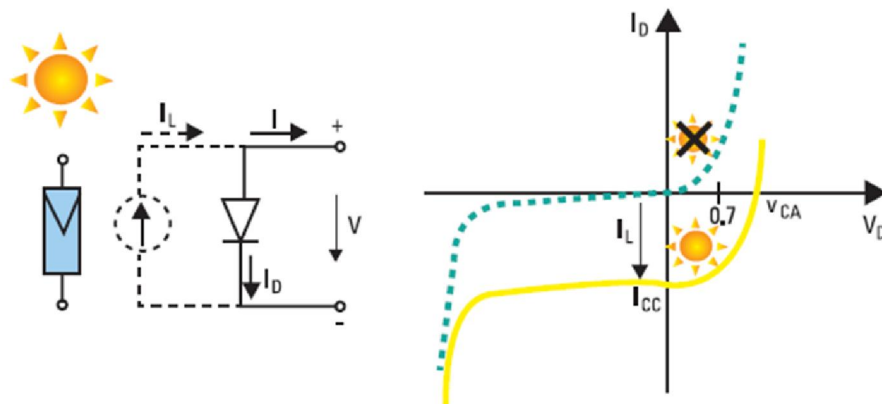


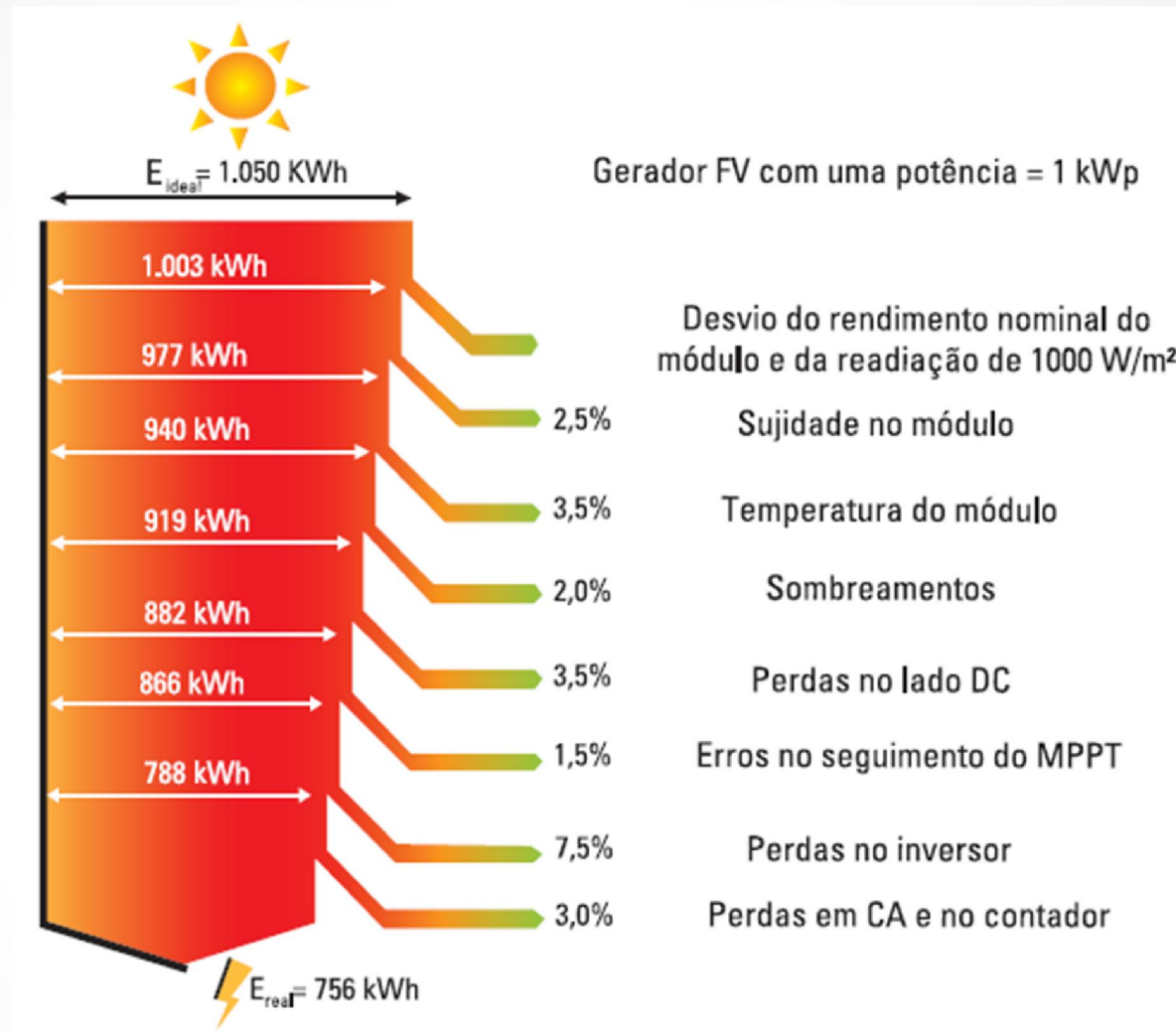
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes

Universidade Federal do Tocantins



Capítulo 2 – Modelagem matemática

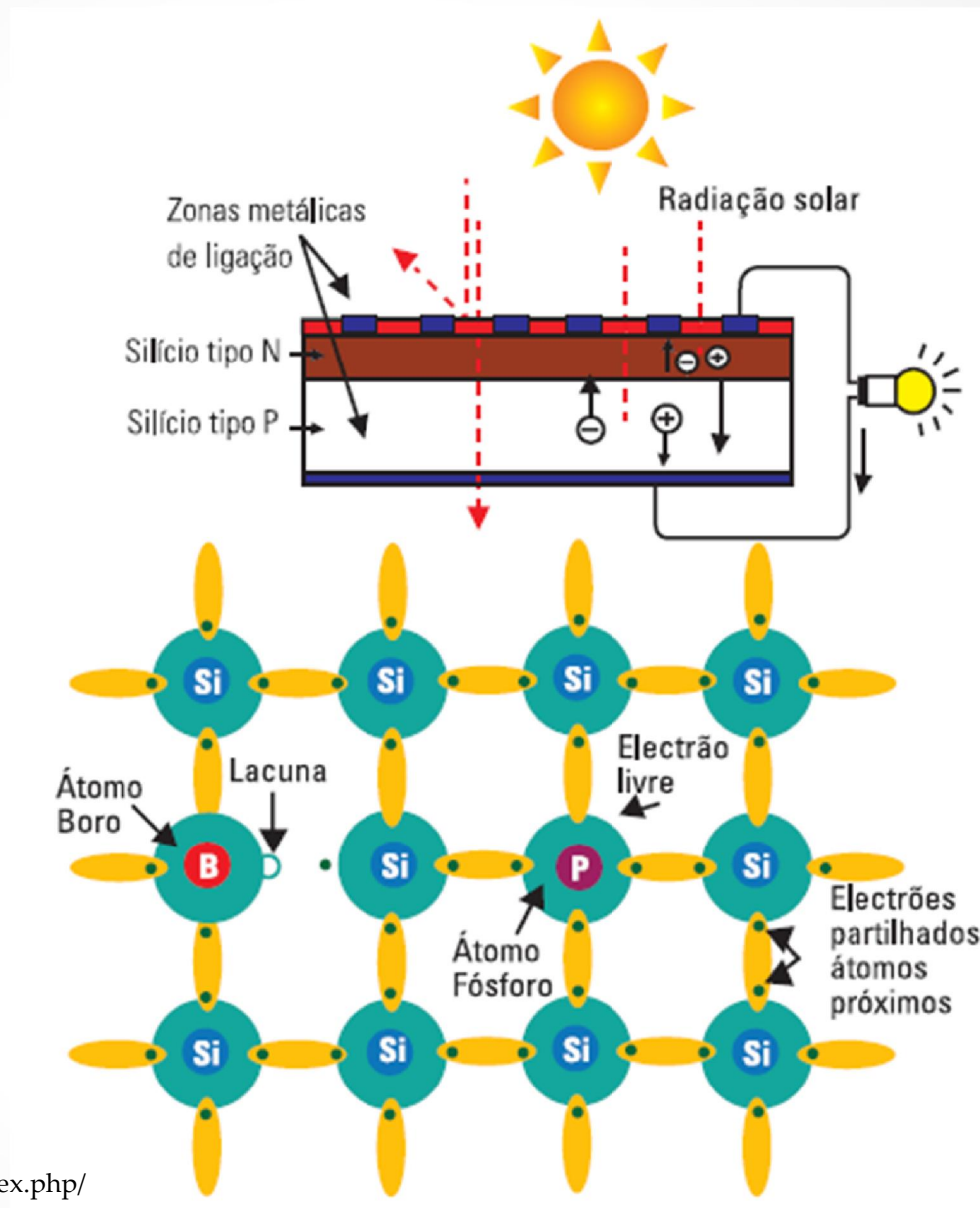


Fonte: "Instalaciones Solares Fotovoltaicas", Miguel Moro Vallina, Paraninfo

**Efeito Fotoelétrico
(Hertz – 1887)**

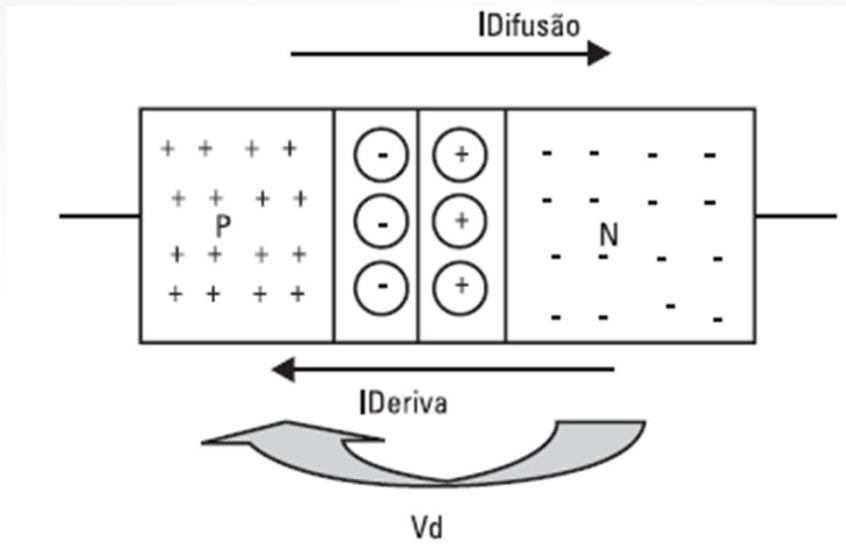


Efeito Fotovoltaico

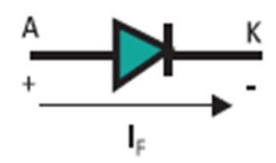


Fonte: <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/271/202/>

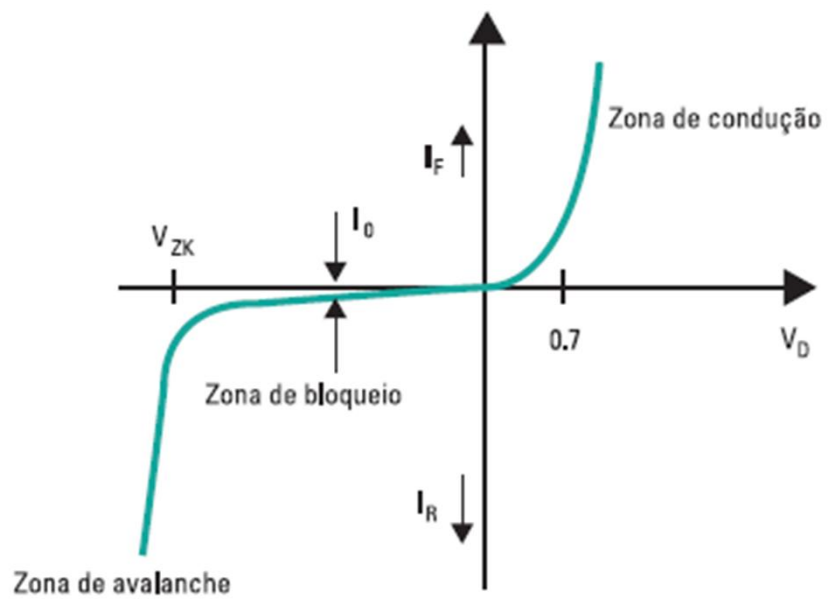
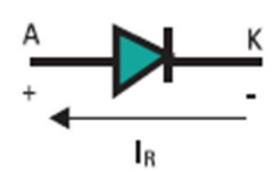
● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



Polarização directa

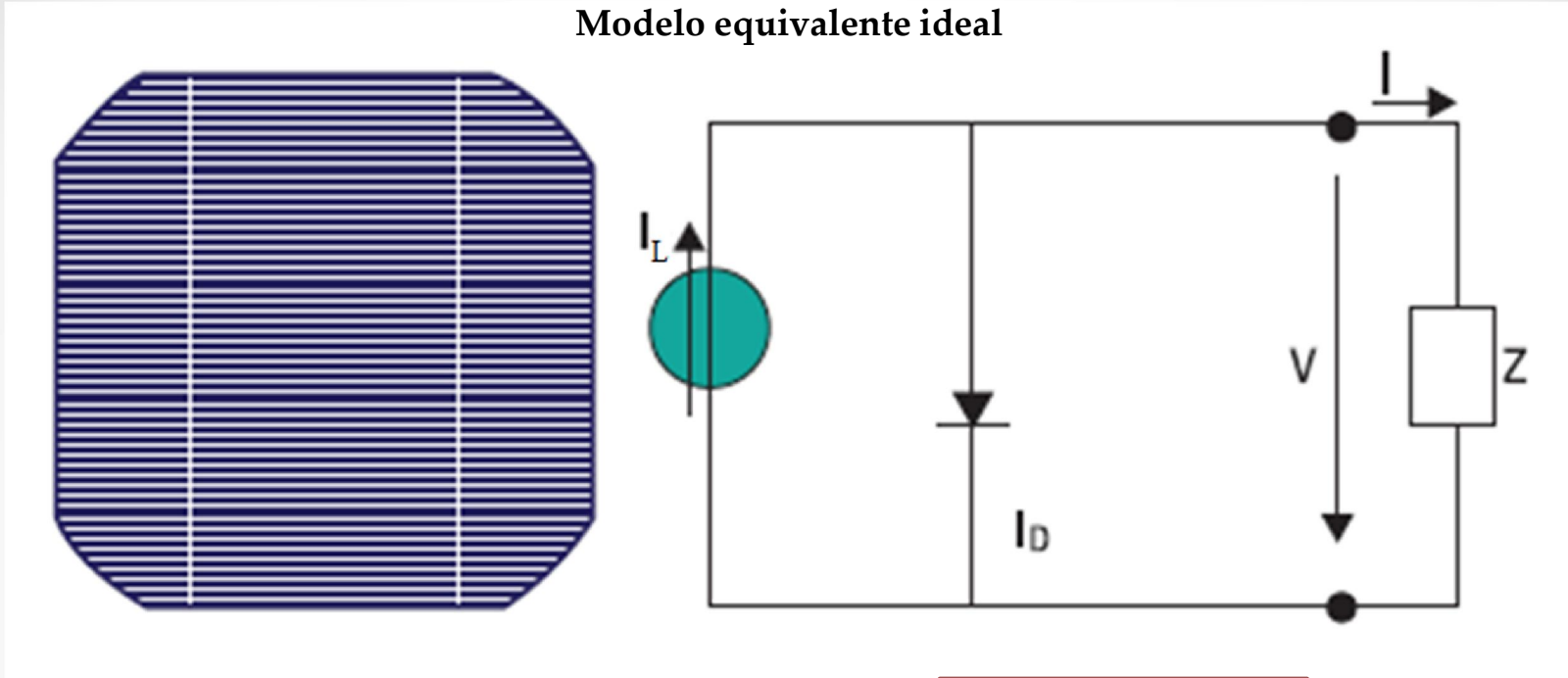


Polarização inversa



Fonte: http://www.eletronica24h.com.br/cursoeletronica/cursoEN1/aulas/images/Aula02_03a.gif

