

Conceitos Fundamentais de Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

Prof. Dr. Claudio Roberto de Freitas Pacheco

Apostila 4



Conceitos Fundamentais de Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

1.O Fenômeno fotovoltaico

2.A Célula Fotovoltaica

3.O Painel Fotovoltaico

4. Gerador Fotovoltaico Acoplado à Rede de Distribuição Elétrica. Conceito.

Referências.

a) Duffie John A. & Beckman William A.; Solar Engineering of Thermal Processes. 3ed. John Wiley. USA.2006. Ch.23.

b) Zilles Roberto et alii.; Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica. Oficina de Textos .São Paulo. 2012.

c) http://pveducation.org/ Possui fundamentos e especialidade em fotovoltaico

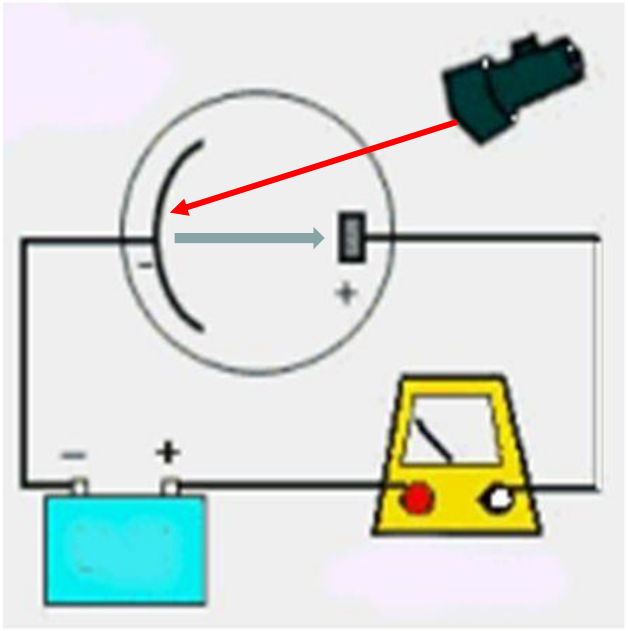
d) Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos – CRESESB - 2014

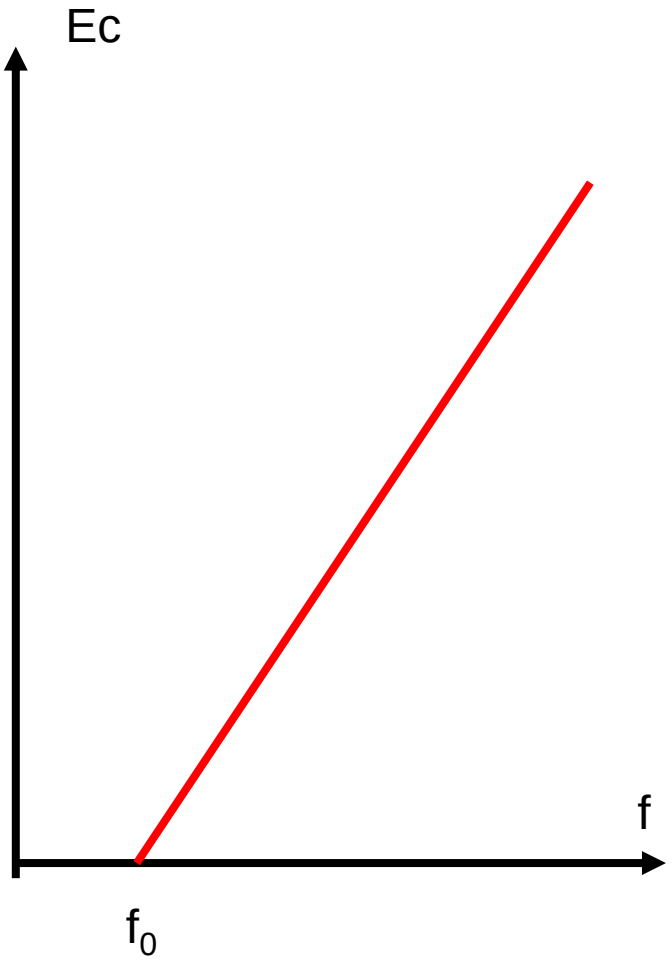
e) Energia Solar Fotovoltaica. Marcelo G. Villalva.2ed Saraiva.2016



1. O FENÔMENO FOTOVOLTAICO

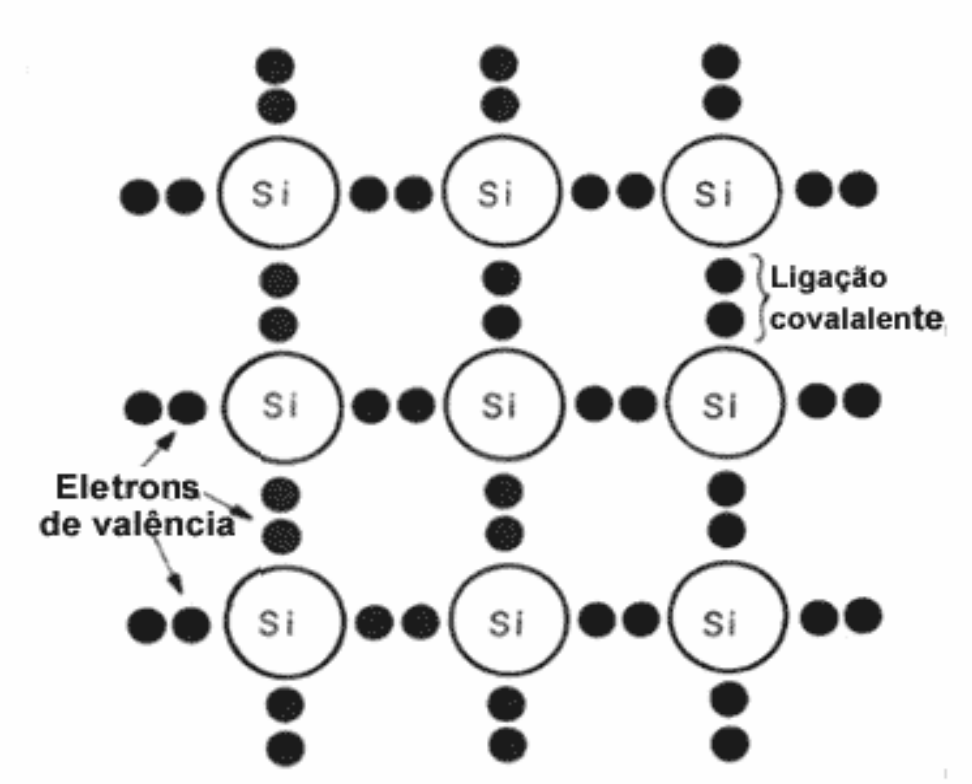
EFEITO FOTOELÉTRICO



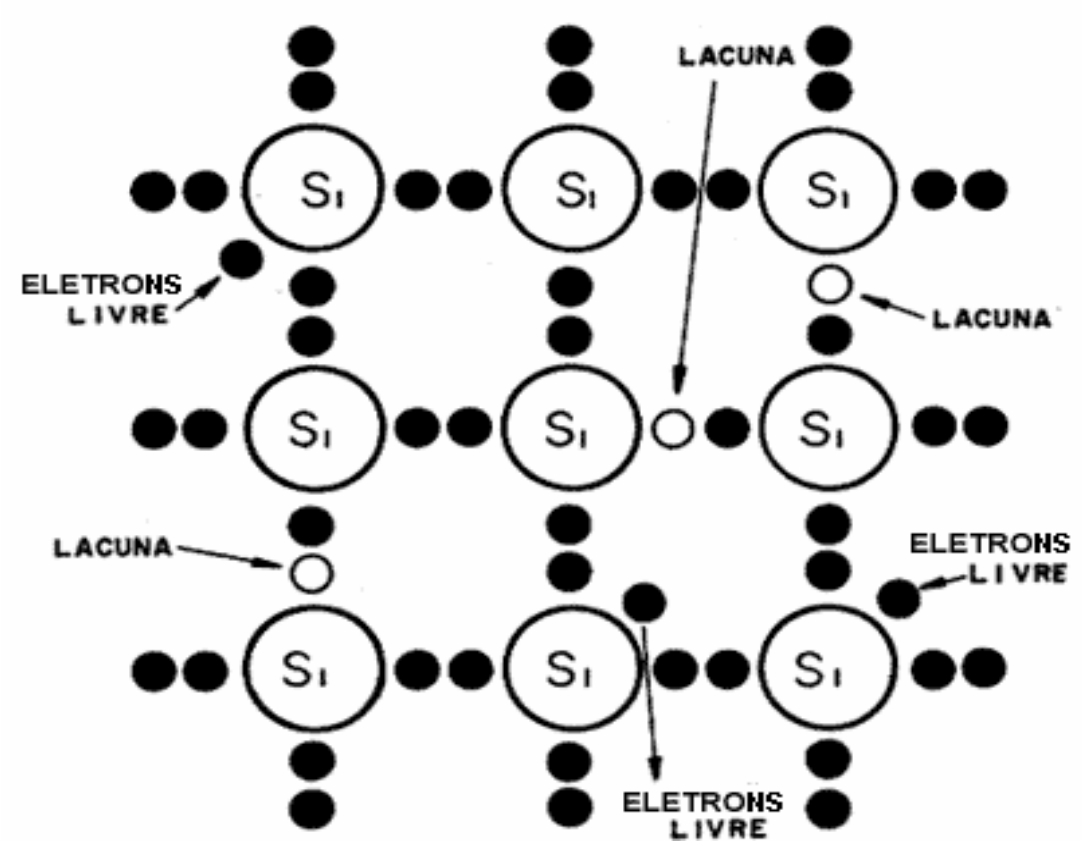


Fotons acima de certa frequência arrancam elétrons da superfície metálica e circulam pelo circuito.

Rede cristalina de Si na temperatura 0 K



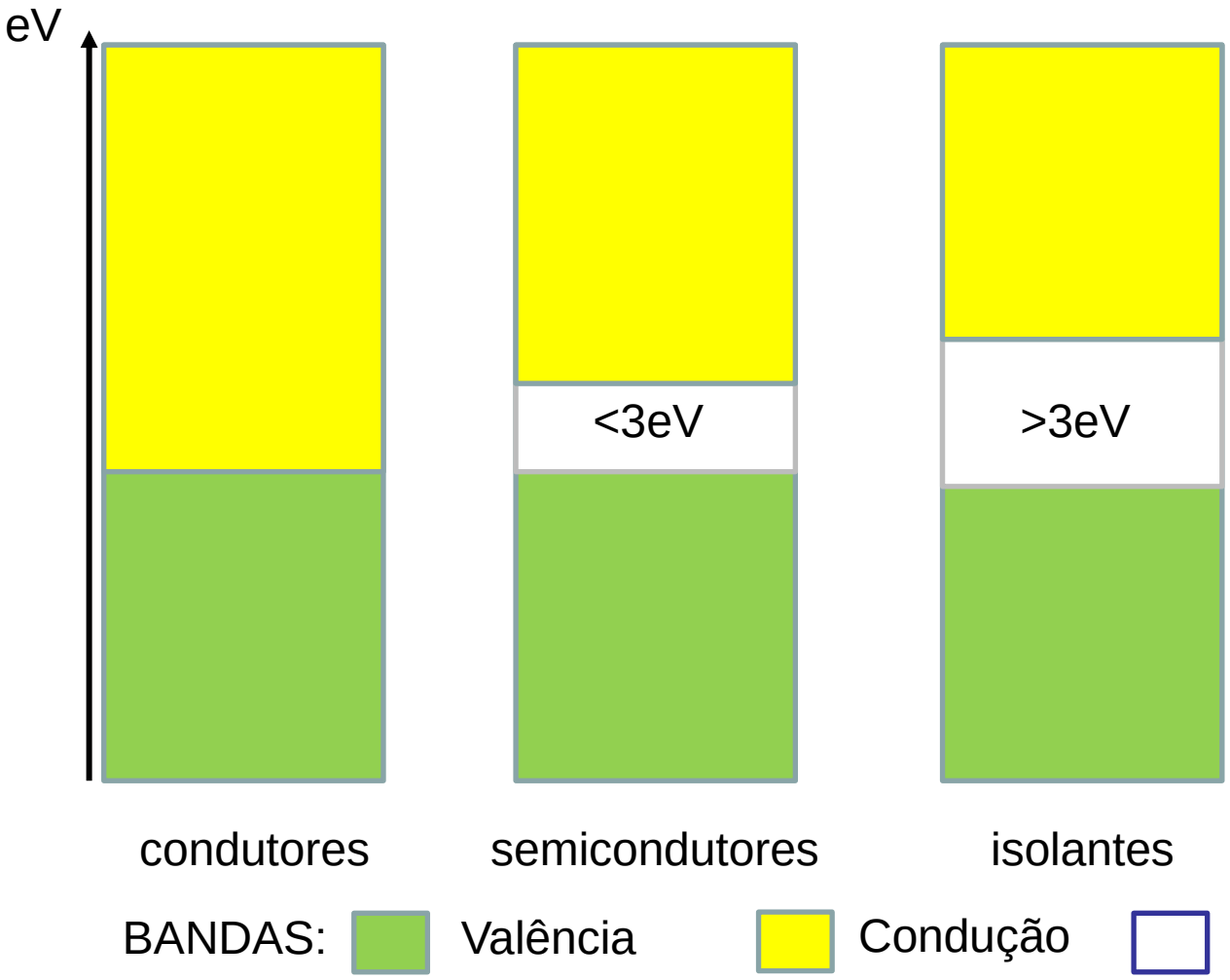
Todos os elétrons estão na banda de energia de valência



Devido a energia térmica fornecida pelo meio alguns elétrons passam para a banda de condução.

Banda de Valência e Banda de Condução em Materiais Diferentes

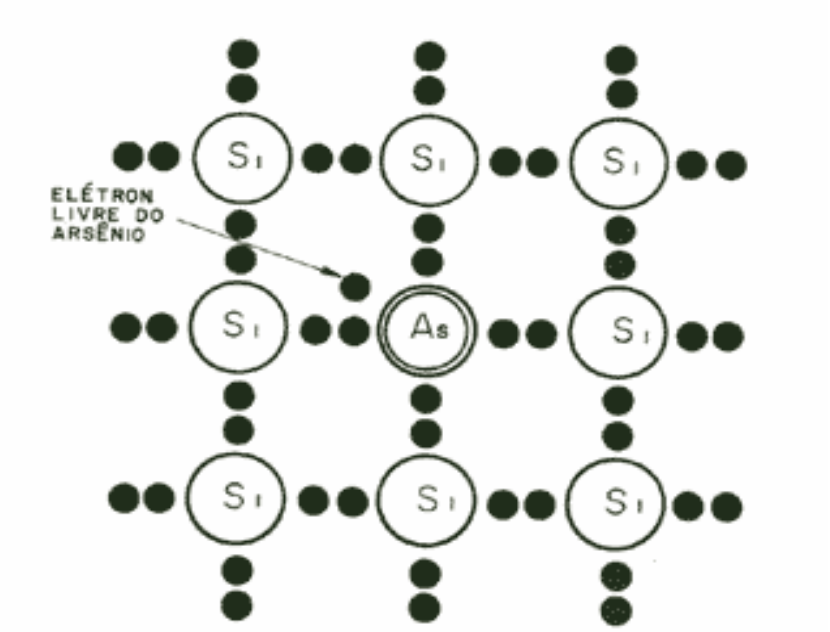
1 eV = 1,602 10^{-19} J



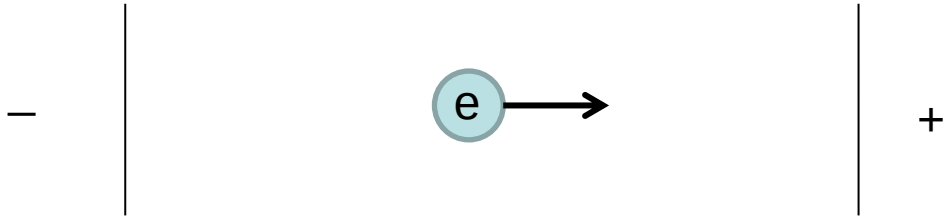
Nota: 1eV é a energia de uma partícula com carga igual a de um elétron sujeita a uma diferença de potencial de 1V.
1eV=1,6 10^{-19} J



Material Semi-Condutor Tipo N.
Átomos Doadores geram Elétrons Livres sem Gerar Lacunas

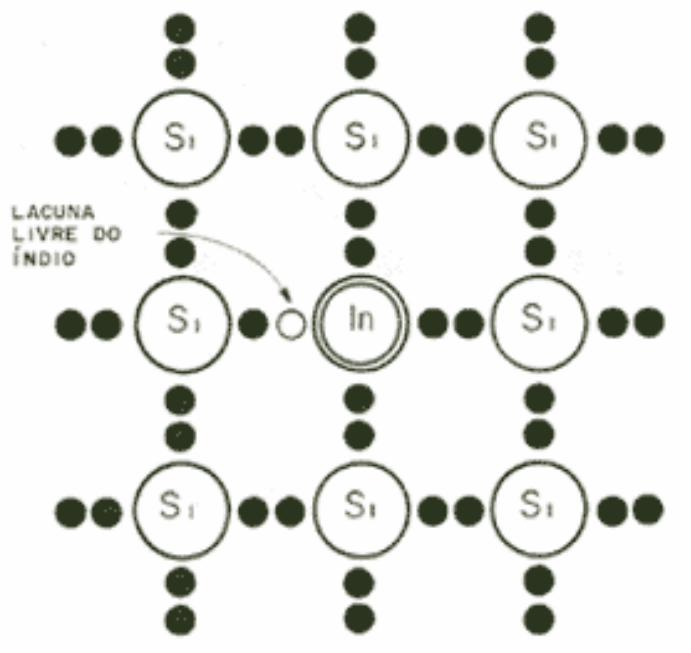


Alteração da condição original da rede cristalina por átomo pentavalente (dopagem)
Exemplo com As. Usual P
A corrente de elétrons na banda de condução é o transportador majoritário de carga elétrica.



