

## Información suplementaria 2

### 2.3 Modelos de desempeño.

#### 2.3.1 Modelo de desempeño eléctrico.

Las celdas solares, componentes primarios de los paneles fotovoltaicos, fundamentales en la conversión de radiación solar a electricidad, se pueden modelar matemáticamente para tener una idea de su comportamiento eléctrico. Dado que son uniones de materiales semiconductores cumplen propiedades eléctricas similares a un diodo, con elementos característicos del mismo, tales como resistencia de juntura, corriente de diodo, fotocorriente, etc. Tal como se observa en la Figura 2S (Kalogirou, S, 2009).

**Figura 2S.** Equivalente eléctrico de una celda solar.

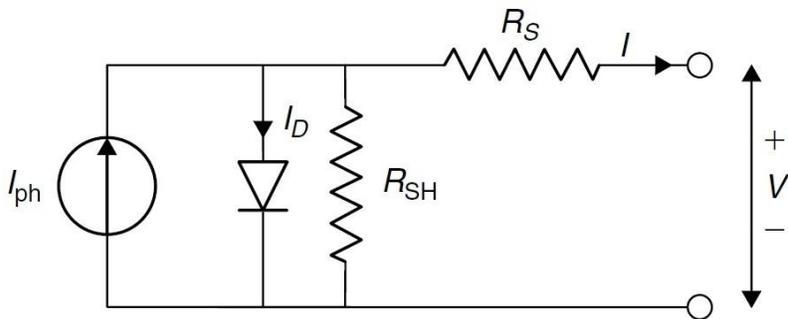


Figura 2S. Circuito Equivalente celda solar

En este modelo matemático se presentan varios elementos; entre los cuales podemos citar, una *Foto corriente*  $I_{ph}$ , corriente que fluye en un panel fotovoltaico que depende directamente de la radiación solar incidente y la temperatura del panel o la celda  $T_C$ , una corriente  $I_D$ , denominada corriente de diodo o corriente

oscura, que fluye cuando no existe radiación incidente en el panel. Una resistencia en serie,  $R_s$ , característica en cada celda y la resistencia de unión o juntura,  $R_{sh}$ , resistencia de unión entre las capas  $p$  y  $n$  de un diodo, donde  $k$  es la constante de Boltzman y  $e$  es la carga del electrón (Cibira G, et all. 2014; Salmi T, et all. 2012). La corriente total  $I$  se modela matemáticamente como lo muestra la Ecuación (1S). La diferencia entre la fotocorriente,  $I_{ph}$ , y la corriente oscura  $I_D$ , buscando expresar esta corriente en términos característicos del panel, tales como resistencia de juntura, voltaje de operación y fotocorriente (Cibira G, et all. 2014).

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{e(V+IR_s)}{kT_c} \right] - 1 \right\} - \frac{(V+IR_s)}{R_{SH}} \quad (1S)$$

La fotocorriente  $I_{ph}$  depende directamente de la radiación solar incidente a condiciones estándar (STC),  $1000 \text{ W/m}^2$ , la radiación incidente  $G$ , la temperatura ambiente  $T_{ref}$  y del coeficiente de corriente de corto circuito típico de cada celda,  $K_i$ , además de la fotocorriente de la celda a condiciones nominales (NOCT); se modela matemáticamente como lo muestra la Ecuación (2S):

$$I_{ph} = \left( I_{scr} + K_i * (T_c - T_{ref}) \right) * \frac{G}{1000} \quad (2S)$$

Para modelar matemáticamente la corriente de saturación del diodo  $I_{scr}$  representada en la Ecuación (3S), con propiedades análogas al mismo, donde  $q$  es la carga del electrón, y  $E_g$  banda de energía estándar del material (Cibira G, et all. 2014).

$$I_{scr} = I_{rr} * \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 * e^{\left( \frac{q * E_g}{k * A} * \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right)} \quad (3S)$$

Debido a que un panel fotovoltaico es un diodo de una gran área  $A$ , con  $N_s$  celdas en serie y  $N_p$  celdas en paralelo, la corriente total está dada por la diferencia entre estas dos corrientes, como lo muestra la Ecuación (4S):

$$I = N_p * \left( I_{ph} - I_{rr} * \left( e^{\left( \frac{q*V}{N_s*k*T_c*A} \right)} - 1 \right) \right) \quad (4S)$$

La potencia total producida por un panel fotovoltaico está dada entonces por la Ecuación (5S):

$$P = VI \quad (5S)$$

Para operar la celda solar en condiciones de funcionamiento nominales (NOCT), se asumen valores de condiciones medioambientales como los mostrados en la Tabla 1S (Labouret, et all. 2009).