Célula fotovoltaica Modelo equivalente ideal



$$I = I_L - I_D$$

$$I_D = I_0 e^{\frac{V}{mV_t}}$$

$$V_t = \frac{kT}{e} \cong 26mV$$

$$I = I_L - I_0 e^{\frac{eV}{mkT}}$$

$$e = 1,602 * 10^{-19}C$$

$$k = 1,381 * 10^{-23}J/K$$

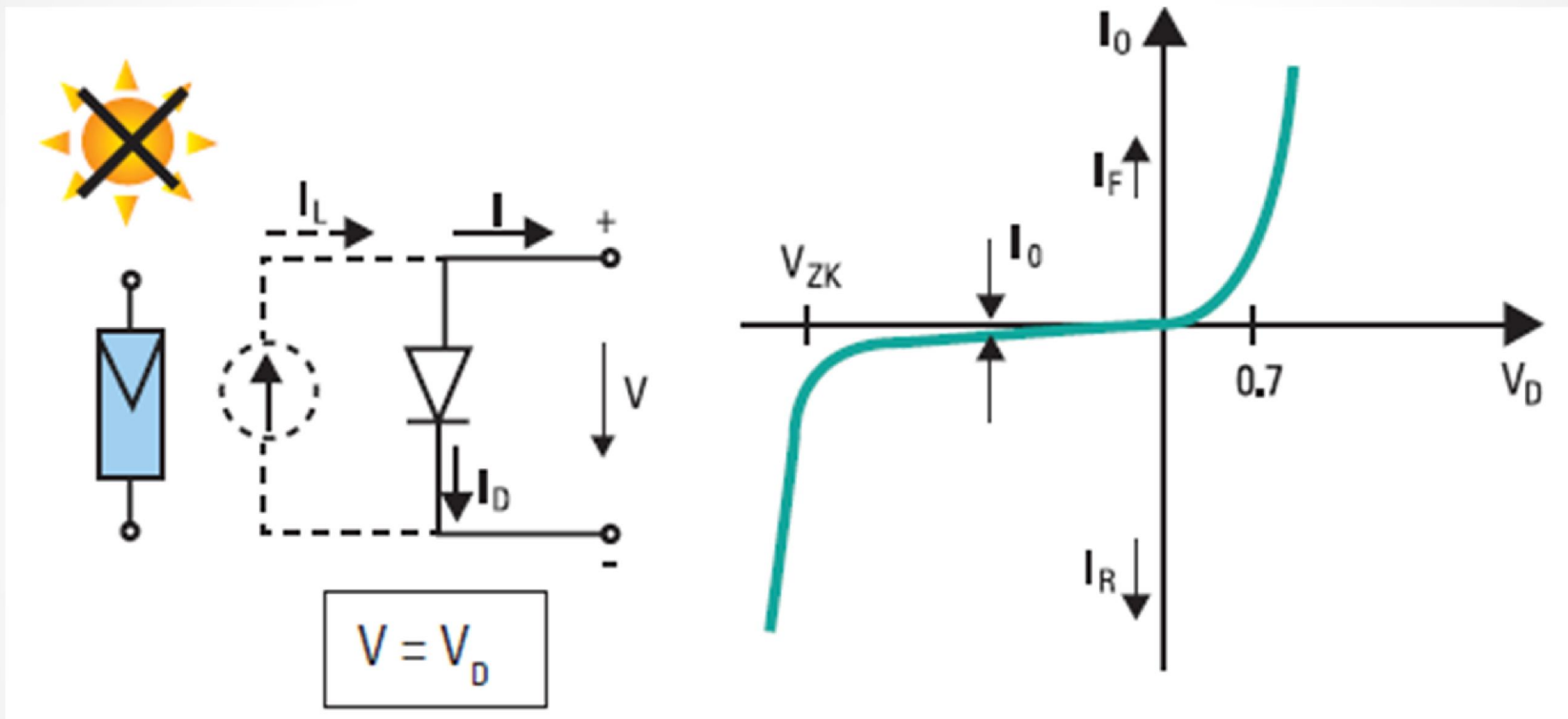
$$T = \left[T_A + \frac{H_i}{800} (T_{UC} - 20) \right] + 273,15$$

Fonte: "Introdução à Energia Fotovoltaica", Rui M.G. Castro

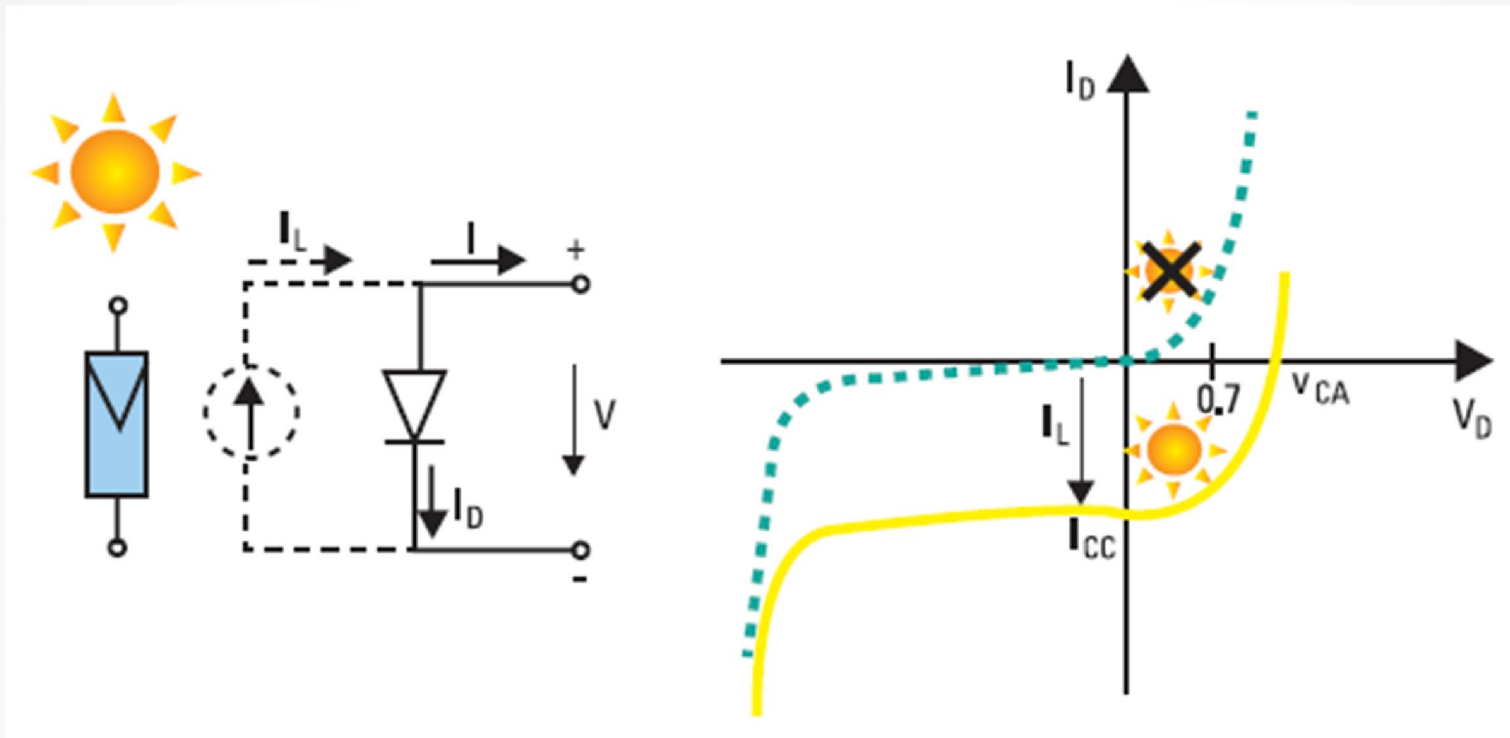
● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes

"É medida quando a célula está submetida a circuito aberto, temperatura ambiente de 20°C, irradiância de 800W/m² e velocidade do vento de 1m/s."

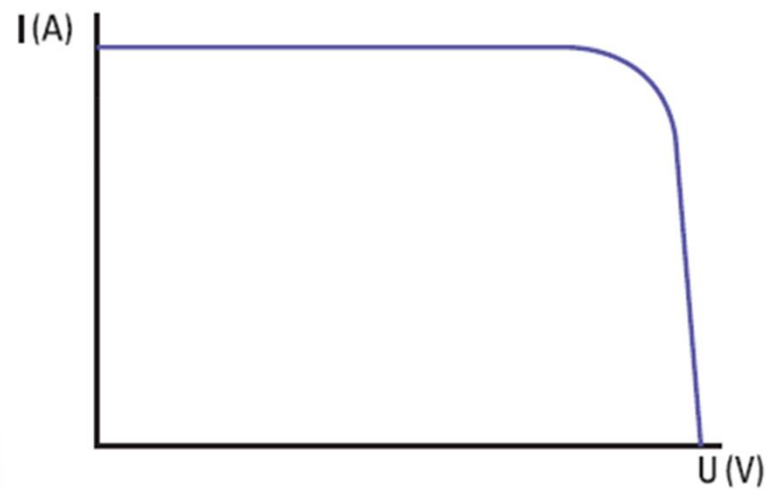
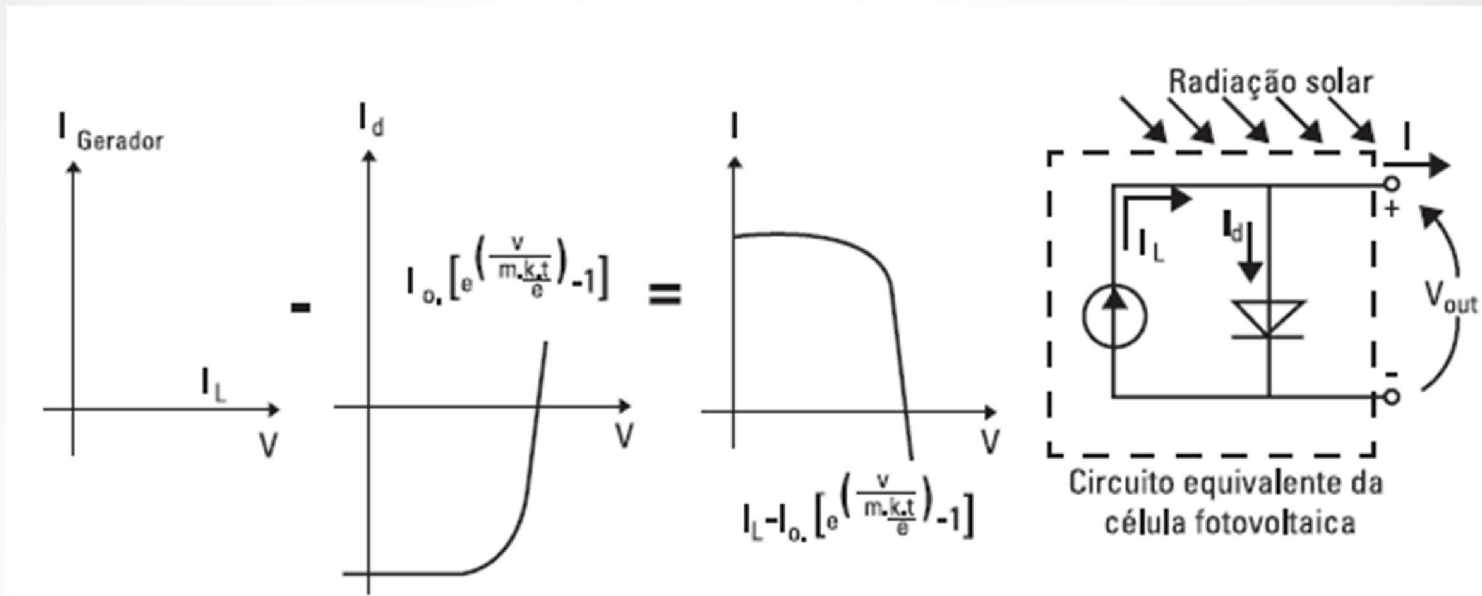
●



Fonte: FER - Fontes de Energia Renováveis.
 "Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projecto e
 Instalação, Volume III". Projecto parcialmente financiado pela
 Comissão Europeia, designadamente através do programa
 ALTENER, 2004.

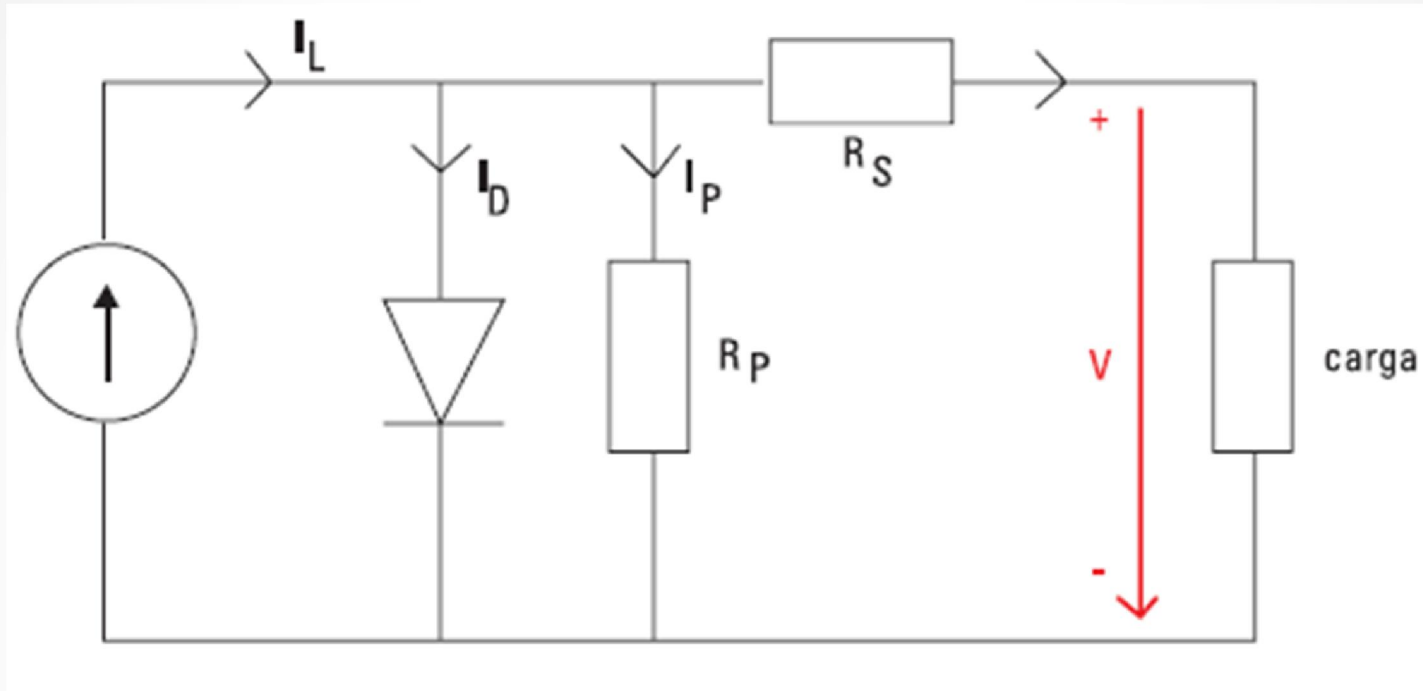


Fonte: FER - Fontes de Energia Renováveis.
 "Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projecto e
 Instalação, Volume III". Projecto parcialmente financiado pela
 Comissão Europeia, designadamente através do programa
 ALTENER, 2004.