Material Semi-Condutor Tipo P.

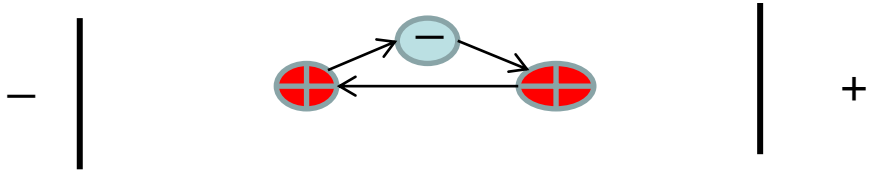
Átomos Receptores. Geram Lacunas sem gerar elétrons livres.



Átomos trivalentes.

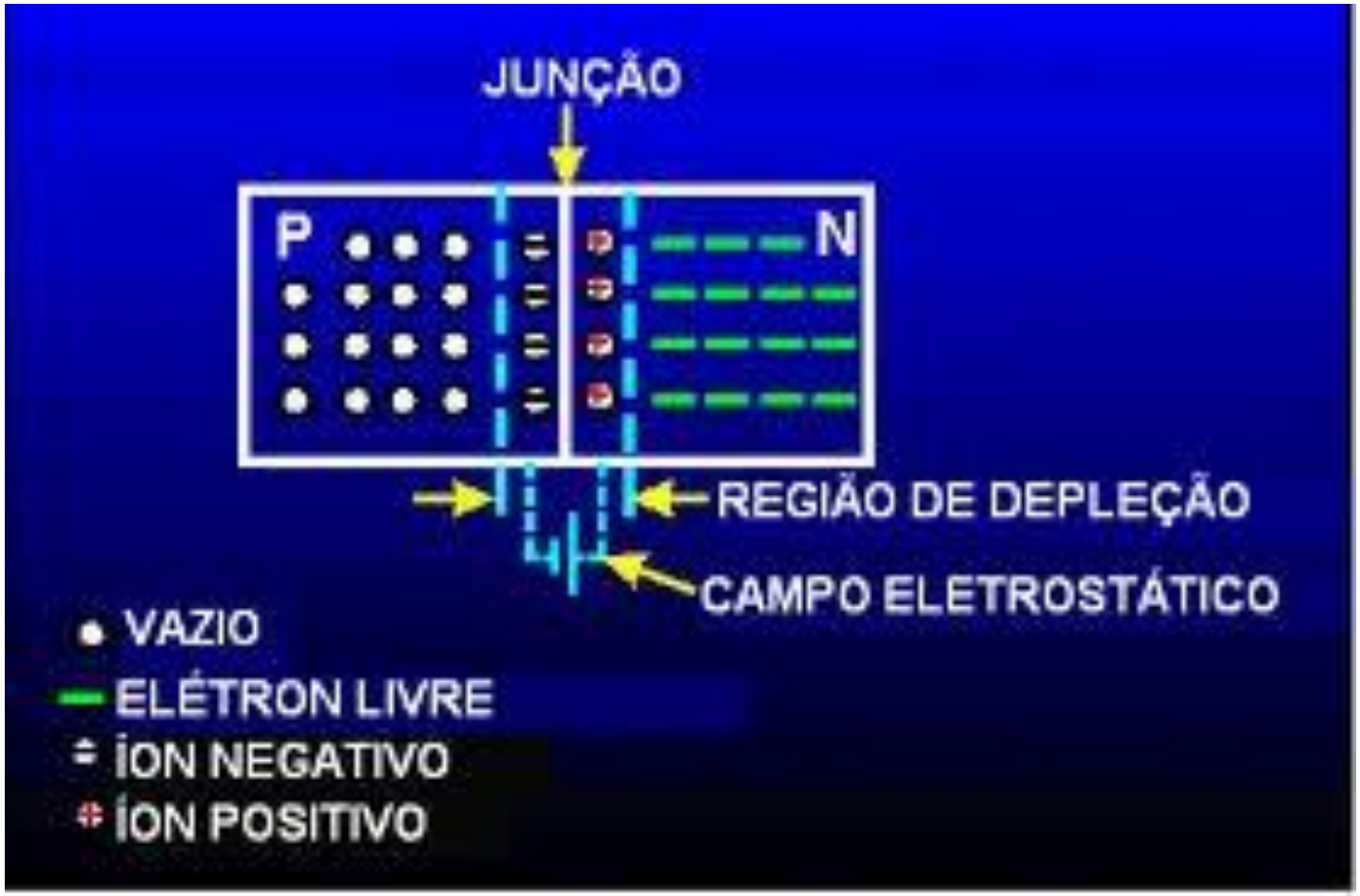
Exemplo In, mais comum B

A corrente de “lacunas” na banda de valência é o transportador majoritário de cargas elétricas.

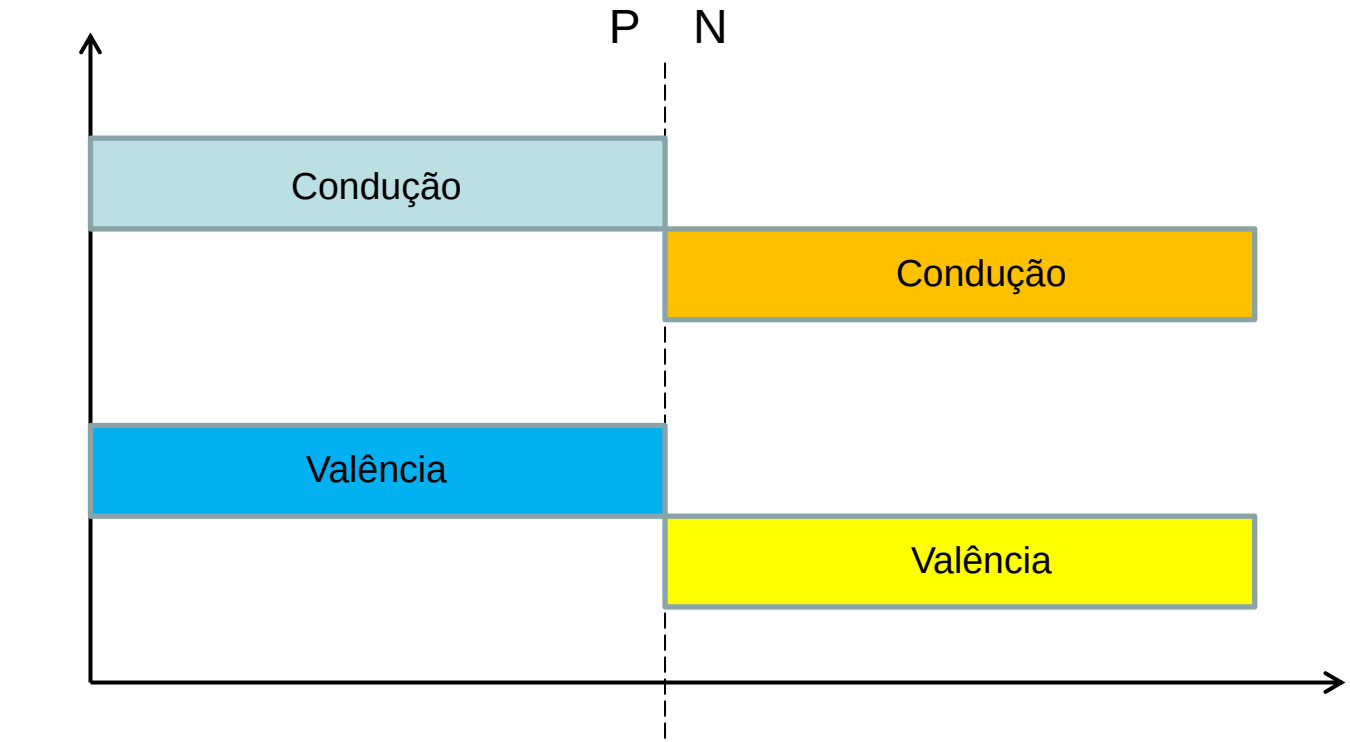




A junção PN

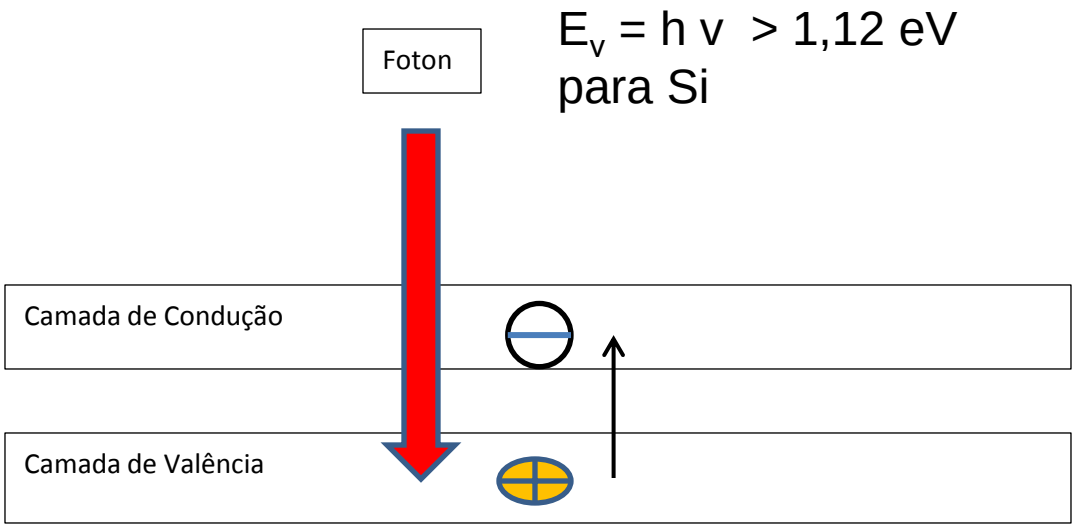

JUNÇÃO
P
N
REGIÃO DE DEPLEÇÃO
CAMPO ELETROSTÁTICO
VAZIO
ELÉTRON LIVRE
ÍON NEGATIVO
ÍON POSITIVO


Shock wave
CP
TE
HEC


Energia
P
N
Condução
Condução
Valência
Valência



Efeito Fotovoltaico



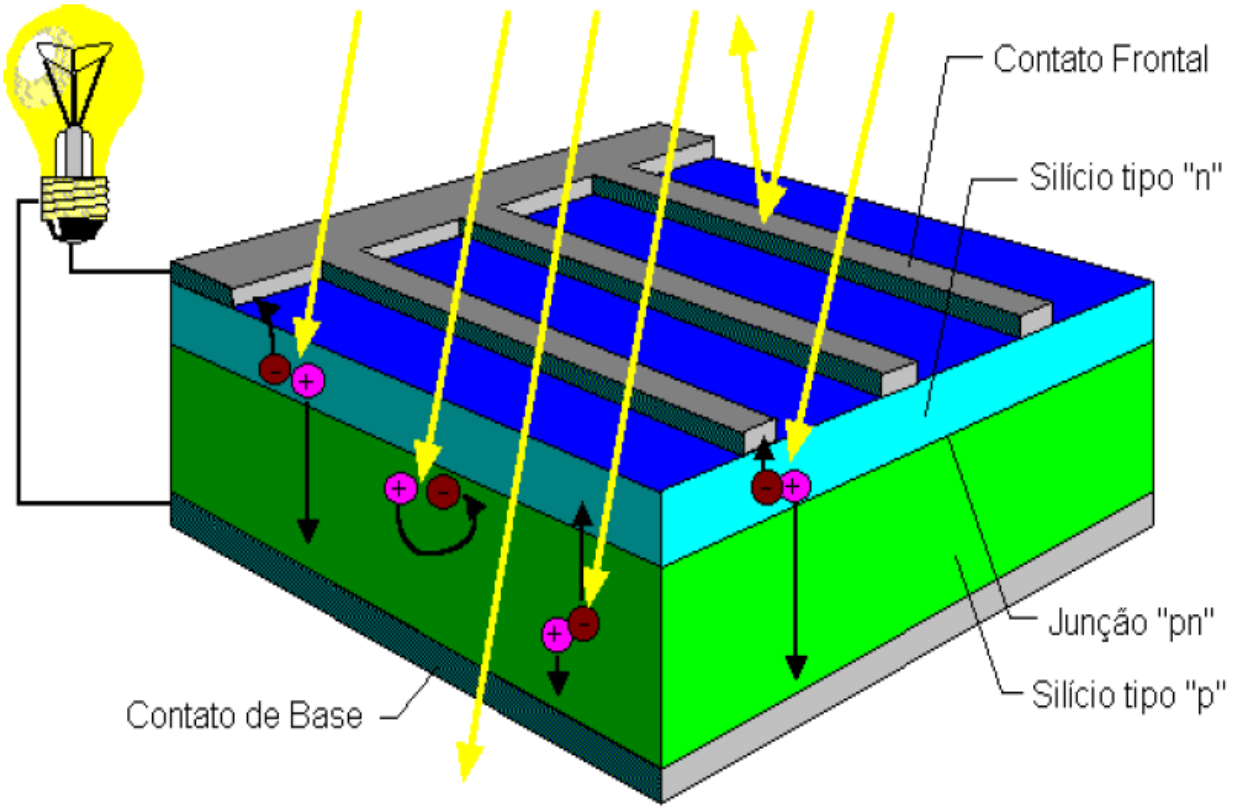
Na junção PN o campo elétrico separa os portadores de carga

