

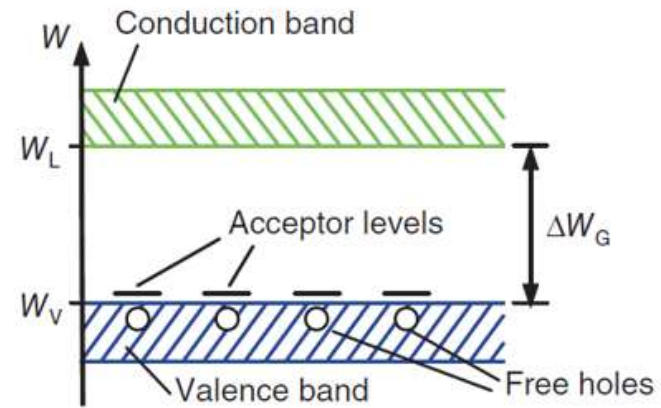
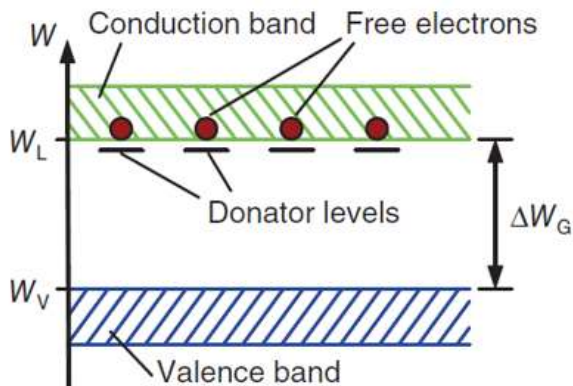
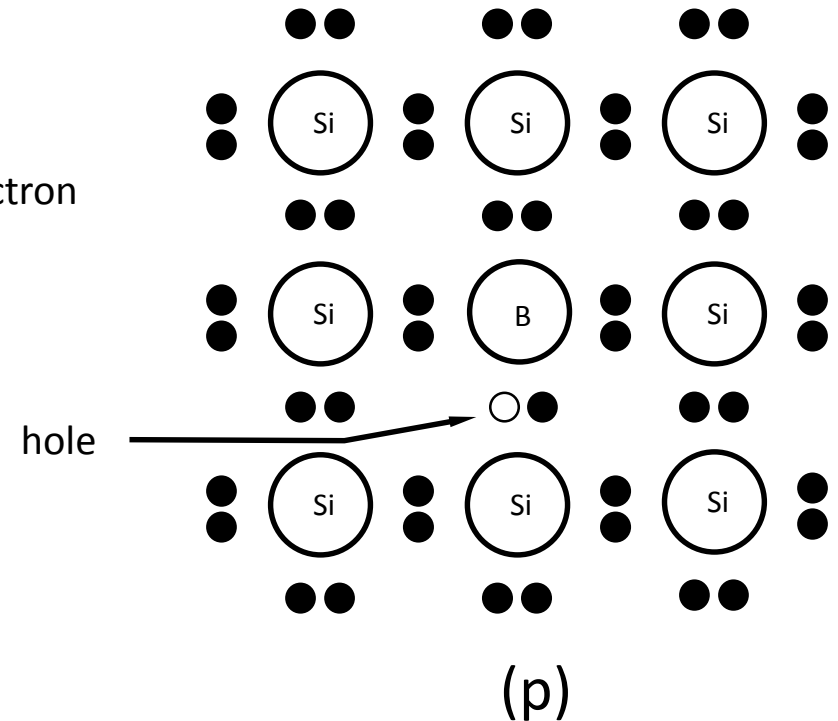
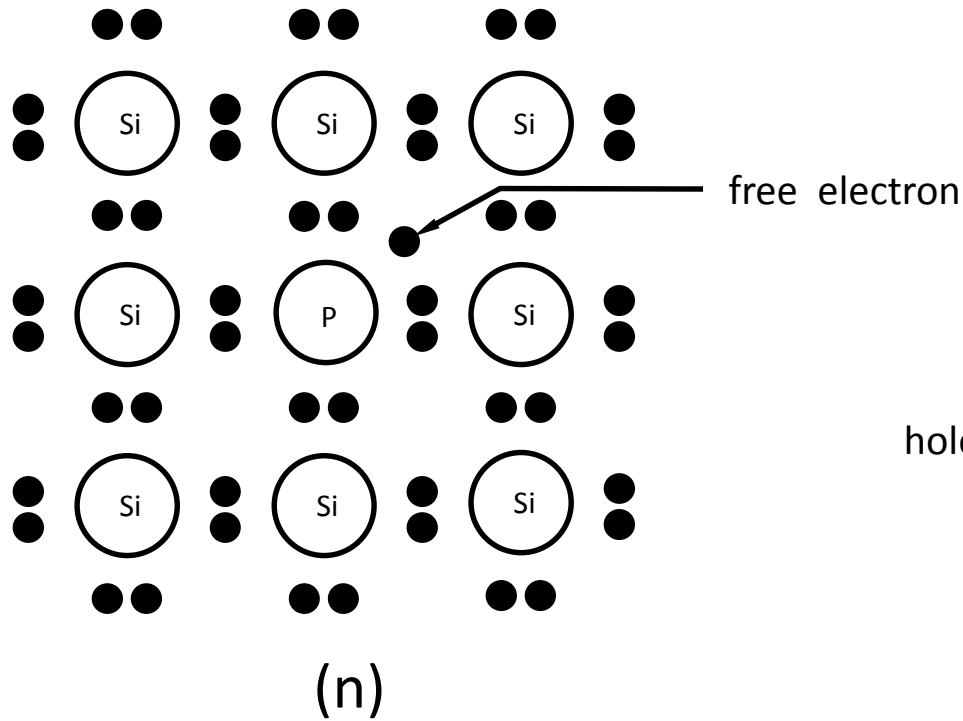


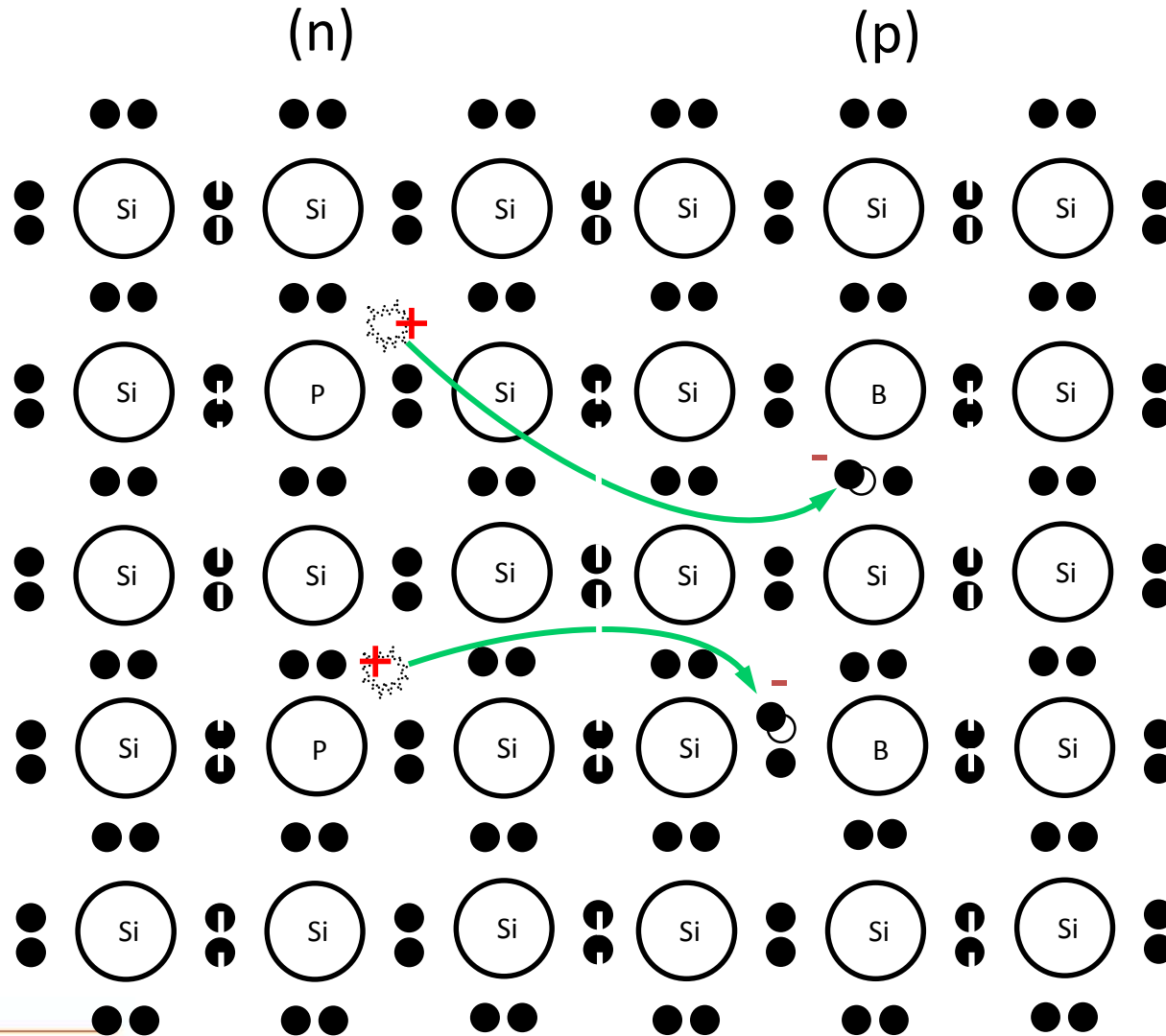
Minicurso 5

Identificação de Parâmetros Elétricos em Módulos Fotovoltaicos



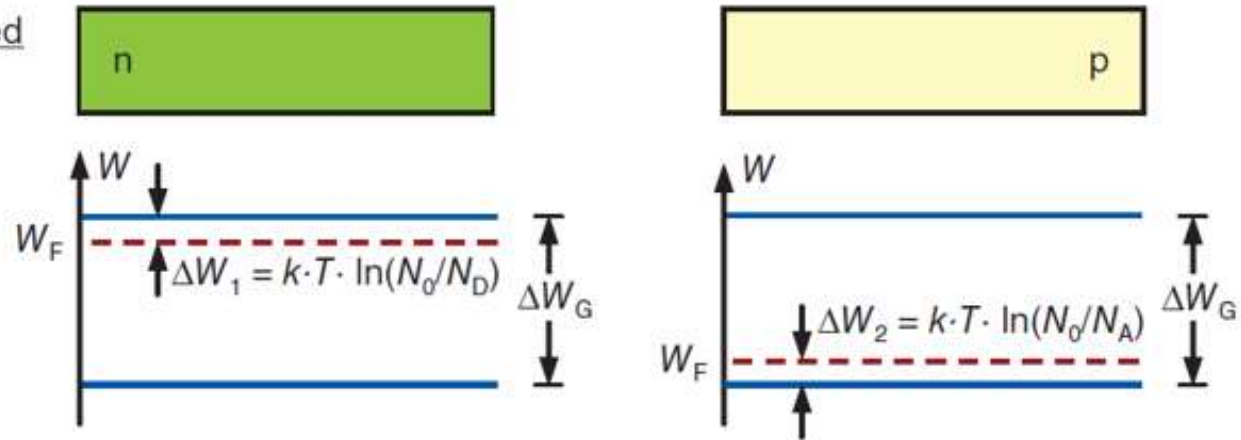
Doping of Silicon



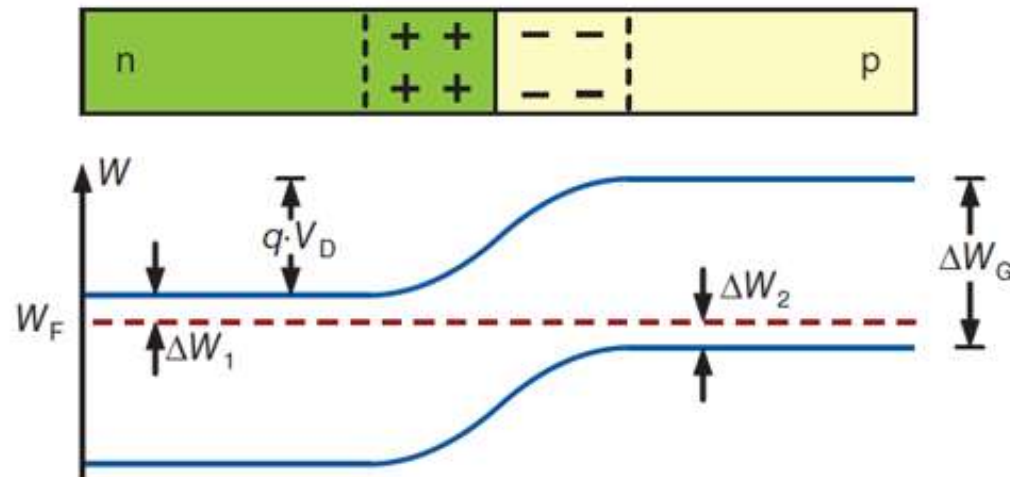


Obtenção de uma Diferença de Potencial

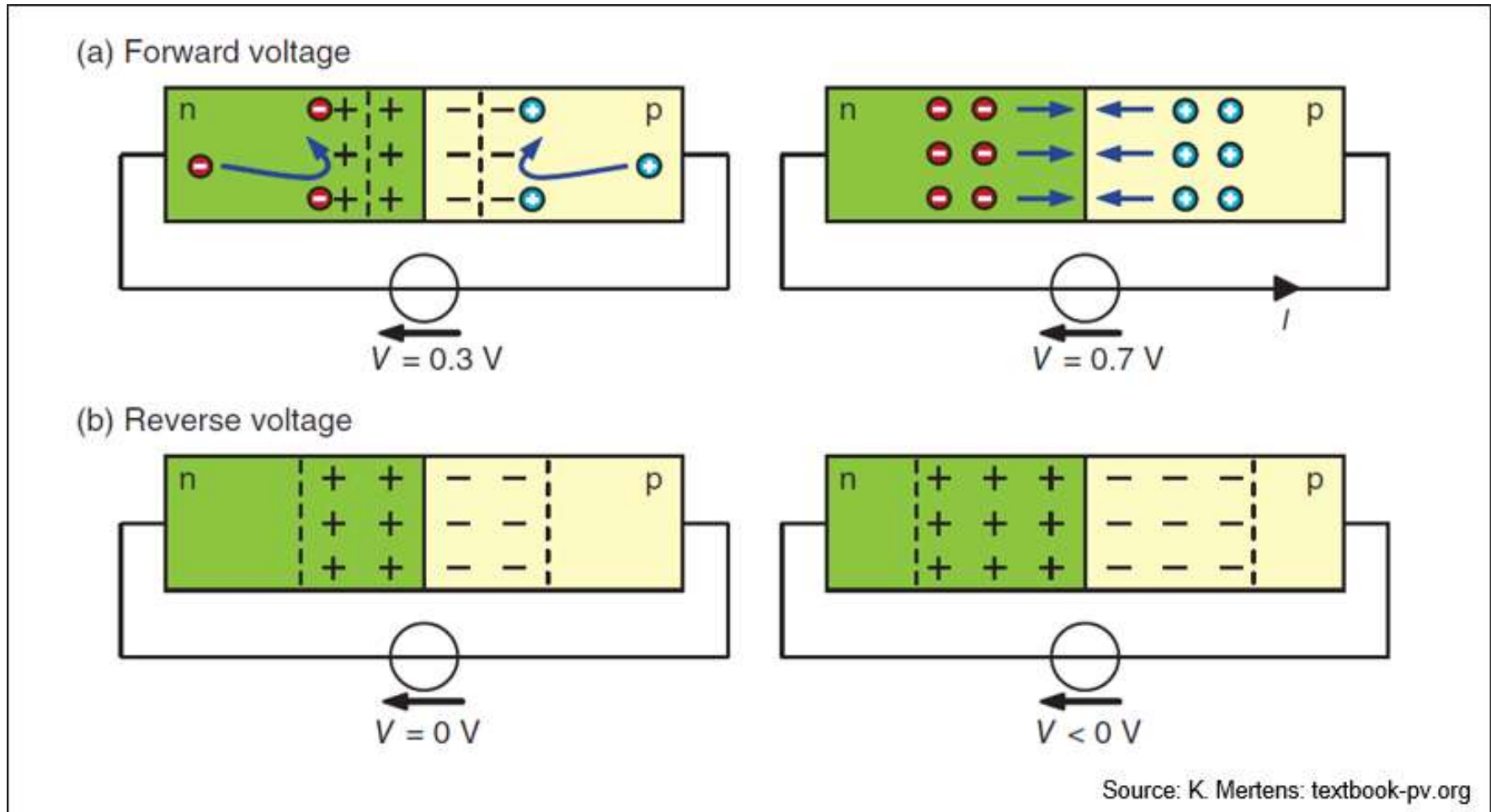
(a) p and n separated



(b) p and n linked



Source: K. Mertens: textbook-pv.org



$$i = I_d \left[\exp \left(\frac{v \cdot q}{n k \cdot T} \right) - 1 \right]$$

```
k = 1.38e-23; % Constante de Boltzman [J/K]
q = 1.6e-19; % Carga do elétron [Coulombs]
T1 = 273 + 0; % Convertendo para Kelvin
T2 = 273 + 100;
I_s1 = 1.0e-12; % Corrente de Saturação
k_s = 0.072; % Constante para correção da corrente de saturação
I_s2 = I_s1*exp(k_s*(T2-T1)); % Corrente de Saturação em T2
V_d = 0.45:0.01:0.7; % Tensões amostradas no Diodo
I_T1 = I_s1*exp(q*V_d/(k*T1)); % Corrente no Diodo a T1
I_T2 = I_s2*exp(q*V_d/(k*T2)); % Corrente no Diodo a T2
plot(V_d,I_T1,'r',V_d,I_T2,'g')
axis([0.45,0.75,0,10])
title('Curva I-V do Diodo a duas temperaturas')
xlabel('Tensao (V)')
ylabel('Corrente (A)')
```





