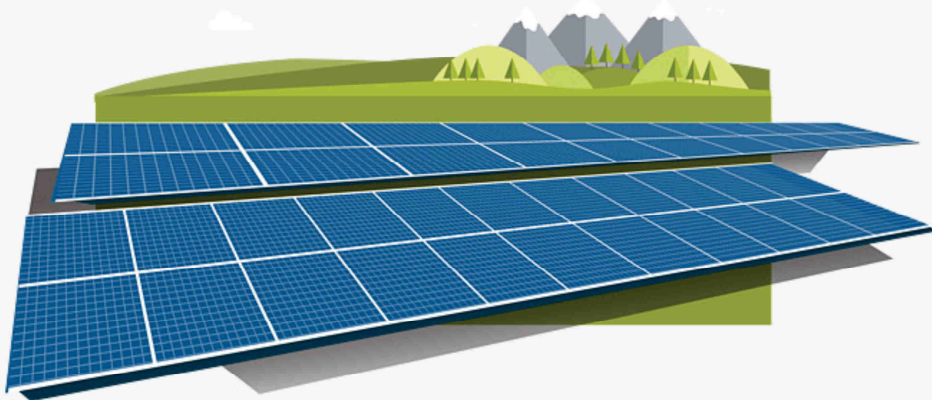




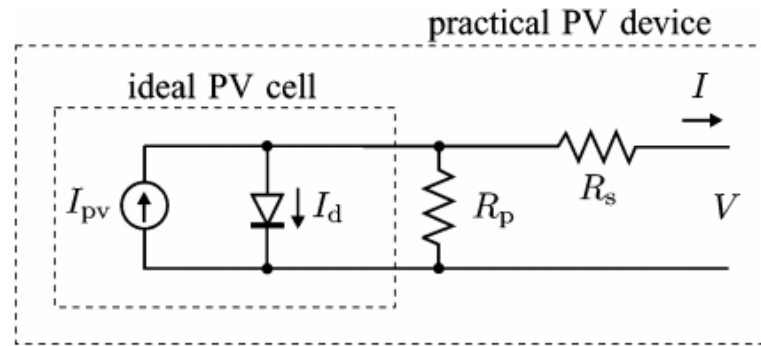
Modelagem e Controle de Sistemas Fotovoltaicos

Aula 02 – P2 - Modelagem Matemática de Módulos Fotovoltaicos

Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br



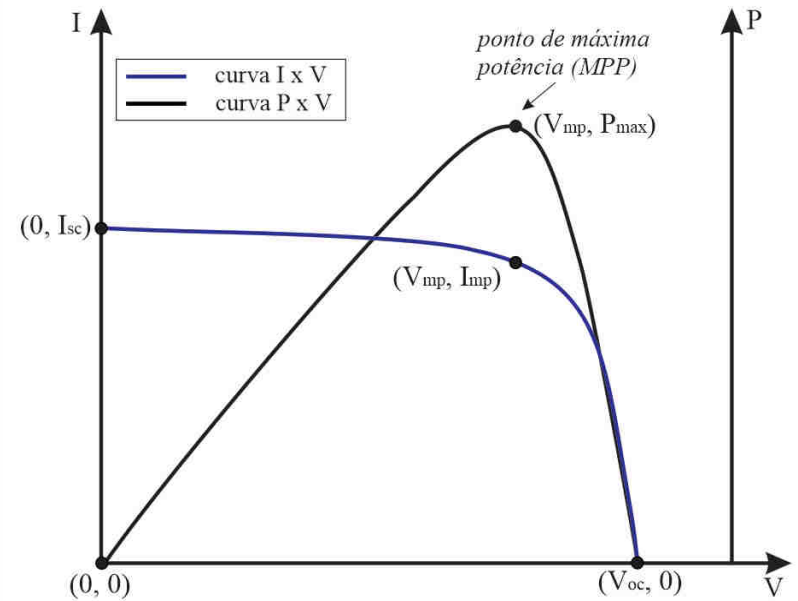
Módulo fotovoltaico...



Modelo do módulo fotovoltaico.