Fonte: "Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas", Almir Ghensev

Célula fotovoltaica Modelo equivalente real

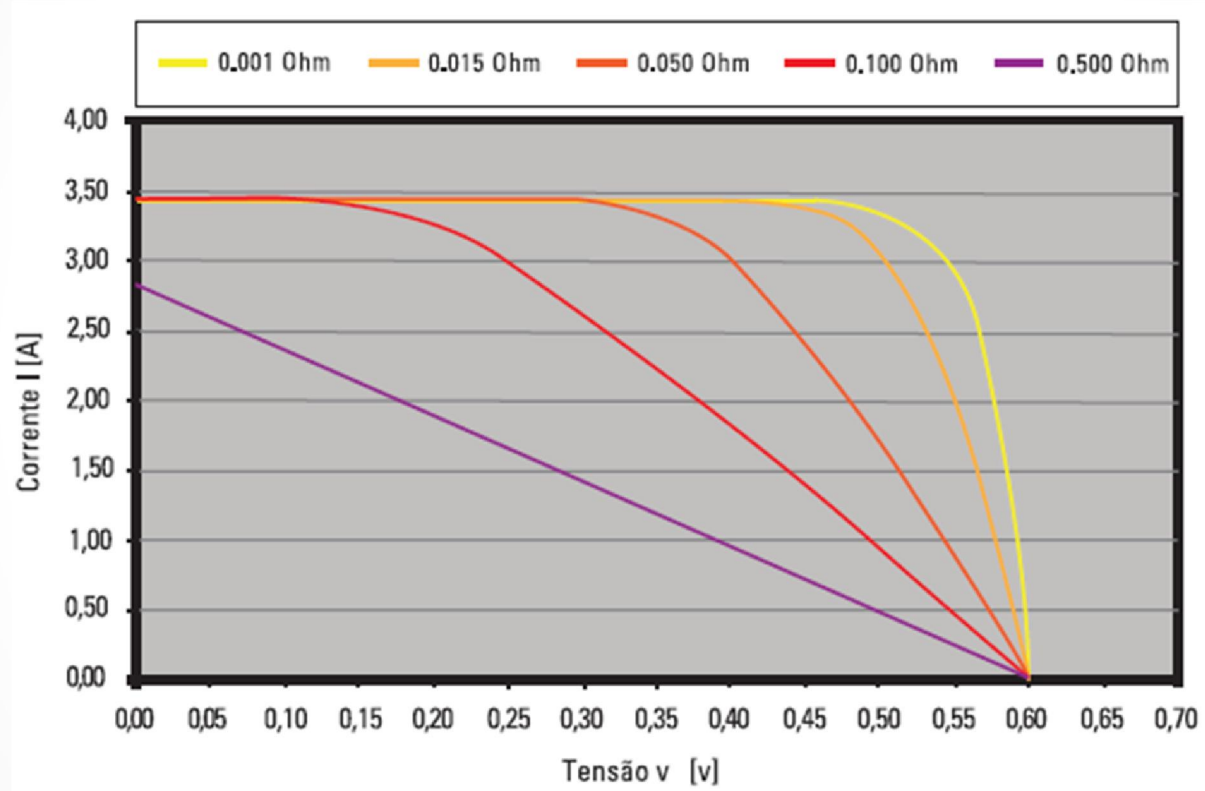


$$I = I_L - I_0 e^{\frac{eV_D}{mkT}} - I_P$$

$$I = I_L - I_0 e^{\frac{eV_D}{mkT}} - \frac{V + IR_S}{R_P}$$

Fonte: "Laboratórios de Energia Solar Fotovoltaica", Manuel Oliveira e Filipe Pereira, Publindústria

Influência da resistência em série na célula fotovoltaica

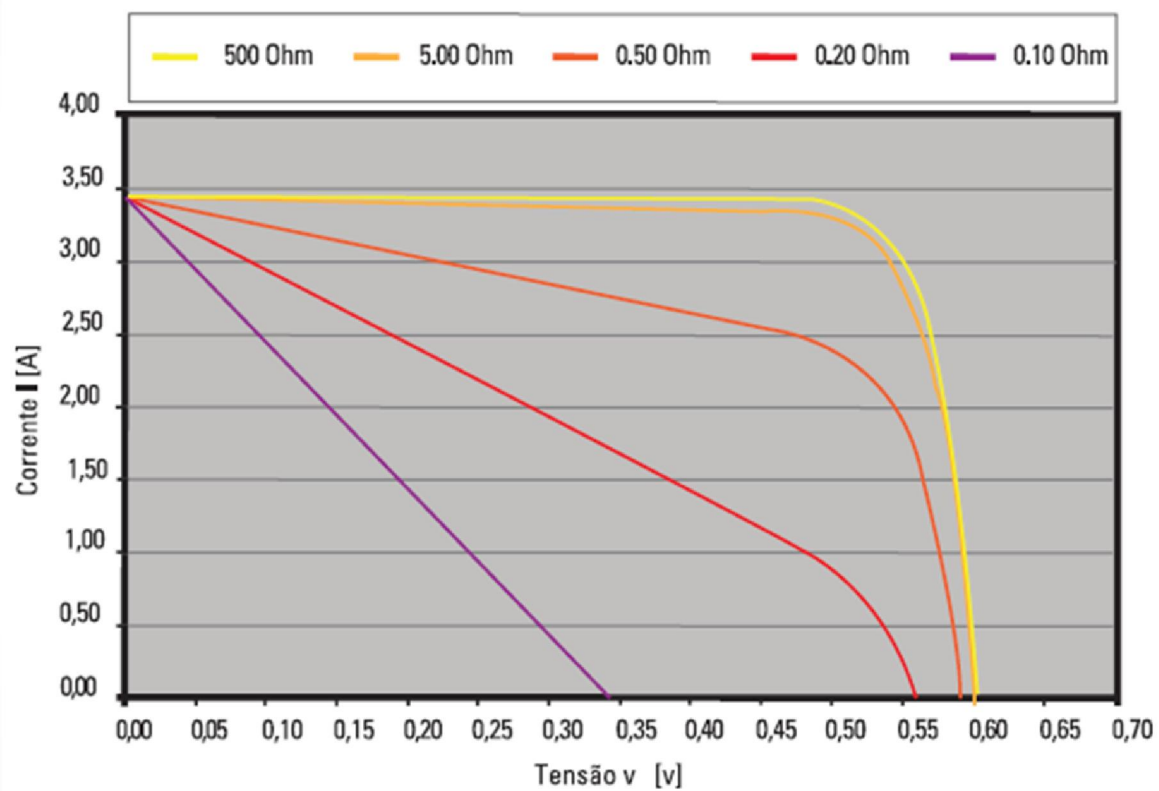


Fonte: "Laboratórios de Energia Solar Fotovoltaica", Manuel Oliveira e Filipe Pereira, Publindústria

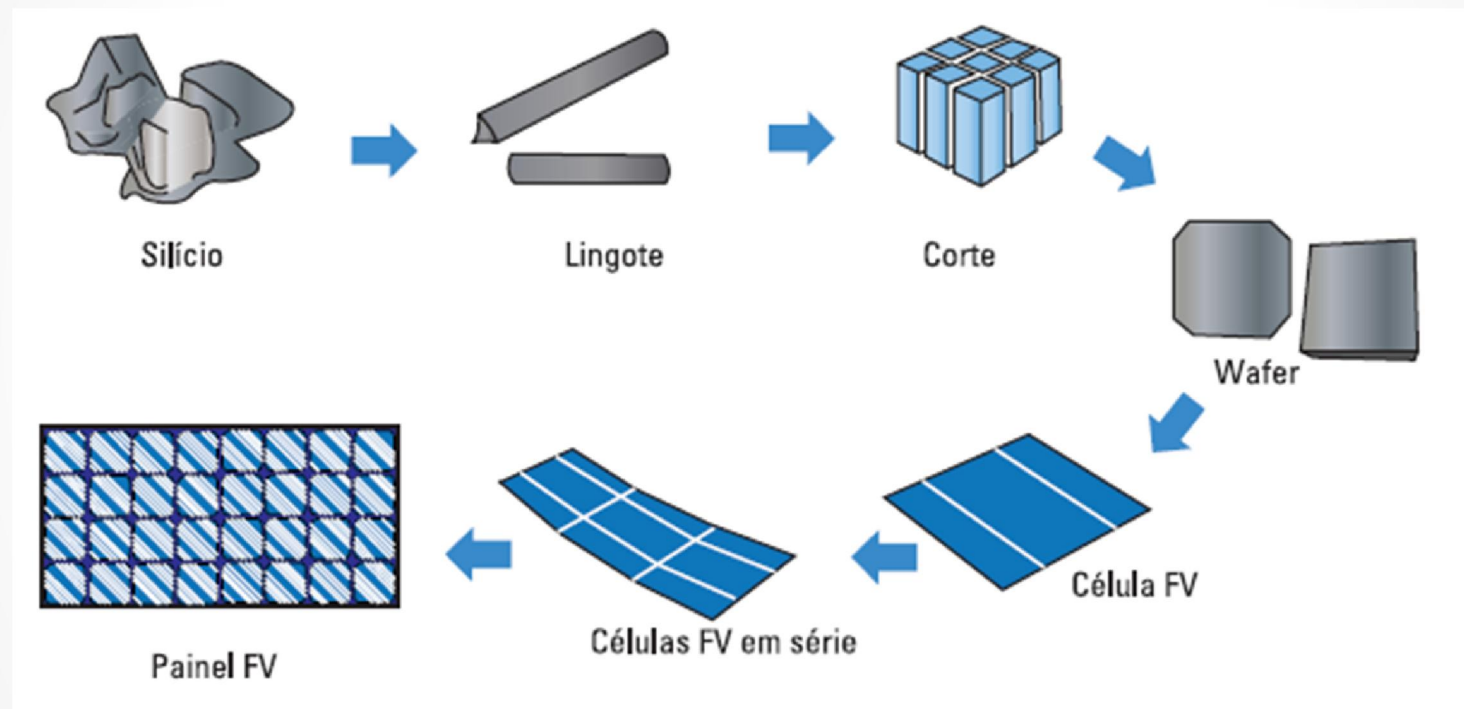
● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes

●

Influência da resistência em paralelo na célula fotovoltaica

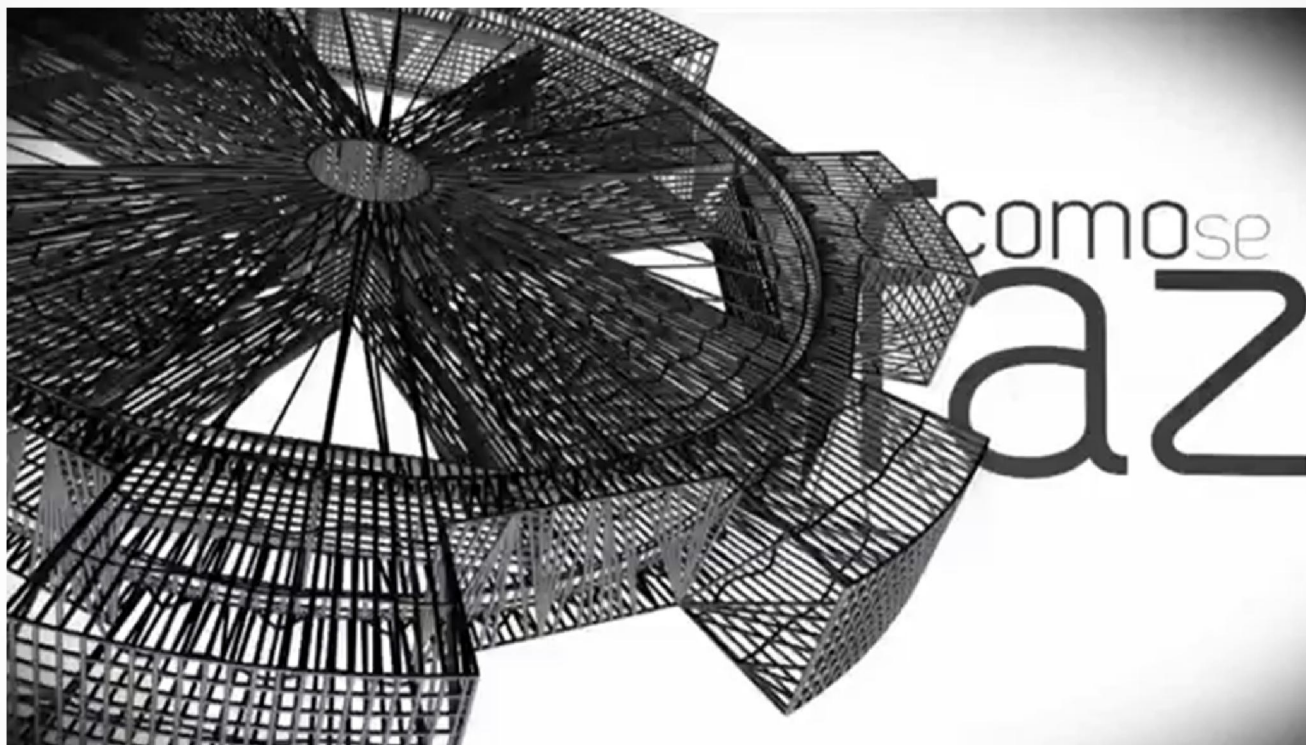


Fonte: "Laboratórios de Energia Solar Fotovoltaica", Manuel Oliveira e Filipe Pereira, Publindústria



Fonte: <http://www.ltesolar.com/knowledge10.html>

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



Fonte: <http://www.ltesolar.com/knowledge10.html>

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes





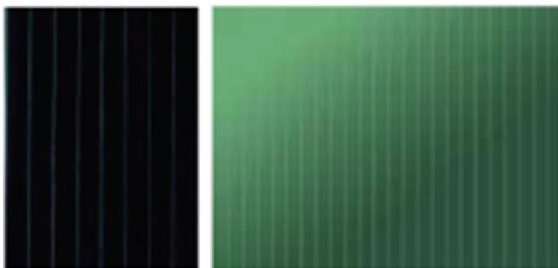
Células monocristalinas num painel



Células policristalinas num painel



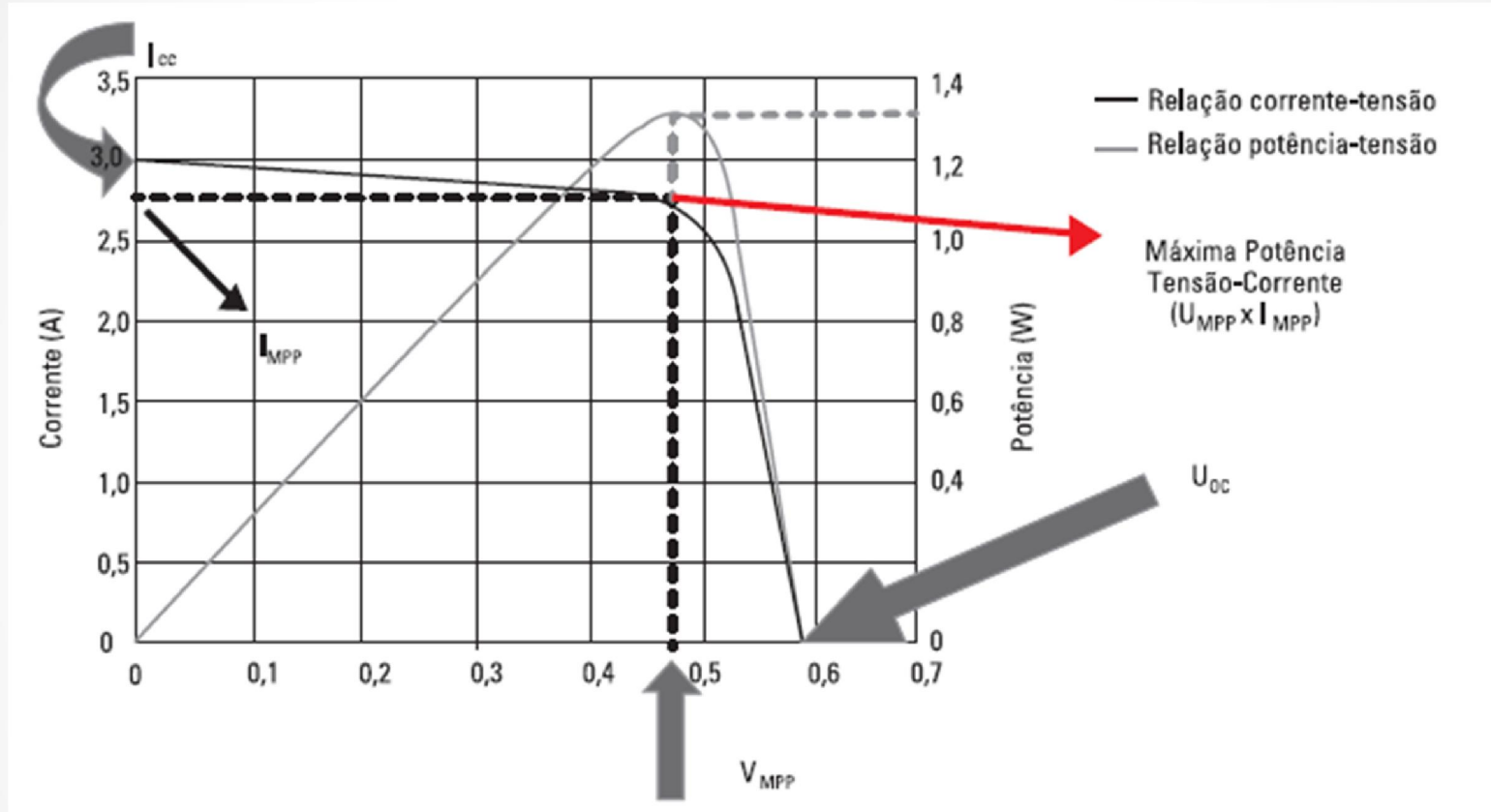
Painel solar a-Si



Células solares CIS e CdTe

Tecnologia	Eficiência laboratorial	Eficiência comercial
Silício monocristalino (c-Si)	24%	15 – 18%
Silício Policristalino (p-Si)	20%	13 – 15%
Silício Amorfo (a-Si)	15%	8 – 9%
Telureto de Cádmio (CdTe)	16%	7 – 9%
Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)	18,8%	9 – 10%