Plataformas de Simulação e gestão de versões



https://github.com/dbr-ufs/solar_fotovoltica

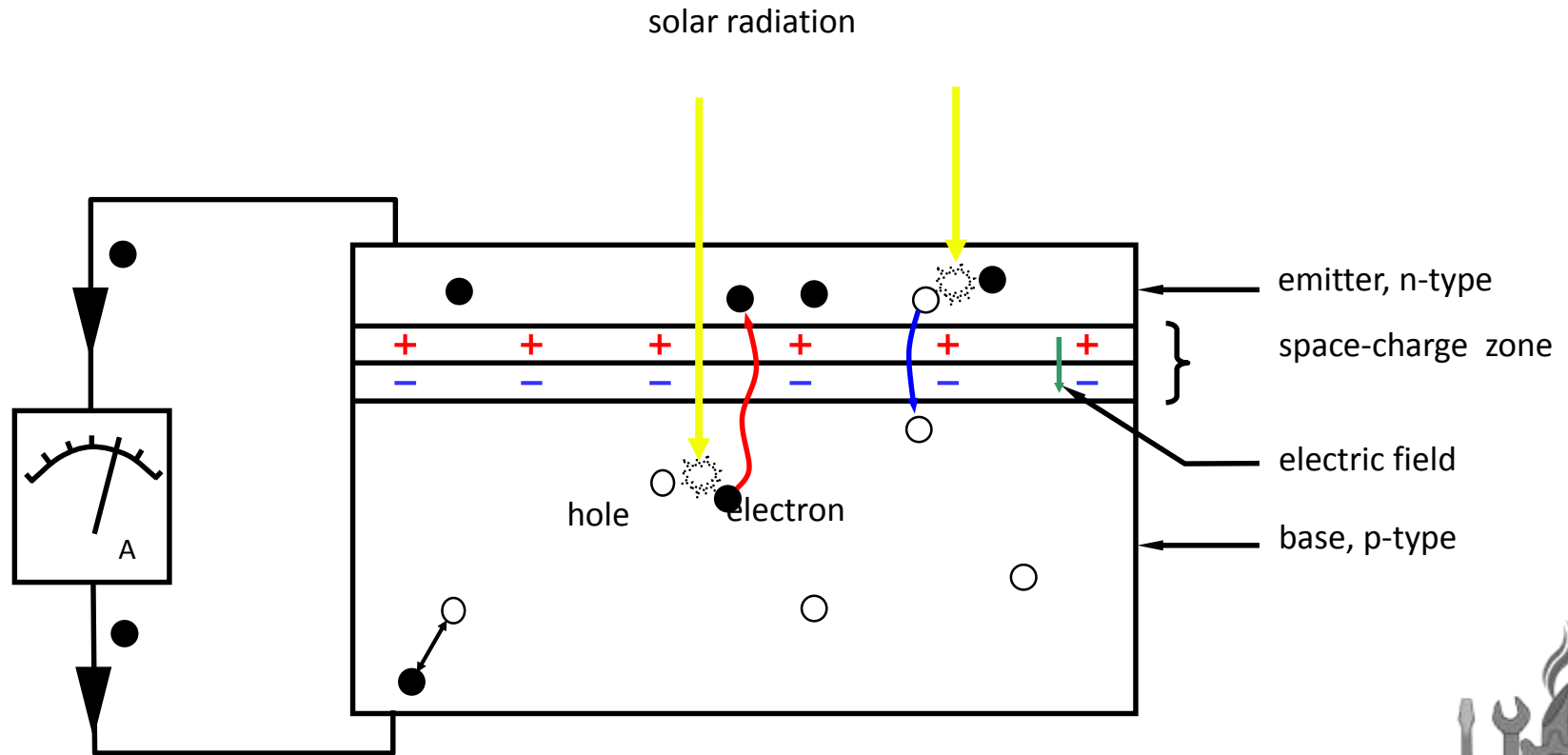


https://mybinder.org/v2/gh/dbr-ufs/solar_fotovoltica/master



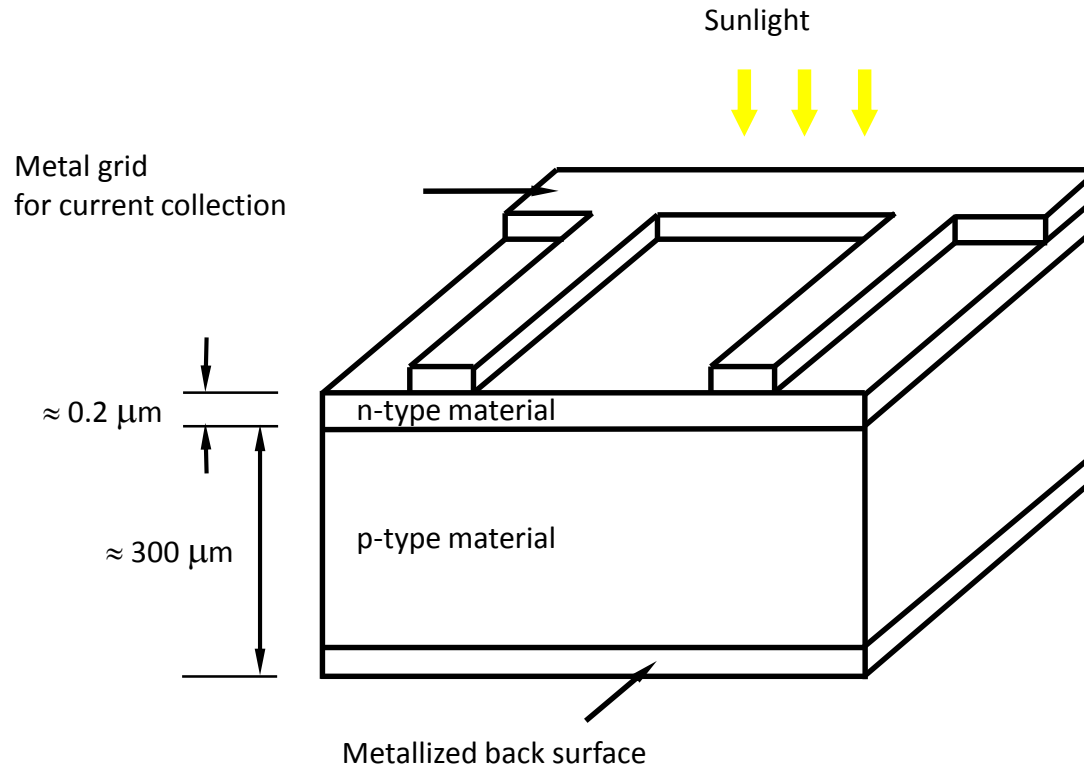


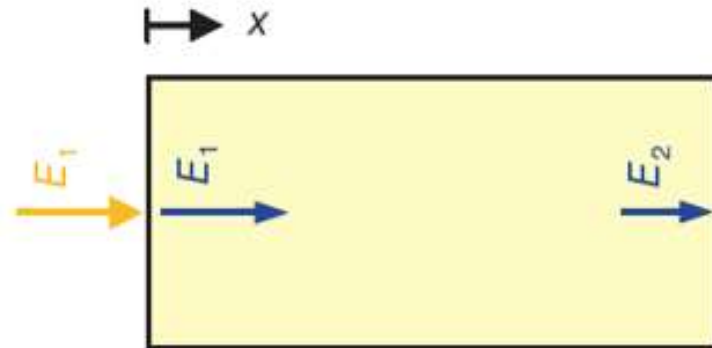
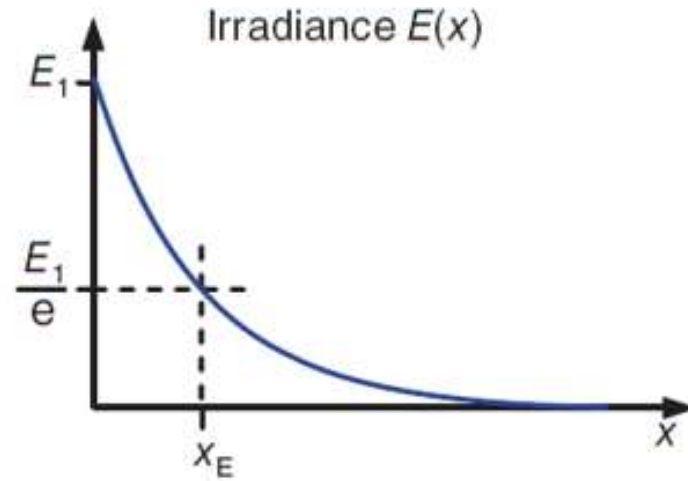
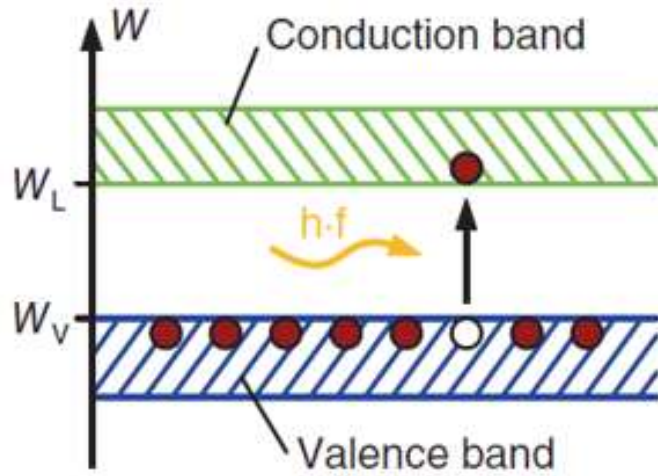
Schematic Operation Principle



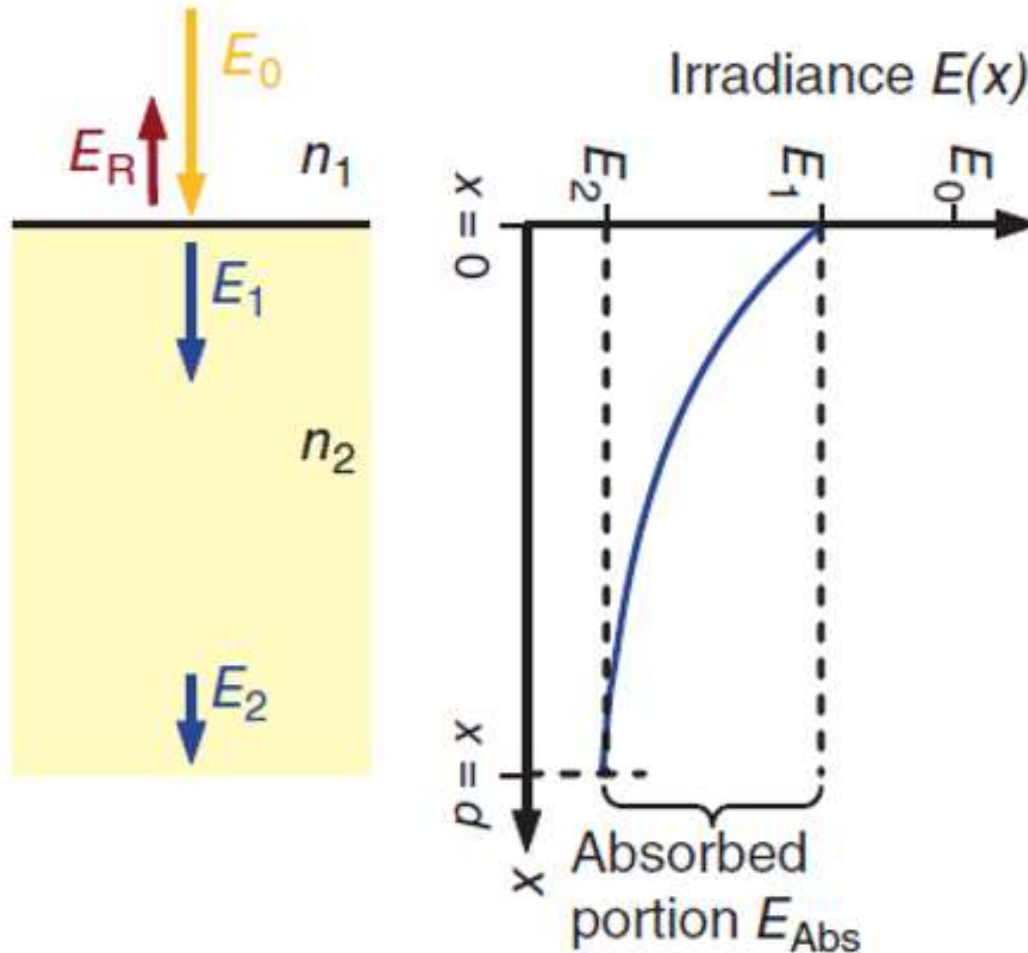


Schematic Drawing of a Solar Cell

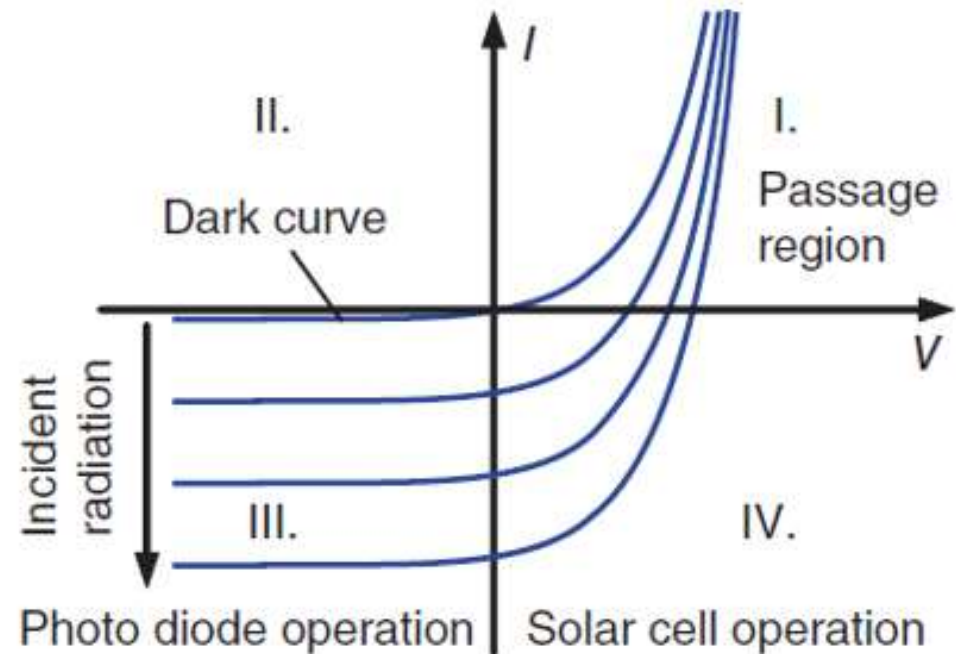
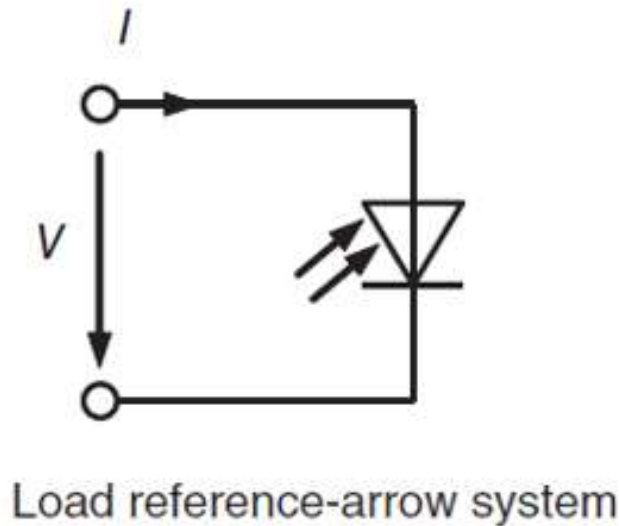




$$\eta_{\text{Abs}} = \frac{\text{Number of absorbed photons}}{\text{Number of incident photons}} = \frac{N_{\text{Ph_Abs}}}{N_{\text{Ph}}} = \frac{E_{\text{Abs}}}{E_0} = \frac{E_1 - E_2}{E_0}$$