2.A CÉLULA FOTOVOLTAICA





Célula Fotovoltaica





foton
15**
Energia
P
N
Condução
Condução
e
emf
Valencia
Valencia



Separação no Espectro Solar dos Fotons com Energia Superior a 1,12 eV para Si

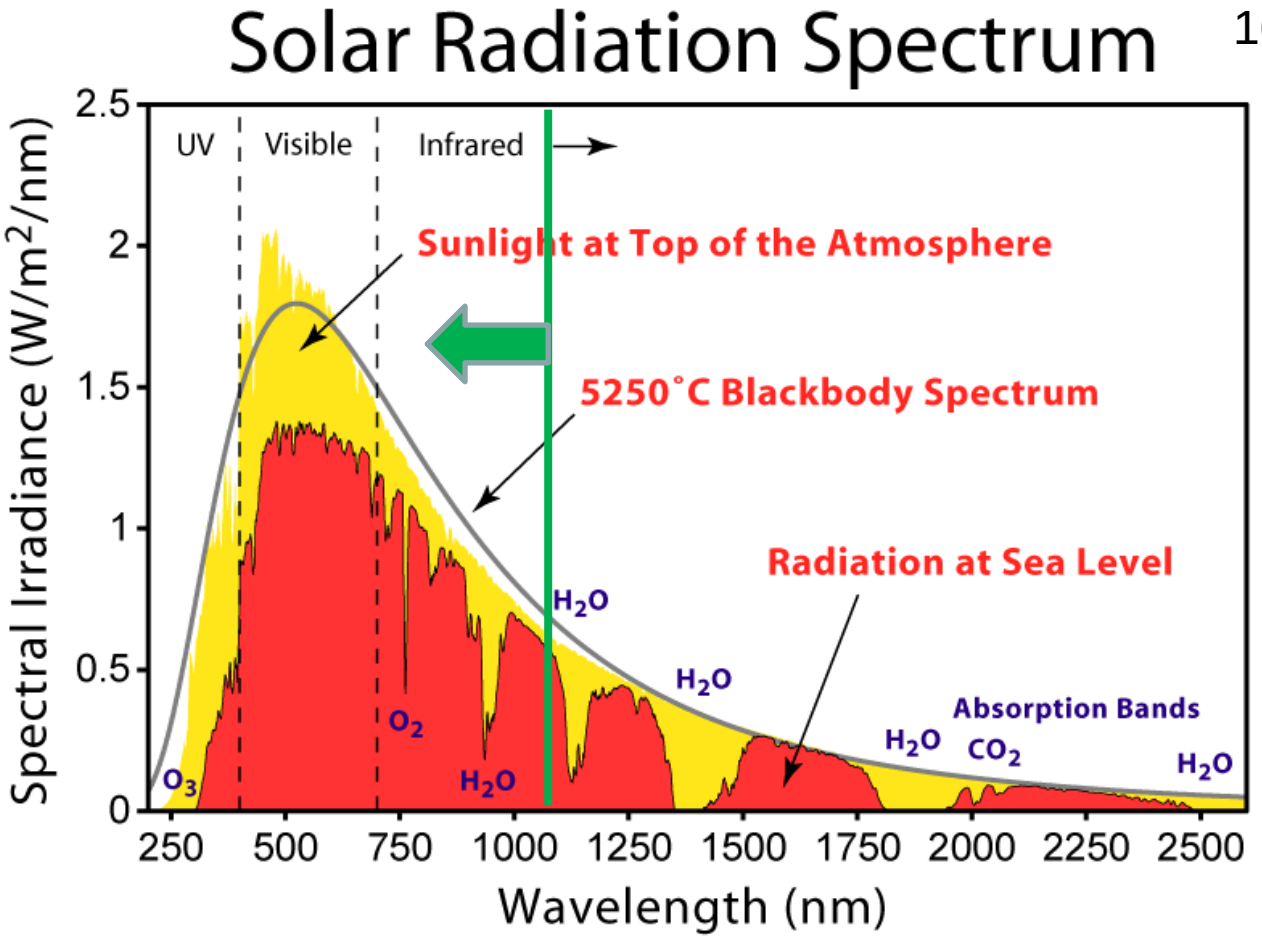
$$E(J/fóton) > 1{,}12\ eV$$

$$\lambda < \frac{hc}{E}$$

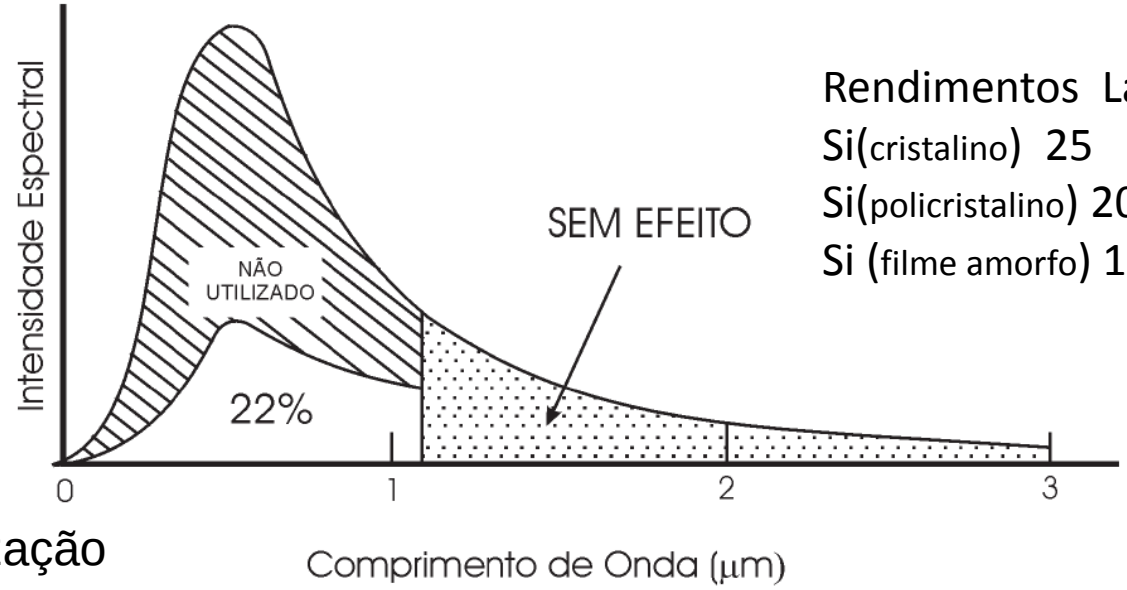
$$E = 1{,}79\ 10^{-19}\ J$$

$$\lambda < \frac{6{,}62\ 10^{-34} 3\ 10^{8}}{1{,}79\ 10^{-19}}$$

$$\lambda < 1109\ nm$$



Thekaekara (1974)



Rendimentos Lab.
Si(cristalino) 25
Si(policristalino) 20
Si (filme amorfo) 10 a 16

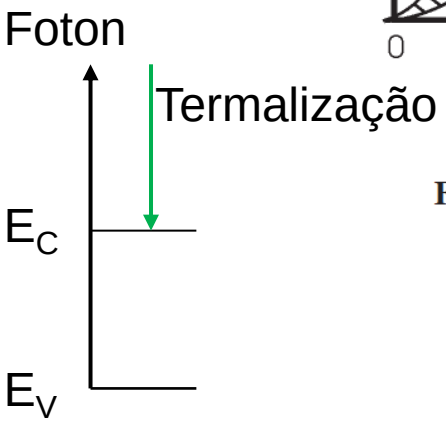


Figura 2.2.2 - Conversão de energia luminosa numa célula de Silício.
(Fonte: "Universidade de Berlin - EMI/SES")

Curva característica I x V de uma Célula Fotovoltaica de Silício de 20x20 mm.
GT = 1000 W/m²; Tc = 25 °C

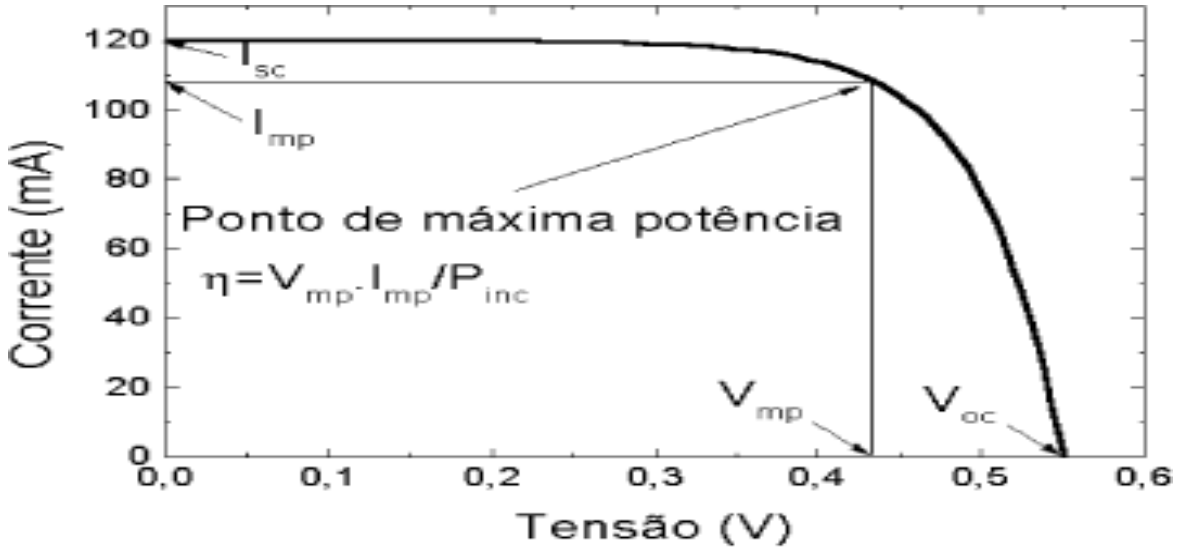


Figura 2 - Curva de corrente por tensão de uma célula solar de silício típica.

I_{SC} : corrente de curto circuito; V_{OC} : tensão de circuito aberto
I_{MP} : corrente de potência máxima; V_{MP} : tensão de potência máxima
P_{INC} : irradiação solar incidente; $P_{INC} = G_T \times A$
η : rendimento da célula;



Qual o valor do rendimento máximo da célula fotovoltaica do slide anterior ?
A curva foi levantada para G_T = 1000 W/m² e T_C = 25 °C (STC)

$\eta = (V_{MP} \times I_{MP})/P_{INC}$

Da curva característica:

V_{MP} = V; I_{MP} = A ;

$P_{INC} = G_T \times A$

A = m²

P_{INC} = W

η =



Qual o valor do rendimento máximo da célula fotovoltaica do slide anterior ?
A curva foi levantada para G_T = 1000 W/m² e T_C = 25 °C (STC)

$\eta = (V_{MP} \times I_{MP})/P_{INC}$

Da curva característica:

V_{MP} = 0,43 V; I_{MP} = 0,108 A ;

$P_{INC} = G_T \times A$

$A = 4\ 10^{-4}$ m²

P_{INC} = 0,4 W

η = (0,43 x 0,108)/0,4 = 0,116 ou 11,6%



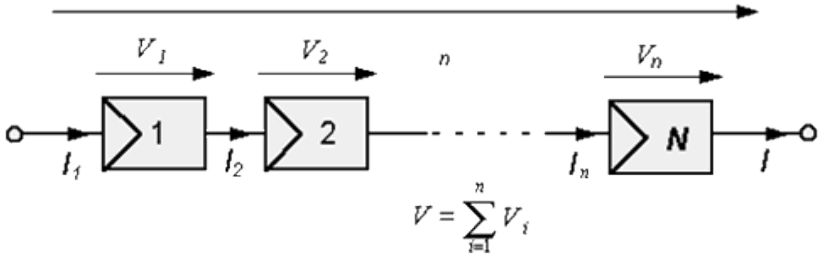
3. O PAINEL FOTOVOLTAICO



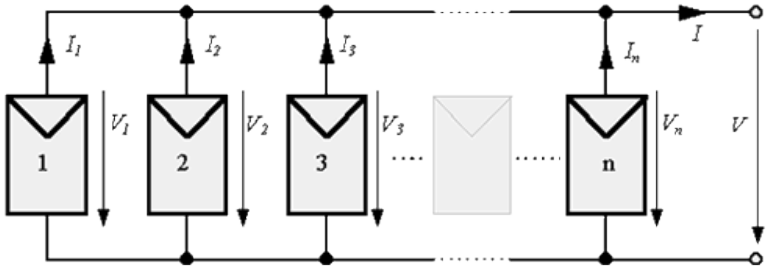
Um painel solar fotovoltaico é constituído pela associação de células solares em série e em paralelo.



Associação de Células Solares em Série



Associação de Células Solares em Paralelo



$$I = \sum I_i$$

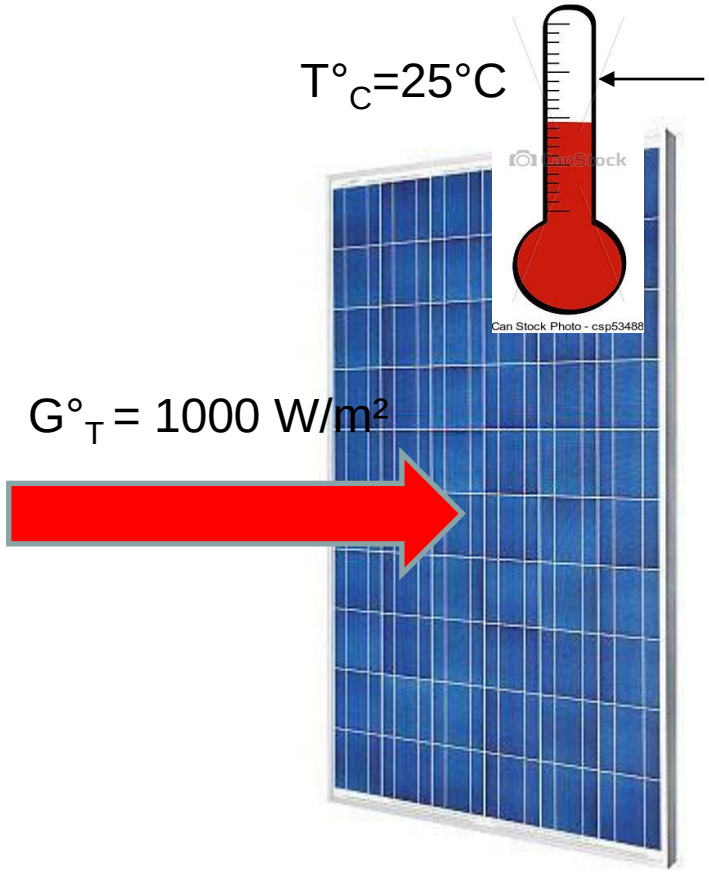


Exemplo de Especificações de Painel Fotovoltaico Comercial

MODULE / MECHANICAL DATA	
Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	60 (6 × 10)
Dimensions	1638×982×40 mm (64.5×38.7×1.57 in)
Weight	18 kg (39.7 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-BOX	IP67, 3 diodes
Cable	4 mm² (IEC) or4 mm² & 12 AWG 1000 V (UL 1000 V) or 12 AWG (UL 600 V), 1000 mm (650 mm is optional)
Connectors	MC4 or MC4 comparable
Stand. Packaging	24 pcs, 480 kg (quantity & weight per pallet)
Module Pieces per Container	672 pcs (40'HQ)

www.canadiansolar.com

Dados de Performance em STC- Standart Test Condition (°)





exemplo

ELECTRICAL DATA / STC*

Electrical Data CS6P	250P	255P	260P
Nominal Max. Power (Pmax)	250 W	255 W	260 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	30.1 V	30.2 V	30.4 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.30 A	8.43 A	8.56 A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.2 V	37.4 V	37.5 V
Short Circuit Current (Isc)	8.87 A	9.00 A	9.12 A
Module Efficiency	15.54%	15.85%	16.16%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C		
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000V (UL) or 600 V (UL)		
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC61730)		
Max. Series Fuse Rating	15 A		
Application Classification	Class A		
Power Tolerance	0 ~ + 5 W		

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.



Exemplo: Painel Solar CS-6P 250 Silício Policristalino condição STC
Área A = (1,638 x 0,982) = 1,6085 m² (60 células de 163 x 163 mm)

Potência Nominal Máxima $P°_{mp}$ = 250 W (STC)
Obs 1: 250W / 1,60 m² = 156 W/m² (típico silício pc 135 W/m²)

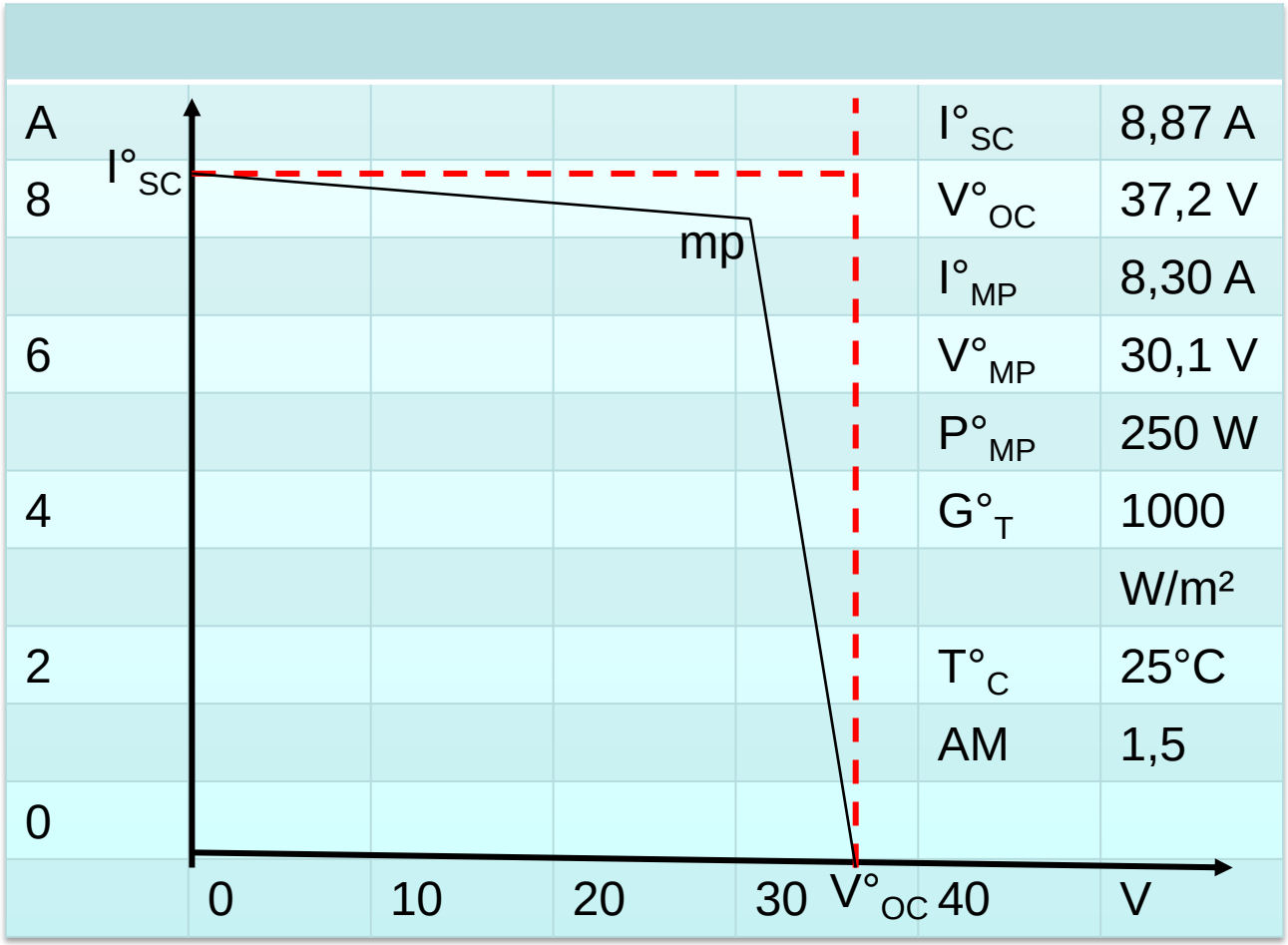
Tensão $V°_{mp}$ = 30,1 V
Obs 2 : 30,1V / 60 células série = 0,50 V/célula

Corrente Elétrica $I°_{mp}$ = 8,3 A
Obs 3 : 8,3 A / (0,0266 m²/célula) = 312 A/m² ou 31,2 mA/cm²

Eficiência $\eta°_{mp}$ = 15,54% (laboratório silício pc 20%)
Obs 4 : 250 W/ (1000 W/m² x 1,6 m²) = 0,1563

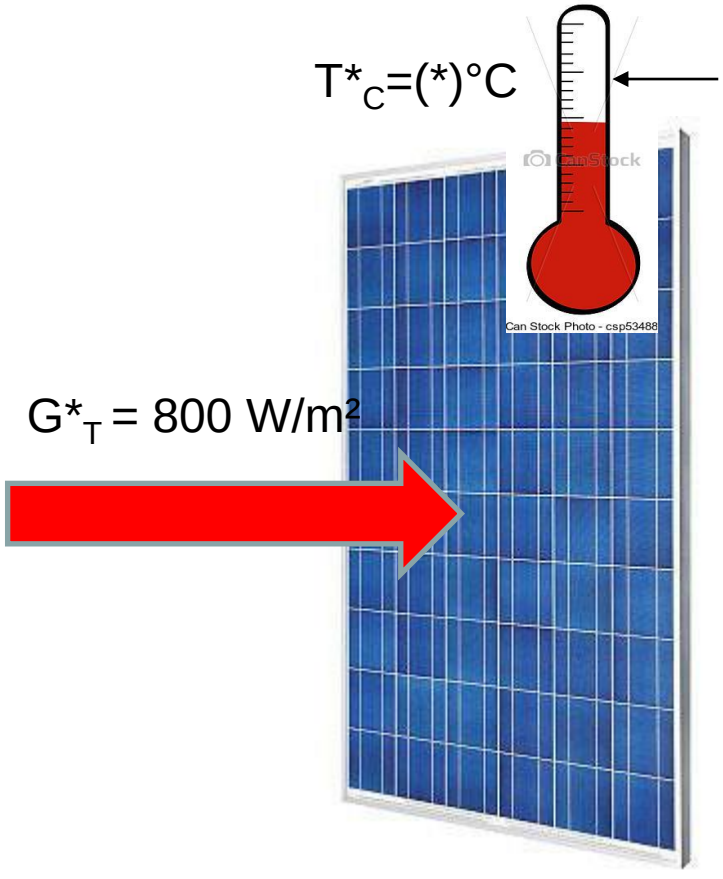
A Temperatura do painel deve ficar na faixa – 40°C a + 85°C

Curva Característica Painel Fotovoltaico na Condição STC



I°SC	8,87 A
V°OC	37,2 V
I°MP	8,30 A
V°MP	30,1 V
P°MP	250 W
G°T	1000 W/m²
T°C	25°C
AM	1,5

Dados de Performance em NOCT – Nominal Operating Cell Temperature (*)



também: NMCT – Nominal Module Operating Temperature



exemplo

ELECTRICAL DATA / NOCT*

Electrical Data CS6P	250P	255P	260P
Nominal Max. Power (Pmax)	181 W	185 W	189 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	27.5 V	27.5 V	27.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	6.60 A	6.71 A	6.80 V
Open Circuit Voltage (Voc)	34.2 V	34.4 V	34.5 V
Short Circuit Current (Isc)	7.19 A	7.29 A	7.39 A

* Under Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), irradiance of 800 W/m^2, spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.