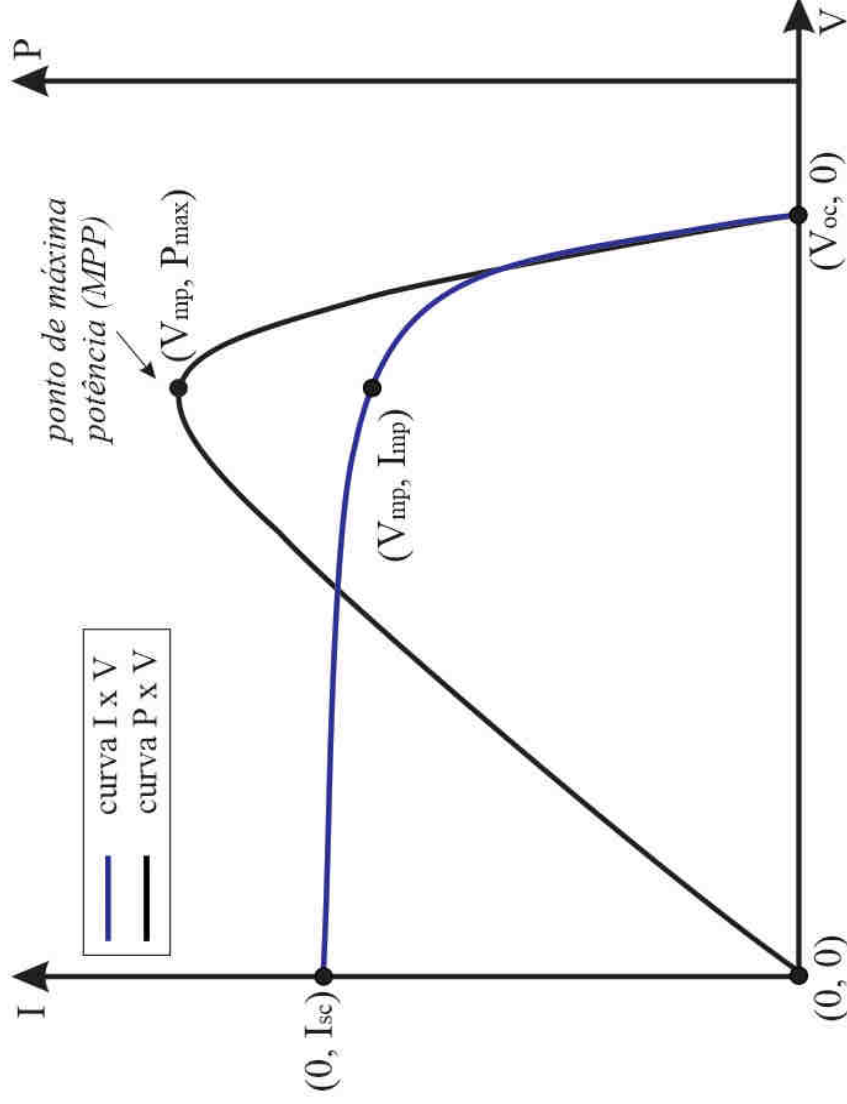
Interesse

Resposta do modelo = módulo



DADOS ELÉTRICOS/STC*

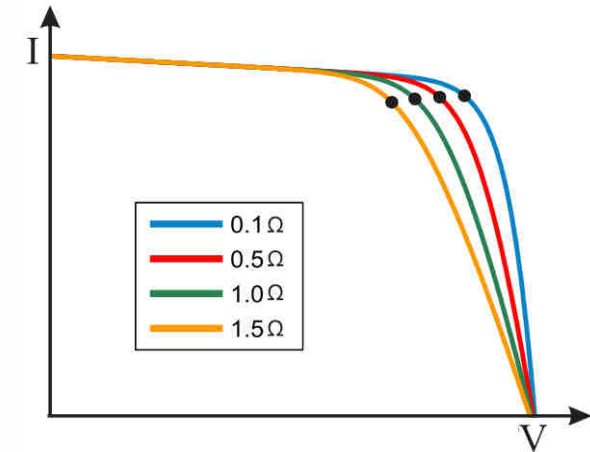
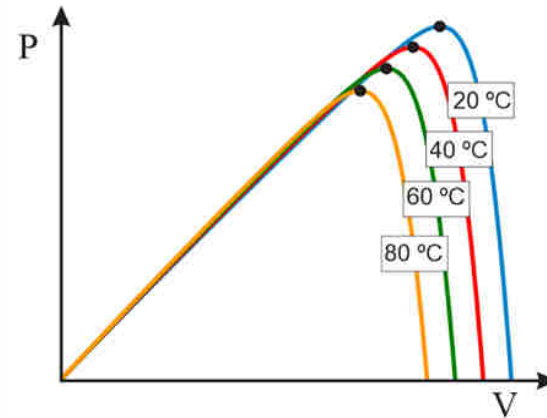
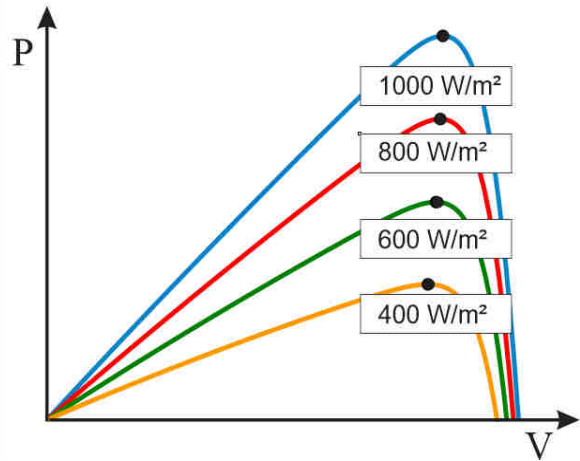
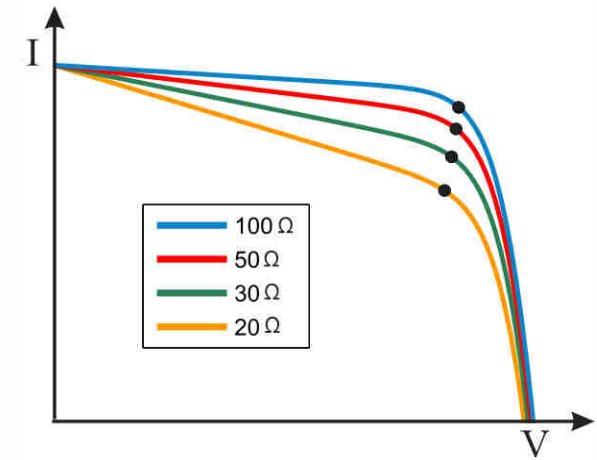
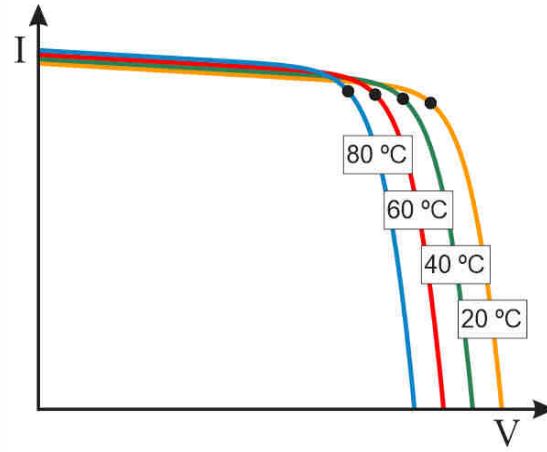
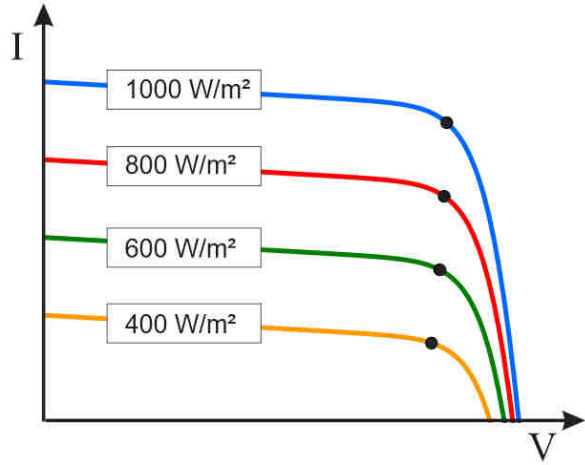
CS6U	330P
Potência nominal máx. (P _{máx})	330 W
Tensão operacional ideal (V _{mp})	37,2 V
Corrente operacional ideal (I _{mp})	8,88 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	45,6 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	9,45 A
Eficiência do módulo	16,97%