Curva característica da célula fotovoltaica



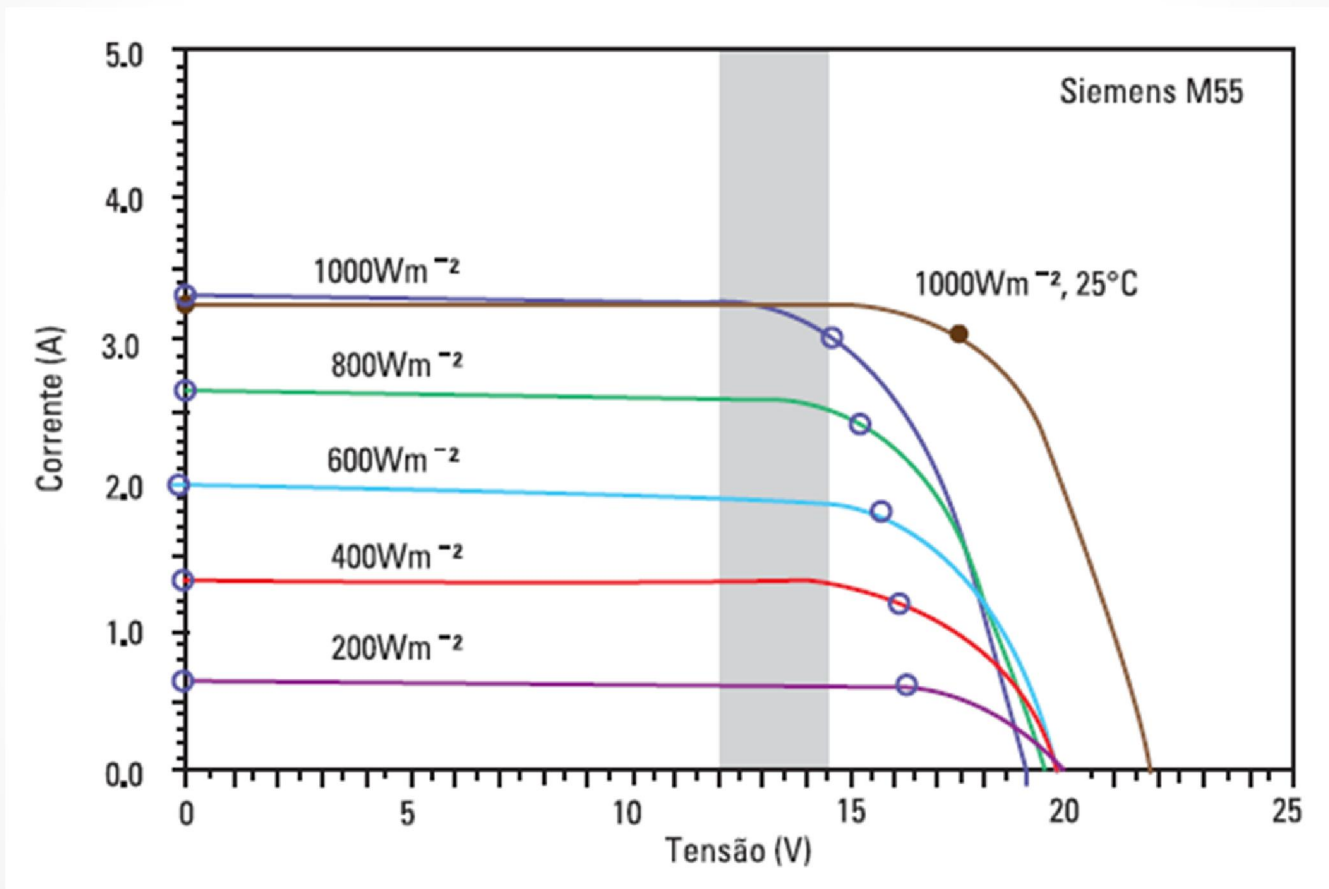
Variáveis importantes:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc})
- Corrente de curto circuito (I_{sc})
- Ponto de máxima potência (P_{mpp})

$$V_{mpp} \approx (0,75 \text{ a } 0,90)V_{oc}$$

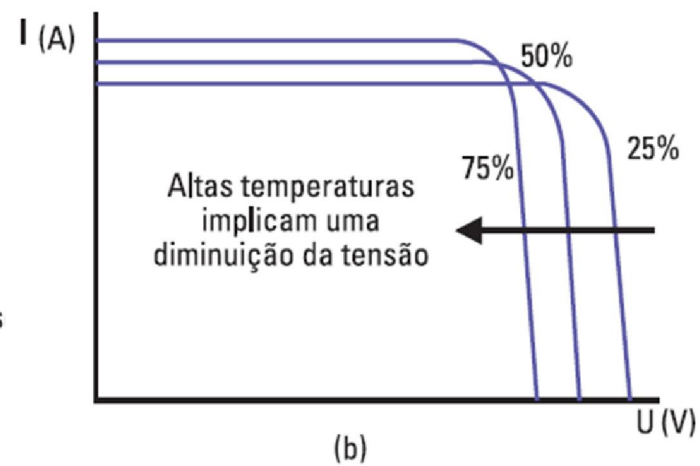
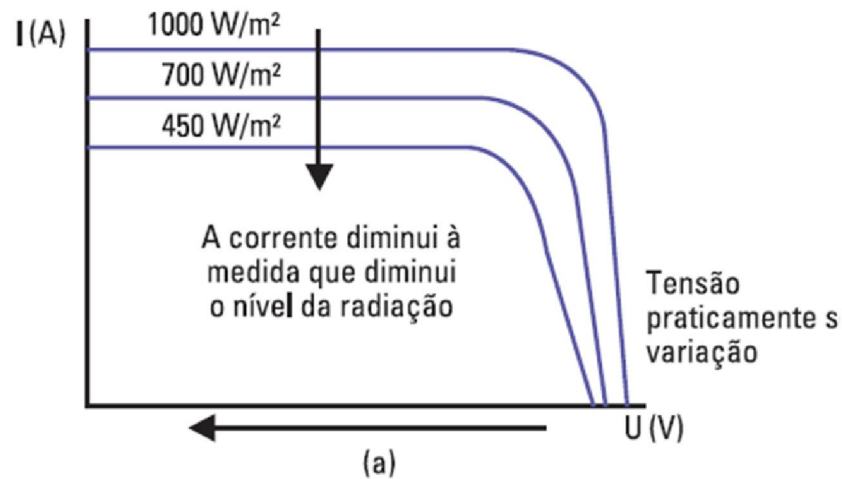
$$I_{mpp} \approx (0,85 \text{ a } 0,95)I_{sc}$$

Fonte: KleanEnergie4Life, Lda.



Fonte: <http://www.cienciaviva.pt/rede/energia/himalaya2005/home/guia4.pdf>.

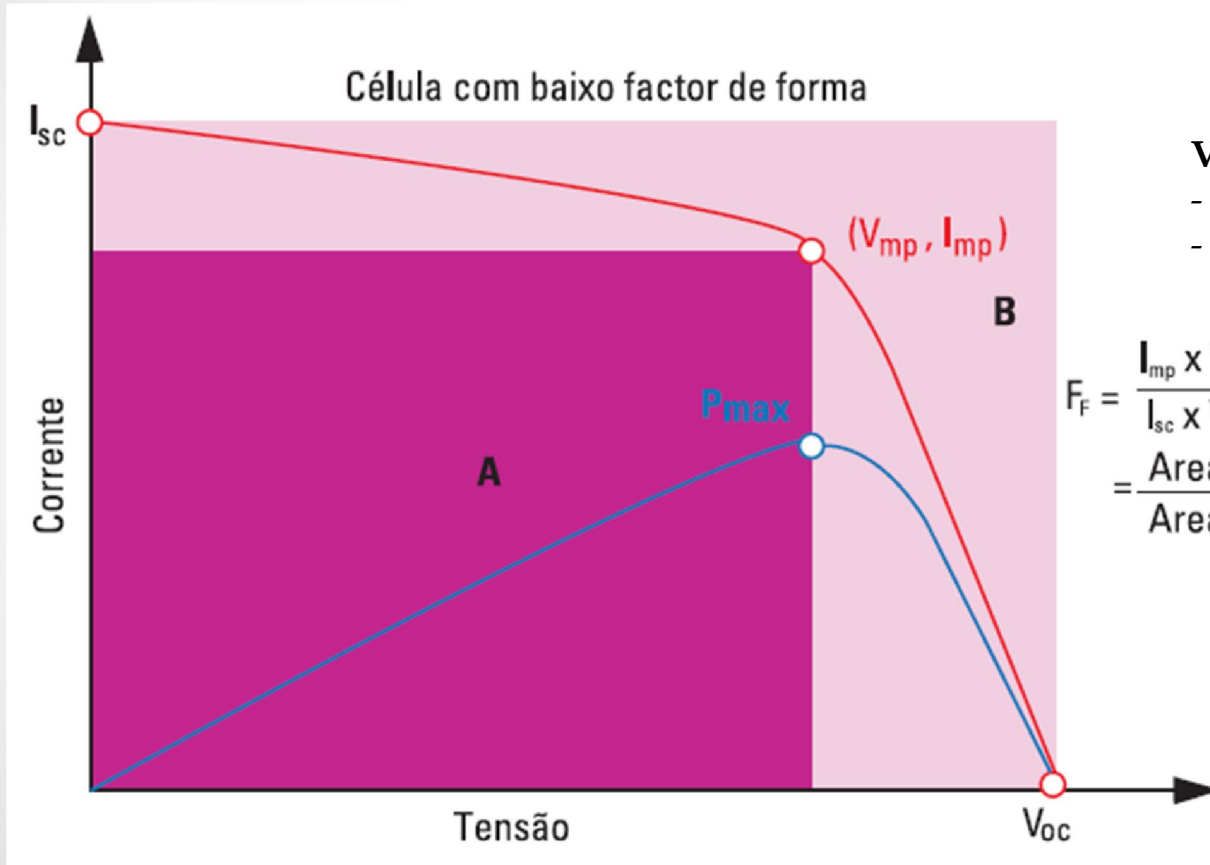
● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



Coeficiente térmico de módulos FV

Tipos de módulos	Tensão ($V_{oc} - V$)	Corrente ($I_{sc} - A$)	Potência ($P_{mpp} - W$)
Silício Amorfo (a-Si)	De -0,28 a -0,5%/°C	De +0,06 a +0,1%/°C	De -0,1 a -0,3%/°C
Telureto de Cádmio (CdTe)	De -0,26 a -0,5%/°C	De +0,045 a +0,1%/°C	De -0,39 a -0,45%/°C
Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)	De -0,22 a -0,43%/°C	De +0,02 a +0,04%/°C	De -0,2 a -0,36%/°C

Fonte: FER - Fontes de Energia Renováveis. "Energia Fotovoltaica – Manual sobre Tecnologias, Projectos e Instalações, Volume III". Projecto parcialmente financiado pela Comissão Europeia, designadamente através do programa ALTENER, 2004.



Valores típicos de fator de forma:

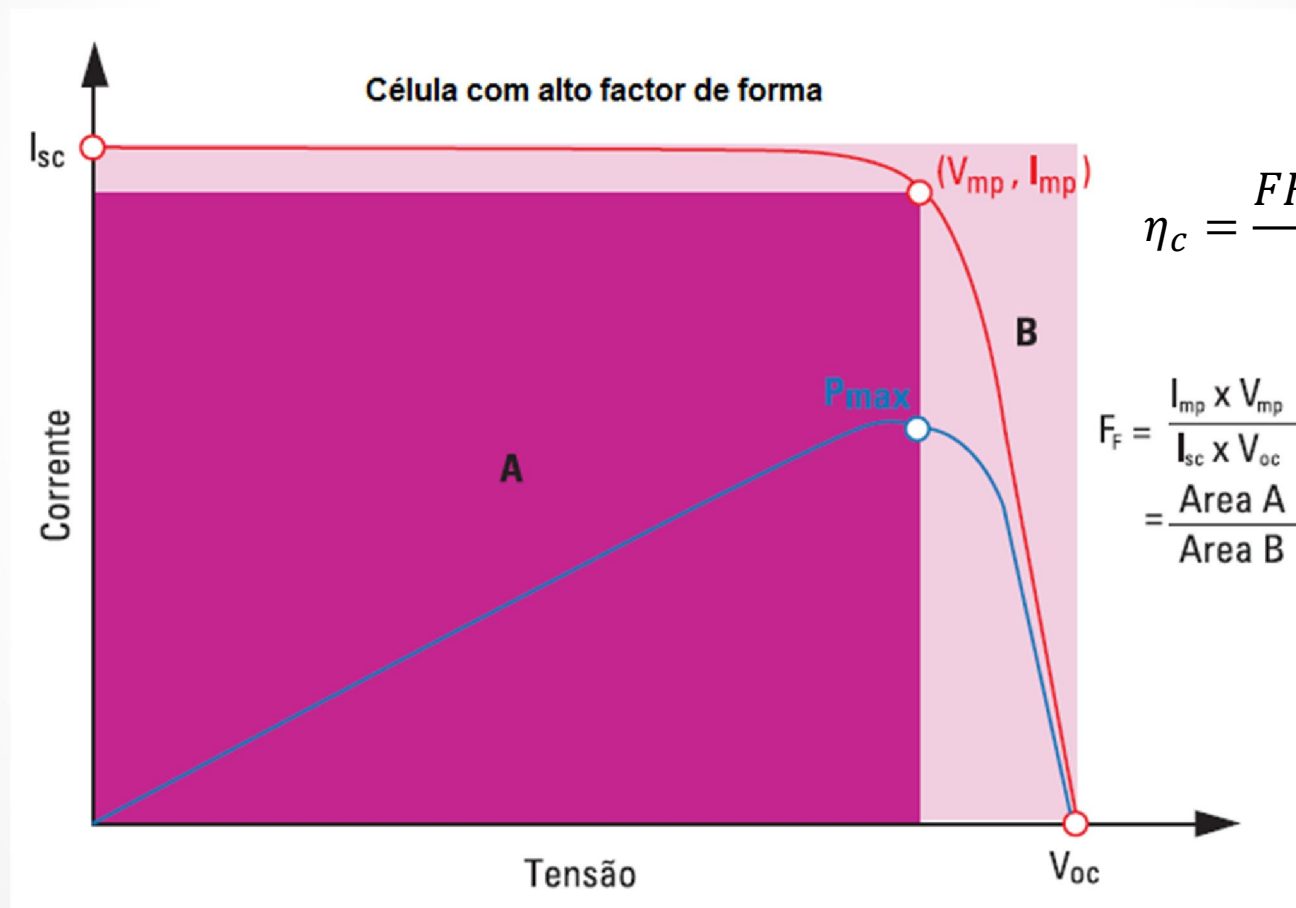
- m-Si: 0,6 a 0,85
- a-Si: 0,5 a 0,7

$$F_F = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

$$= \frac{\text{Area A}}{\text{Area B}}$$

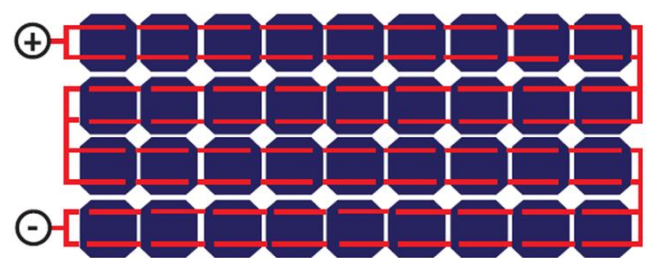
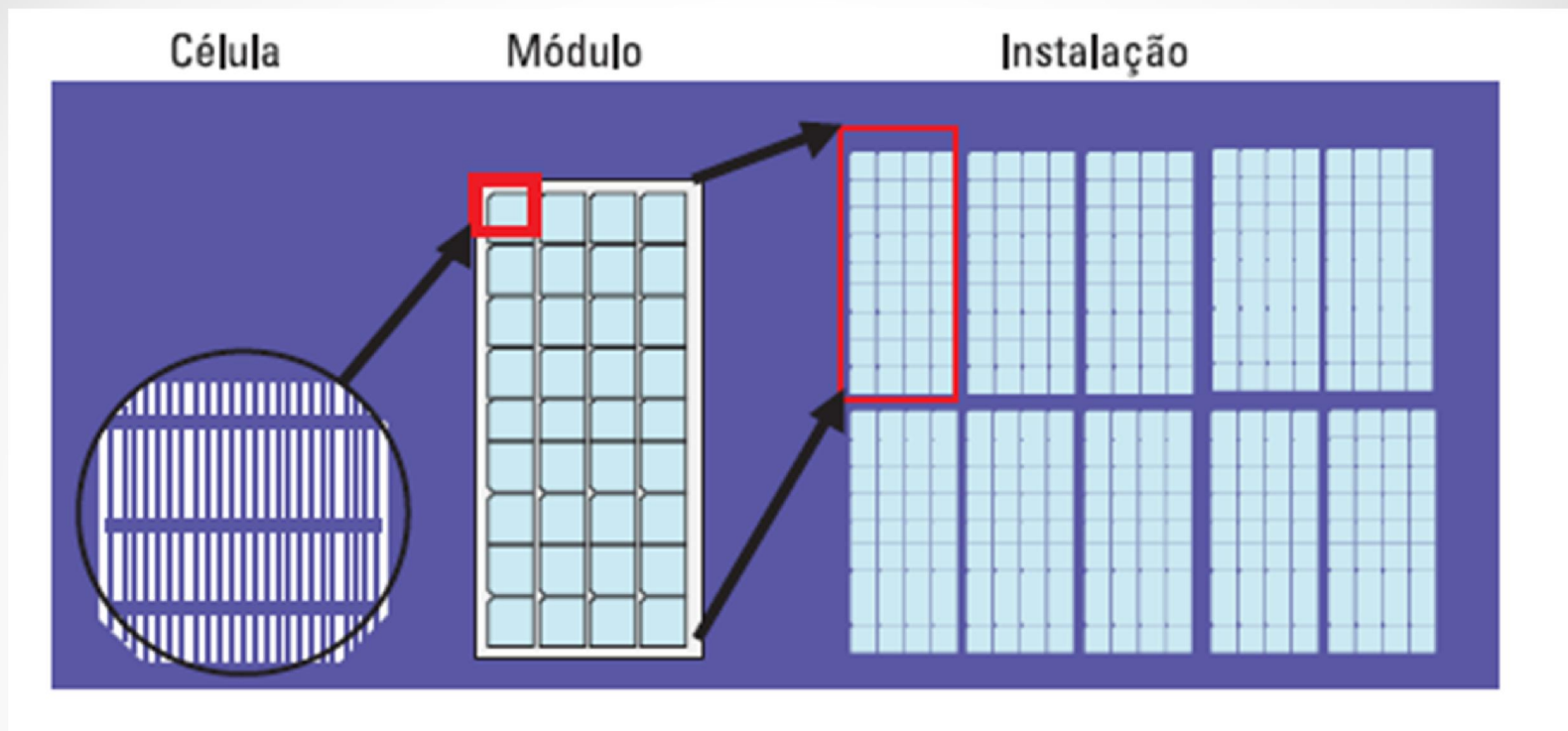
Fonte: pveducation.org/pvcdrom