Exemplo: Painel Solar CS-6P 250 Silício Policristalino condição NOCT (*)
Área A = (1,638 x 0,982) = 1,6085 m² (60 células de 163 x 163 mm)

Potência Nominal Máxima P^*_{mp} = 181 W (NOCT)
Obs 1: 181W / 1,60 m² = 113 W/m²

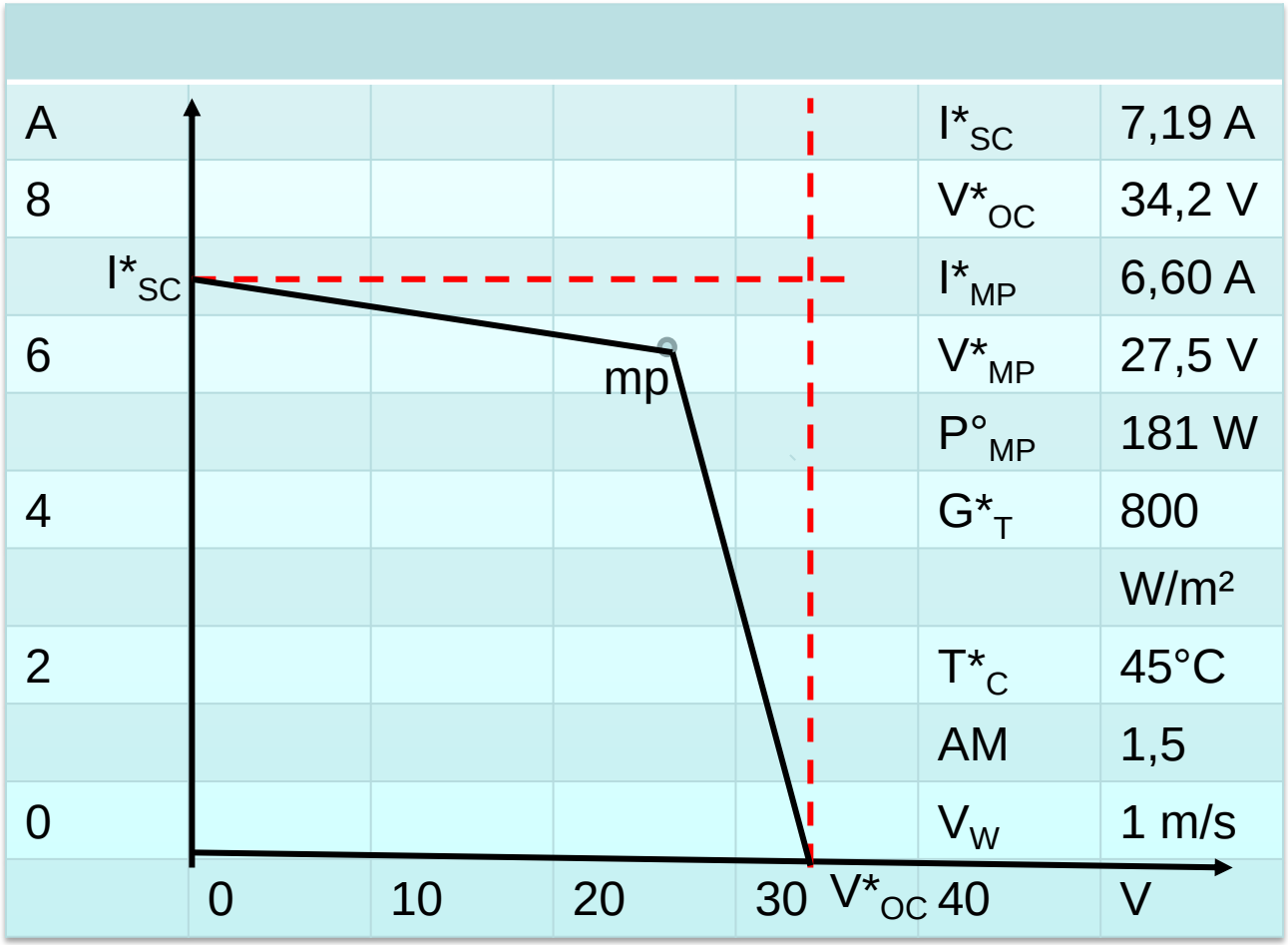
Tensão V^*_{mp} = 27,5 V
Obs 2 : 27,5 V / 60 células série = 0,46 V/célula

Corrente Elétrica I^*_{mp} = 6,6 A
Obs 3 : 6,6 A / (0,0266 m²/célula) = 248 A/m² ou 24,8 mA/cm²

Eficiência η^*_{mp} = 14,14%
Obs 4 : 181 W /(800 W/m² x 1,6 m²) = 0,1414

Nominal Operating Cell Temperature – NOCT – Tc* = 45°C

Curva Característica Painel Fotovoltaico na Condição NOCT





Comparação Condições STC e NOCT

	STC		NOCT	
G_T (W/m²)	$I°_{SC}$	8,87 A	$I*_{SC}$	7,19 A
fluxo elétrons	$V°_{OC}$	37,2 V	$V*_{OC}$	34,2 V
gerados	$I°_{MP}$	8,30 A	$I*_{MP}$	6,60 A
	$V°_{MP}$	30,1 V	$V*_{MP}$	27,5 V
Tc (°C)	$P°_{MP}$	250 W	$P°_{MP}$	181 W
velocidade da	$G°_T$	1000	$G*_T$	800
reação de		W/m²		W/m²
recombinação	$T°_C$	25°C	$T*_C$	45°C
	AM	1,5	AM	1,5
$P*_{mp}/P°_{mp}$ =0,72			V_W	1 m/s
	$\eta_{mp}°$	15,5	$\eta_{mp}*$	14,1%

Influência da Irradiação Solar na Curva Característica

I_{SC} é praticamente proporcional a G_T
V_{OC} varia pouco com G_T

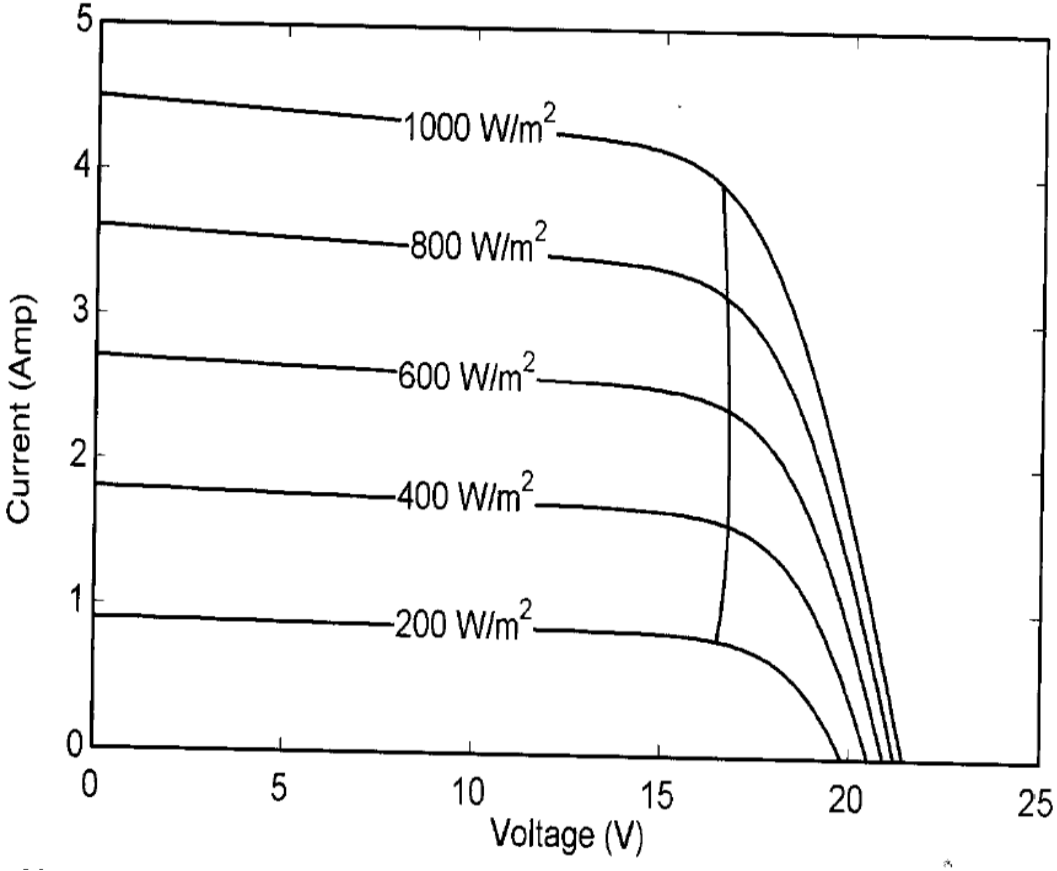


Fig.23.2.2 Duffie & Beckman

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CURVA CARACTERÍSTICA

I_{SC} varia pouco com T_C;
V_{OC} varia significativamente com T_C

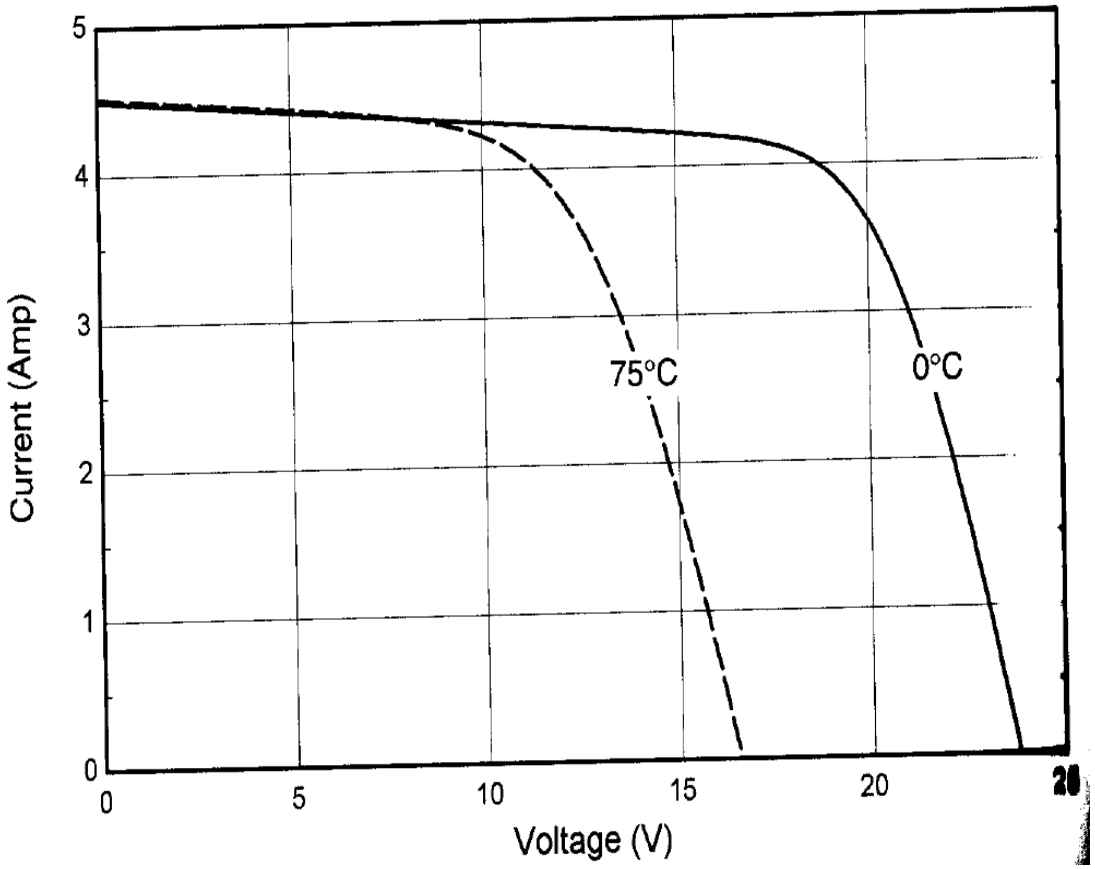


Fig.23.2.5 Duffie & Beckman



INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR E DA TEMPERATURA NA MÁXIMA POTÊNCIA

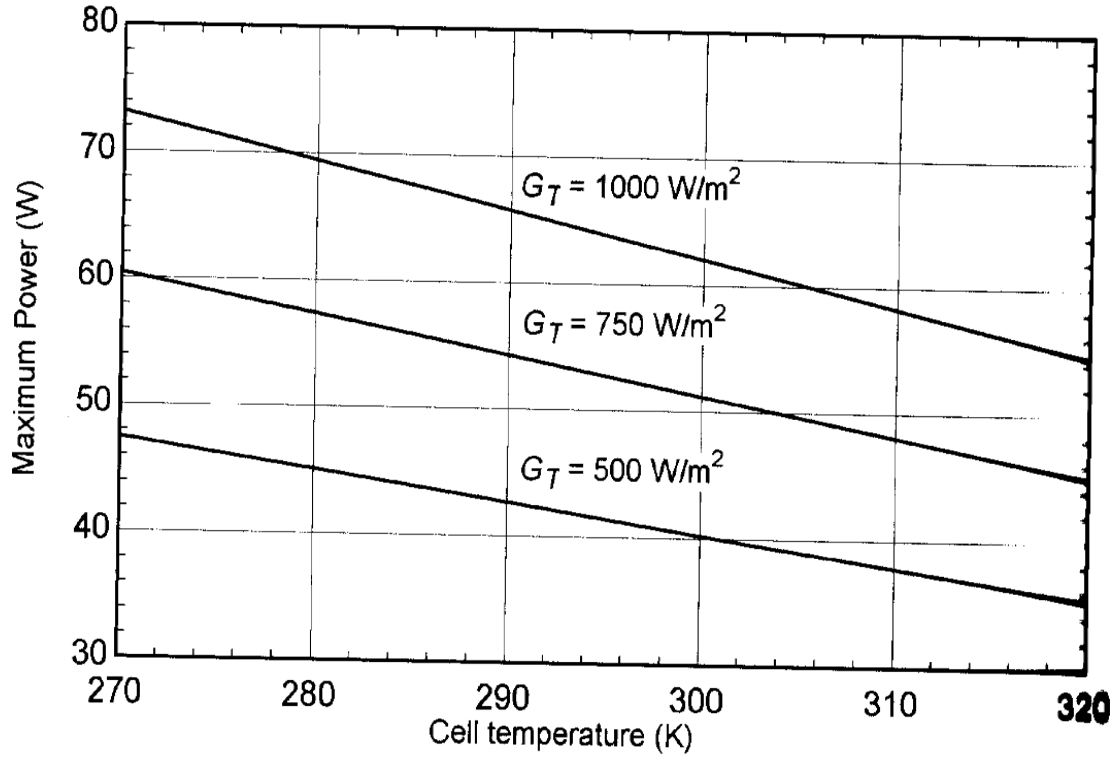


Fig.23.2.6 Duffie & Beckman



TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.43% / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.34% / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.065% / °C
Nominal Operating Cell Temperature	45±2°C

http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabela_fotovoltaico_modulo.pdf



Coeficiente de Temperatura para V_{oc} na temperatura de célula T_C
G_T = 1000 W/m²

$$\gamma_{OC} = \frac{1}{V_{OC}^0}\left(\frac{V_{OC} - V_{OC}^0}{T_C - T_C^0}\right)$$

Exemplo: -0,0034 °C^{-1} para Painel Solar CS-6P 250

$$V_{OC} = V_{OC}^0\left(1 + \gamma_{OC}\left(T_C - T_C^0\right)\right)$$

Coeficiente de Temperatura para I_{SC} na temperatura de célula T_C G_T=1000W/m²,

$$\gamma_{SC} = \frac{1}{I_{SC}^0}\left(\frac{I_{SC} - I_{SC}^0}{T_C - T_C^0}\right)$$

Exemplo: +0,00065 °C^{-1} para Painel Solar CS-6P 250

$$I_{SC} = I_{SC}^0\left(1 + \gamma_{SC}\left(T_C - T_C^0\right)\right)$$



Estimativa da Temperatura de Operação da Célula de Painel Fotovoltaico (Zilles)

$$T_C = T_a + \frac{G_T}{800}(T_C^* - 20)\ 0{,}9$$

T_C [ºC] temperatura da célula
T_a [ºC] temperatura ambiente
T_C^* [ºC] temperatura nominal de operação da célula TNOC
G_T [W/m²] radiação solar média no plano de célula

Exemplo: Um gerador fotovoltaico usando painéis Canadian Solar 250P, foi instalado em Sinop-MT. Estime a temperatura do painel as 14:30 de um dia de janeiro com G_T = 865 W/m² e Ta = 35,1 °C. A TNOC deste painel é Tc*=45°C.