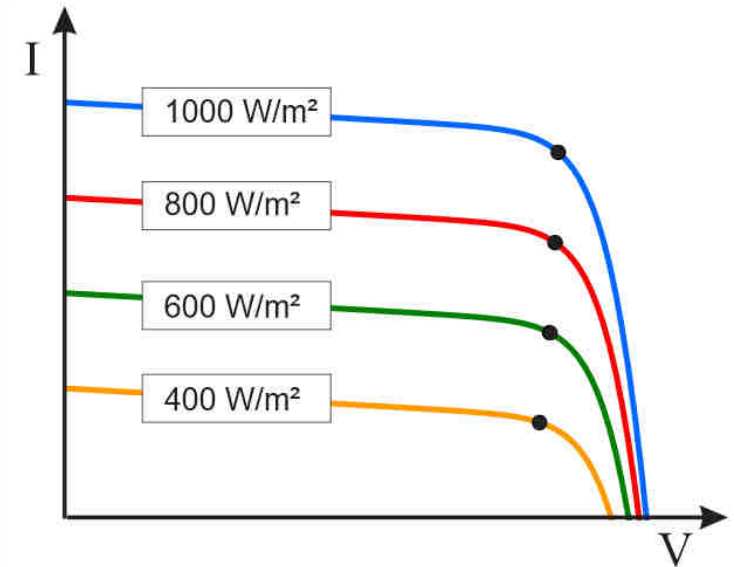
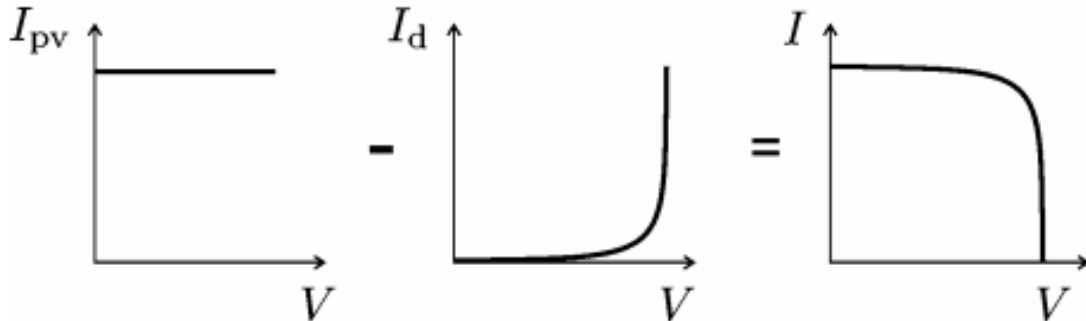
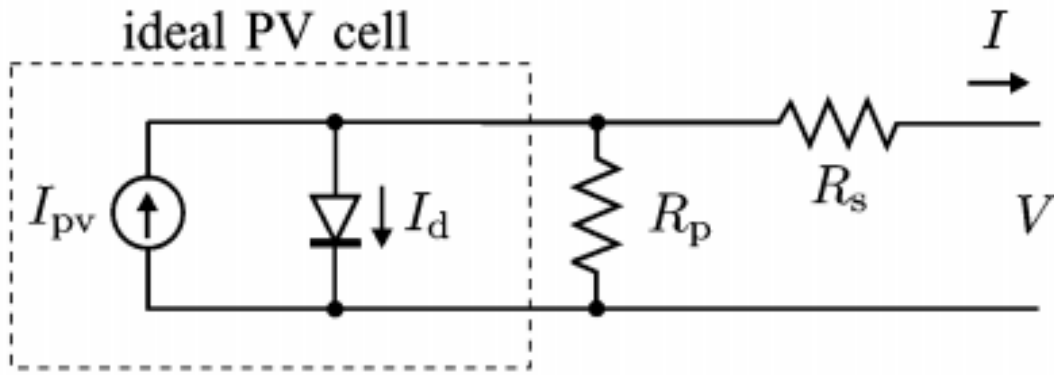
Como saber se um modelo é adequado?