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



Fonte: pveducation.org/pvcdrom

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



$$E_G = P_{m\acute{a}x} * n^\circ \text{ de horas de radia\c{c}\~{a}o solar}$$

"Puramente te\~{o}rico"

Fonte: <http://www.cienciaviva.pt/rede/energia/himalaya2005/home/guia4.pdf>

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes

PARÂMETROS FÍSICOS

Dimensões do módulo (mm)	1,976 x 990 x 50
Peso do módulo (kg)	22
Tipo de célula	Multicristalina
Número de células	72
Material da estrutura	Alumínio anodizado
Vidro (mm)	3.2 Vidro temperado ARC

COEFICIENTES DE TEMPERATURA E PARÂMETROS

Temperatura nominal de operação da célula (NOCT) (°C)	47 ± 2
Coefficiente de temperatura de Pmax (%/°C)	-0.45
Coefficiente de temperatura de Voc (%/°C)	-0.33
Coefficiente de temperatura de Isc (%/°C)	+0.066
Temperatura de operação (°C)	-40 a +85
Tensão máxima do sistema (V)	1000 (UL e IEC)
Corrente inversa limite (A)	8.40
Classificação do fusível de série máxima (A)	15
Faixa de potência (W)	-0/+5

Os coeficientes de temperatura podem apresentar uma variação de ± 10%

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Modelo nº	MEMC-P280BMC	MEMC-P285BMC	MEMC-P290BMC	MEMC-P295BMC	MEMC-P300BMC
Potência máxima Pmax (W)	280	285	290	295	300
Tensão de circuito aberto Voc (V)	44.0	44.4	44.7	45.1	45.3
Corrente de curto-circuito Isc (A)	8.60	8.65	8.71	8.95	9.00
Eficiência do módulo (%)	14.3	14.6	14.8	15.1	15.4
Tensão no ponto de máxima potência Vmpp (V)	34.7	34.9	35.4	35.7	36.0
Corrente no ponto de máxima potência Impp (A)	8.08	8.16	8.20	8.26	8.34

Todos os dados elétricos em condições padrão de teste (STC): 1000W/m², AM1,5, 25°C.
As características elétricas poderão variar em ±5% e a potência em -0/+5W.



Fonte: SunEdison

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



PARÂMETROS FÍSICOS

Dimensões do módulo (mm)	1,976 x 990 x 50
Peso do módulo (kg)	22
Tipo de célula	Multicristalina
Número de células	72
Material da estrutura	Alumínio anodizado
Vidro (mm)	3.2 Vidro temperado ARC

COEFICIENTES DE TEMPERATURA E PARÂMETROS

Temperatura nominal de operação da célula (NOCT) (°C)	47 ± 2
Coefficiente de temperatura de Pmax (%/°C)	-0.45
Coefficiente de temperatura de Voc (%/°C)	-0.33
Coefficiente de temperatura de Isc (%/°C)	+0.066
Temperatura de operação (°C)	-40 a +85
Tensão máxima do sistema (V)	1000 (UL e IEC)
Corrente inversa limite (A)	8.40
Classificação do fusível de série máxima (A)	15
Faixa de potência (W)	-0/+5

Os coeficientes de temperatura podem apresentar uma variação de ± 10%

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Modelo nº	MEMC-P280BMC	MEMC-P285BMC	MEMC-P290BMC	MEMC-P295BMC	MEMC-P300BMC
Potência máxima Pmax (W)	280	285	290	295	300
Tensão de circuito aberto Voc (V)	44.0	44.4	44.7	45.1	45.3
Corrente de curto-circuito Isc (A)	8.60	8.65	8.71	8.95	9.00
Eficiência do módulo (%)	14.3	14.6	14.8	15.1	15.4
Tensão no ponto de máxima potência Vmpp (V)	34.7	34.9	35.4	35.7	36.0
Corrente no ponto de máxima potência Impp (A)	8.08	8.16	8.20	8.26	8.34

Todos os dados elétricos em condições padrão de teste (STC): 1000W/m², AM1,5, 25°C.
As características elétricas poderão variar em ±5% e a potência em -0/+5W.

$$P_G = P_N \frac{H_i}{H_{ref}} [1 - \gamma(T_c - T_{c,ref})]$$

$$T_c = \left[T_A + \frac{H_i}{800} (T_{UC} - 20) \right] \text{ °C}$$

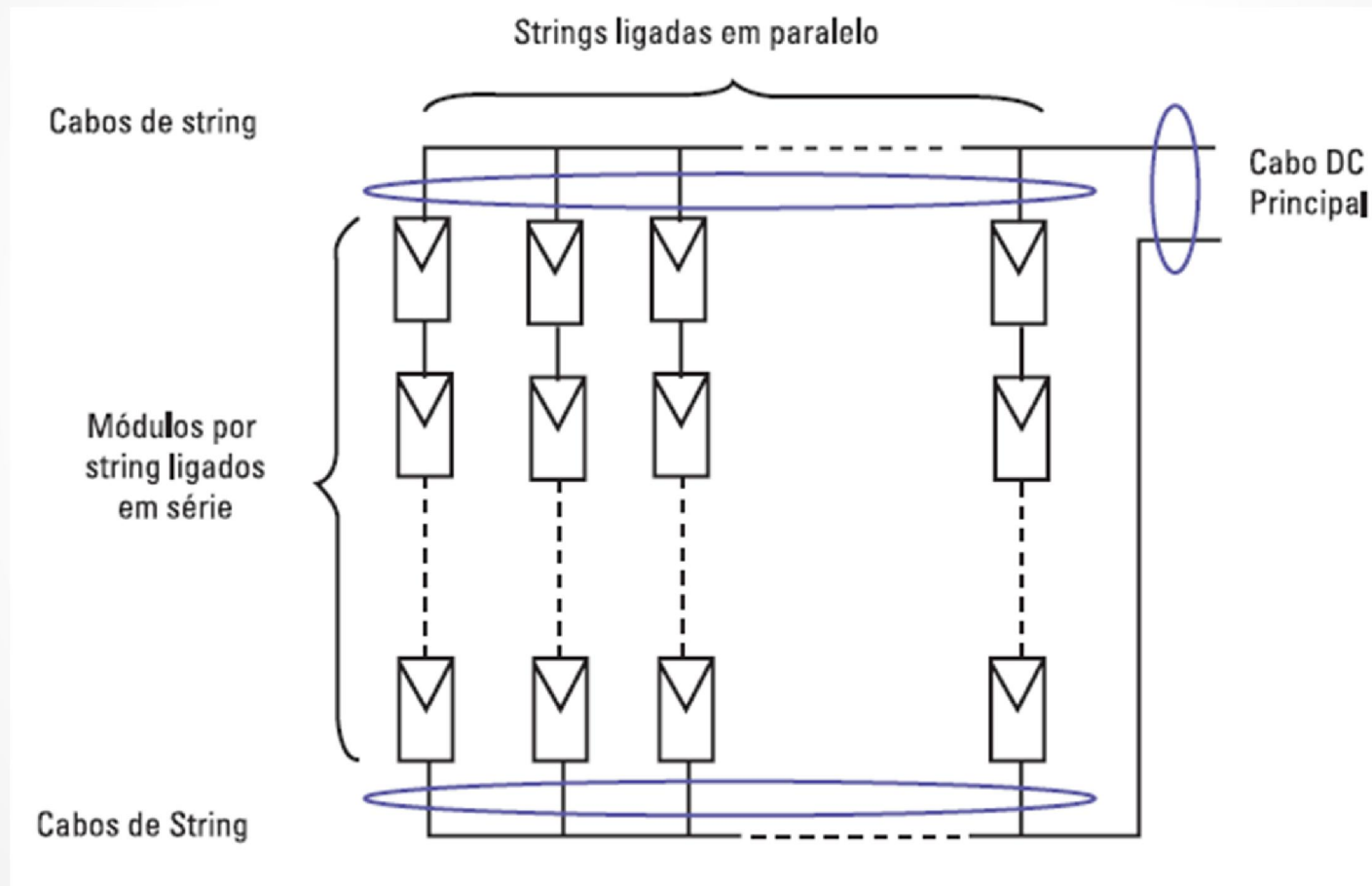
$$P_G = P_N \frac{H_i}{H_{ref}} [1 - \gamma(T_c - T_{c,ref})] * \eta_{SPMP}$$