**Tabla 1S.** Variables medioambientales para condiciones estándar y condiciones nominales.

<b>Variable</b>	<b>Condiciones nominales (NOCT)</b>	<b>Condiciones estándar (STC)</b>
Temperatura ambiente	20°C	25°C
Radiación solar	800 W/m <sup>2</sup>	1000 W/m <sup>2</sup>
Velocidad del viento	1 m/s	0 m/s

Las condiciones estándar son usadas por el fabricante de paneles fotovoltaicos

para brindar información en las hojas técnicas, acerca de la corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto. Las condiciones nominales se acercan más a la realidad y ayudan a obtener una respuesta más ajustada a parámetros medioambientales del sistema en una eventual implementación (Labouret, et all. 2009). Teniendo en cuenta lo anterior y usando las Ecuaciones (4S) y (5S) se llega al modelo utilizado para simular el comportamiento del panel fotovoltaico, en términos de potencia teniendo en cuenta variables medioambientales, este modelo es mostrado en la Ecuación (6S). Donde  $V$ , es el voltaje producido por el panel fotovoltaico y es la denominada *variable independiente* del sistema (Labouret, et all. 2009).

$$P = V \left[ N_p * \left( I_{ph} - I_{rr} * \left( e^{\left( \frac{q*V}{N_s*k*T_c*A} \right)} - 1 \right) \right) \right] \quad (6S)$$

### 2.3.2 Modelo de desempeño Duffie & Beckman.

Este modelo de desempeño desarrollado por los profesores, John Duffie y William Beckman, del laboratorio de Energía Solar, de la Universidad de Wisconsin, dado en la Ecuación (7S), presenta la relación entre radiación solar, temperatura de la celda fotovoltaica, velocidad del viento y datos técnicos de desempeño dispuestos por el fabricante de paneles fotovoltaicos.

$$\frac{T_c - T_a}{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}} = \frac{G_T}{G_{T,NOCT}} * \frac{9.5}{(5.7 + 3.8V)} \left( 1 - \frac{n_c}{0.9} \right) \quad (7S)$$

Donde,  $T_a$  : temperatura ambiente,  $G_T$  : radiación solar incidente,  $V$ : velocidad del viento en el lugar donde el panel se encuentra instalado,  $n_c$  : eficiencia en el punto de potencia máxima,  $T_{NOCT}$ : Temperatura del módulo fotovoltaico en las condiciones NOCT (valor proporcionado por el fabricante),  $T_{a,NOCT}$  : Temperatura ambiente (20 °C) en las condiciones nominales,  $G_{T,NOCT}$  : radiación solar incidente

(800 W/m<sup>2</sup>) en las condiciones nominales. El modelo presenta una relación de temperaturas, teniendo en cuenta su relación directa con la radiación incidente y la velocidad del viento, esto se hace para evaluar el rendimiento de la celda fotovoltaica en una determinada región en términos de su temperatura (Duffie J, et all. 1980)

### **2.3.4 Modelo de desempeño King.**

David King, William Boyson y Jay Kratochvill, investigadores del Departamento de I+D en Sistemas Fotovoltaicos, Laboratorio Nacional Sandia, desarrollaron un modelo de desempeño desde el punto de vista térmico, este modelo utiliza tres coeficientes,  $a$ : límite máximo de temperatura módulo fotovoltaico para baja velocidad del viento y alta radiación solar,  $b$ : valor de caída de la temperatura del módulo a medida que la velocidad del viento aumenta,  $\Delta T$ : diferencia entre la temperatura de la celda y la superficie posterior del módulo fotovoltaico (nivel de radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>). Teniendo a la temperatura de la celda,  $T_c$ , como función de la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento, parámetro que en los anteriores modelos no es considerado. Existen varias características particulares de este modelo, entre las cuales podemos citar:

- Utiliza bases de datos solares horarios (datos hora-hora).
- La versatilidad y exactitud del modelo fueron validados con base en datos experimentales (tomado como referencia).
- Proporciona la temperatura de operación esperada para el módulo fotovoltaico con una exactitud de  $\pm 5^\circ\text{C}$ , impacto en producción de energía del 3%.

El modelo se presenta en la Ecuación (8S), donde,  $G_T$ : es la radiación solar en el lugar. Los valores de  $a$ ,  $b$ , y  $\Delta T$  son coeficientes proporcionados por el fabricante, calculados a partir de condiciones estándar.  $V$ : Velocidad del viento en el lugar donde el panel se encuentra instalado,  $T_a$  : Temperatura ambiente,  $G_{ref}$  : Radiación solar de referencia del módulo fotovoltaico (1000 W/m<sup>2</sup>) (L. King, et all. 2004).

$$T_c = [G_T * \{e^{a+b*V}\} + T_a] + \frac{G_T}{G_{ref}} \Delta T \quad (8S)$$

### 2.3.3 Modelo de desempeño Masters.

Este modelo desarrollado por el Prof. Gilbert Masters de la Universidad de Stanford, calcula la temperatura de la celda fotovoltaica para diferentes condiciones ambientales y condiciones nominales. El modelo se muestra en la Ecuación (9S):

$$T_c = T_a + \left( \frac{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}} \right) G_T \quad (9S)$$

Donde,  $T_a$ : temperatura ambiente,  $T_{NOCT}$ : temperatura del módulo fotovoltaico en condiciones nominales (valor proporcionado por el fabricante),  $T_{a,NOCT}$ : temperatura ambiente a condiciones nominales (20 °C).  $G_{T,NOCT}$ : radiación solar incidente en las condiciones nominales (800 W/m<sup>2</sup>),  $G_T$ : radiación solar incidente. En este modelo, no se tiene en cuenta los efectos del viento sobre la temperatura de la celda  $T_c$ , pero si se tiene en cuenta las condiciones nominales, planteando una relación directa entre la radiación del lugar y la temperatura ambiente, es ampliamente usado cuando no se tiene datos de velocidad del viento en la región, tomando la condición para esta variable como 1m/s. (Masters G. 2004).