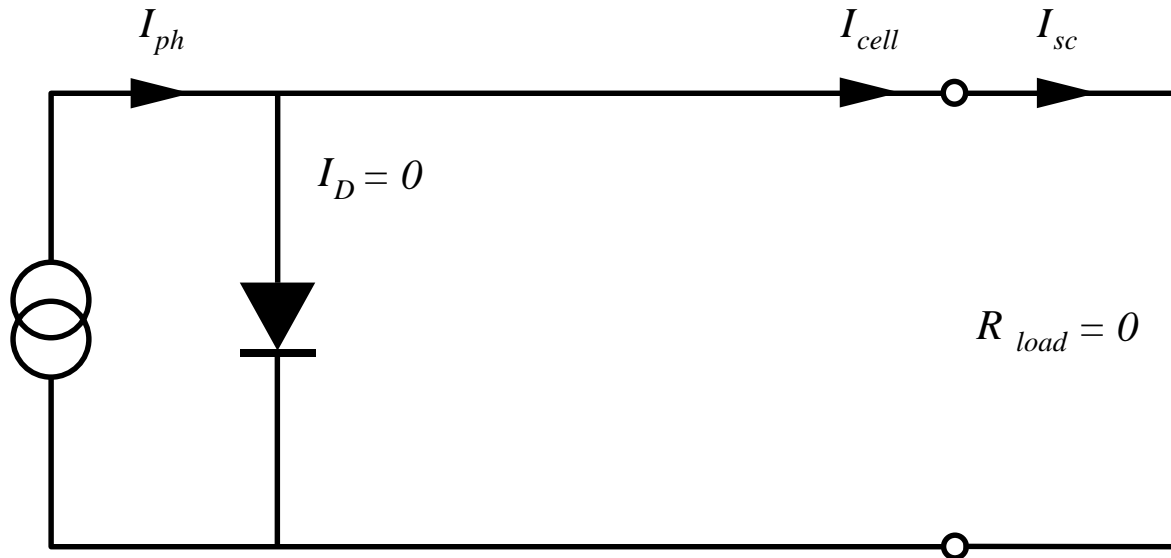
Curva Característica



Source: K. Mertens: textbook-pv.org



Short Circuit

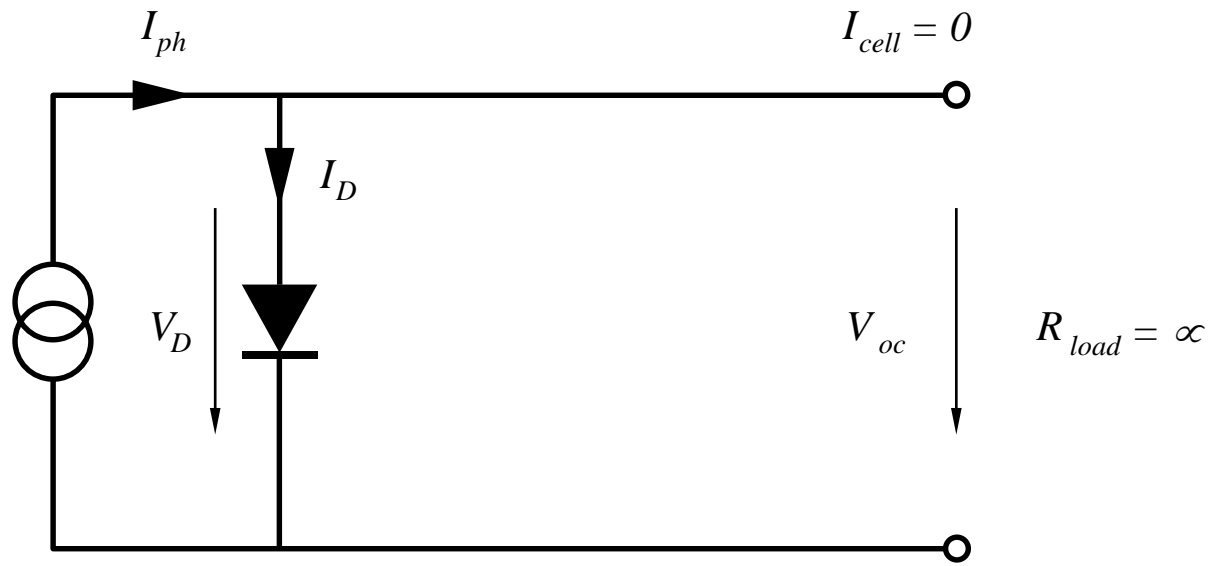


$$I_{sc} = I_{cell} = I_{ph}$$



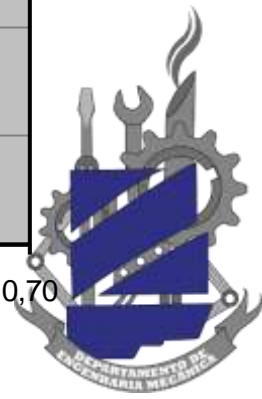
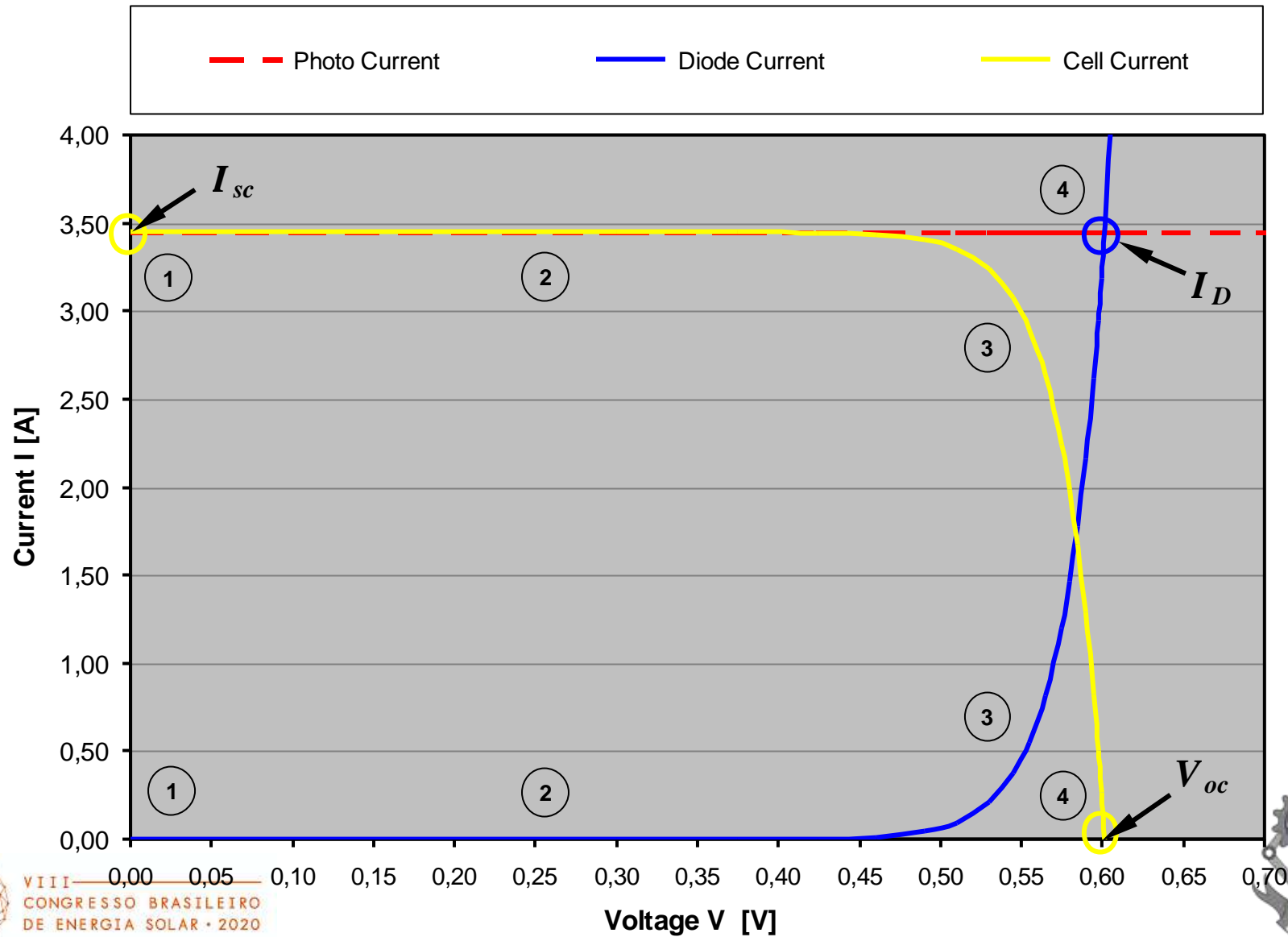


Open Circuit

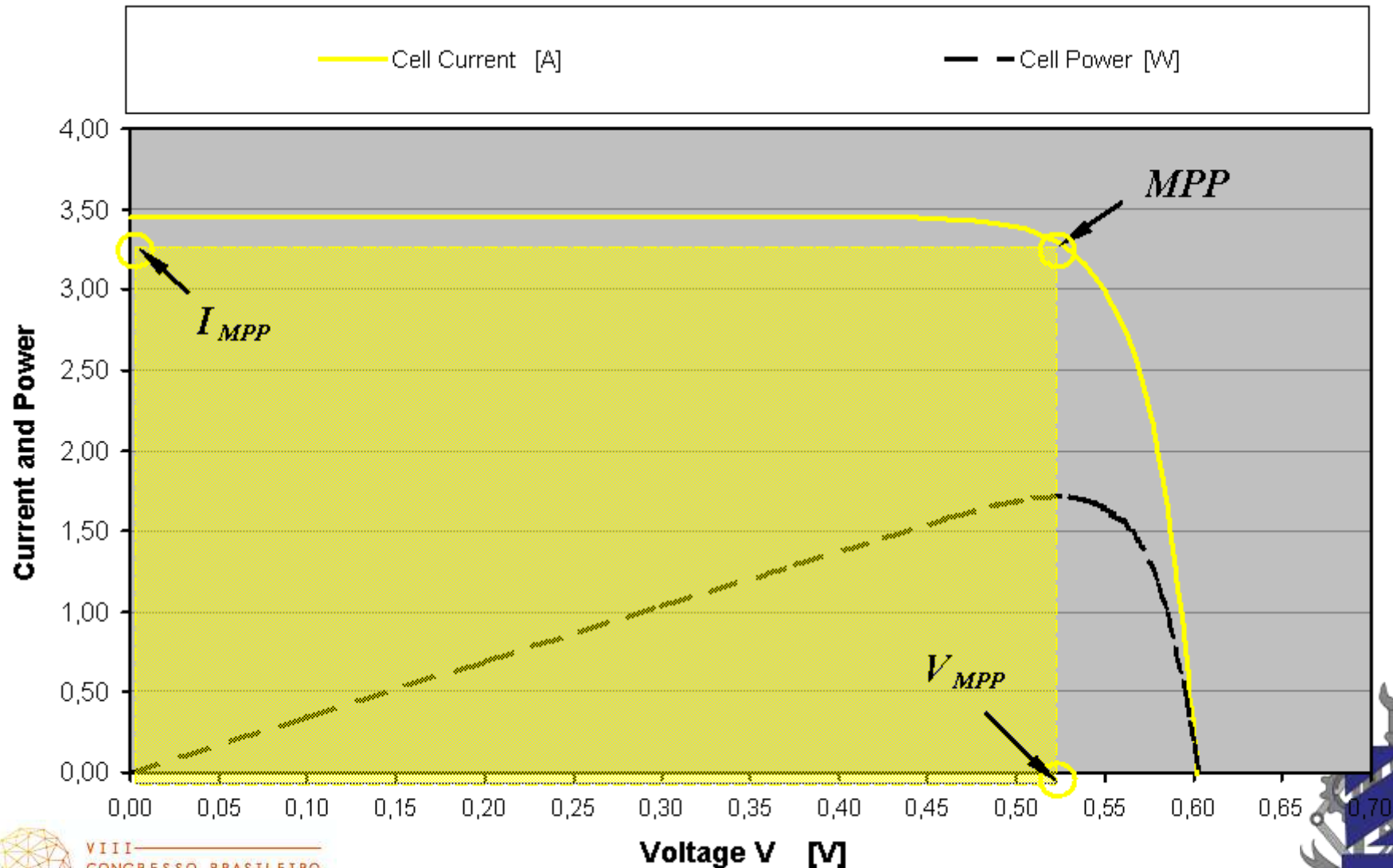




Solar Cell Curve



Maximum Power Point



Circuito equivalente modelo de um diodo

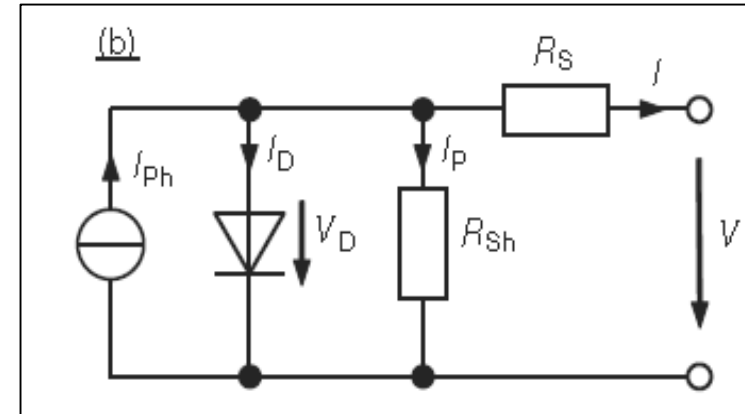
Resistência em série (R_s);

Resistência em paralelo (R_{sh});

Fator de idealidade do díodo (n);

Corrente fotogerada (I_{ph});

Corrente de saturação do díodo (I_d).