$$H_{ref} = 1000W/m^2$$

$$T_{c,ref} = 25^\circ\text{C}$$

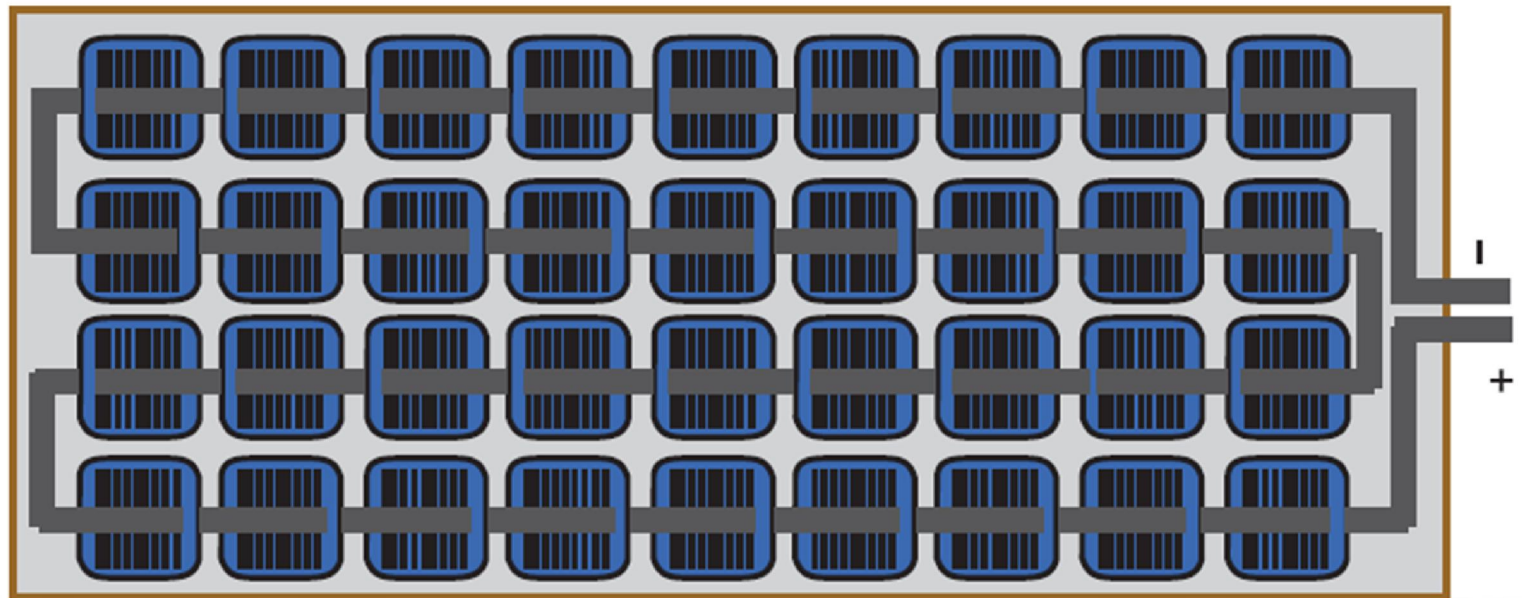
Fonte: SunEdison

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



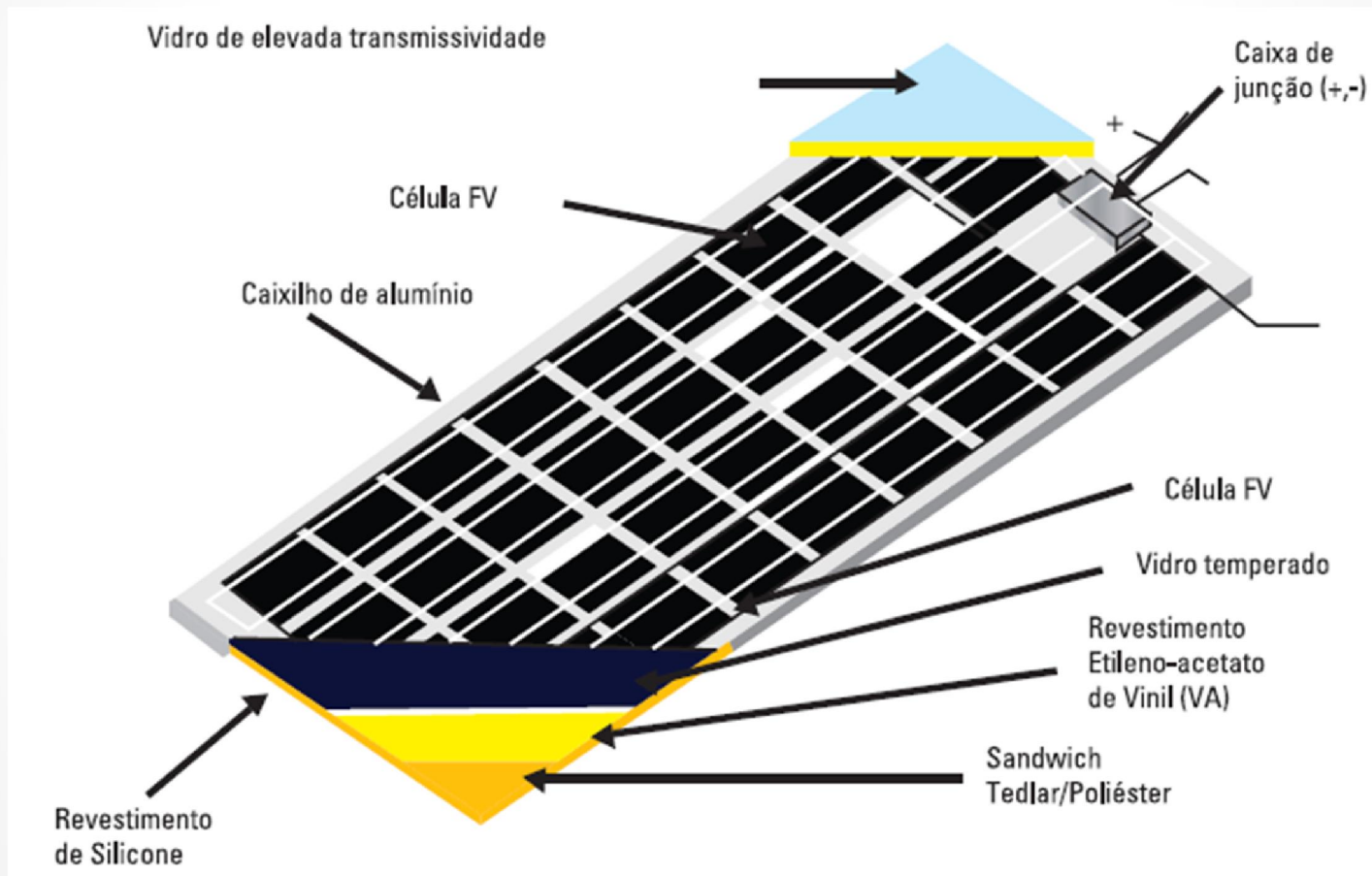
Fonte: Tese de Fernando Mapota - INETI

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



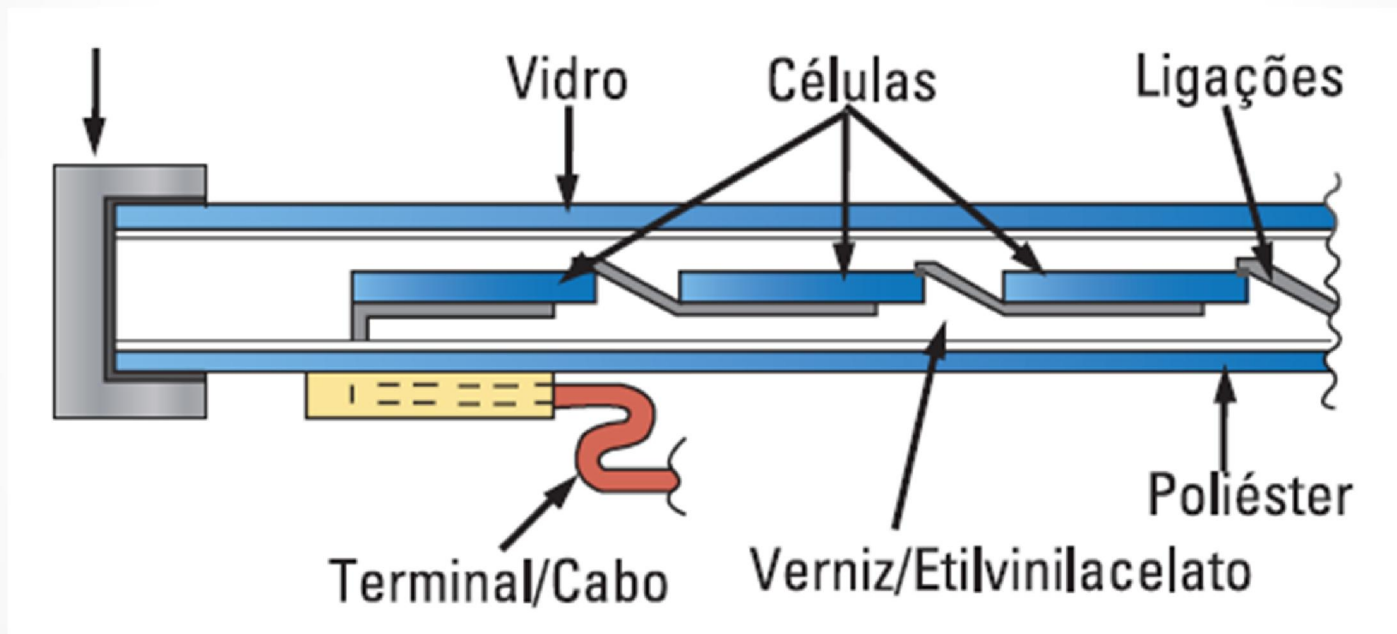
Fonte: pveducation.org/pvcdrom

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



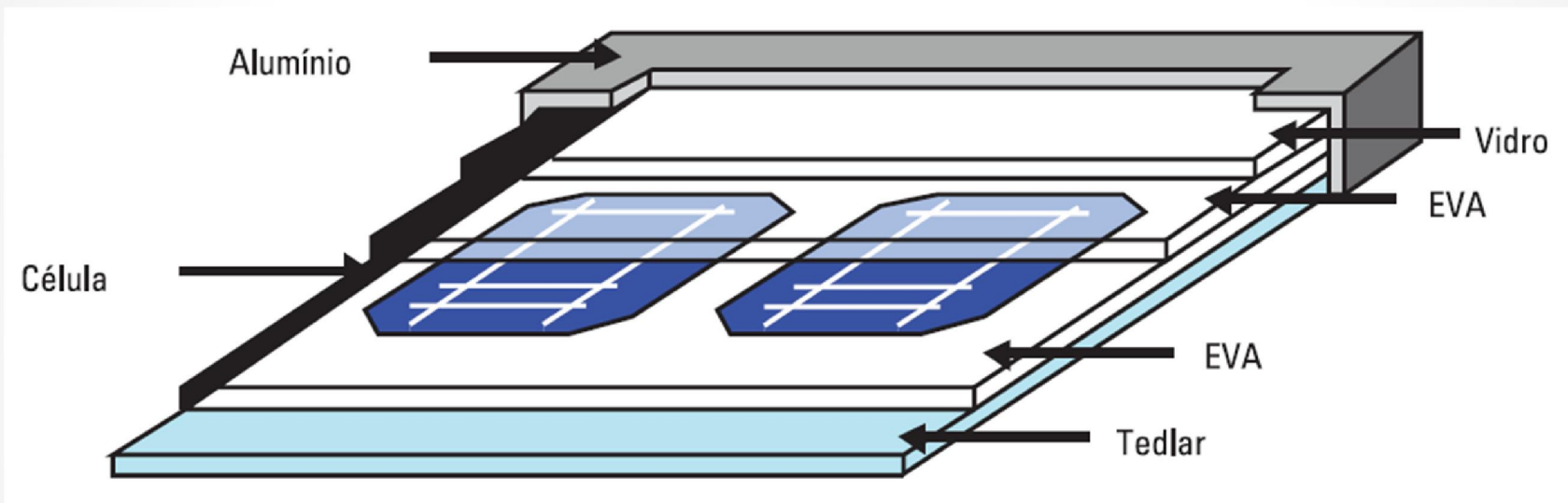
Fonte: http://www.pucrs.br/cbsolar/ntsolar/img/energia_02.jpg

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



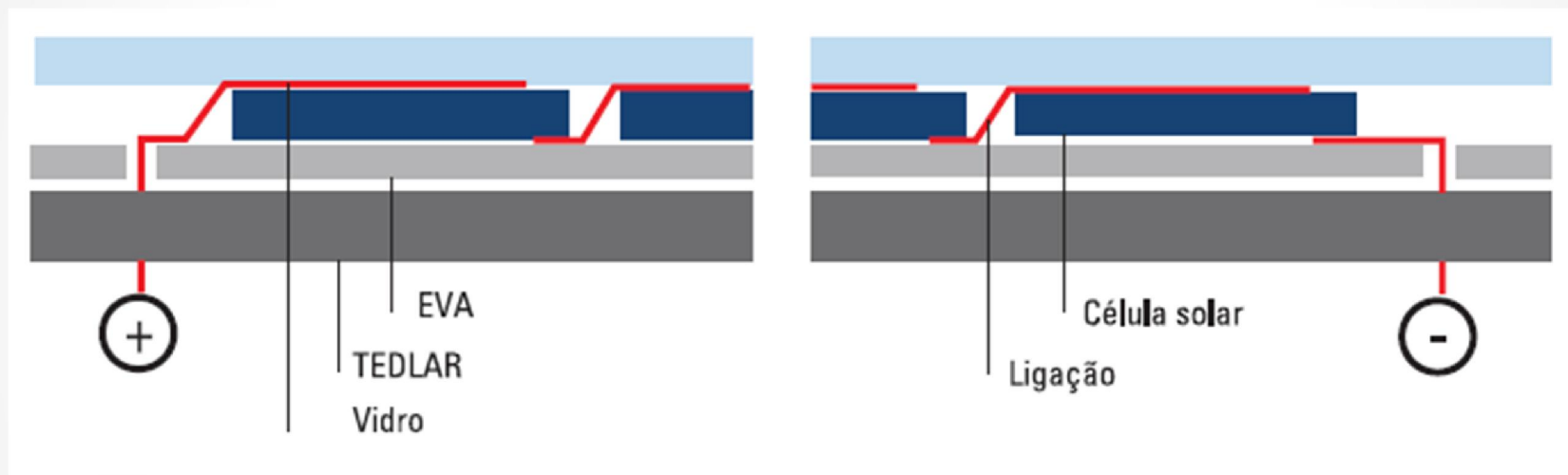
Fonte: <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/271/202/>

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



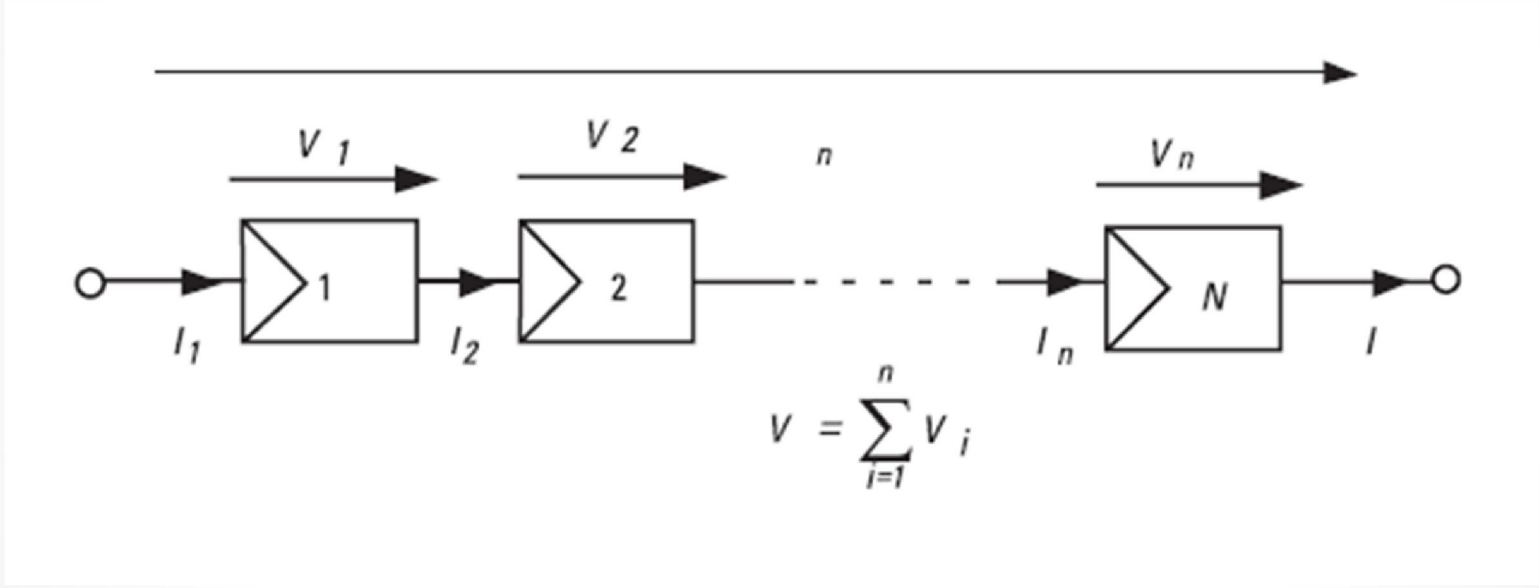
Fonte: <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/271/202/>

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



Fonte: <https://sites.google.com/site/reeetech/home/photovoltaic/>

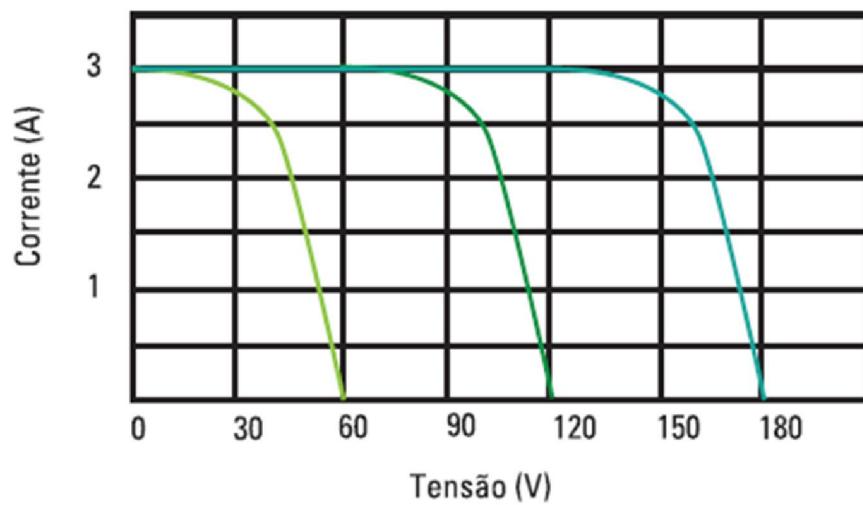
● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



Fonte: "Laboratórios de Energia Solar Fotovoltaica", Manuel Oliveira e Filipe Pereira, Publindústria

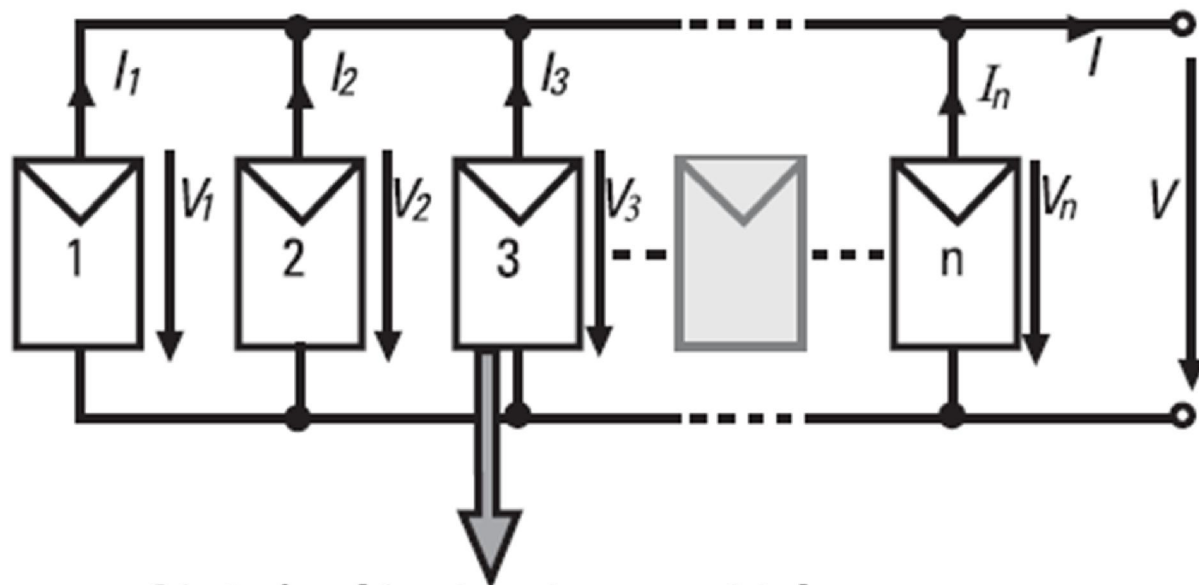
● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes





- Um módulo
- Dois módulos ligados em série
- Três módulos ligados em série

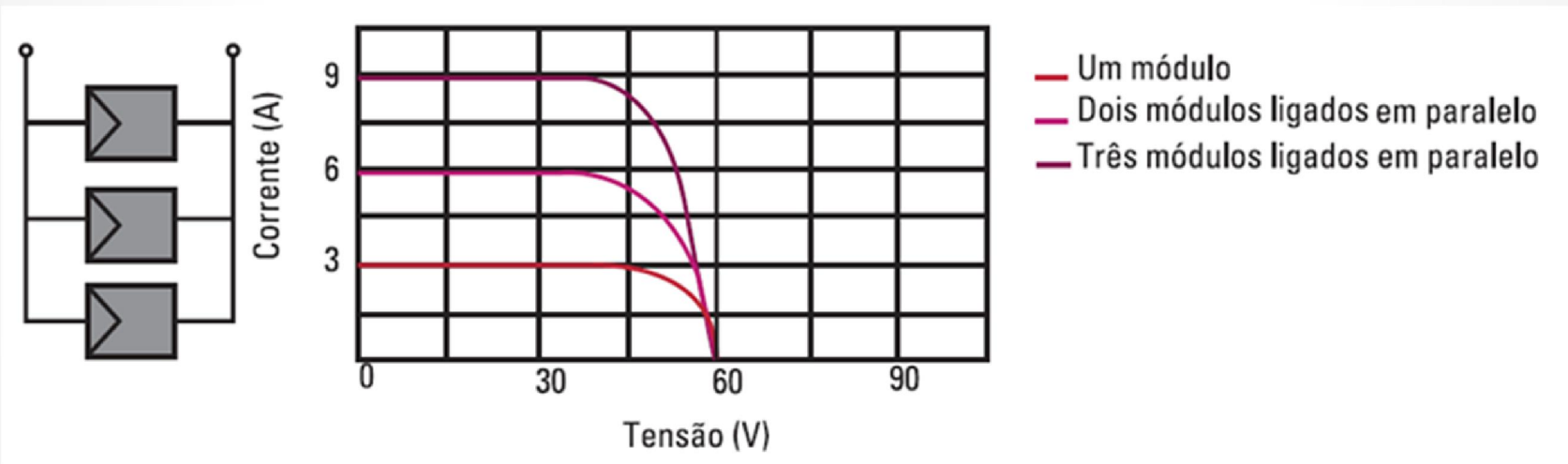
Fonte: " Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalação", Projecto GreenPro