- Pergunta de 1 milhão de dólares
- Variáveis utilizadas
- Informações disponíveis pelo fabricante
- Complexidade versus necessidade
- Processamento computacional
- Comparar resultados reais com simulados em diferentes condições de operação

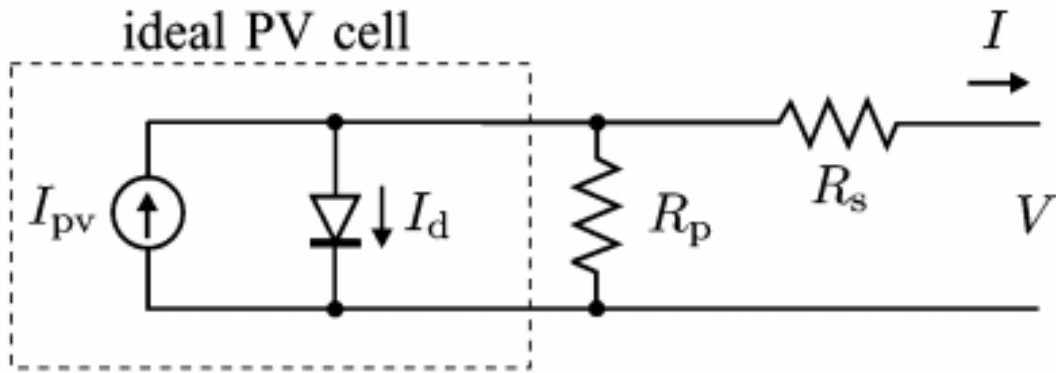
Módulo Fotovoltaico: Curvas Características



Modelo Matemático 1 – Um Diodo



Modelo Matemático 1



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

Modelo Matemático 1

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

$$V_t = N_s k T / q$$

a é a constante de idealidade do diodo.

$$1 \leq a \leq 1,5$$

q é a carga elementar do elétron [$1.60217646 \cdot 10^{-19} \text{C}$]

T [K] é a temperatura da junção $p-n$

k é a constante de Boltzmann [$1.3806503 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$]

Modelo Matemático 1

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

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad V_t = N_s k T / q$$

$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc,n} \quad \Delta_T = T - T_n$$

Modelo Matemático 1

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

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta_T}{\exp((V_{oc,n} + K_V \Delta_T)/aV_t) - 1}$$