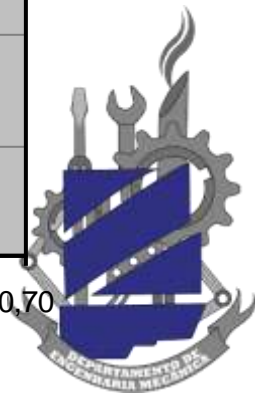
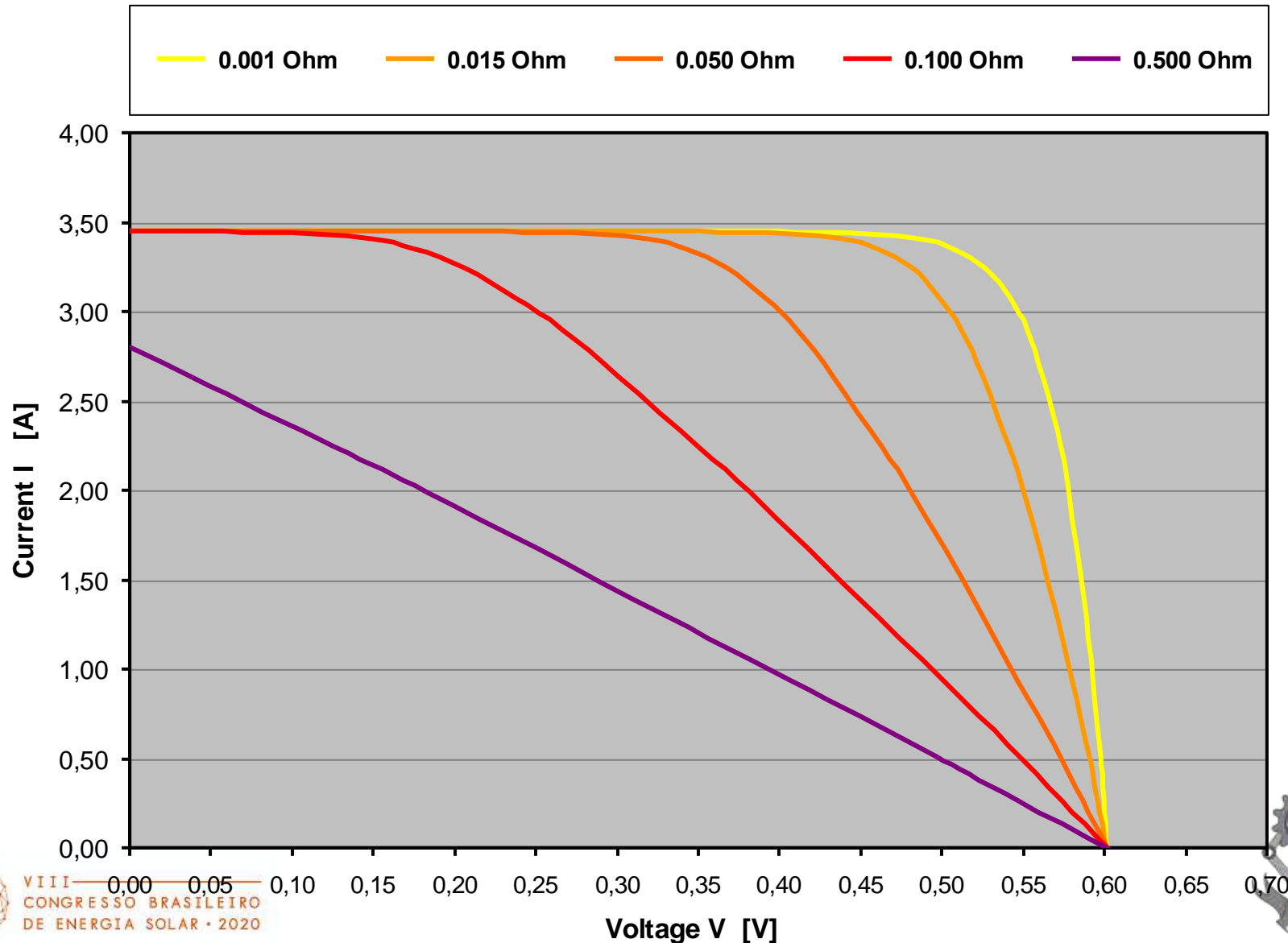
Circuito equivalente modelo de um diodo e cinco parâmetros Fonte: Mertens (2014).

$$I_L = I_{ph} - I_d \left[\exp \left(\frac{V_L + R_s I_L}{n V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_s I_L}{R_{sh}}$$

Equação do modelo elétrico de um diodo

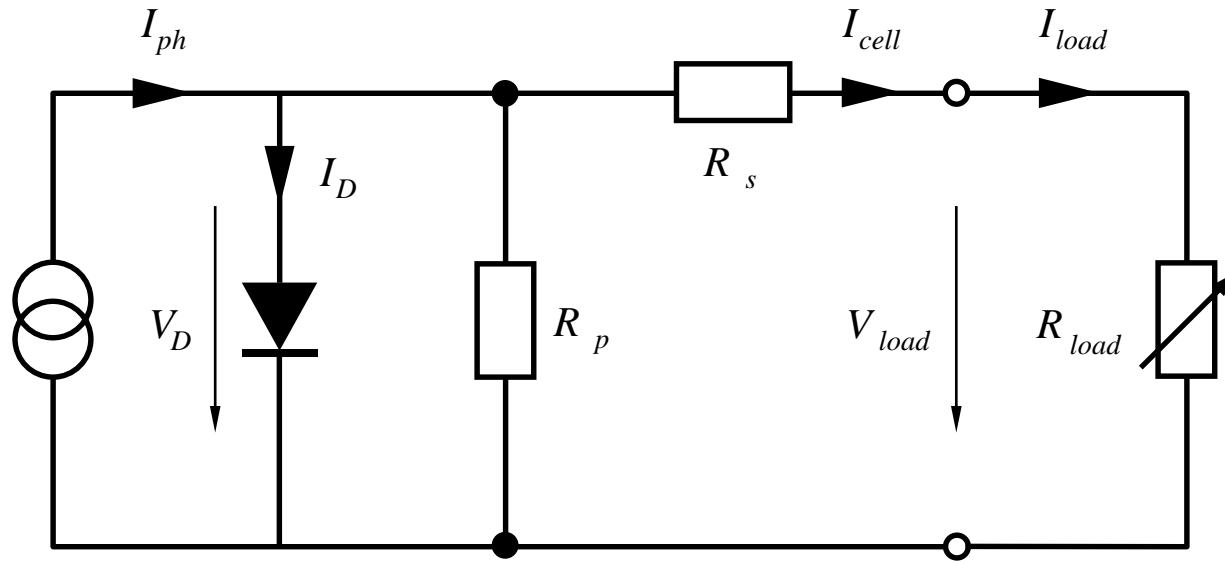


Serial Resistance



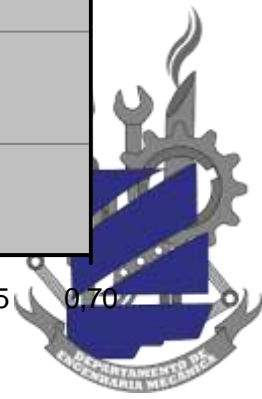
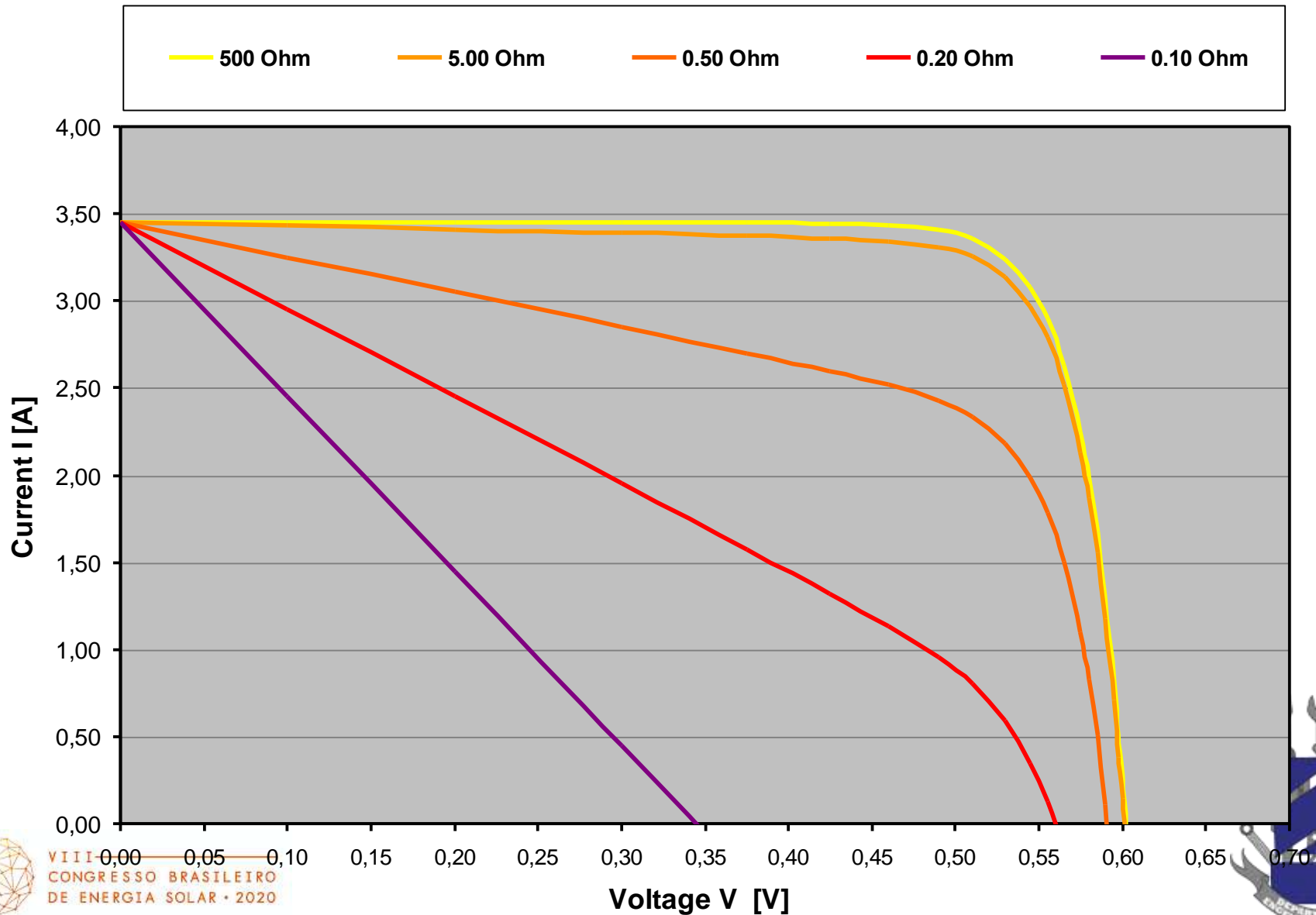


Real Solar Cell



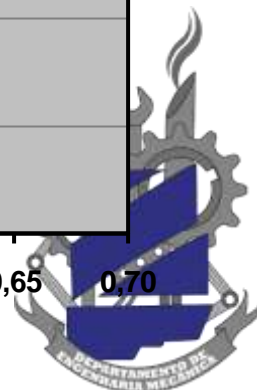
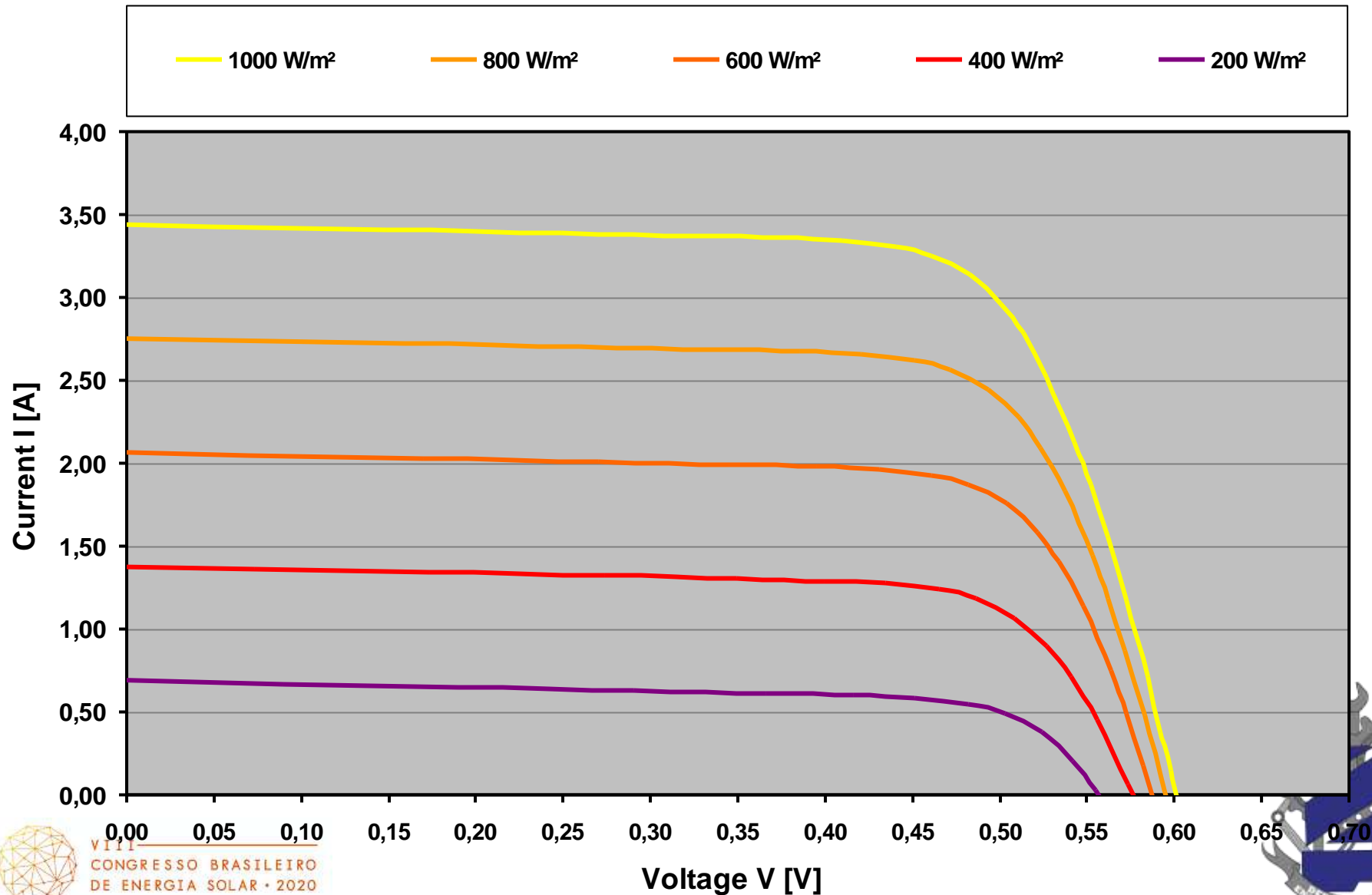