Símbolo eléctrico de um módulo fotovoltaico ou de célula fotovoltaica

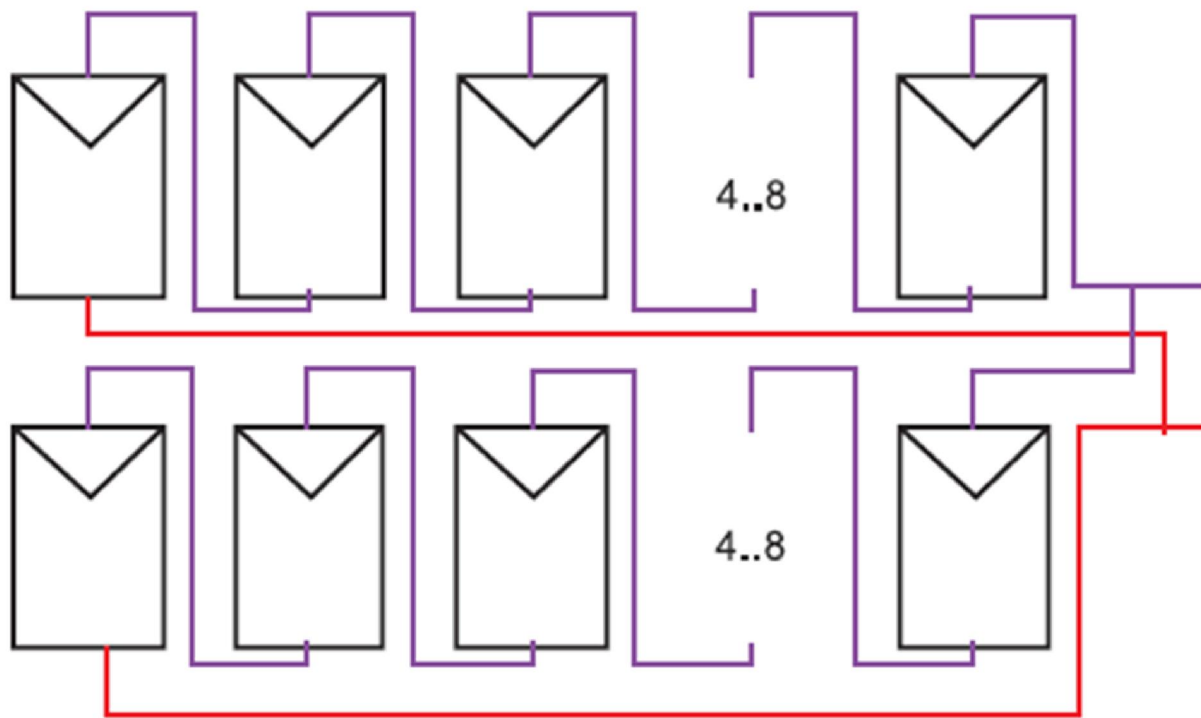
Fonte: "Laboratórios de Energia Solar Fotovoltaica", Manuel Oliveira e Filipe Pereira, Publindústria

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



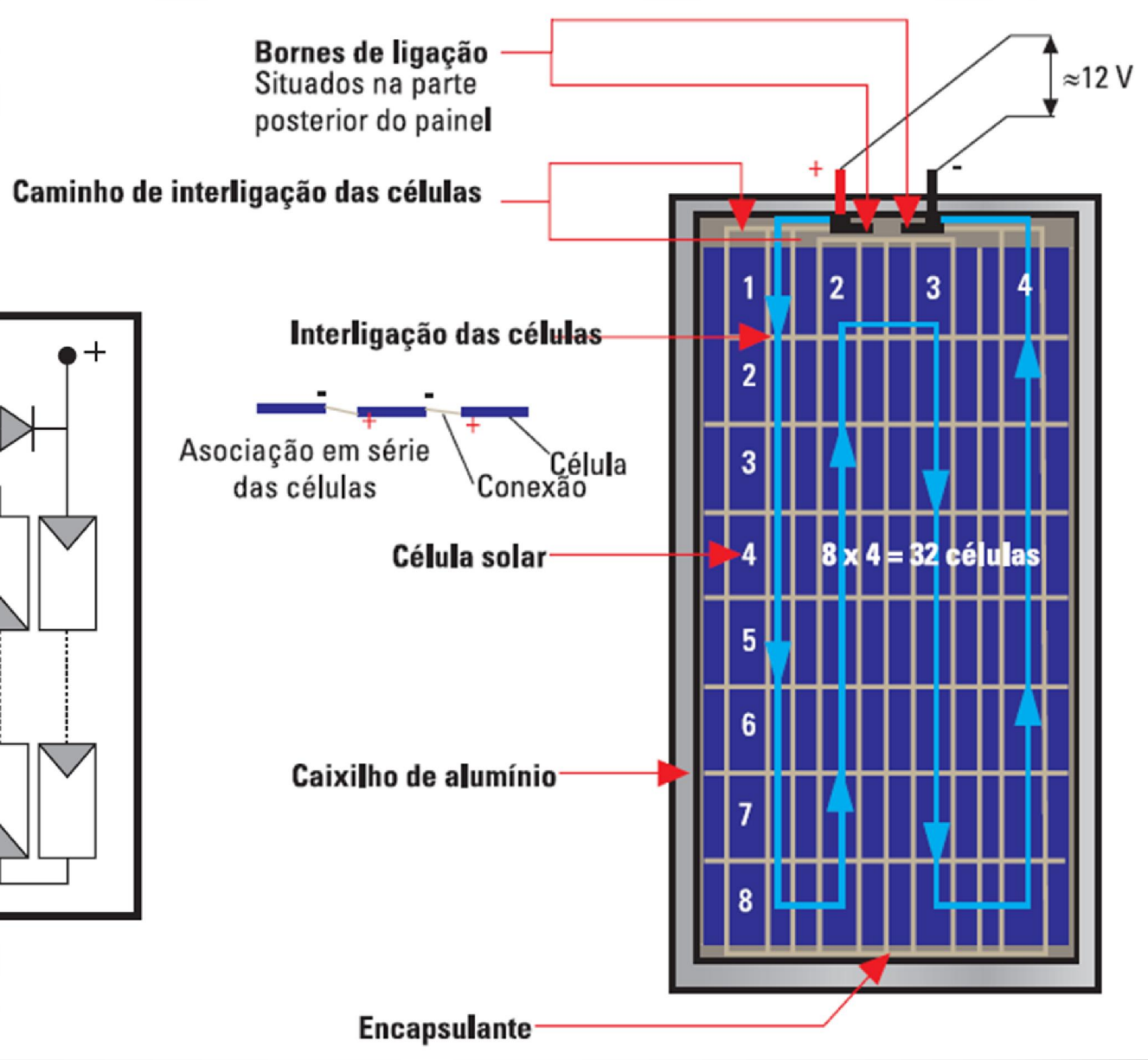
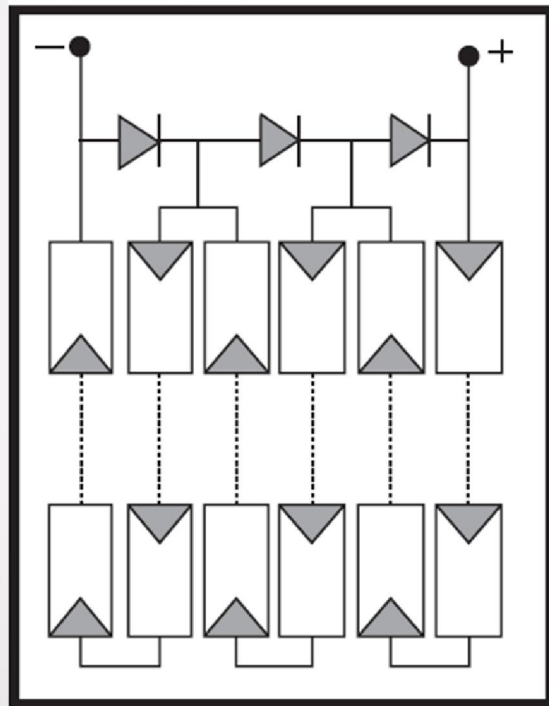
Fonte: " Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalação", Projecto GreenPro