$$V_t = N_s kT / q$$

Modelo Matemático 1

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

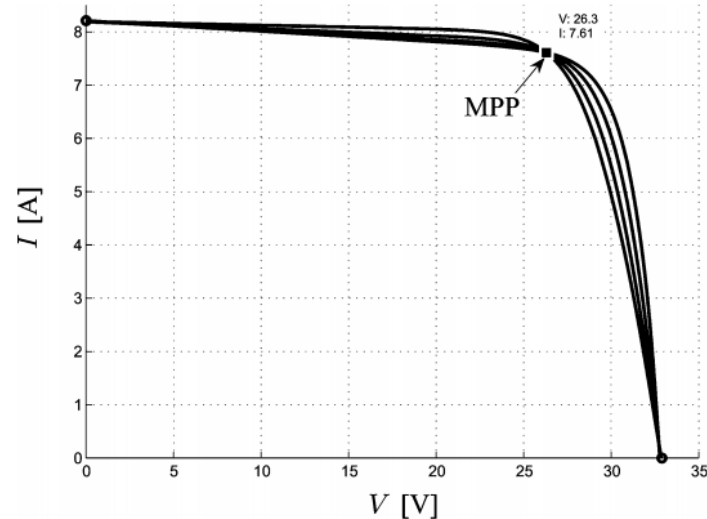
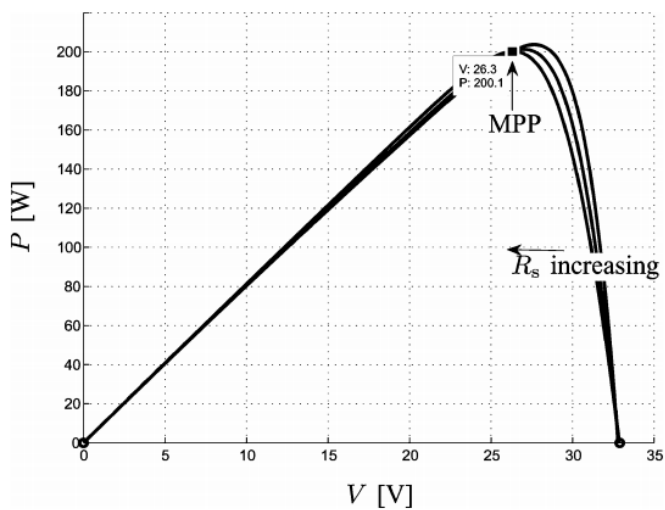
Solução através de um método iterativo

$$P_{\max,m} = V_{mp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{kT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{a N_s} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \right\} = P_{\max,e}$$

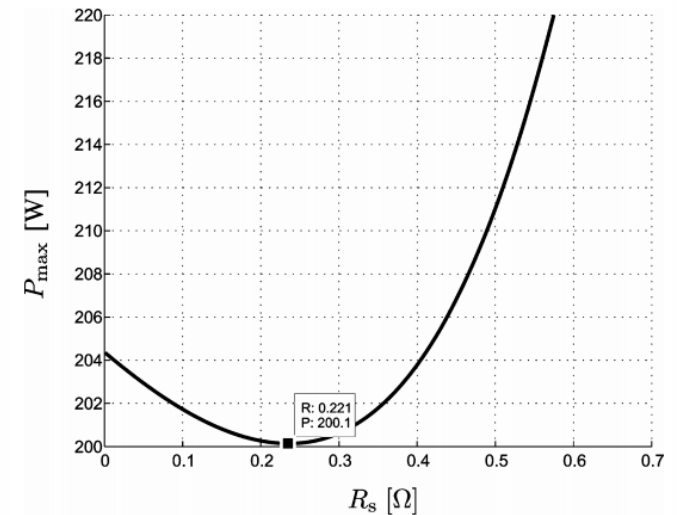
$$R_p = V_{mp} (V_{mp} + I_{mp} R_s) / \left\{ V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \exp \left[\frac{(V_{mp} + I_{mp} R_s) q}{N_s a kT} \right] + V_{mp} I_0 - P_{\max,e} \right\}$$

Modelo Matemático 1 - Método Iterativo

Inicia $R_s = 0$ e vai aumentando



Escolha de R_s



Modelo Matemático 1

Download do método iterativo no site do Prof. Marcelo Villalva:

<https://sites.google.com/site/mvillalva/pvmodel>

Modelo Matemático 1 - Dados *Datasheet*

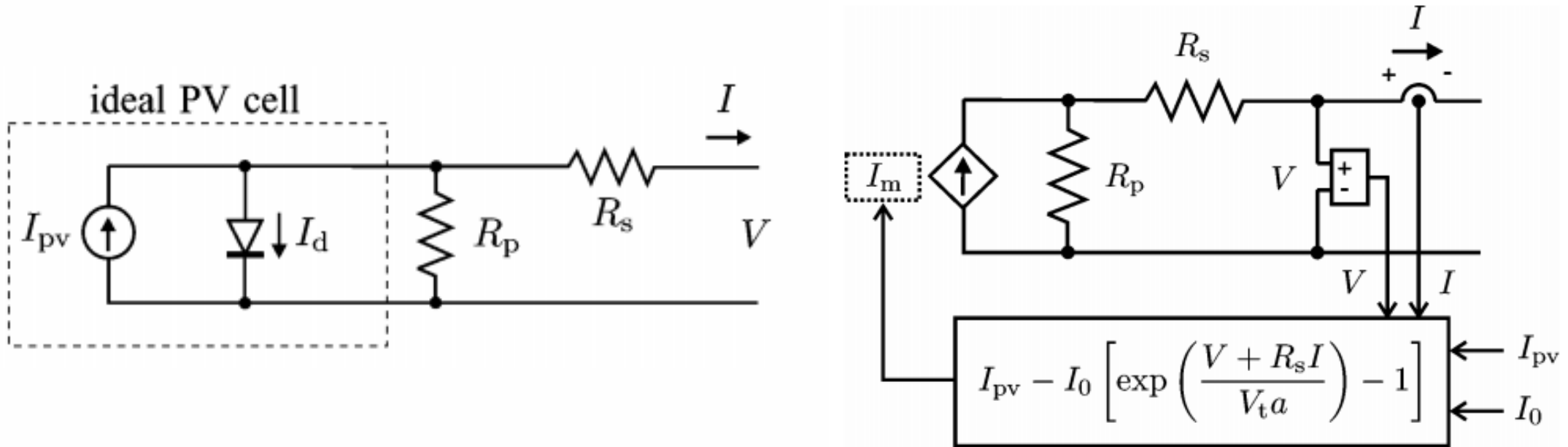
DADOS ELÉTRICOS/STC*

CS6U	330P
Potência nominal máx. (P _{máx})	330 W
Tensão operacional ideal (V _{mp})	37,2 V
Corrente operacional ideal (I _{mp})	8,88 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	45,6 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	9,45 A
Eficiência do módulo	16,97%

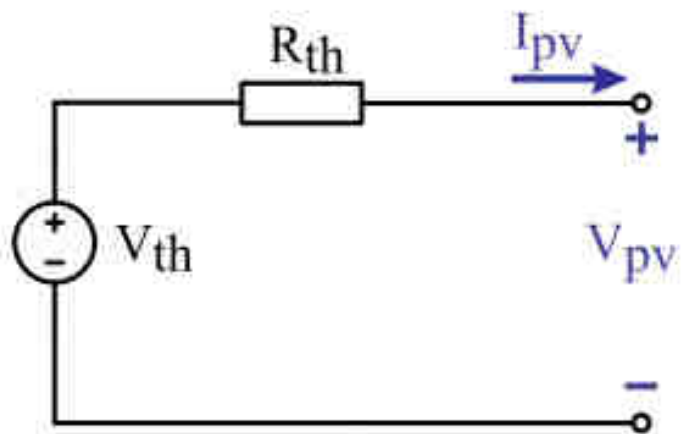
CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA

Especificação	Dados
Coeficiente de temperatura (P _{máx})	-0,41%/°C
Coeficiente de temperatura (V _{oc})	-0,31%/°C
Coeficiente de temperatura (I _{sc})	0,053%/°C
Temperatura operacional nominal da célula	45±2 °C

Modelo Matemático 1



Modelo Simplificado - Linearizado



$$V_{th} = 2V_{mp}$$

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

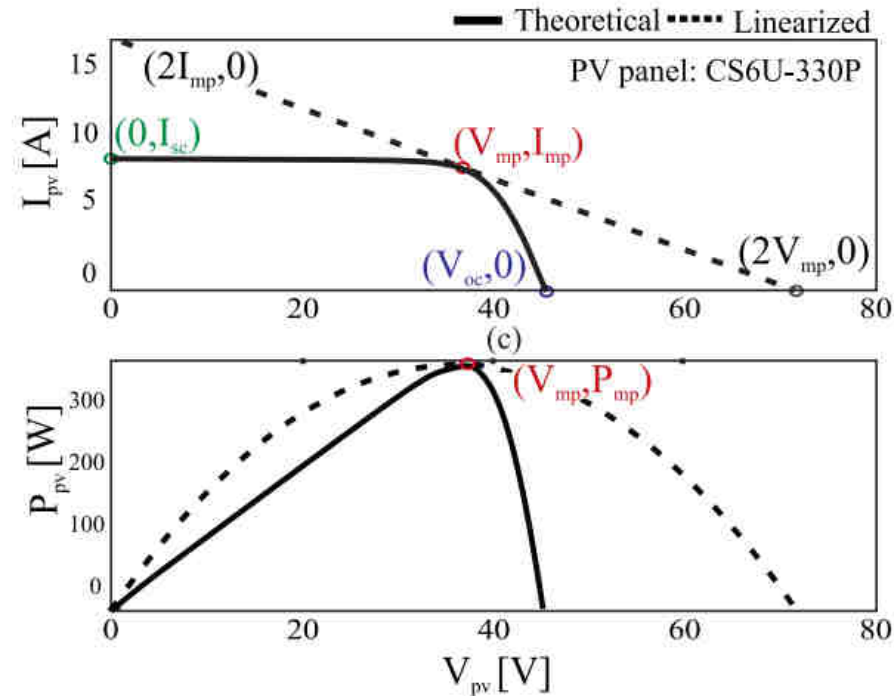
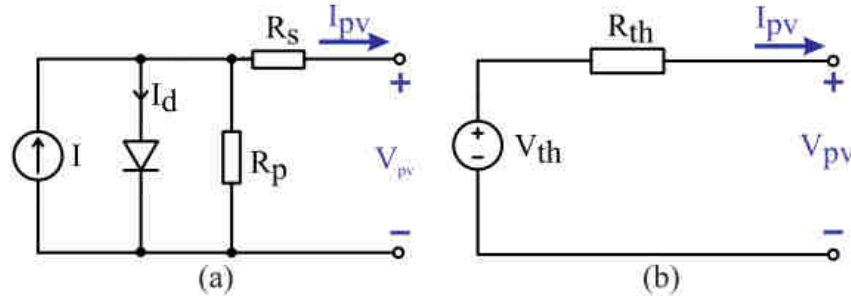
DADOS ELÉTRICOS/STC*

CS6U	330P
Potência nominal máx. (Pmáx)	330 W
Tensão operacional ideal (Vmp)	37,2 V
Corrente operacional ideal (Imp)	8,88 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	45,6 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,45 A
Eficiência do módulo	16,97%

$$V_{th} = 2V_{mp} = 2 \times 37,2 = 74,4V$$

$$R_{th} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{37,2}{8,88} = 4,19 \Omega$$

Modelo Linearizado x Modelo com 1 Diodo





www.gesep.ufv.br



Gesep



gesep_vicosa



Gesep UFV



ES
Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



Obrigado!

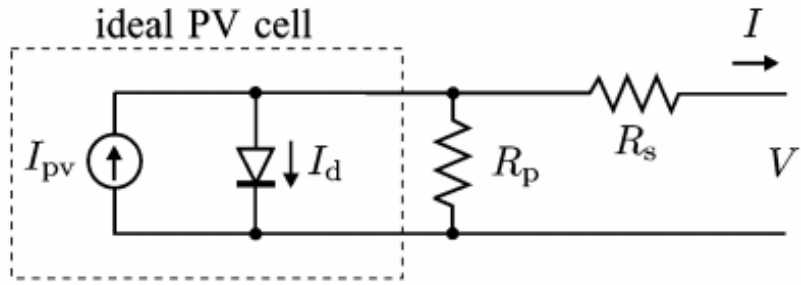
Heverton Augusto Pereira

Prof. Departamento de Engenharia Elétrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: heverton.pereira@ufv.br



$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta_T}{\exp((V_{oc,n} + K_V \Delta_T)/aV_t) - 1}$$

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

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta_T) \frac{G}{G_n}$$

$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc,n}$$

$$\Delta_T = T - T_n$$

$$V_t = N_s kT/q$$