Parallel Resistance



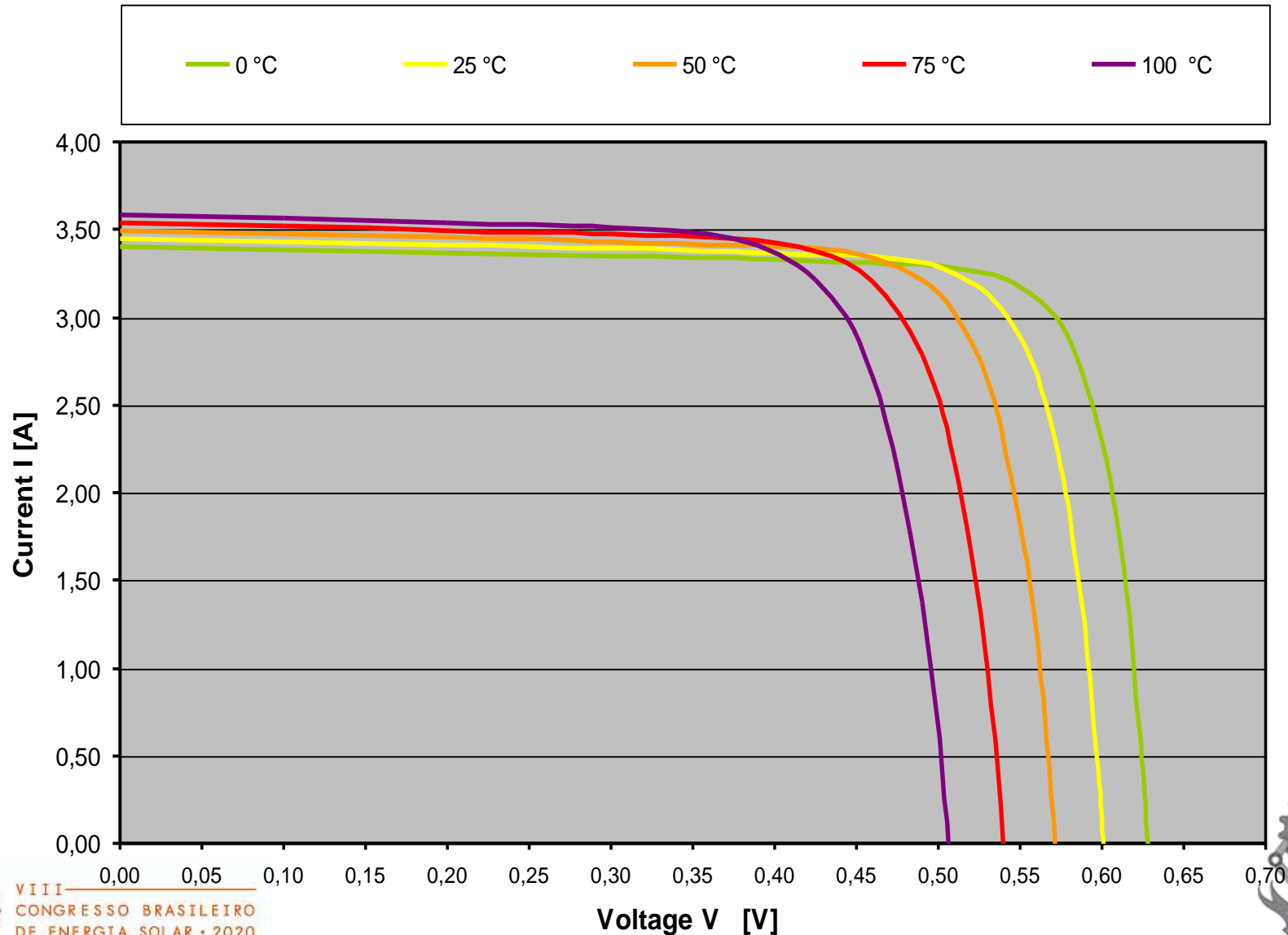


IV-Curves depending of the Radiation





IV-Curves depending of temperature





alcantarane@academico.ufs.br

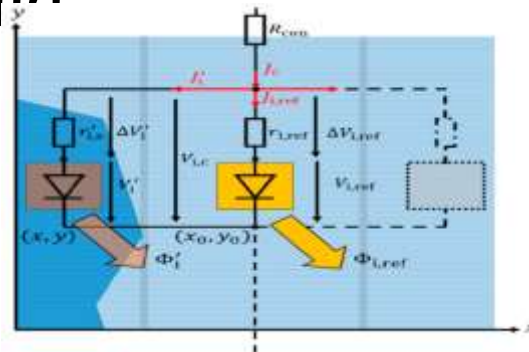
Eletroluminescência

para analisar as resistências
série e paralelo

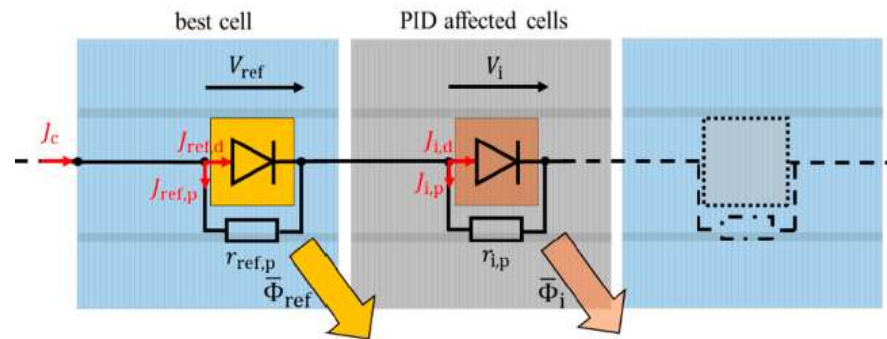
- O método de Kropp *et al.* em [10], chamado “Predição de Potência de Módulos por EL” (ELMO) é referência para este trabalho. Trata-se da predição da curva I-V a partir de um mapeamento de resistências por EL e dados da folha de dados;
- O ELMO obtém um mapa de resistências relacionando duas imagens de EL, uma de baixa luminescência ($\leq 10\%$ de I_{sc}) e outra de alta luminescência (I_{sc});



- A resistência série local no ponto de maior luminescência na imagem de alta luminescência é determinada para cada célula;
- A partir desta resistência de referência é feito o mapeamento de todas as resistências série locais da célula.



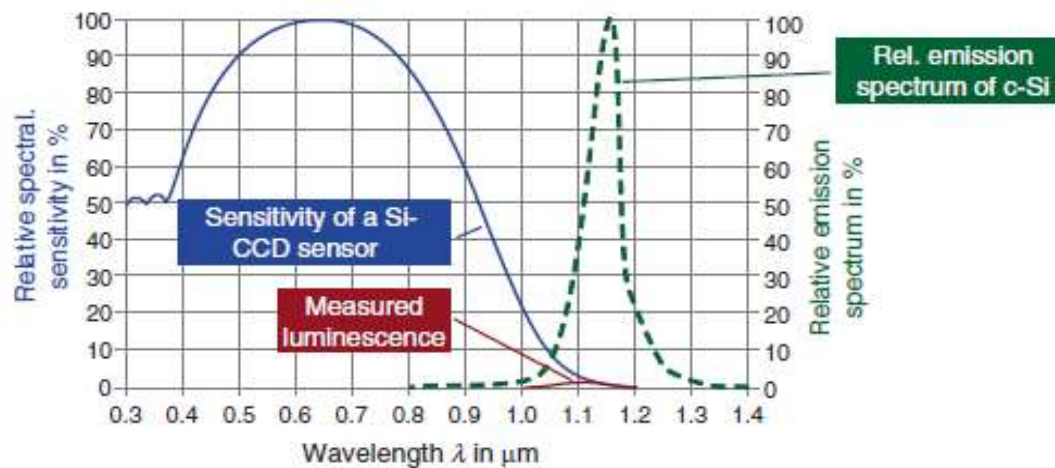
- Já a resistência paralelo é mapeada a partir da célula com maior luminescência média na imagem de baixa luminescência.



- Sistema de aquisição de imagens para realização de ensaios de EL:
 - Câmara escura; Fonte DC e cabos de energia; Dispositivos fotovoltaicos;
 - Microcomputador Raspberry PI 3, modelo B *plus*;
 - Câmera CMOS modelo Pi NoIR V2;



- Espectros Relativos de Emissão (c-Si) e Sensibilidade (CCD):



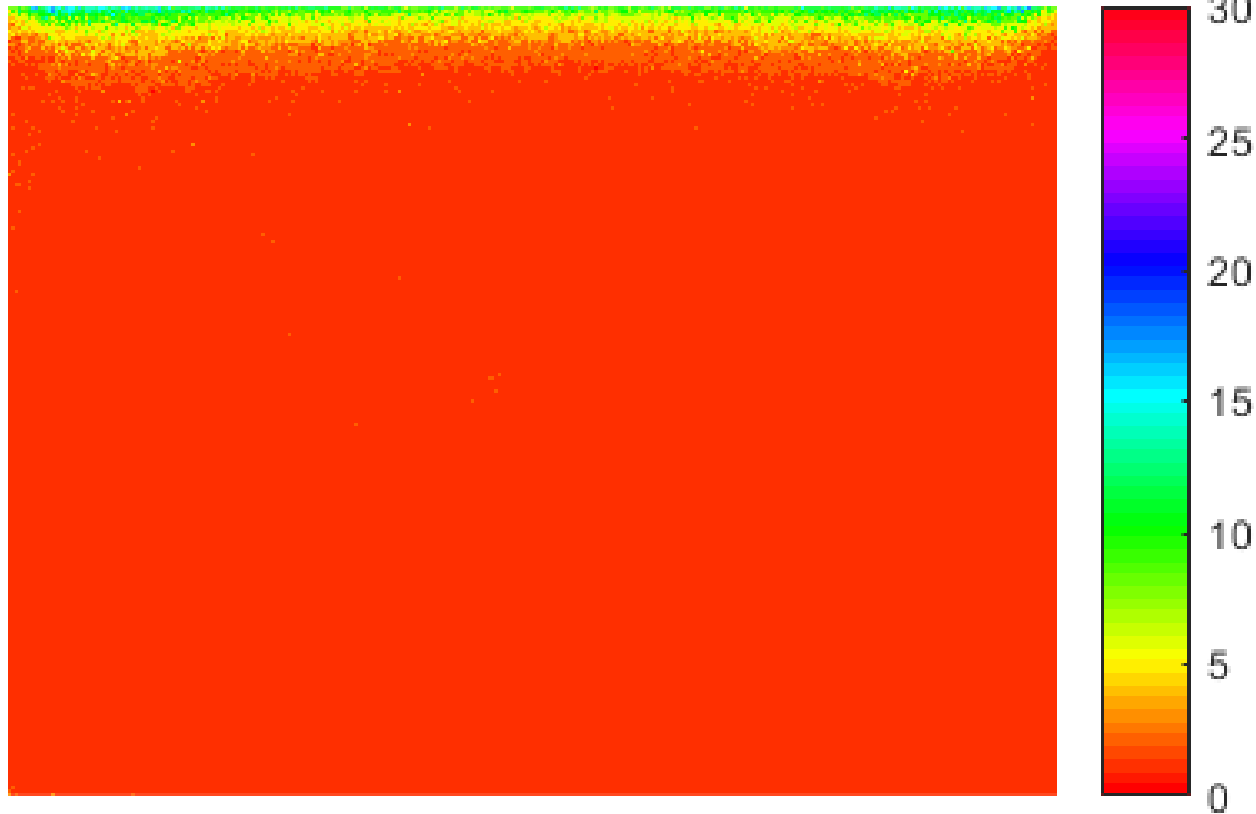
K. Mertens, Photovoltaic Metrology, in *Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice*, Chichester: John Wiley & Sons, 2014, pp.219.





Distribuição Espacial das Resistências

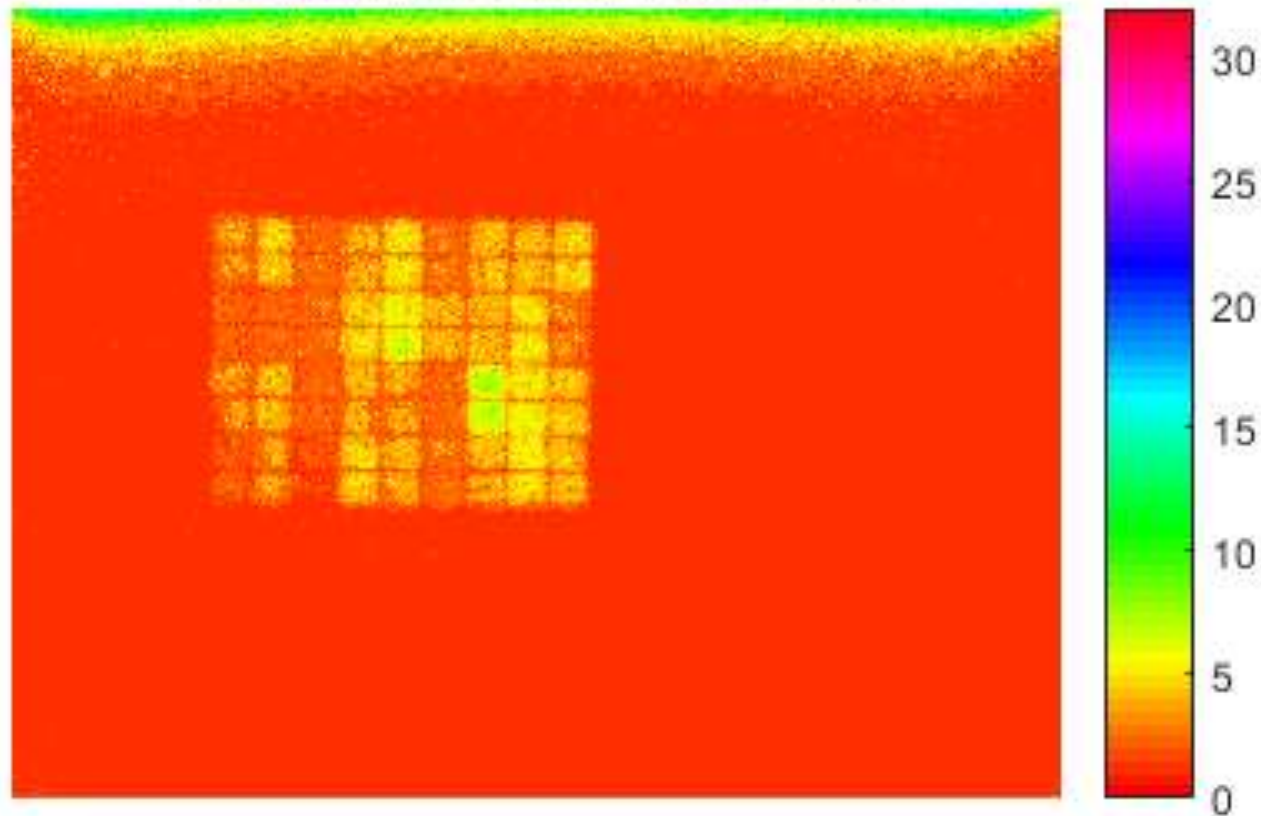
EL 10% de I_{sc} [HSV em escala]





Distribuição Espacial das Resistências

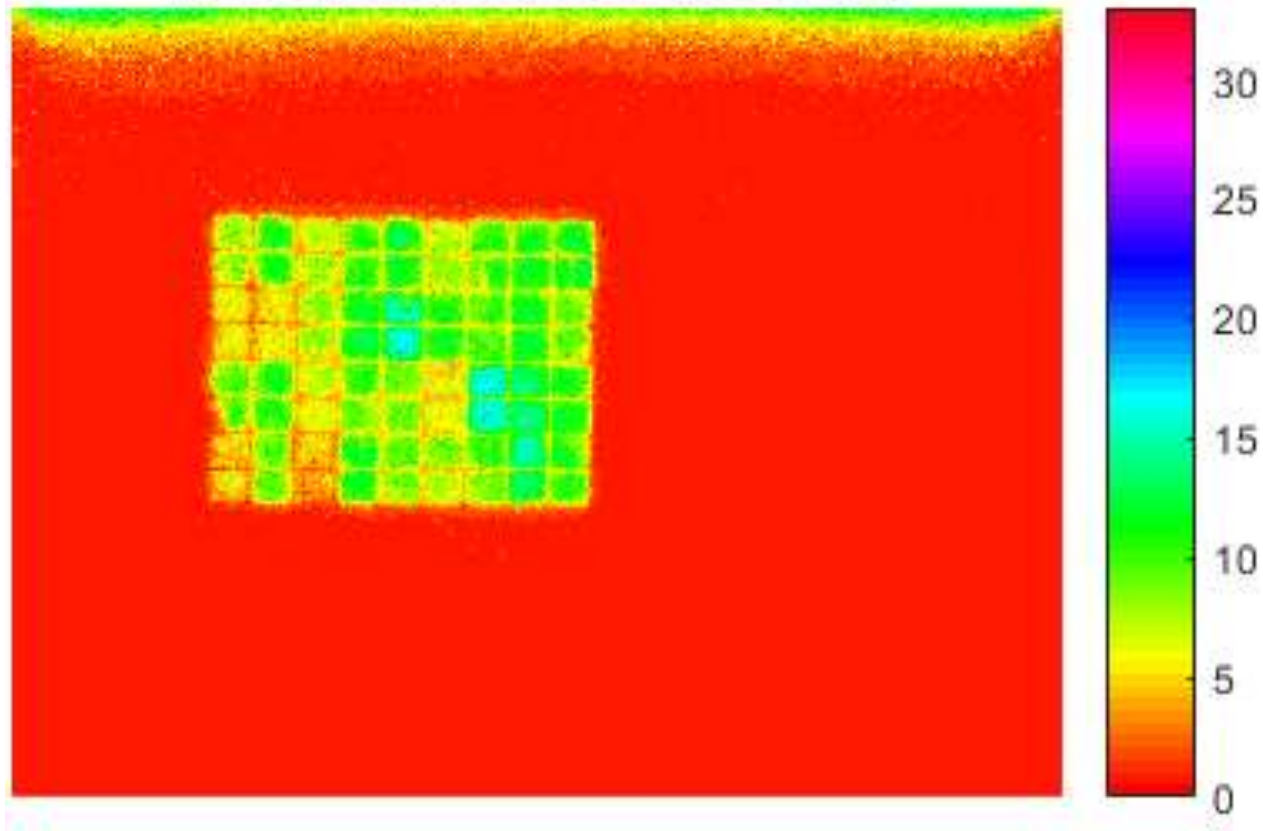
EL 20% de I_{sc} [HSV em escala]