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



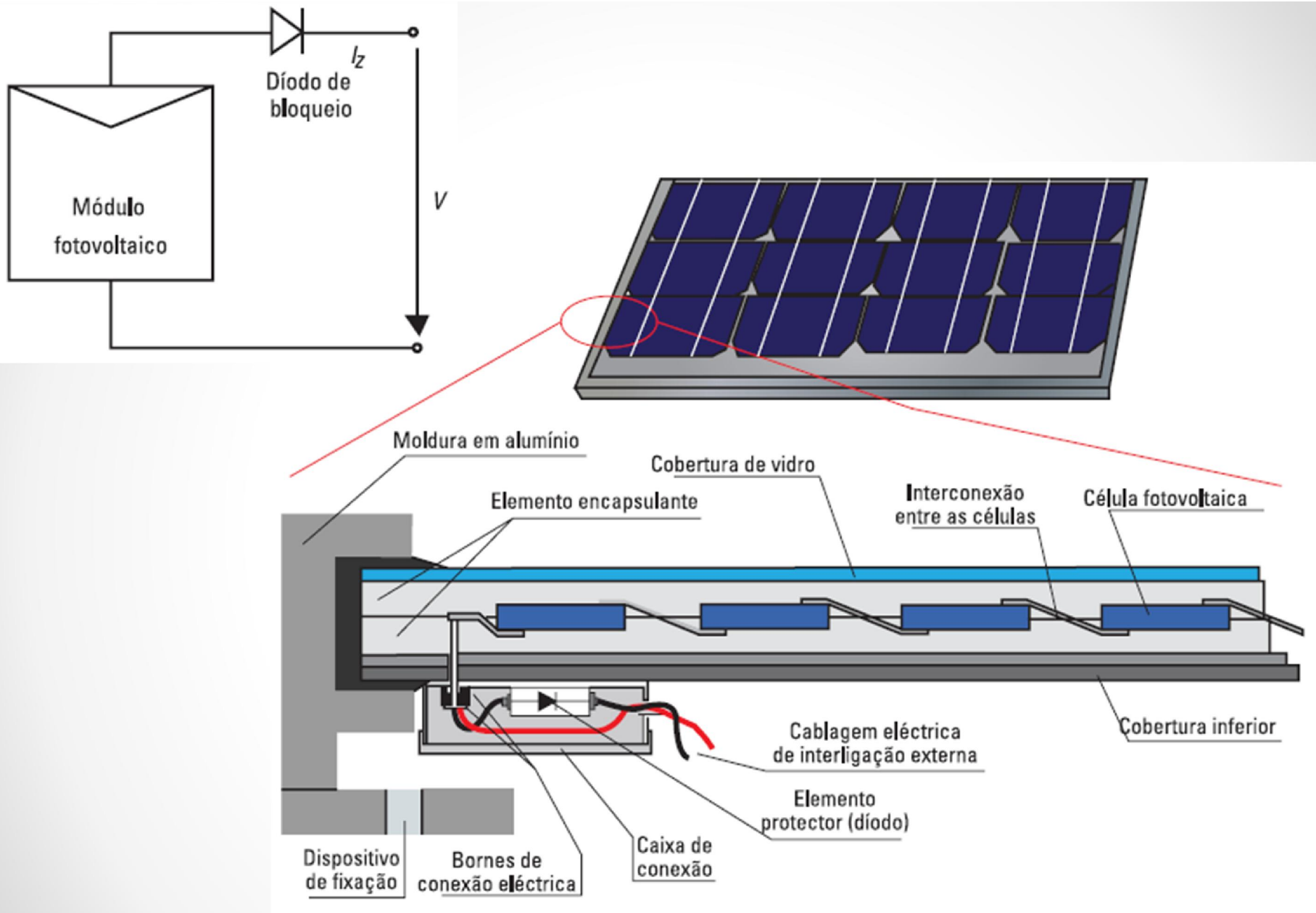
Fonte: KleanEnergie4Life, LDA

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



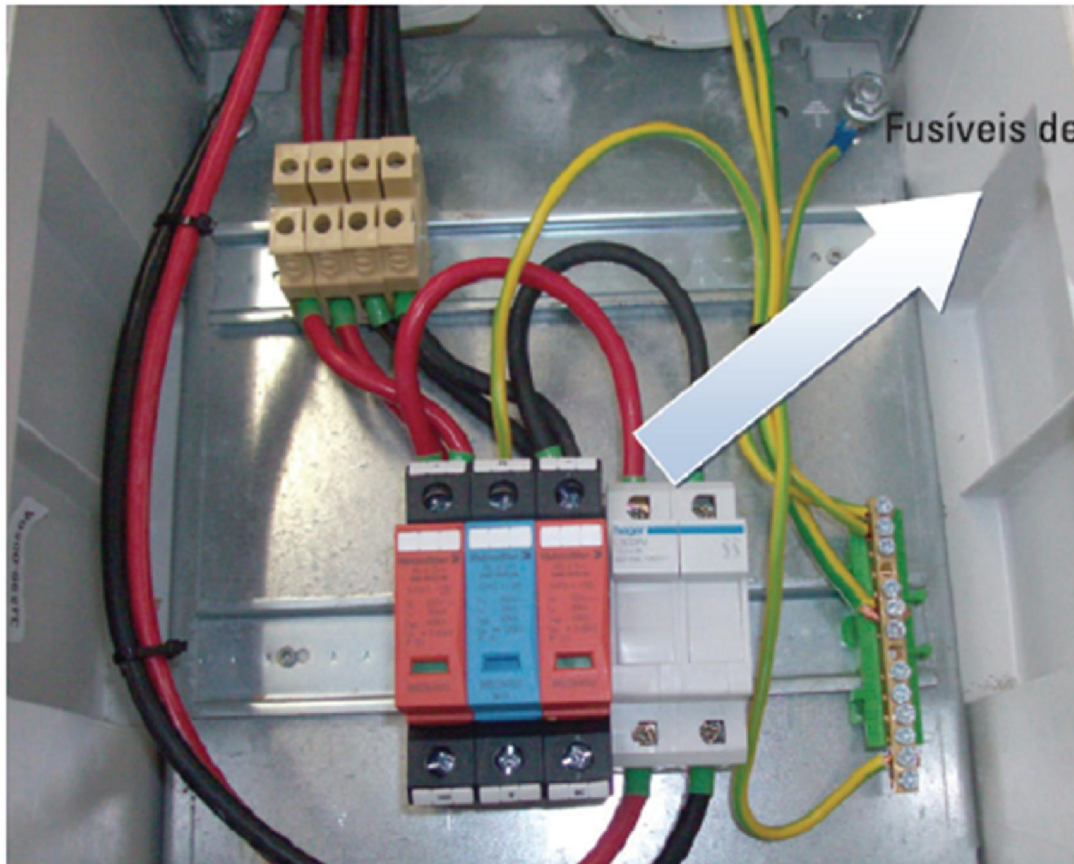
Fonte: SOLERNEG

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



Fonte: SOLERNEG

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes

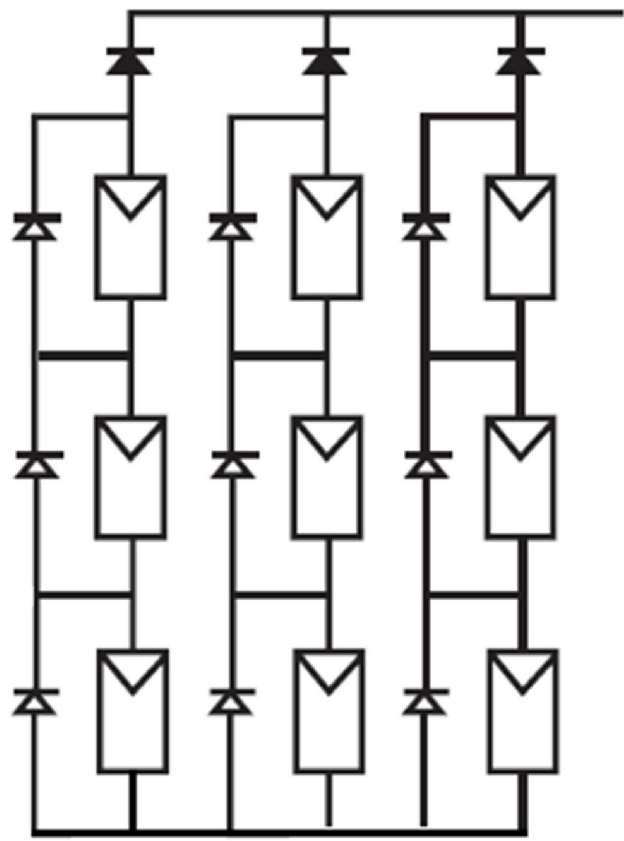


Fusíveis de fileira

Fonte: KleanEnergie4Life, LDA

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes





▲ Díodos de fileira

▲ Díodos de by-pass

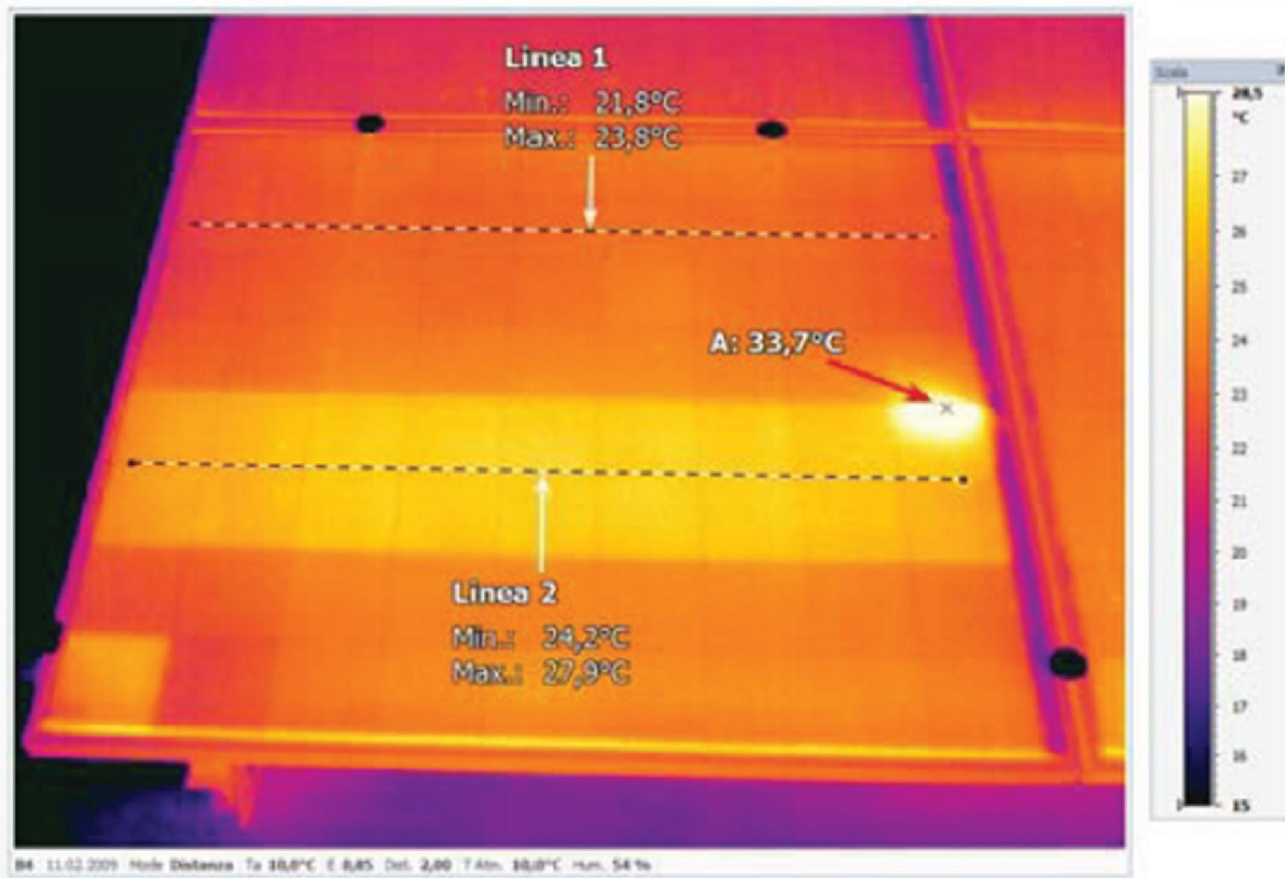
Fonte: <http://www.daviddarling.info>

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



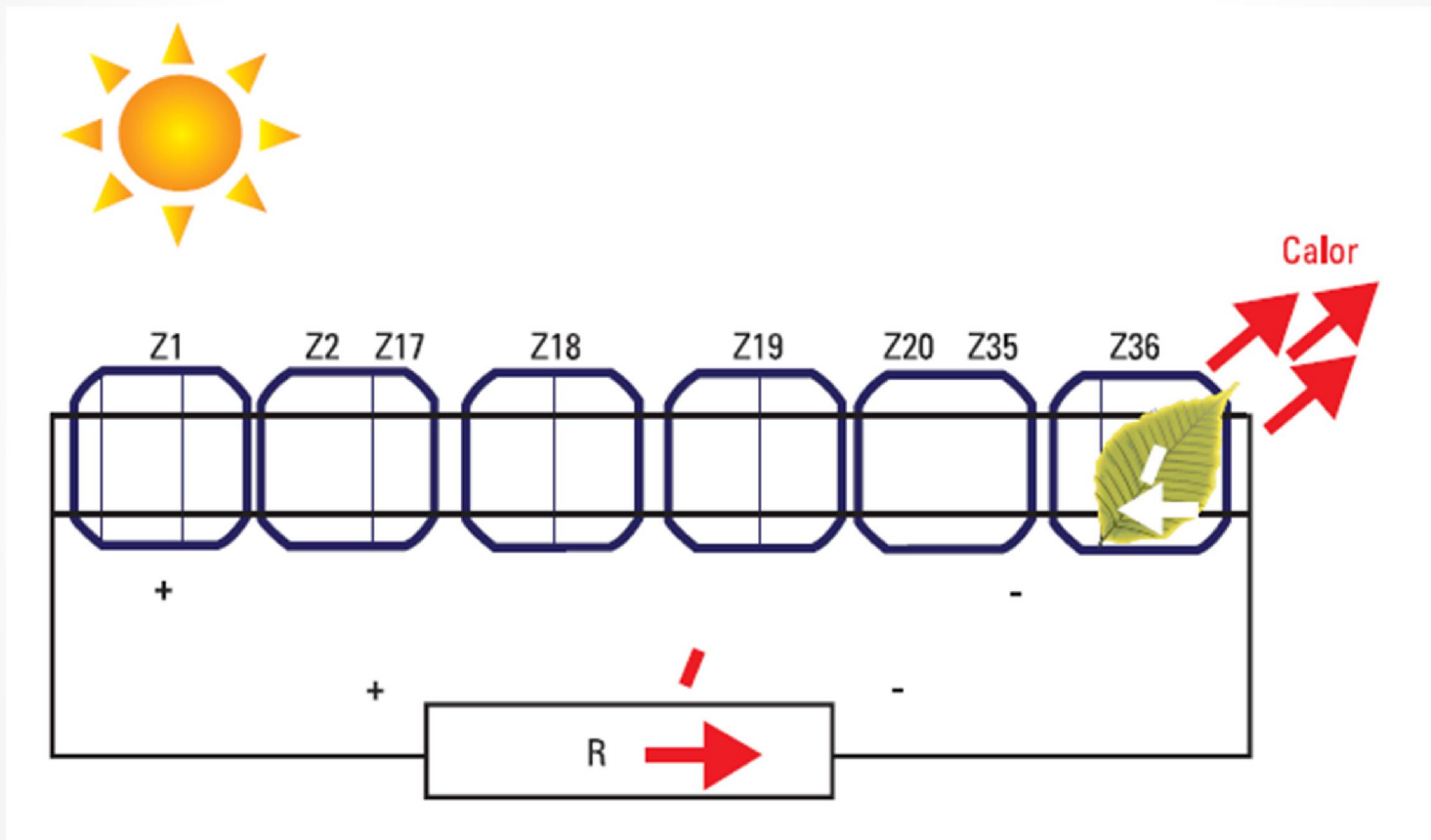
Ponto
quente

*Fonte: FER - Fontes de Energia Renováveis. "Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projectos e Instalações, Volume III".
Projecto parcialmente financiado pela Comissão Europeia, designadamente através do programa ALTENER, 2004.*



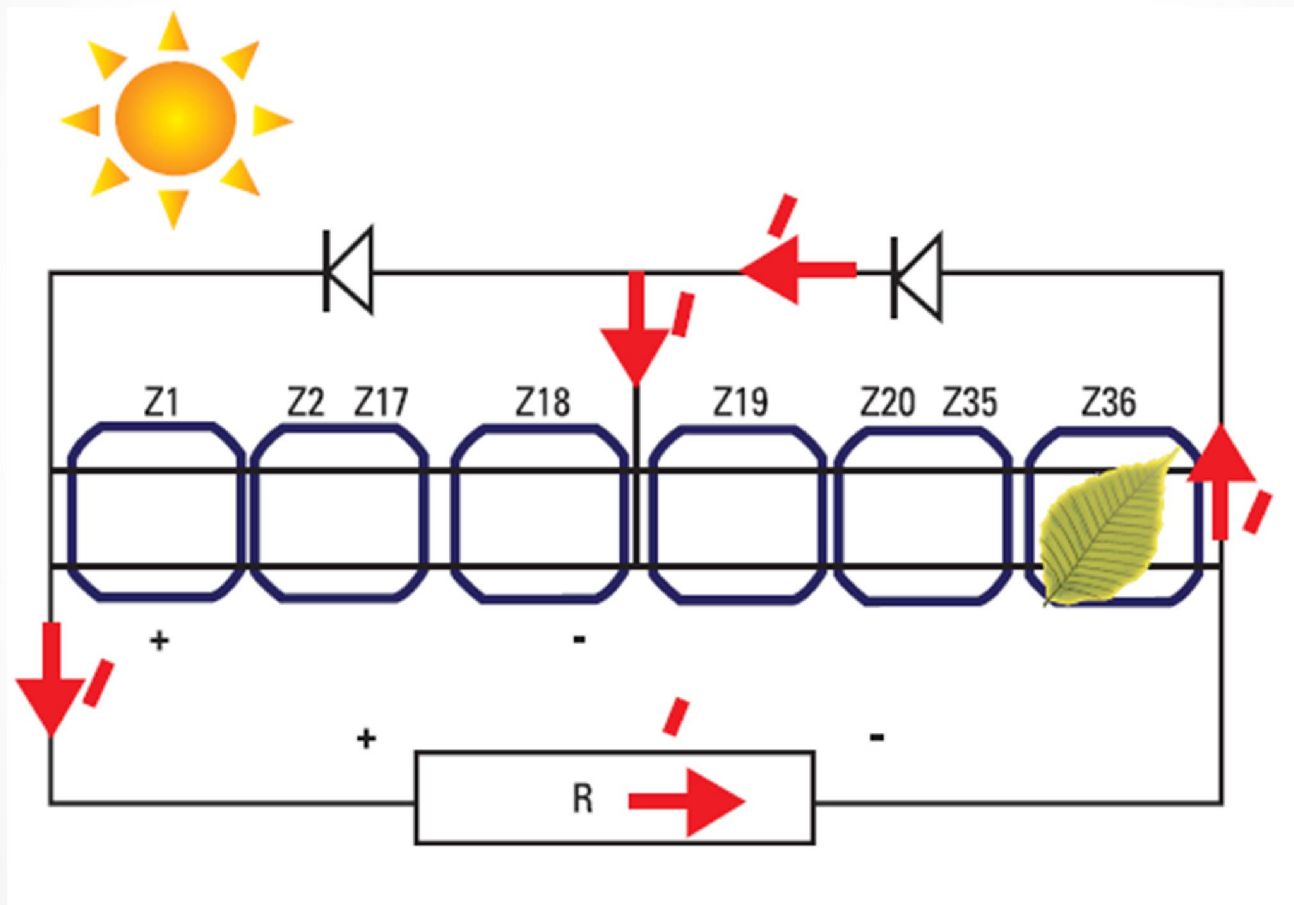
Fonte: <http://www.icrepq.com/icrepq'10/634-Acciani.pdf>

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



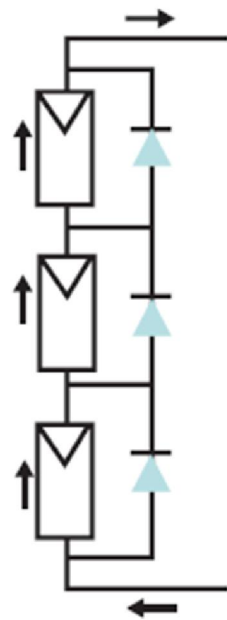
Fonte: "Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalação", Projecto GreenPro

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes

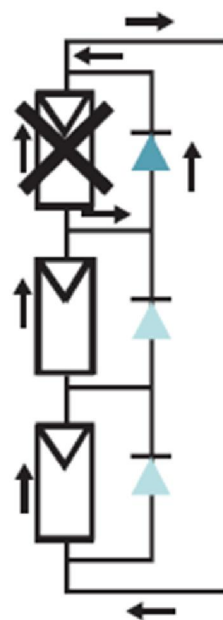


Fonte: "Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalação", Projecto GreenPro

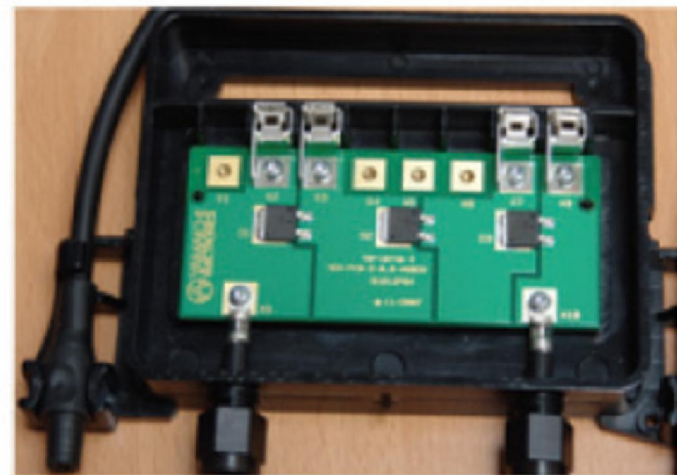
● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes



Modo normal



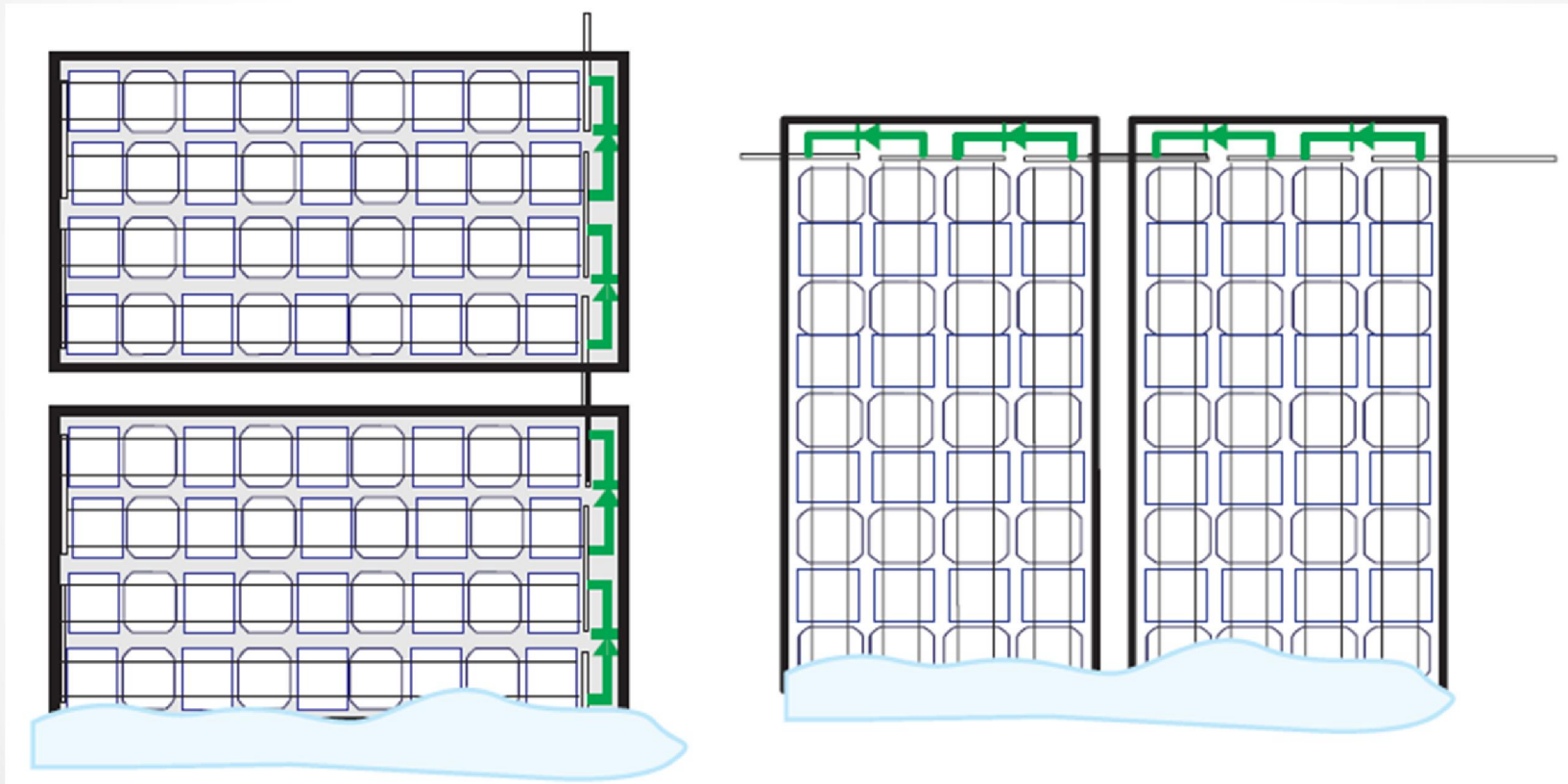
Com sombra



Fonte: <http://www.logic.nl/getfile/fbeea312-9c61-48ed-9a16-980670a5e5d3/Y-Sol-2.aspx>

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes





Fonte: "Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalação", Projecto GreenPro

● Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes