo, aumentar en un 50% la irradiancia provoca un corrimiento considerable de la curva.

**Pregunta:** ¿Hacia dónde?

Sin importar las condiciones en las que se releve, la curva característica del panel tiene una forma parecida a la de la gráfica. En ella, se distinguen principalmente tres zonas:

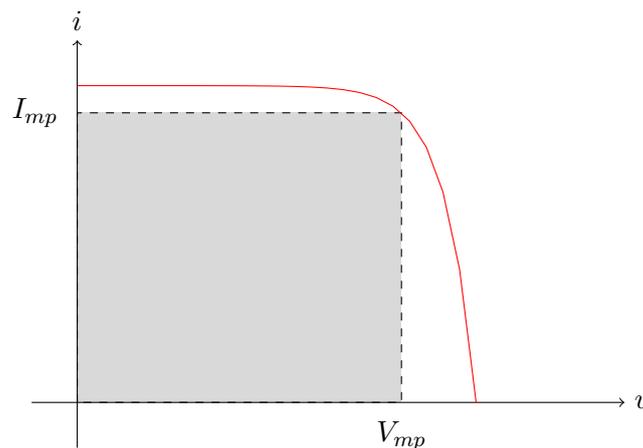
- Fuente de corriente: para voltajes chicos, el panel se comporta como una fuente de corriente.
- Fuente de tensión: para corrientes chicas, el panel se comporta como una fuente de voltaje.
- Zona de transición: entre medio de las dos zonas anteriores

Observar, viendo la gráfica, que el panel “es mejor” fuente de corriente que de voltaje.

### 2.2.1. Punto de operación de máxima potencia

Como se vino haciendo hasta este momento, interesa encontrar, para un panel en particular y con un nivel de irradiancia particular, el punto de operación de máxima potencia ( $P_{max}$ ). Si uno logra situarse en ese punto, estará “aprovechando al máximo” la conversión de energía.

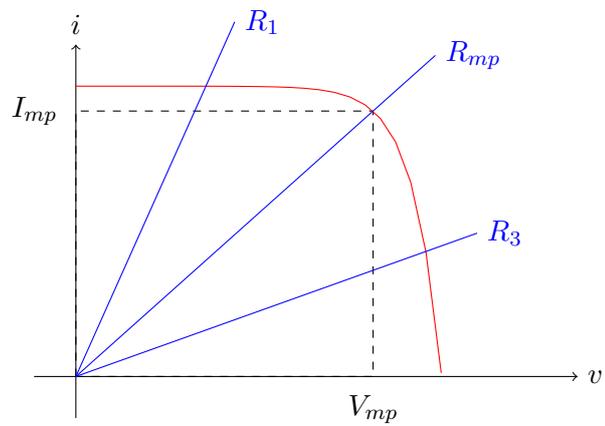
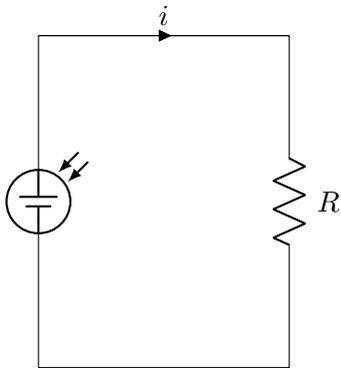
Si interesa extraer del panel una potencia  $P < P_{max}$ , observar que siempre existen dos puntos de funcionamiento: uno de voltaje chica y corriente grande, otro de voltaje grande y corriente chica. Para visualizar estos dos puntos, pensar en la intersección de la curva del panel con una hipérbola, como se vio en la sección (1.4.1)



El punto de máxima potencia ( $P_{max}$ ) está dado por las coordenadas  $(v, i) = (V_{mp}, I_{mp})$ . Viendo la gráfica resulta evidente que pertenece a la zona de transición

### 2.2.2. Operación del panel con carga resistiva

¿Qué potencia entrega el panel al conectarlo a una resistencia de valor conocido?



Al conectar resistencias de distinto valor se obtienen puntos de funcionamiento dados por la intersección de la curva del panel con la recta de cada resistencia. En el caso particular en que se coloque una resistencia de valor

$$R_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}}$$

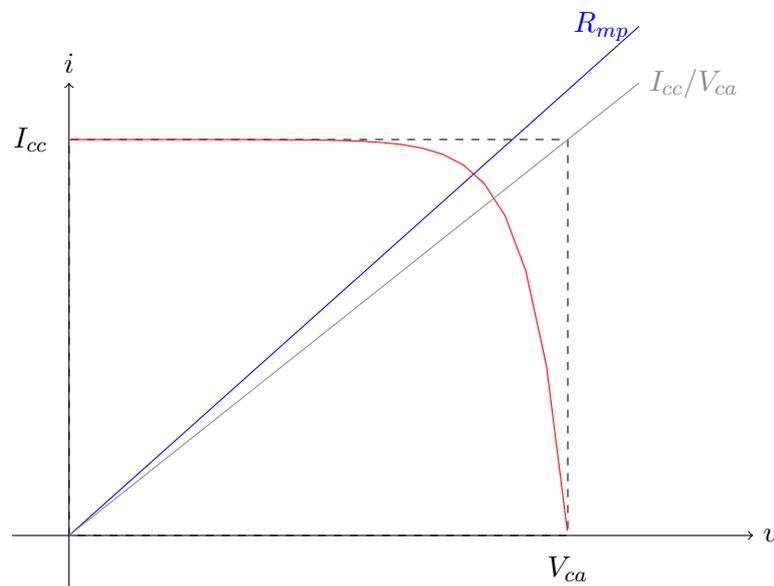
el panel estará funcionando en su punto de máxima potencia.

**Pregunta:** ¿Cómo se relacionan entre sí  $R_1$ ,  $R_{mp}$  y  $R_3$ ?

### 2.2.3. Determinación del punto de máxima potencia

A continuación se verá un método aproximado para determinar el punto de máxima potencia, sin conocer explícitamente la curva del panel. Para ello se aprovecha el hecho de que el panel se comporta como una fuente (sea de voltaje o corriente) cerca de sus límites de funcionamiento. Los únicos dos parámetros necesarios son las magnitudes de estas fuentes.

- Corriente de cortocircuito: ( $I_{cc}$ ) Es la magnitud de la fuente de corriente para voltaje nulo.
- Voltaje de circuito abierto: ( $V_{ca}$ ): Es la magnitud de la fuente de voltaje para corriente cero.



Como se ve en la gráfica, la resistencia  $R_{mp}$  y la resistencia  $V_{ca}/I_{cc}$  son bastante parecidas. Cuánto más ideal sea el panel, mayor similares serán.

El método esencialmente consiste en aproximar:

$$\frac{V_{ca}}{I_{cc}} \simeq R_{mp}$$

Una vez obtenido este valor, se interseca la curva de  $R_{mp}$  con los datos relevados del panel, obteniéndose una buena aproximación del punto de máxima potencia.