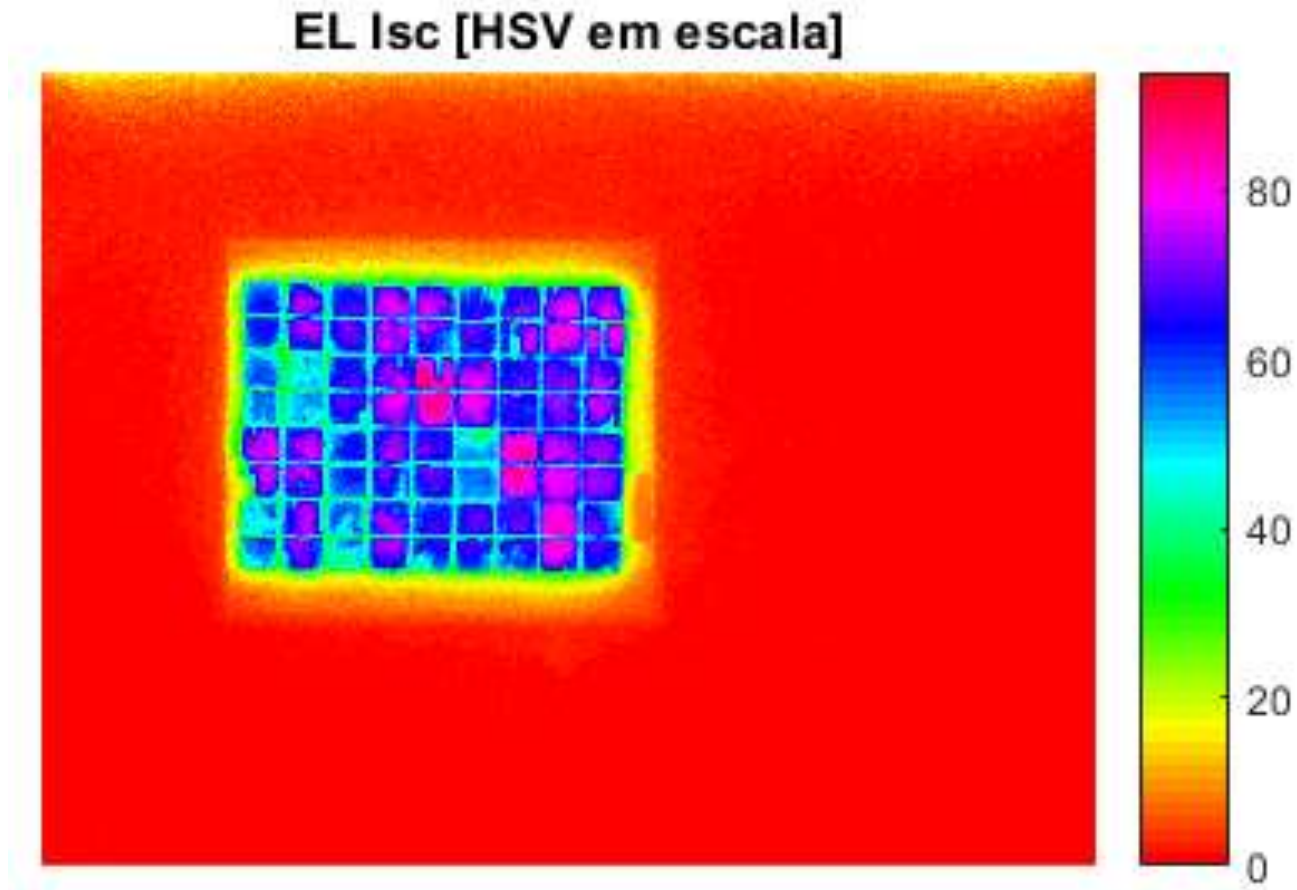
Distribuição Espacial das Resistências

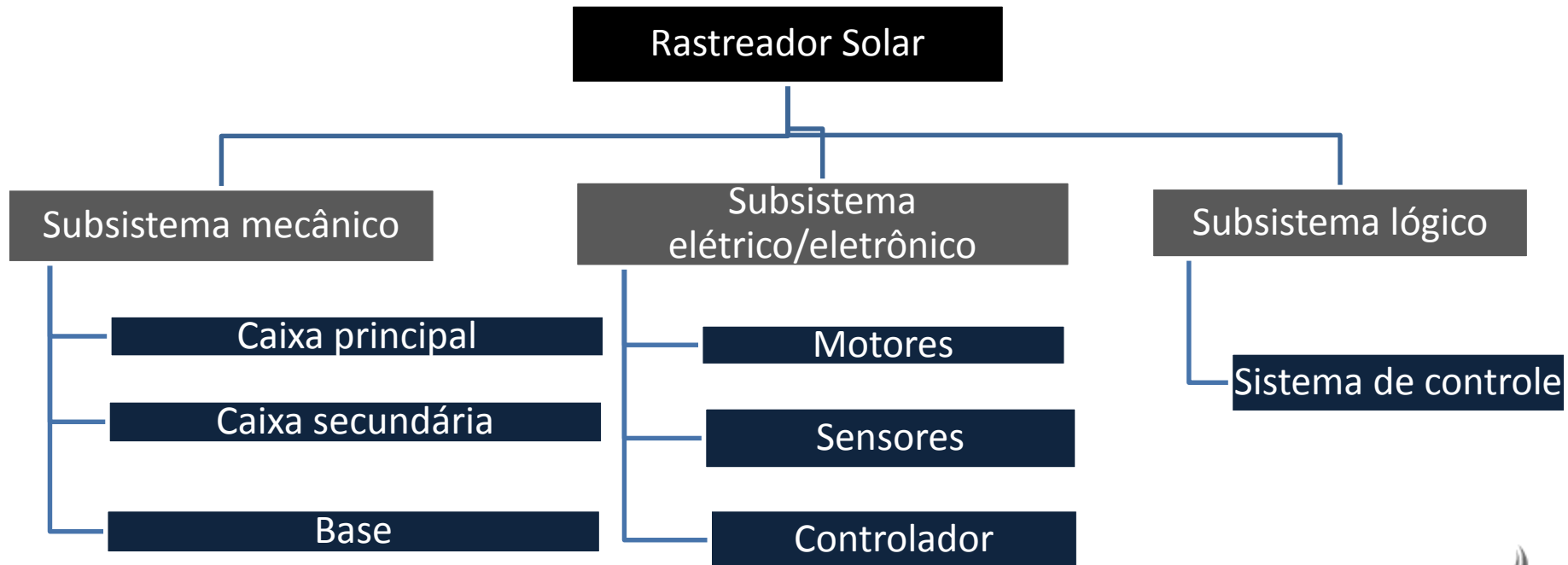
EL 30% de Isc [HSV em escala]





Distribuição Espacial das Resistências





Subsistema elétrico/eletrônico

Motor de passo

• Conceito

Aplicações

Vantagens e
desvantagens



Figura 12: Easy Servo motor (esquerda) e motor de passo comum (direita). Fonte: (KALATEC, 2019)

Subsistema elétrico/eletrônico

Sensores

Acelerômetro/
giroscópio



•Magnetômetro



Figura 13: Acelerômetro MPU6080 (esquerda) e magnetômetro gy-27 (direita).
Fonte: (NEW FROG, 2019)

Subsistema elétrico/eletrônico

Módulos

•SD Card

RTC

•Display



Figura 14: Display TFT 2.4". Fonte: (FLOP, 2015)



Figura 15: RTC DS1307. Fonte: (FLOP, 2015)



Figura 17: SD card Catalex. Fonte: (FLOP, 2015)

Solarimetria e instrumentos de medição.

Pireliômetro

DN5-E Middleton; campo de visão de aproximadamente 4° ; 10s de tempo de resposta pra mensuração de 95% do valor real.

Piranômetro

ER08-SE da Middleton Solar; 0,3s de tempo de resposta para 95% do valor real; 1ª Classe



Figura 17: Pireliômetro (esquerda) e piranômetro (direita) de termopilha diferencial.
Fonte: CRESESB, 2019)

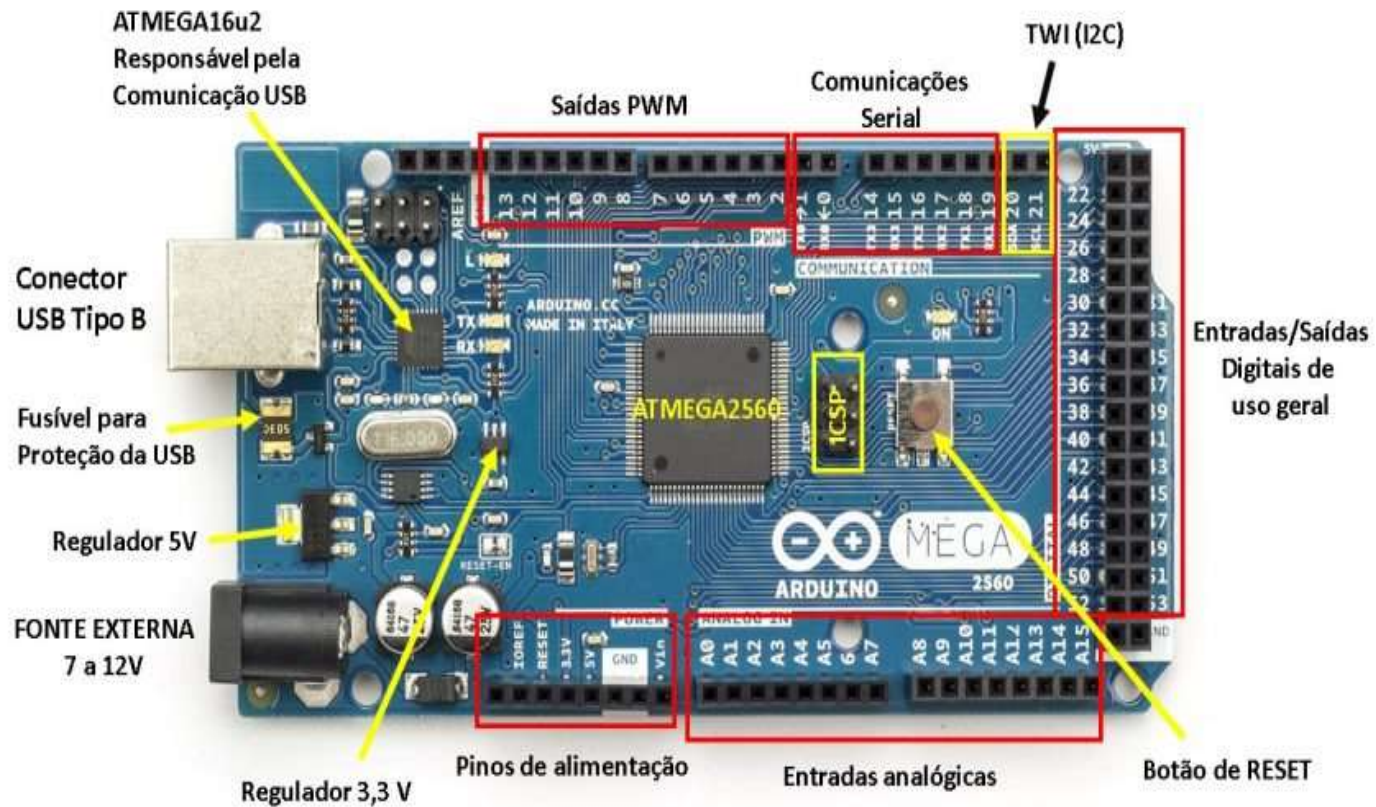


Figura 18: Arduino Mega 2560. Fonte: (EMBARCADOS, 2014)

Estrutura

•Base

Caixa principal

•Caixa secundária

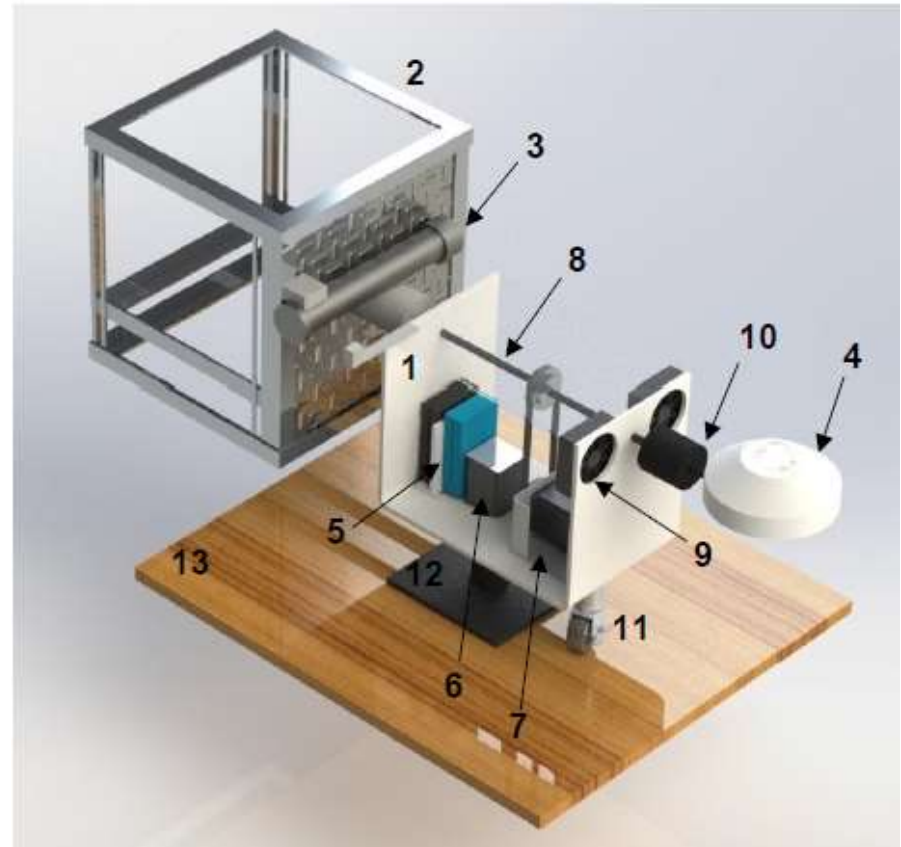


Figura 21: Cad 3D do seguidor. Fonte: Santos, 2019.



Rastreador Montado

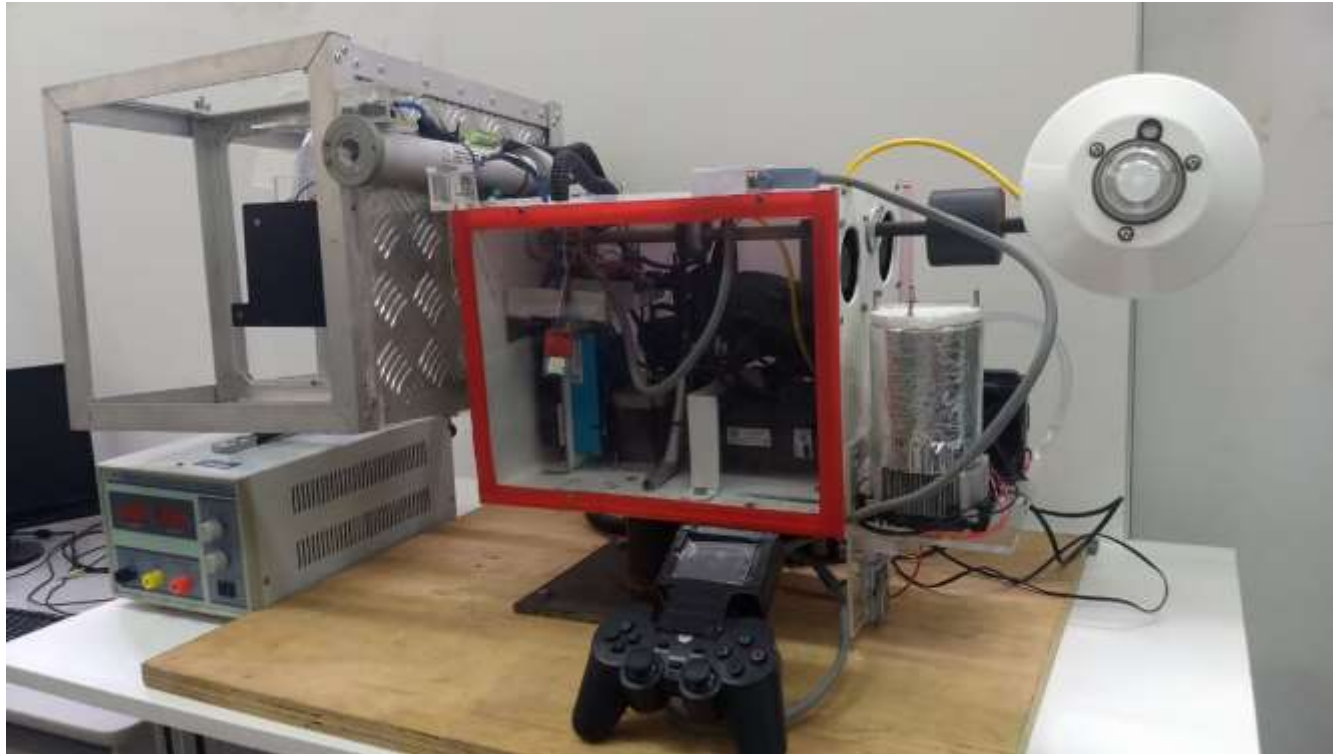


Figura 21: Rastreador solar e sistema de controle de temperatura.



Rastreador Montado

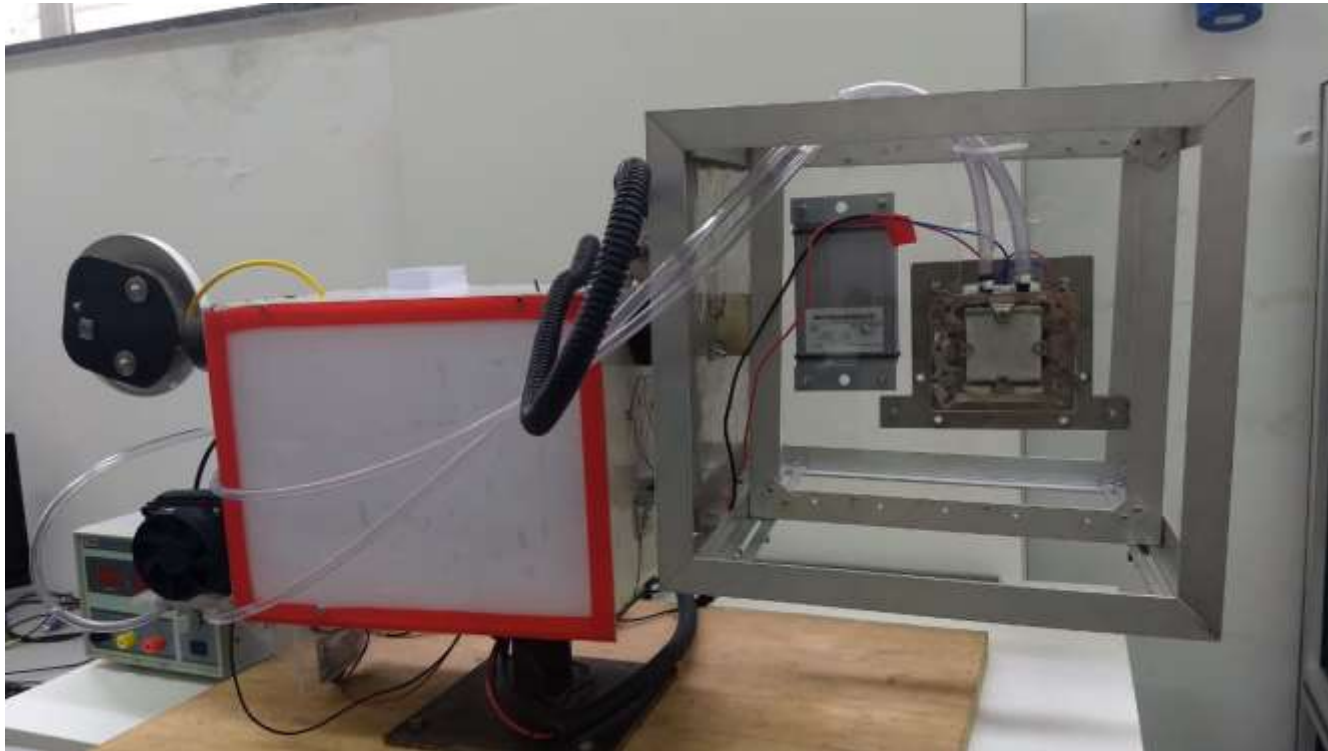


Figura 22: Rastreador solar e sistema de controle de temperatura.



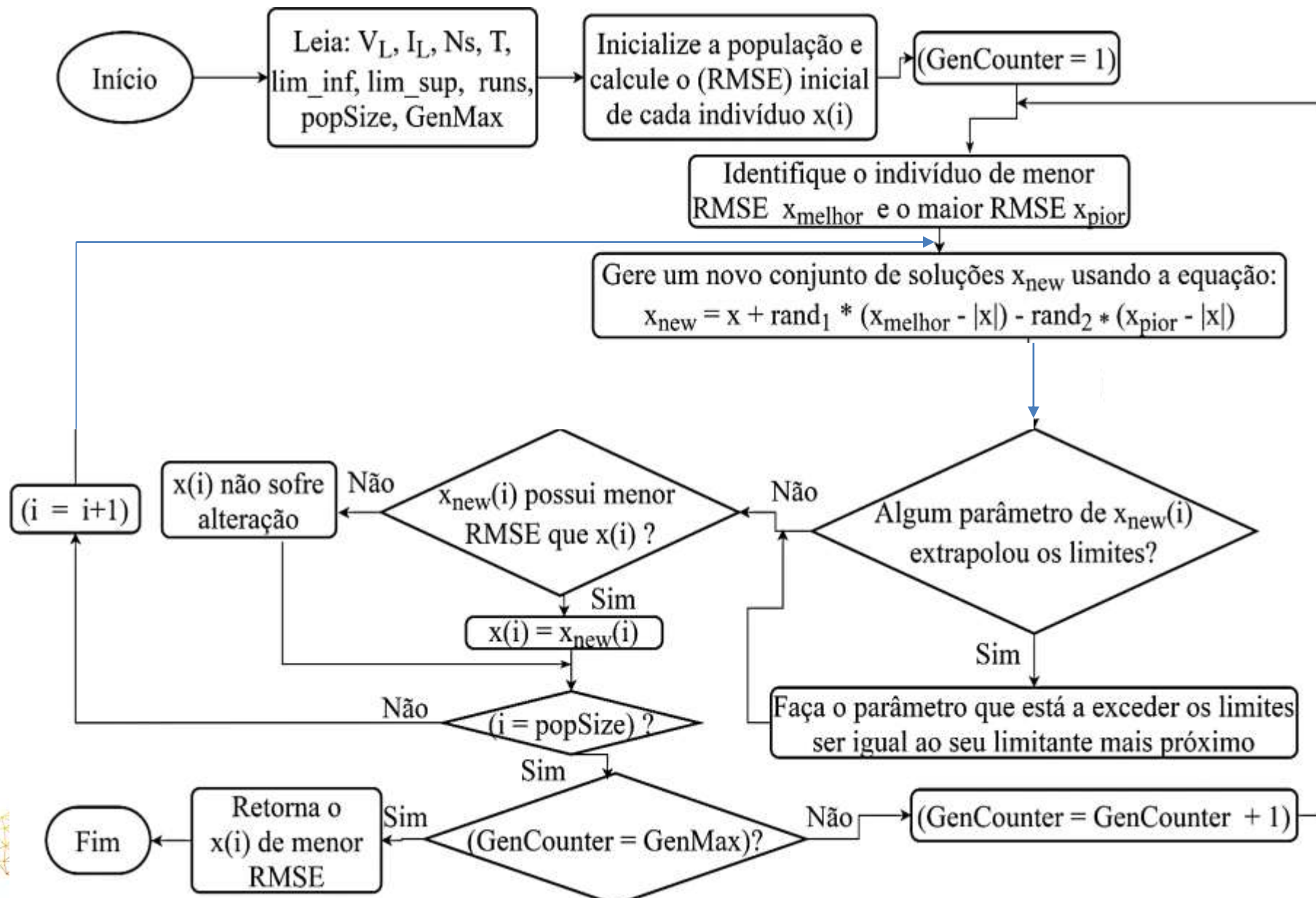


Traçador de Curvas IV



Movavi Video Editor Plus





3.1 Algoritmo meta-heurístico genético baseado em estratégia JAYA (YU *et al.*, 2017):

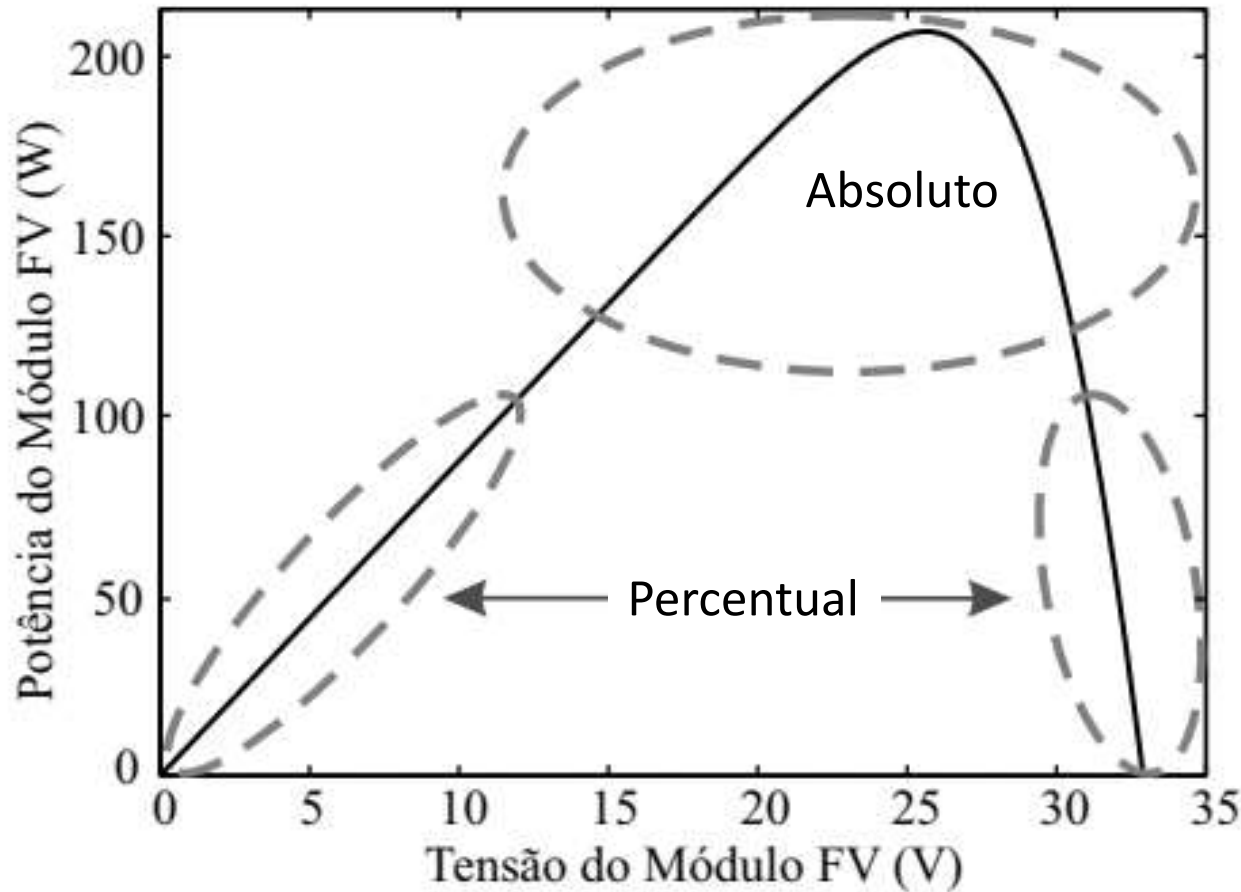
O algoritmo JAYA é um método de otimização estocástico baseado em evolução de população proposto por Venkata Rao (2016).

$$\begin{cases} f_K(V_L, I_L, X) = I_{ph} - I_d \left[\exp\left(\frac{q(V_L + R_s I_L)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_s I_L}{R_{sh}} - I_L \\ x = \{I_{ph}, I_d, R_s, R_{sh}, n\} \end{cases}$$

$$RMSE(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^N f_K(V_L, I_L, x)^2}$$

$$x_{new} = xi,j + rand_1 * (x_{melhor,j} - |xi,j|) - rand_2 * (x_{pior,j} - |xi,j|)$$





Fonte: Adaptada de Silva et al. (2016).



6. Resultados e Discussões

6.1.6 Etapa 6

Parâmetros no STC a partir da norma IEC-60891 (2009). Curvas na faixa de 800W/m^2 a 1200W/m^2 ($\pm 20\%$ da condição de STC).

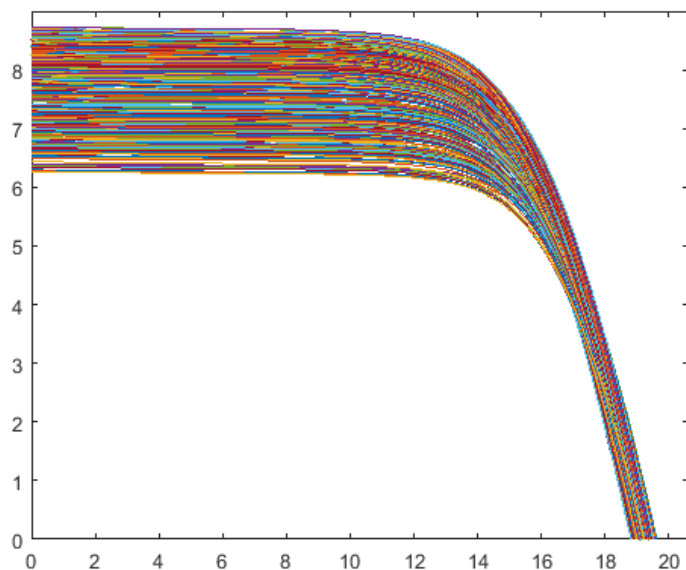


Figura 13 – Curvas de entrada para serem transladas a condição de STC.

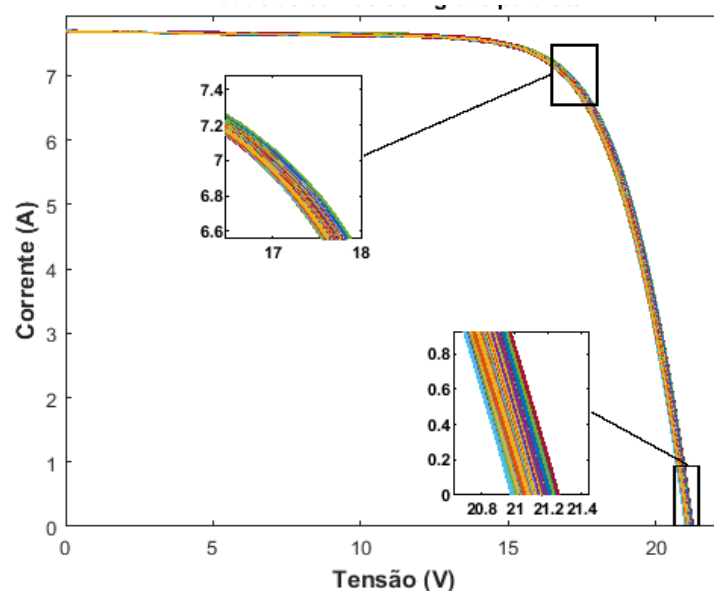


Figura 14 – Resultado da transladação por meio da norma IEC-60891 (2009) das curvas selecionadas para a condição de referência, STC.

6. Resultados e Discussões

6.1.6 Etapa 6

Parâmetros no STC obtidos a partir da norma IEC-60891 (2009), transladando a curva que mais se aproxima do STC.

Tabela 6.2 - Parâmetros elétricos e valores dos principais pontos de operação do módulo.

Parâmetros obtidos no STC ($T_c = 25^\circ\text{C}$, $G = 1000\text{W/m}^2$ e $A.M = 1.5$)	
V_{oc0}	21,2535 (V)
I_{sc0}	7,7407 (A)
V_{mpp0}	16,9021 (V)
I_{mpp0}	7,0667 (A)
P_{mpp0}	119,4421 (W)
I_{ph0}	7,7633 (A)
I_{d0}	0,00869 (μA)
R_{s0}	0,1977 (Ω)
R_{sh0}	67,3372 (Ω)
n_0	1,1172 (Adimensional)
FF_0	0,7260 (Adimensional)

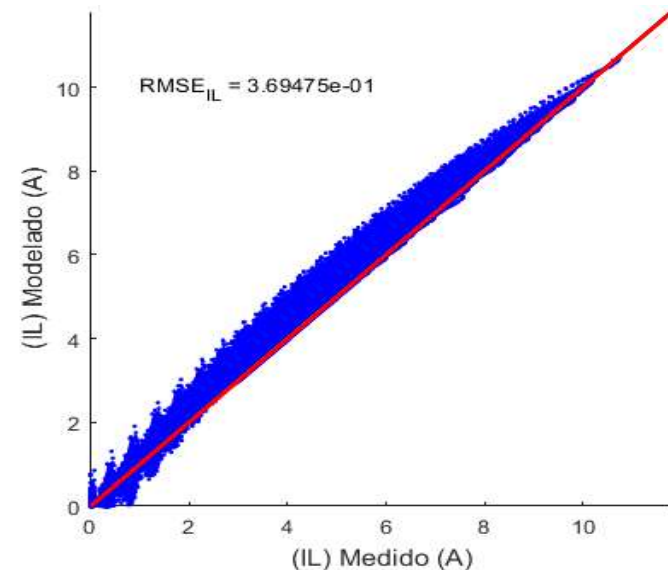
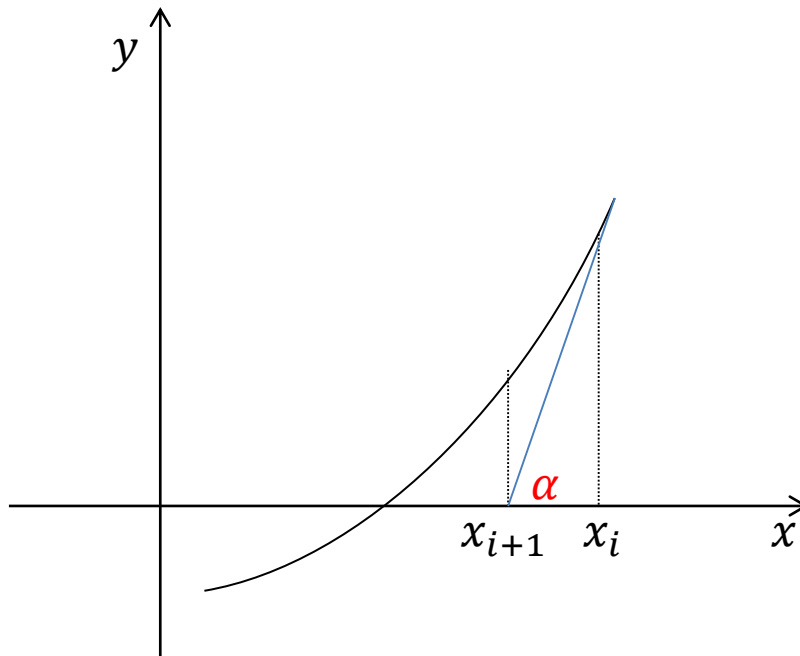


Figura 15 - Corrente (I_L) medida e estimada, e RMSE total para modelo.



Método de Newton-Raphson

- Interpretação geométrica



$$\operatorname{tg} \alpha = f(x_i) / (x_i - x_{i+1})$$

$$f'(x_i) = f(x_i) / (x_i - x_{i+1})$$

$$x_i - x_{i+1} = f(x_i) / f'(x_i)$$

$$x_{i+1} = x_i - f(x_i) / f'(x_i)$$





Método de Newton-Raphson

- Exercício para sala:
- Dada a equação $f(x) = x^3 - 9x + 3$, encontre a raiz dentro do intervalo $[0,1]$. Execute o método até que $|x_{i+1} - x_i| < 10^{-2}$
 - $f'(x) = 3x^2 - 9$
 - $x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} = x_k - \frac{(x_k^3 - 9x_k + 3)}{(3x_k^2 - 9)}$
 - Assim:
 - $x_1 = 0,5 - \frac{(0,5^3 - 9 \cdot 0,5 + 3)}{3 \cdot 0,5^2 - 9} = 0.3333$
 - $x_2 = x_1 - \frac{(x_1^3 - 9x_1 + 3)}{(3x_1^2 - 9)} = 0.3376$
 - $f(x_2) \cong 1,834 \cdot 10^{-5}$ e já pode ser considerada uma precisão aceitável.
 - Solução: $x' = x_2 = 0.3376$

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$$



5.2.1 Modelos descritos para os parâmetros (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_d e n)

Tabela 5.3 – Modelo(s) para cada um dos parâmetros (I_{ph} , I_d , E_g , n , R_s , R_{sh} , α e β) a serem executadas integrada com a equação do modelo de um diodo.

Parâmetros	Nº do modelo	Equação	Autor (es)
(I_{ph})	1	$I_{ph} = I_{ph}(G, T_c) = \frac{G}{G_0} [I_{ph0} + \alpha_{IsC} (T_c - T_0)]$	Hansen (2015b)
	1	$I_d = I_d(T_c) = I_{d0} \left[\frac{T_c}{T_0} \right]^3 e^{\left[\frac{1}{k} \left(\frac{E_g(T_0)}{T_0} - \frac{E_g(T_c)}{T_c} \right) \right]}$	Hansen (2015b)
	2	$I_d = I_d(T_c) = I_{d0} \left[\frac{T_c}{T_0} \right]^{\frac{3}{n}} e^{\left[\frac{q}{n k} \left(\frac{E_g(T_0)}{T_0} - \frac{E_g(T_c)}{T_c} \right) \right]}$	Junior (2018)
	3	$I_d = I_d(T_c) = I_{d0} \left[\frac{T_c}{T_0} \right]^{\frac{3}{n}} e^{\left[\frac{-q E_g}{n k} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_0} \right) \right]}$	Ramos (2017)
	4	$I_d = I_d(T_c) = I_{d0} \left[\frac{T_c}{T_0} \right]^3 e^{\left[\frac{q E_g}{n k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_c} \right) \right]}$	Ramos (2017)
	5	$I_d = I_d(T_c) = I_{d0} \left[\frac{T_0}{T_c} \right]^3 e^{\left[\frac{q E_g}{n k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_c} \right) \right]}$	Ramos (2017)
	6	$I_d = I_d(T_c) = I_{d0} \left[\frac{T_c}{T_0} \right]^3 e^{\left[\frac{N_s E_g}{n_0} \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right) \right]}$	Ramos (2017)
(I_d)			



5.2.1 Modelos descritos para os parâmetros (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_d e n)

Continuação da Tabela 5.3 – Modelo(s) para cada um dos parâmetros (I_{ph} , I_d , E_g , n , R_s , R_{sh} , α e β) a serem executadas integrada com a equação do modelo de um diodo.

Parâmetros	Nº do modelo	Equação	Autor (es)
(E_g)	1	1,12eV	Mertens (2014)
	2	$(E_g) = (E_{g0})$ Fixo calculado pelo algoritmo proposto	Próprio autor
	3	$E_g(T_C) = E_{g0} (1 - 0.0002677(T_C - T_0))$	Hansen (2015b)
	4	$E_g(T_C) = E_g(0) - \frac{aT^2}{T+b}$, com $(E_{g(0)})$ fixo	Junior (2018)
	5	$E_g(T_C) = E_g(0) - \frac{aT^2}{T+b}$, com $(E_{g(0)})$ calculado pelo algoritmo proposto	Próprio autor



5.2.1 Modelos descritos para os parâmetros (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_d e n)

Continuação da Tabela 5.3 – Modelo(s) para cada um dos parâmetros (I_{ph} , I_d , E_g , n , R_s , R_{sh} , α e β) a serem executadas integrada com a equação do modelo de um diodo.

Parâmetros	Nº do modelo	Equação	Autor (es)
(n)	1	$n = n_0$	Hansen (2015b)
	2	$n(T_C) = n_0 + nT (T_C - T_0)$	Hansen (2015c)
	3	$n(T_C) = n_0 \left(\frac{T_C}{T_0} \right)$	Bai <i>et al.</i> (2014)
	4	(n) Fixo calculado pelo algoritmo proposto	Próprio autor
(R _s)	1	$R_s = R_{s0}$	Hansen (2015b)
	2	$R_s(T_C) = R_{s0} + (T_C * R_s T)$	Sabry <i>et al.</i> (2007)
	3	$R_s(G, T_C) = R_{s0} \left(\frac{T_C}{T_0} \right) \left[1 - \beta \ln \left(\frac{G}{G_0} \right) \right]$	Tossa <i>et al.</i> (2014)
	4	$R_s(T_C) = R_{s0} \left(\frac{T_C}{T_0} \right)$	Et-Torabi <i>et al.</i> (2018)

5.2.1 Modelos descritos para os parâmetros (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_d e n)

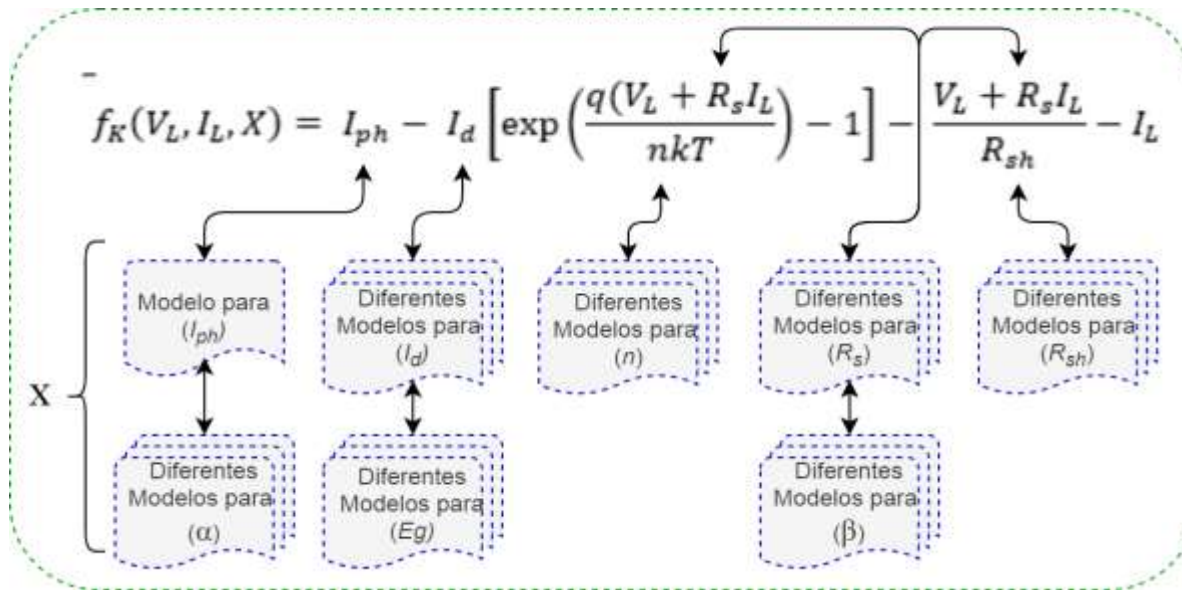
Continuação da Tabela 5.3 – Modelo(s) para cada um dos parâmetros (I_{ph} , I_d , E_g , n , R_s , R_{sh} , α e β) a serem executadas integrada com a equação do modelo de um diodo.

Parâmetros	Nº do modelo	Equação	Autor (es)
(R_{sh})	1	$R_{sh}(T_C) = R_{sh0} + (T_C * R_{sh}T)$	Sabry <i>et al.</i> (2007)
	2	$R_{sh}(G) = R_{sh0} \left(\frac{G_0}{G} \right)$	Hansen (2015b)
	3	(Rsh) Fixo calculado pelo algoritmo proposto	Próprio autor
(α)	1	Calculado através da regressão robusta	Hansen (2015b)
	2	(α) Fixo calculado pelo algoritmo proposto	Próprio autor
	3	(α) Obtido do <i>Datasheet</i>	(Mitsubishi, 2020)
(β)	1	Calculado através da regressão robusta	Hansen (2015b)
	2	(β) Obtido do <i>Datasheet</i>	(Mitsubishi, 2020)

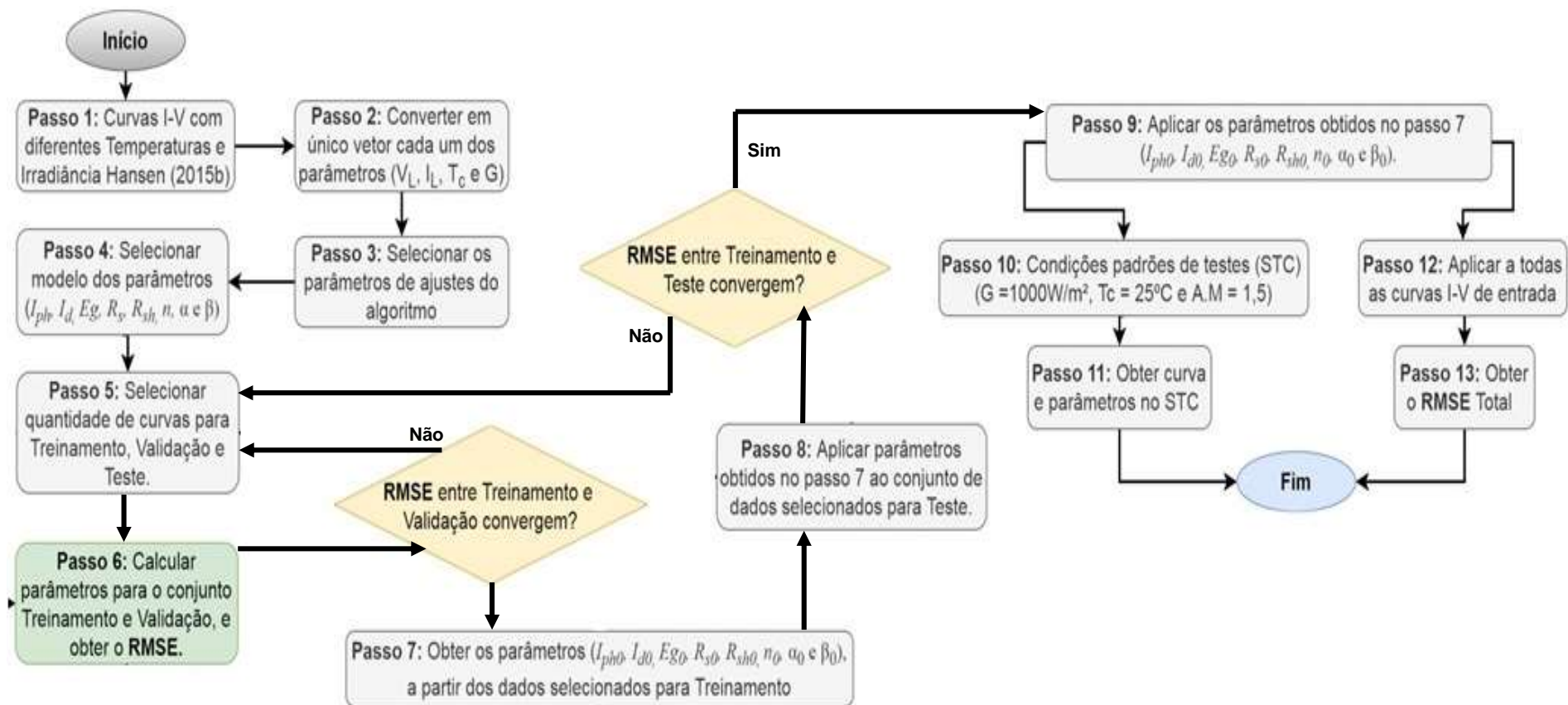


5.2.2 Método proposto de algoritmo dinâmico meta heurístico baseado em estratégia JAYA para extração dos parâmetros elétricos do modelo de um diodo.

Função objetivo $f_k(V_L, I_L, x)$, Equação do RMSE para minimizar (f_k)



$$RMSE(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^N f_K(V_L, I_L, x)^2}$$





Agradecimentos:



HIGRA

FAPITEC/SE

Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação
Tecnológica do Estado de Sergipe



Finep
INOVAÇÃO E PESQUISA



DAAD

Alexander von Humboldt
Stiftung/Foundation

Deutscher Akademischer Austausch Dienst
German Academic Exchange Service



CAPES



UFS

Obrigado pela Atenção!

Dr. Eng. Douglas Bressan Riffel <dougbr@academico.ufs.br>

Grupo de Pesquisa em Conversão de Energia e Termodinâmica Aplicada

Universidade Federal de Sergipe

Tel: +55 (79) 3194-6310

<http://energia.ufs.br/>