Exemplo: Um gerador fotovoltaico usando painéis Canadian Solar 250P, foi instalado em Sinop-MT. Estime a temperatura do painel as 14:30 de um dia de janeiro com GT = 865 W/m² e Ta = 35,1 °C. A TNOC deste painel é Tc*=45°C.

$$T_C = T_a + \frac{G_T}{800}[T_{NOC} - 20]\ 0{,}9$$

T_C= 35,1 + [865/800]*[45-20]*0,9= 35,1 + 24,3 = 59,4ºC

Nota: O manual FV do CRESESB apresenta a expressão

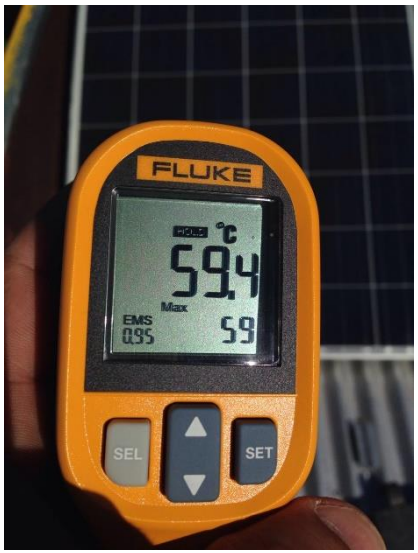
$$T_C = T_a + K_T G_T$$

Onde K_T (°C/Wm^{-2}) é o coeficiente térmico do painel que se não for dado sugere admitir-se o valor 0,03

Das duas equações segue que K_T=[0,9(T_{NOC}-20)]/800

No exemplo temos:

T_C = 35,1 + 0,03 x 865 = 61,0°C



Sinop-MT 14:30



Exemplo: Um gerador fotovoltaico usando painéis Canadian Solar 250P, foi instalado em Sinop-MT. A temperatura do painel as 14:30 de um dia de janeiro com G_T = 865 W/m² e Ta = 35,1°C foi estimada em Tc=59,4°C. A TNOC deste painel é Tc*=45°C.

Estime os valores de I_{SC} e V_{OC} deste painel nesta Tc sabendo que:

$I°_{SC}$ = 8,87 A e $V°_{OC}$ = 37,2 V (G_T=1000W/m²),

$\gamma_{SC} = +0{,}00065\ °C^{-1}$, $\gamma_{OC} = -0{,}0034°C^{-1}$.

$$V_{OC} = V_{OC}^{0}\left(1 + \gamma_{OC}\left(T_C - T_C^{0}\right)\right)$$

$$I_{SC} = I_{SC}^{0}\left(1 + \gamma_{SC}\left(T_C - T_C^{0}\right)\right)$$



Exemplo: Um gerador fotovoltaico usando painéis Canadian Solar 250P, foi instalado em Sinop-MT. A temperatura do painel as 14:30 de um dia de janeiro com G_T = 865 W/m² e Ta = 35,1°C foi estimada em Tc=59,4°C. A TNOC deste painel é Tc*=45°C.

Estime os valores de I_{SC} e V_{OC} deste painel nesta T_C sabendo que:

$I°_{SC}$ = 8,87 A e $V°_{OC}$ = 37,2 V, G_T=1000 W/m²

$\gamma_{SC} = +0{,}00065\ °C^{-1}$, $\gamma_{OC} = -0{,}0034°C^{-1}$.

$$V_{OC} = V_{OC}^0\left(1 + \gamma_{OC}\left(T_C - T_C^0\right)\right)$$

$$I_{SC} = I_{SC}^0\left(1 + \gamma_{SC}\left(T_C - T_C^0\right)\right)$$

V_{OC} = 37,2*(1-0,0034(59,4-25))=37,2*0,8830= 32,8V

I_{SC} = 8,87*(1+0,00065(59,4-25))=8,87*1,0224=9,07A

G_T = 1000 W/m²



Coeficiente de Temperatura para Pmp na temperatura de célula T_C

$$\gamma_{mp} = \frac{1}{P_{mp}^0}\left(\frac{P_{mp} - P_{mp}^0}{T_C - T_C^0}\right)$$

$$P_{mp} = P_{mp}^o\left(1 + \gamma_{mp}(T_C - T_C^0)\right)$$

Exemplo: γ_{mp} = -0,0043 °C^{-1} para Painel Solar CS-6P 250

Observe-se que P_{mp} desta expressão esta associado a um valor de T_C referente a um valor de G_T = 1000 W/m².

Para outros valores de G_T usa a expressão de Zilles (eq. 3-2 p.77)

$$P_{mp} = P_{mp}^0 \frac{G_T}{1000}\left(1 + \gamma_{mp}\left(T_C - T_C^0\right)\right)$$



Exemplo: Painel Canadian Solar 250P

Condições STC : P°mp = 250 W; V°mp = 30,1 V ; I°mp= 8,30 A

TNOC = 45ºC; Tc°=25ºC ;

γ(Pmp)= -0,43 [%/ºC]; γ(Voc)= -0,34 [%/ºC]; γ(Isc)= 0,065 [%/ºC];

Estimar : P_{mp} para G_T = 1000 W/m², Ta = 35,1°C e T_C = 59,4°C

$$P_{mp} = P^{o}_{mp}\left(1 + \gamma_{mp}(T_C - T^{0}_{C})\right)$$

$\mathrm{Pmp} = 250 \text{ x } (1\text{- } 0{,}0043 \text{ x } (59{,}4 \text{ -}25)) = 250 \text{ x } 0{,}8521 = 213 \text{ W}$

$\mathrm{I_{SC}} = 9{,}07 \text{ A} ; \mathrm{V_{OC}} = 32{,}8\mathrm{V} ; \mathrm{G_T} = 1000 \text{ W/m}^2$

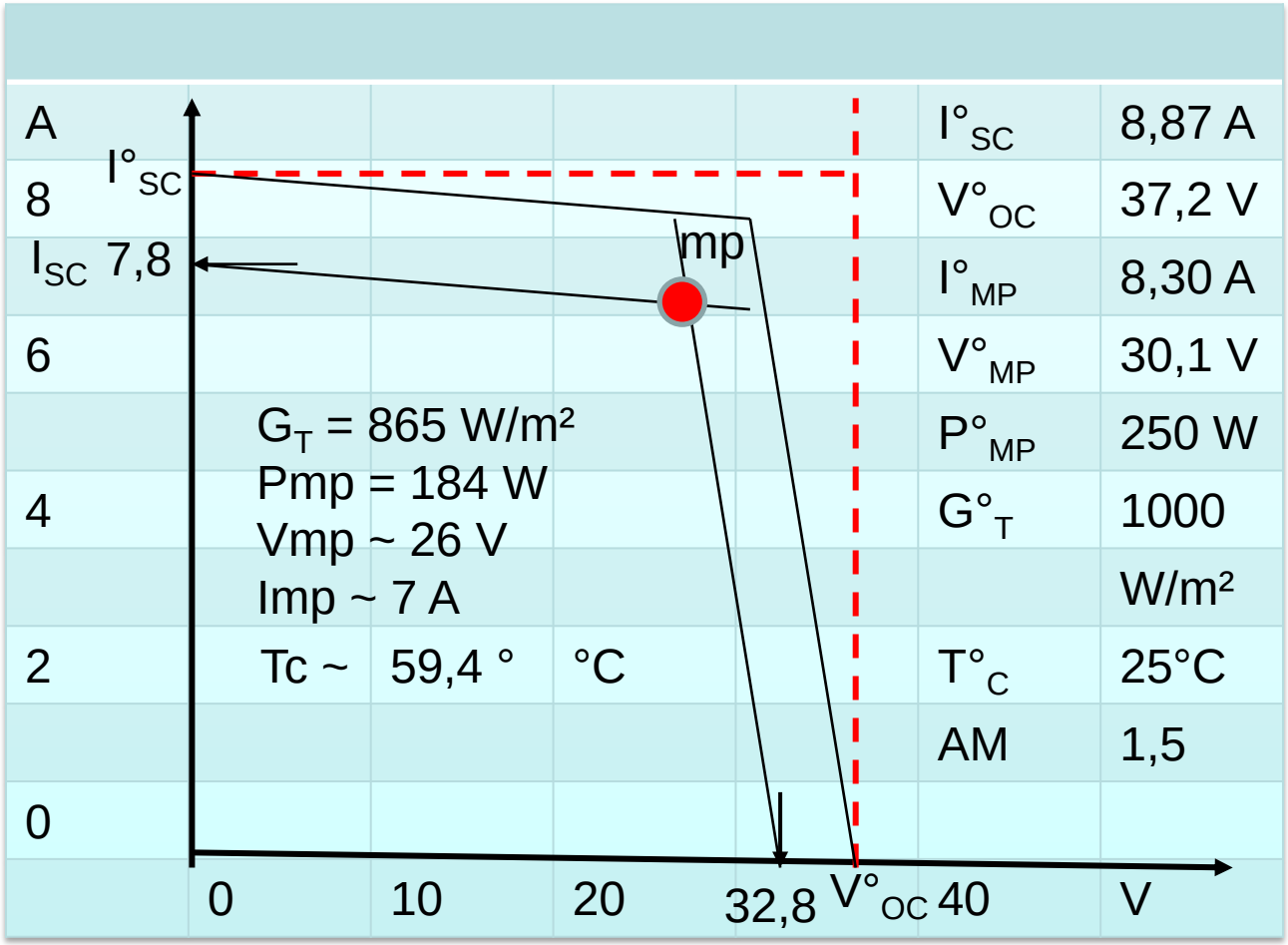
Estimar: P_{mp}, para G_T = 865 W/m² , T_a = 35,1ºC e T_C=59,4°C

$$P_{mp} = P^{0}_{mp}\frac{G_T}{1000}\left(1 + \gamma_{mp}\left(T_C - T^{0}_{C}\right)\right)$$

P_{mp} = 250 x (865/1000) x (1- 0,0043 x (59,4-25)) = 250 x 0,7370 = 184,2 W

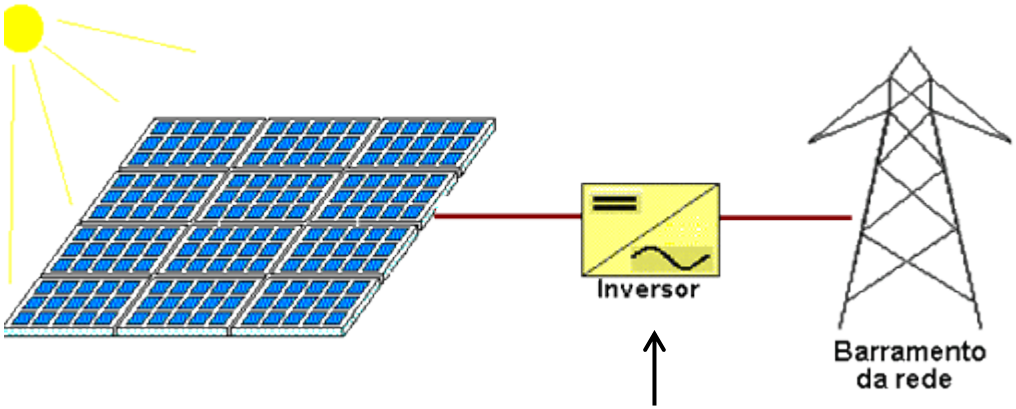
I_{SC} = 9,07 x (865/1000) = 7,8 A; V_{OC} ~ 32 V; G_T = 865 W/m²

Curva Característica Painel Fotovoltaico na Condição (G_T; T_C)



Vmp=30,1x0,8830=26,5V Imp=Pmp/Vmp=6,95A~7A

4.Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Distribuição Elétrica SFCR



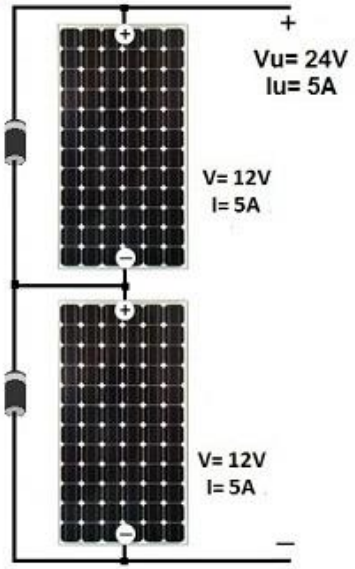
Gerador Fotovoltaico

(CRESESB, 2008)

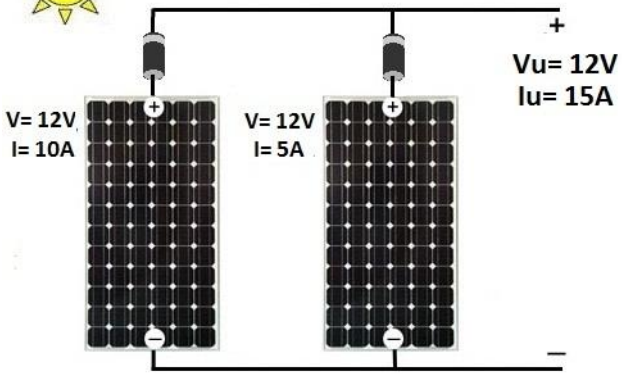


Associação de painéis fotovoltaicos para formar um Gerador Fotovoltaico

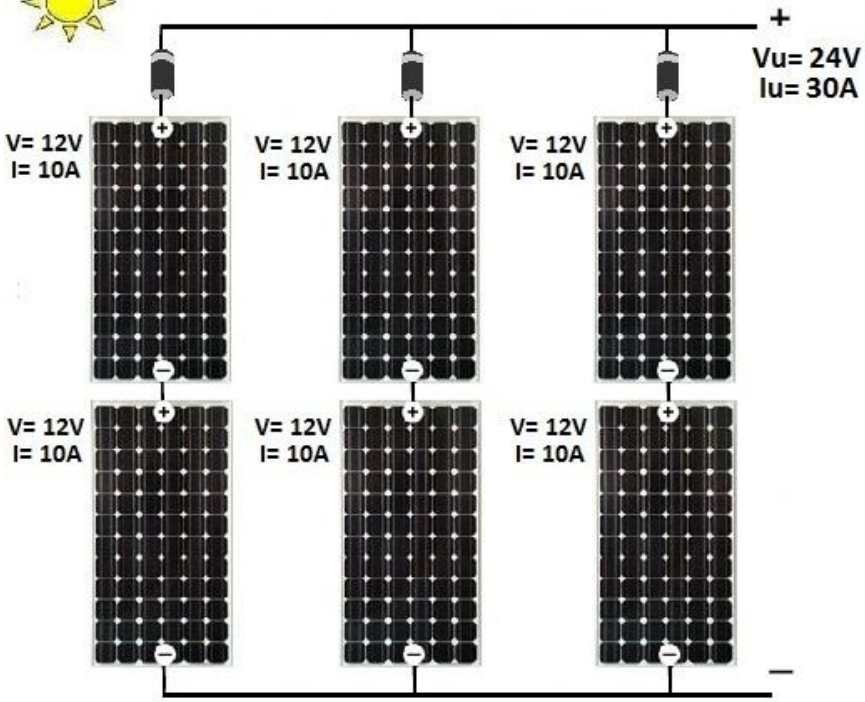
Dois painéis iguais em série



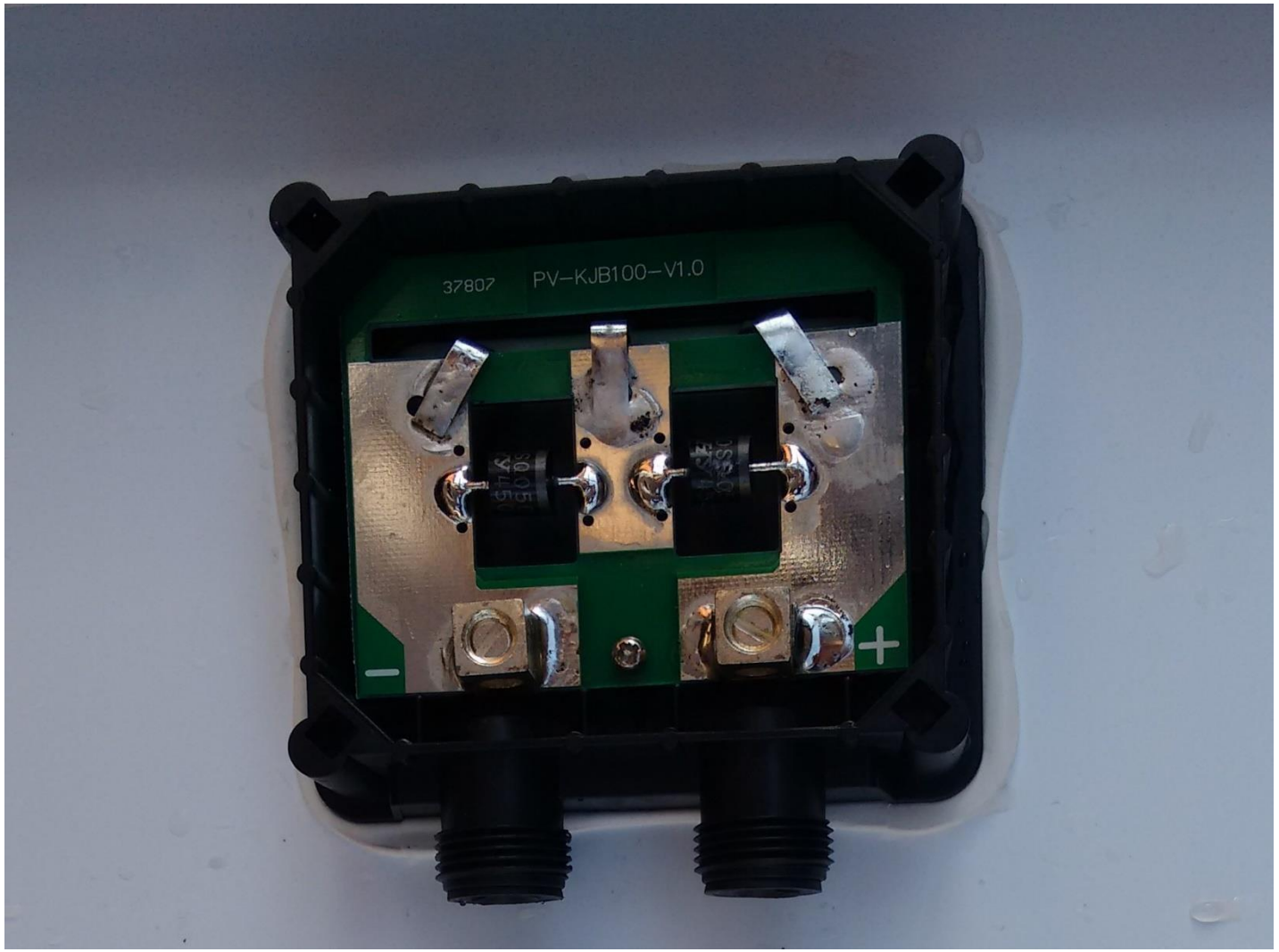
Dois painéis diferentes em paralelo



Painéis fotovoltaicos em série-paralelo



Diodo inserido na caixa de conexão do painel Fotovoltaiico



Curva Característica do Gerador Fotovoltaico

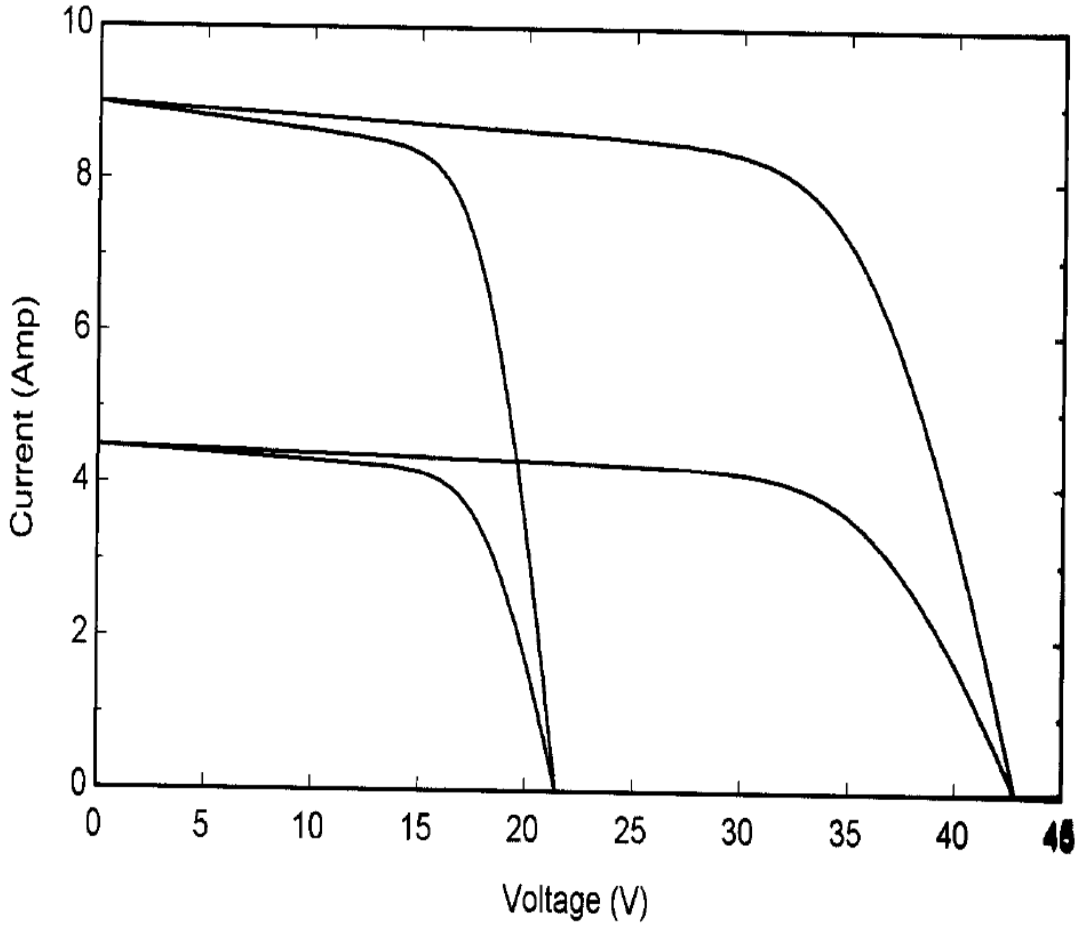




Fig.23.2.3 Duffie & Beckman



Inversores CC/CA
Principais Funções

1.Ilhamento: rede inoperante, GFV interrompe injeção de corrente na rede que só retorna com restabelecimento da mesma.

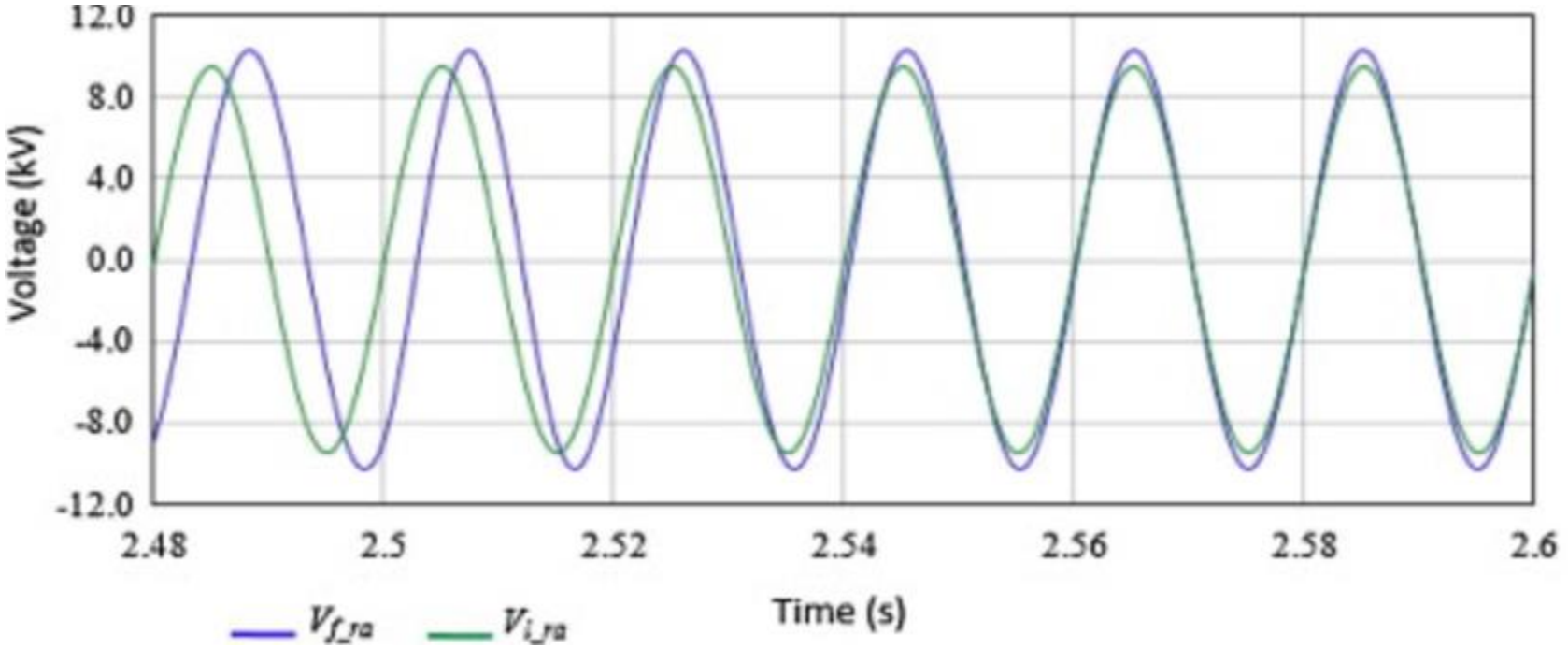
2.Sincronização: ca injetada em fase com a ca da rede

3.Harmonicos: fidelidade do perfil senoidal injetado com aquele da rede

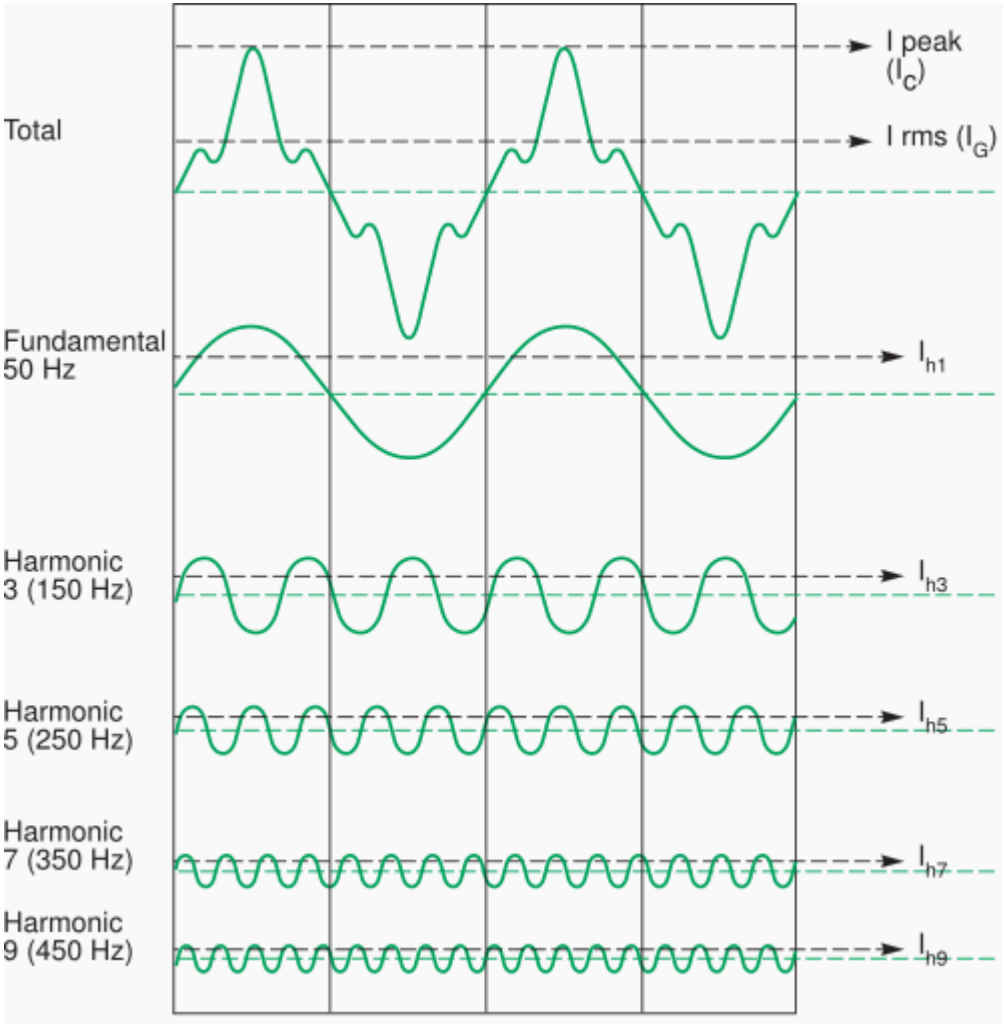
4. Possibilidade de conexão em rede mono, bi ou trifásica

5.MPPT seguidor do ponto de potência máxima garante que instantaneamente os PV operem em seu ponto de máxima potência em diferentes T_C e G_T.

SINCRONIZAÇÃO

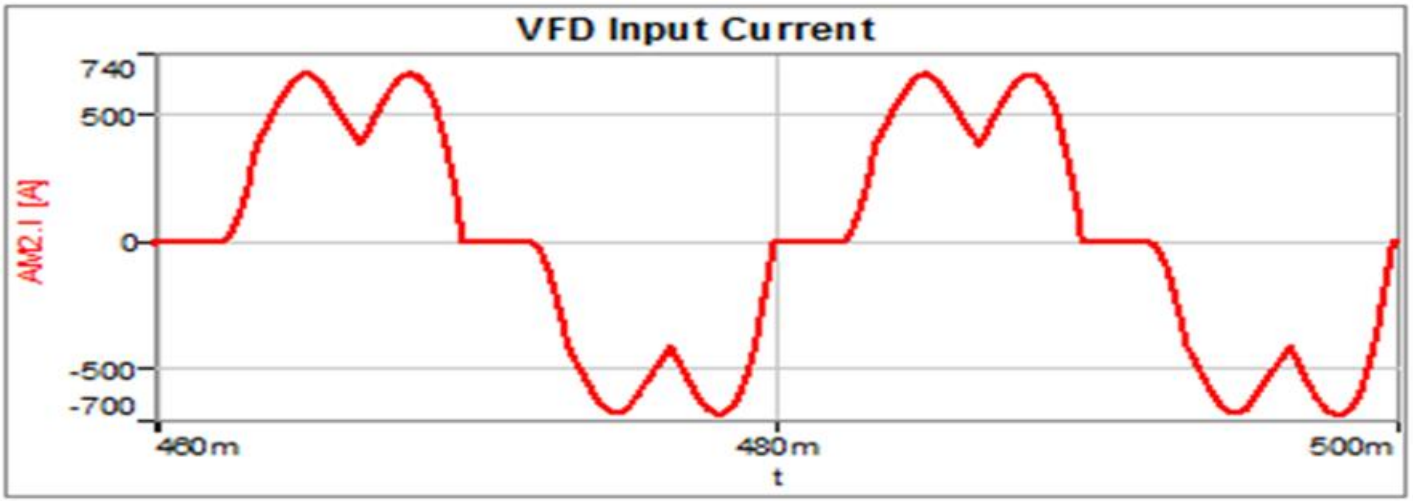


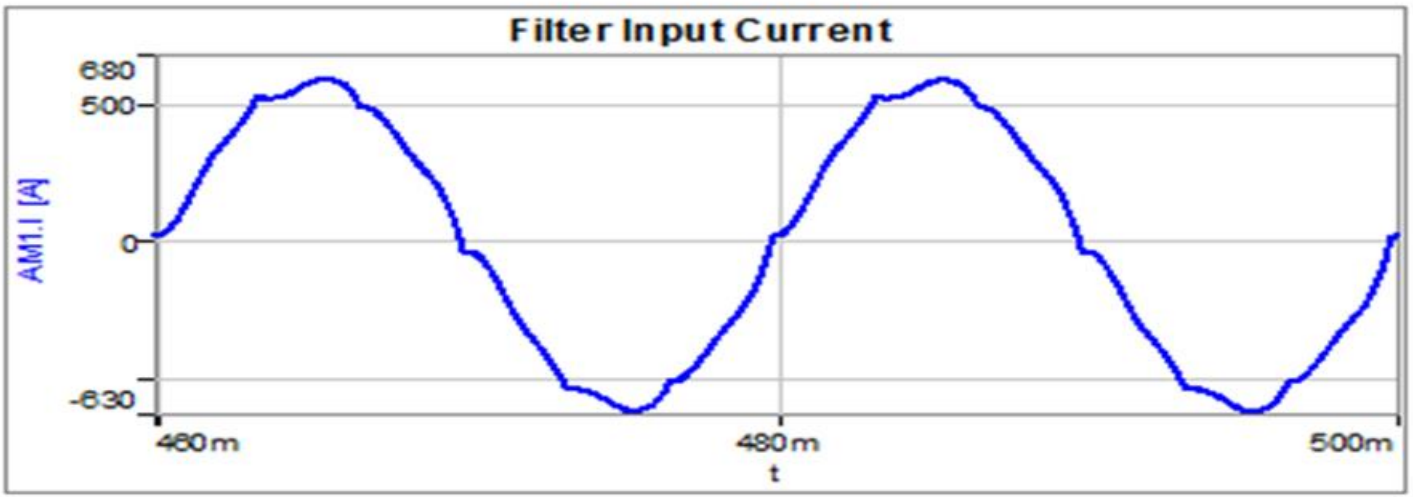
Conceito de Harmônicos de um Onda Senoidal



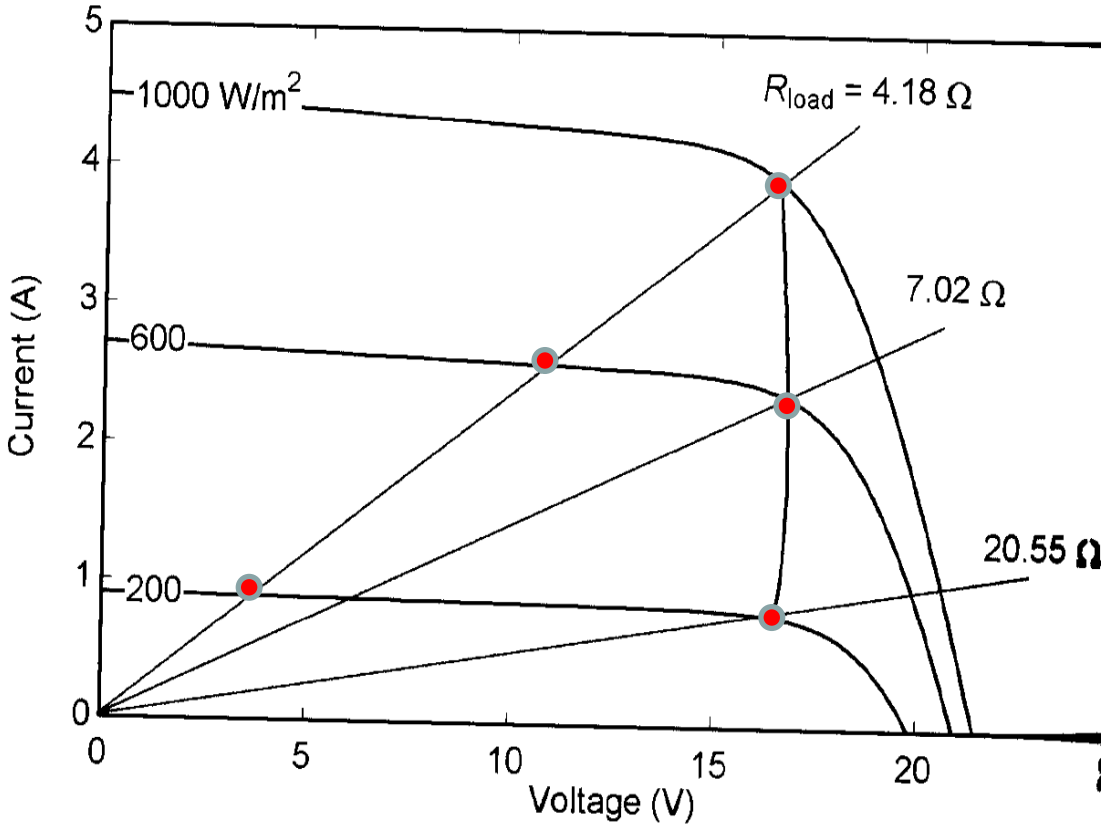


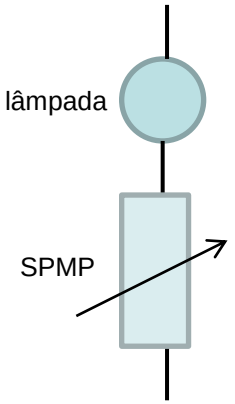
Correção de Distorção Harmônica





Painel Fotovoltaico e Equipamento Consumidor
Exemplo Carga Resistiva: lâmpadas
Conceito de MPPT ou SPMP





MPPT – maximum power point tracker

Fig.23.4.1 Duffie & Beckman



Exemplo de Inversor Fronius Primo 6.0

4,8<P_{GFV}<9,3 kWp

DADOS DE ENTRADA	
Max. corrente de entrada (Idc max1 / Idc max2)	18.0 A / 18.0 A
Max. conjunto corrente curto-circuito (MPP1 / MPP2)	27.0 A / 27.0 A
Min. tensão de entrada (Udc min)	80 V
Feed-in tensão de entrada (Udc start)	80 V
Tensão nominal de entrada (Udc,r)	710 V
Max. tensão de entrada (Udc max)	1,000 V
Faixa de tensão MPP (Umpp min - Umpp max)	240 - 800 V
Numeros de rastreadores MPP	2
Numero de conexões CC	2 + 2

Fronius Primo 6.0-1



EFICIÊNCIA	
Max. eficiência	98.0 %
Eficiencia Europeia (ηEU)	97.3 %
MPP adaptação eficiente	> 99.9 %

Dados de Saida

Potência Nominal ac 6000W

Conexão a rede 180-270V

Frequencia 45-65 Hz

Distorção Harmônica < 5%

Fator de Potência 0,85



Características do Inversor (Exemplo)

Parâmetro	PHB3000-SS
Potência de Entrada Máxima (CC)	20500W
Tensão de Entrada Máxima (CC)	10000Vcc 1000Vcc
Faixa de Operação SPMP (MPPT)	260Vcc a 850Vcc
Tensão CC de Partida	250Vcc
Corrente CC Máxima	22A
Número de Strings	4/2
Consumo em Standby	10W
Potência CA Nominal	20000W
Corrente CA Máxima	30A
Saída Nominal CA	60Hz; 380/220Vca
Conexão CA	Trifásico (3F+N+T)
Fator de Potência	Unitário 0,9 (indutivo/capacitivo)
Máxima Eficiência	98,2%
Eficiência SPMP (MPPT)	> 99,5%
Retorno após Reestabelecimento (Ajuste)	180s
Comunicação	USB2.0 e RS485
Grau de Proteção	IP65
Certificado do INMETRO	005808/2015



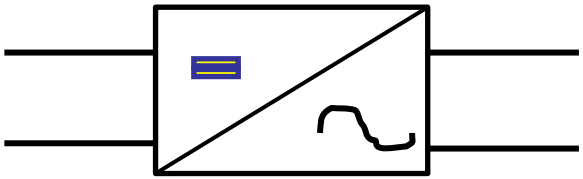
PHB 3000-SS



Inversor de CC/CA – Características Elétricas – Exemplo PHB 3000SS

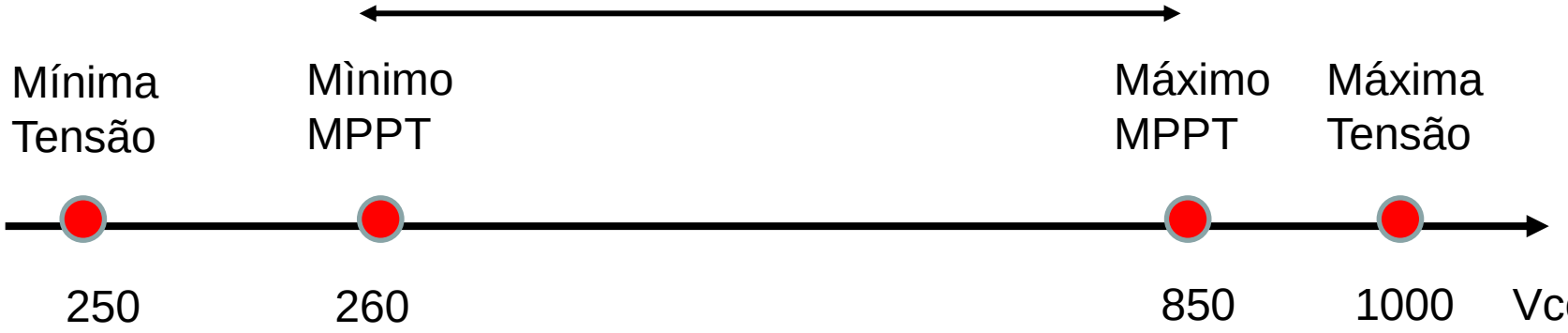
η_{max} = 98,2%
η_{spmp}> 99,5%

P°max = 20500W
Imax = 22 A string
Strings 4/2



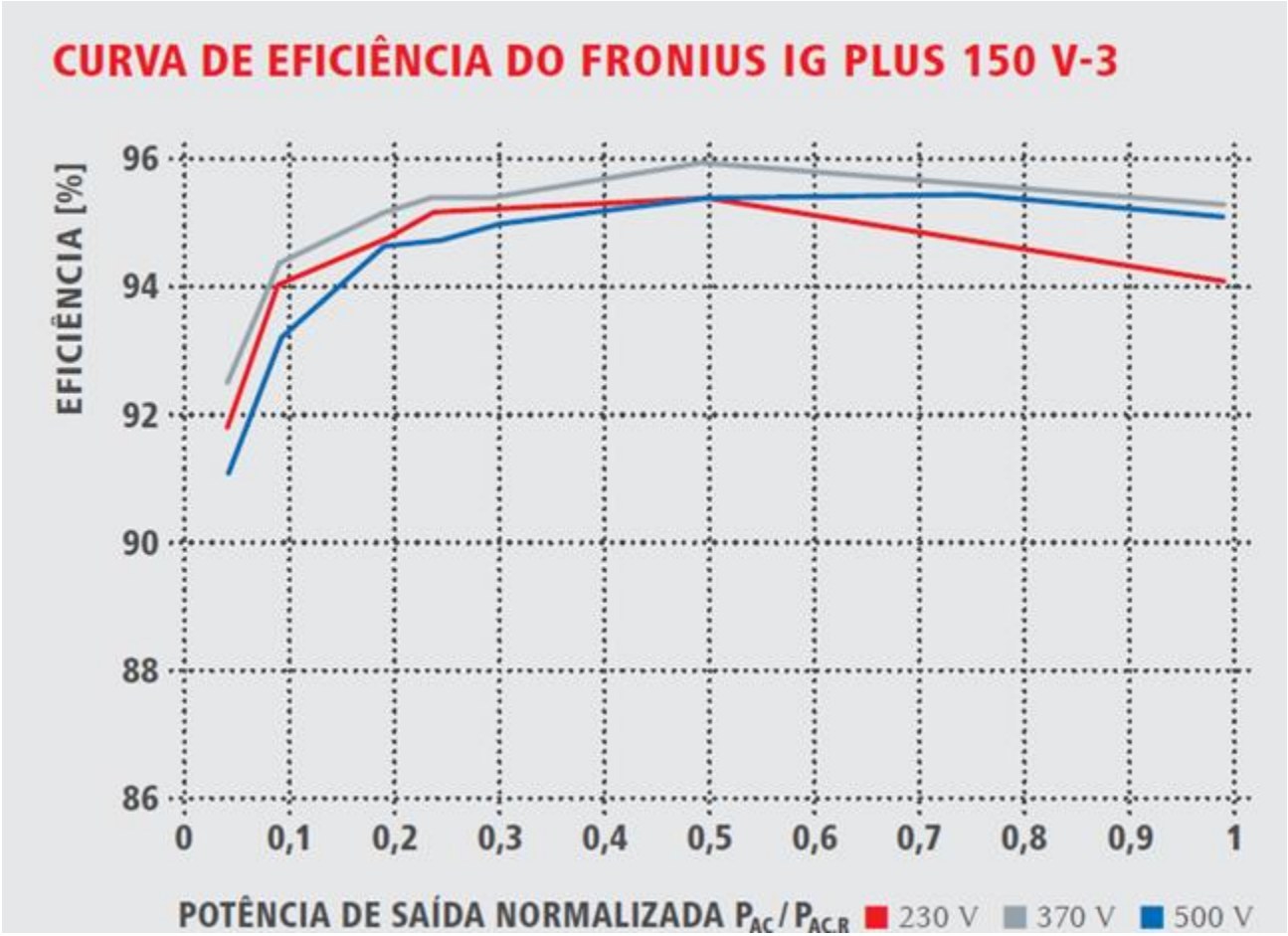
P°$_i$=20000W
V_{ac}220-380 V
Imax ac = 30A
f 60 Hz
Trifásico (3F+N+T)

Faixa de Utilização

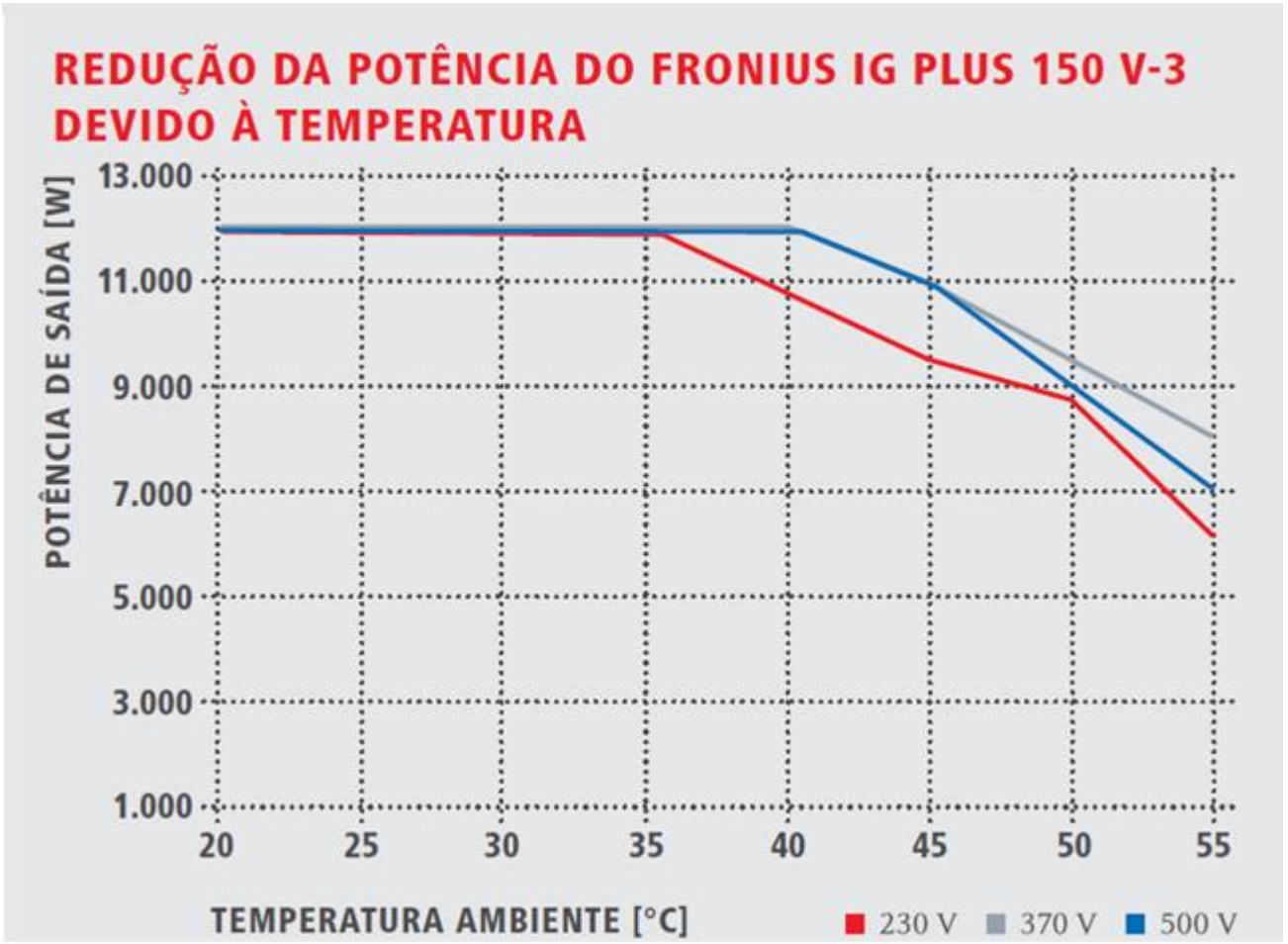




Influência da fração de carga na eficiência do inversor






REDUÇÃO DA POTÊNCIA DO FRONIUS IG PLUS 150 V-3
DEVIDO À TEMPERATURA
POTÊNCIA DE SAÍDA [W]
13.000
11.000
9.000
7.000
5.000
3.000
1.000
20
25
30
35
40
45
50
55
TEMPERATURA AMBIENTE [°C]
230 V
370 V
500 V



Exemplo Dimensionamento Gerador Fotovoltaico Conectado a Rede

Local : Águas de São Pedro SP

Φ (º) = -22,7; L (º)= 47,8 W; LO (º)= 45 W

Consumo anual de energia elétrica do empreendimento: 35,8 MWh/ano

Proposta : injetar 90% deste consumo na rede elétrica ou 32,2 MWh/ano

Energia média diária anual a ser injetada na rede : E_{rede} = 88,27 kWh/dia



Avaliação do Potencial Solarímétrico

Local : Águas de São Pedro SP

Φ (º) = -22,7; L (º)= 47,8 W; LO (º)= 45 W

Estação: Piracicaba
Município: Piracicaba , SP - BRA
Latitude: 22,7° S
Longitude: 47,649166° O
Distância do ponto de ref. (22,7° S; 47,8° O) :15,5 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
☑	Plano Horizontal	0° N	5,42	5,36	5,14	4,56	4,11	3,39	3,89	4,53	4,58	5,17	6,08	5,28	4,79	2,69
☑	Ângulo igual a latitude	23° N	4,91	5,11	5,29	5,17	5,14	4,38	5,00	5,37	4,87	5,04	5,55	4,72	5,05	1,16
☑	Maior média anual	22° N	4,94	5,13	5,29	5,16	5,11	4,35	4,96	5,35	4,87	5,06	5,58	4,76	5,05	1,23
☑	Maior mínimo mensal	28° N	4,73	4,98	5,24	5,23	5,29	4,53	5,16	5,47	4,86	4,94	5,36	4,54	5,03	,94

Irradiação Solar no Plano Inclinado -Piracicaba-Piracicaba, SP-BRA

22,7° S; 47,649166° O

Inclinação escolhida para o campo: 22° maior média anual 5,05 kWh/m²dia



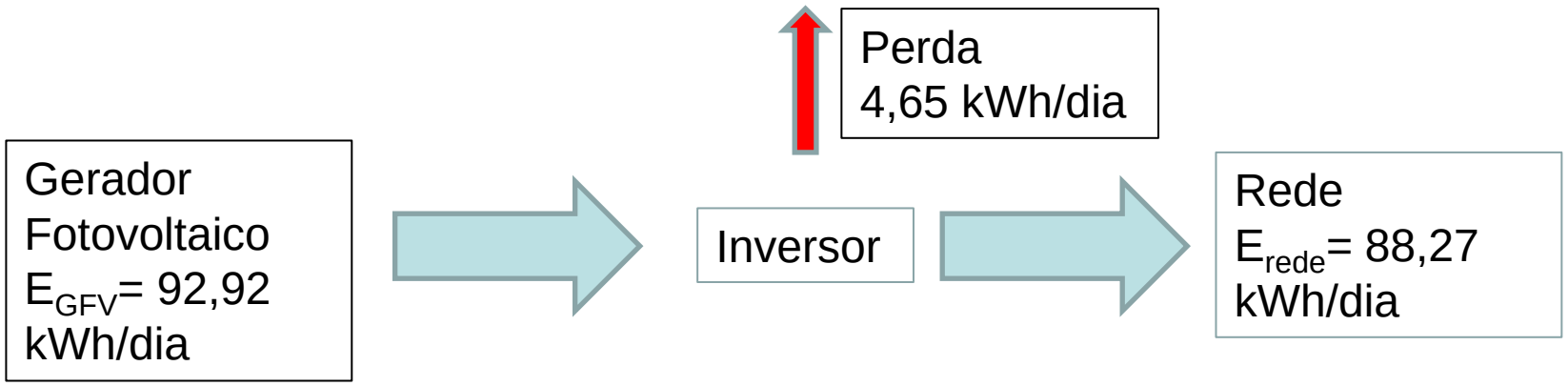
Dados climatológicos para Águas de São Pedro [Esconder]													
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima média (°C)	30,8	30,9	30,6	28,9	26,8	25,7	25,9	28,1	29,0	29,6	30,2	30,1	28,9
Temperatura mínima média (°C)	19,3	19,5	18,8	16,1	13,4	12,0	11,4	12,8	14,8	16,5	17,4	18,7	15,9
Precipitação (mm)	221,5	191,2	149,2	71,8	62,3	44,1	26,7	27,1	64,3	124,0	133,5	191,8	1 307,5
Fonte: Unicamp - Cepagri													

Wikipedia Portugues



Especificação do Gerador Fotovoltaico

Energia fornecida à rede E_{rede} = 88,27 kWh/dia
Rendimento do inversor η_{inv} = 0,95 (max 0,98)
Energia fornecida ao inversor $E_{GFV} = E_{rede}/\eta_{inv}$ = 88,27/0,95 = 92,92 kWh/dia





GERADOR FOTOVOLTAICO: Estimativa do Nº de Painéis FV pelo modelo HSP – Horas de Sol Pleno

E_{GFV} [kWh/dia] energia diária média anual a ser fornecida pelo gerador fotovoltaico.

$\overline{H}_T$ [kWh/m²dia] energia solar incidente no plano do painel FV, média diária anual

(HSP) [h] horas de Sol Pleno média diária anual

$$(HSP) = \frac{\overline{H_T}}{1}\left[\frac{\frac{kWh}{m^2 dia}}{\frac{kWh}{m^2 h}}\right] = \overline{H_T}\left[\frac{h}{dia}\right]$$

P_{MP} [kW/painel] potência máxima de um painel fotovoltaico escolhido operando com G_T = 1000 W/m² na temperatura de célula T_C [ºC], para a temperatura ambiente média máxima anual T_{amax} [ºC].

N número de painéis fotovoltaicos que compõe o gerador

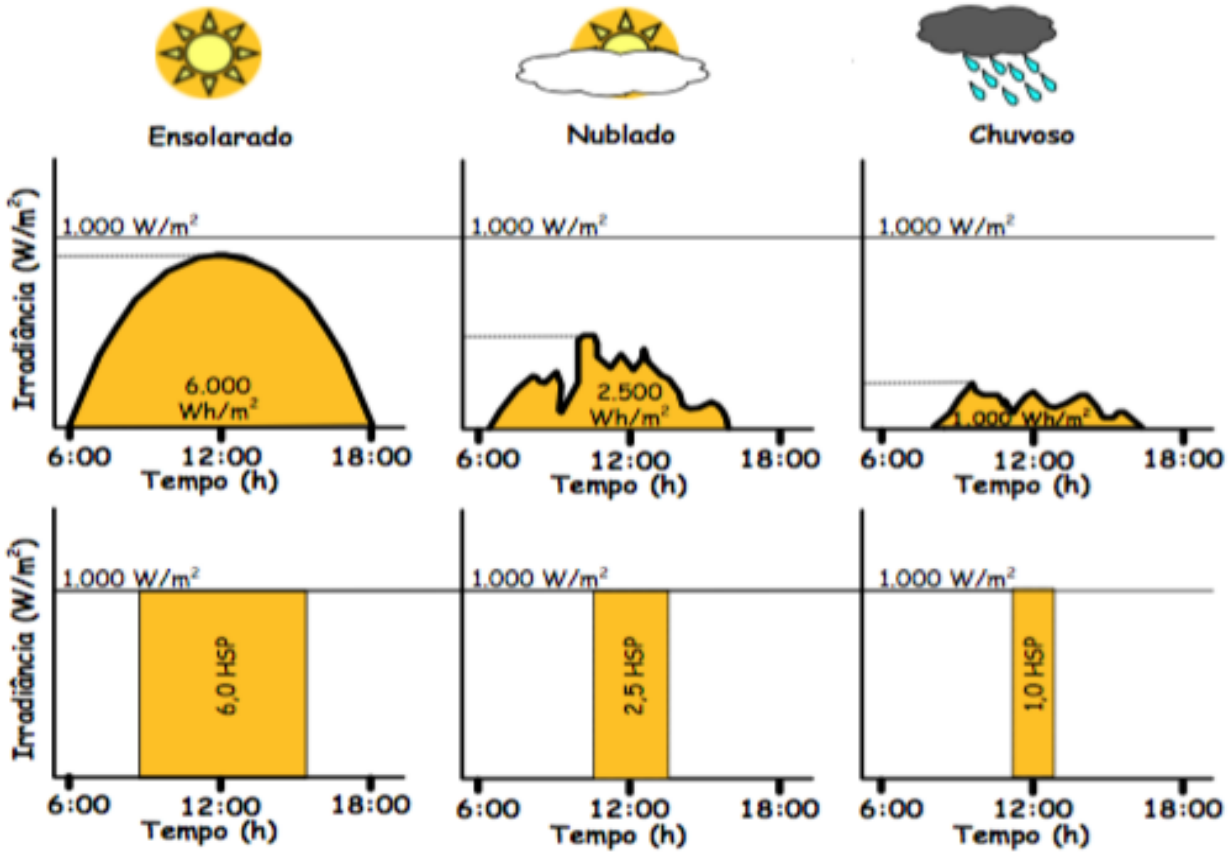
(TD) adimensional, taxa de desempenho do gerador, leva em consideração demais perdas,recomendado no Brasil 0,7 a 0,8.

η_{SPMP} eficiência do seguidor do ponto de máxima potência

$$\mathbf{E_{GFV} = \eta_{SPMP}\, P_{MP}\, (HSP)\, N\, (TD)}$$



Conceito de HSP – Horas de Sol Pleno



Manual do CRESESB



Exemplo

Estimativa da Temperatura de Operação da Célula do Painel Fotovoltaico

$$T_C = T_a + \frac{G_T}{800}[T_{NOC} - 20]\ 0{,}9$$

Painel CS250P

T_C [ºC] temperatura da célula

T_{amax} [ºC] temperatura ambiente média anual máxima = 28,9°C

T_{NOC} [ºC] temperatura nominal de operação da célula=45°C

G_T [W/m²] radiação solar média no plano de célula = 1000 W/m²

T_C = 28,9 + (1000/800) x (45-20) x 0,9 = 28,9 + 28,1 = 57,0 °C

T_C = 57,0°C < Tmax = 85 °C

T_C = 57,0 °C



Estimativa da Potência de Pico do Painel Fotovoltaico

$$P_{MP} = P_{MP}^{0} \frac{G_T}{G_{ref}} \left[1 + \gamma_{mp}\left(T_C - T_{cref}\right)\right]$$

Painel CS250P

T_C [ºC] temperatura da célula = 57,0 °C

T_{cref} [ºC] temperatura da célula nas condições STC = 25 °C

G_T [W/m²] radiação solar média no plano de célula = 1000 W/m²

G_{ref} [W/m²] radiação solar nas condições STC = 1000 W/m²

γ_{mp} [ºC $^{-1}$] coeficiente de temperatura para potência máxima = - 0,0043 °C^{-1}

$P°_{MP}$ [W] Potência nominal do Painel Fotovoltaico = 250 W

P_{MP} [W] Potência do Painel Fotovoltaico

P_{MP} = 250 x (1000/1000) x [1 – 0,0043 x (57,0 – 25)] = 250 x 0,86

P_{MP} = 215,6 W



Estimativa do Número de Painéis Fotovoltaicos

E_{GFV} energia diária média anual a ser fornecida pelo gerador fotovoltaico = 92,9286 kWh/dia.

$\bar{H}_T$ [kWh/m²dia] energia solar incidente no plano do coletor (β=22° N) média diária anual= 5,05 kWh/m² dia

(HSP) [h] horas de Sol Pleno média diária anual = 5,05 h

P_{MP} [W/painel] potência máxima de um painel fotovoltaico na temperatura de célula T_C [ºC] = 57,0 °C ; T_{amax} [ºC] = 28,9°C; G_T= 1000W/m²; P_{MP} = 215,6 W

N número de painéis fotovoltaicos que compõe o gerador

(TD) adimensional, taxa de desempenho do gerador, recomendado no Brasil 0,7 a 0,8. (TD) = 0,73

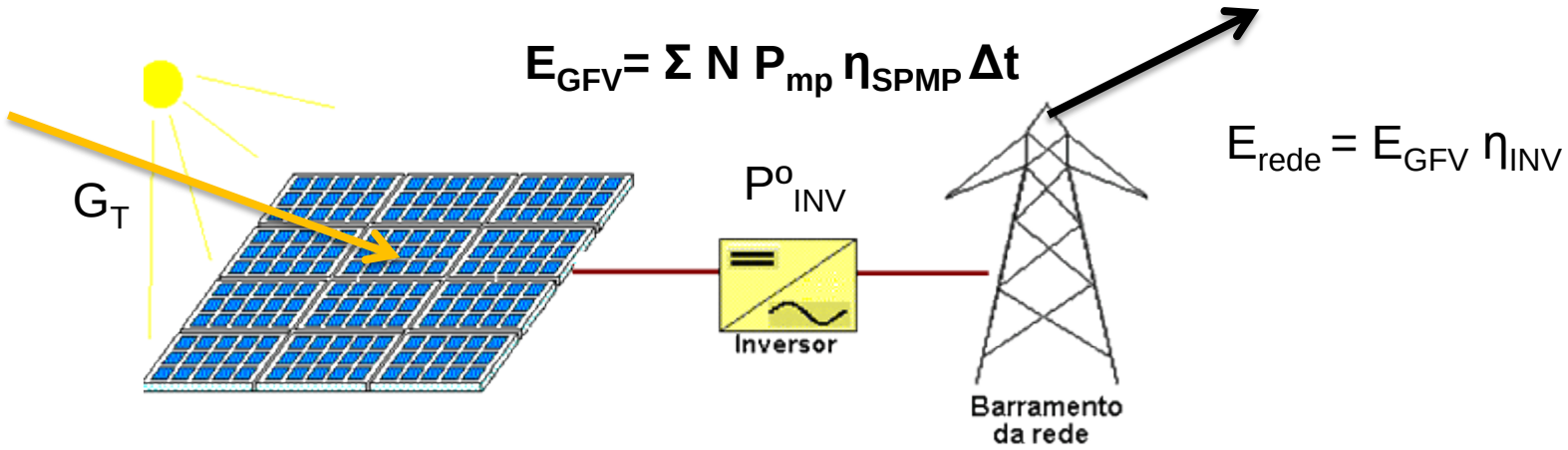
η_{SPMP} = 0,99

$$\mathbf{E_{GFV} = \eta_{SPMP} P_{FV} (HSP) N (TD)}$$

$$\mathbf{92,92\ 10^3\ [Wh] = 0,99\ x215,6\ [W]\ x\ 5,05\ [h]\ x\ N\ x\ 0,73}$$

N = 118 painéis

Sistemas Fotovoltaicos Acoplados à Rede de Distribuição Elétrica-Potências
Verificação da Energia Gerada



E_{rede} energia entregue pelo inversor à rede kWh/dia
E_{GFV} energia gerada pelo gerador fotovoltaico entregue ao inversor kWh/dia
P^o_{INV} potência nominal do inversor
P_{MP} = potência máxima do painel FV usado kW
N número de painéis fotovoltaicos que compõe o gerador fotovoltaico
η_{SPMP} eficiência do seguidor do ponto de máxima potência
η_{INV} eficiência do inversor
Δt intervalo de tempo válido para certo valor de P_{MP} (h)



Roteiro de Cálculo

No local da instalação do GFV

1. Para um determinado mês: H (CRESESB); $\omega_s(\Phi,\delta)$;H_0;$H_d(K_T,\omega_s)$;

2. Para uma certa hora do dia ω: r_T;r_d;I;I_d;I_b;I_T;G_T;Ta (IBGE);

3. Para uma certa hora do dia ω: $T_c(T_a,G_T)$;Pmp (P°mp,G_T,T_c)

4. Energia gerada E_{GFV} na hora considerada[Wh] = N Pmp [W] η_{spmp} 1[h]

5. Energia entregue à rede nessa hora $E_{rede\ hora}=E_{GFV}\ \eta_{inv}$

6. Energia entregue à rede no dia $E_{rede\ dia}=\Sigma\ E_{rede\ hora}$



ESCOLHA DO INVERSOR

1.FDI

Fator de dimensionamento do inversor

P^0_{INV} potência nominal do inversor em ca (W)

P^0_{GFV} potência nominal do gerador fotovoltaico (Wp) em STC

$P^0_{GFV} = N \times P°_{MP}$

$$FDI = \frac{P^0{}_{INV}}{P^0{}_{GFV}}$$

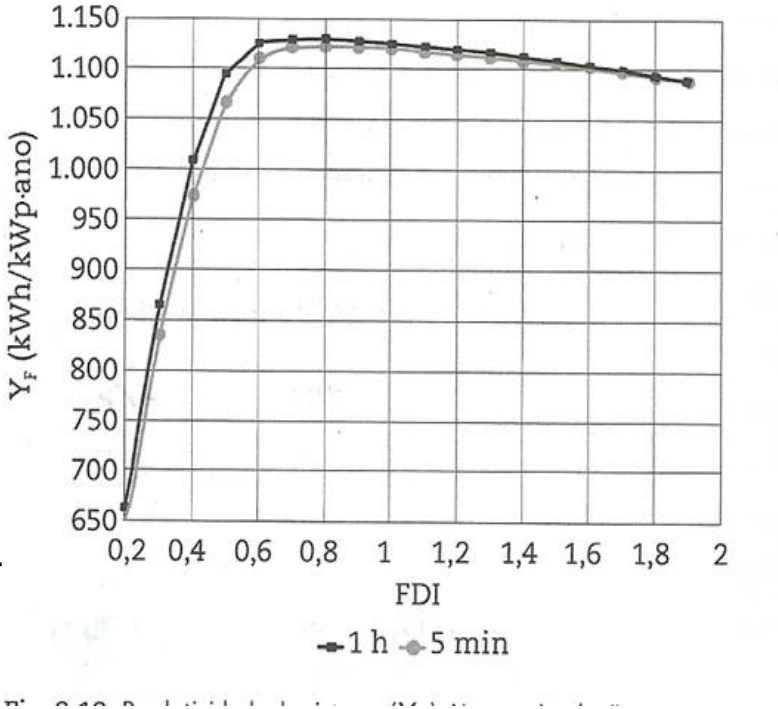
2.Y_F

Produtividade anual do gerador fotovoltaico (kWh/kWp ano) em uma certa localidade Y_F=f(FDI)

Zilles mostra estudo que recomenda

0,6 < FDI < 0,9

Fabricantes 0,8 < FDI < 1,05



Zilles Fig. 3.13 p.92



Escolha do Inversor

P^0_{GFV} potência nominal do gerador fotovoltaico
$P°_{MP}$ = 250W; N=118 PV
$P^0_{GFV} = P°_{MP}$ x N = 250 x 118 = 29500 W

$$FDI = \frac{P^0{}_{INV}}{P^0{}_{GFV}}$$

Supondo um FDI > 0,6 teríamos um $P°_{INV}$ > 29500 x 0,6 = 17000W
Inversor PHB 3000-SS 4/2 $P°_{INV}$ ca = 20000W
FDI = 20000/29500 = 0,68
Zilles mostra estudo que recomenda
0,6 < FDI < 0,9

Resumo da Instalação
118 painéis fotovoltaicos CS250P
1 inversor PHB 3000-SS

Conexão GFV ao Inversor CC-CA

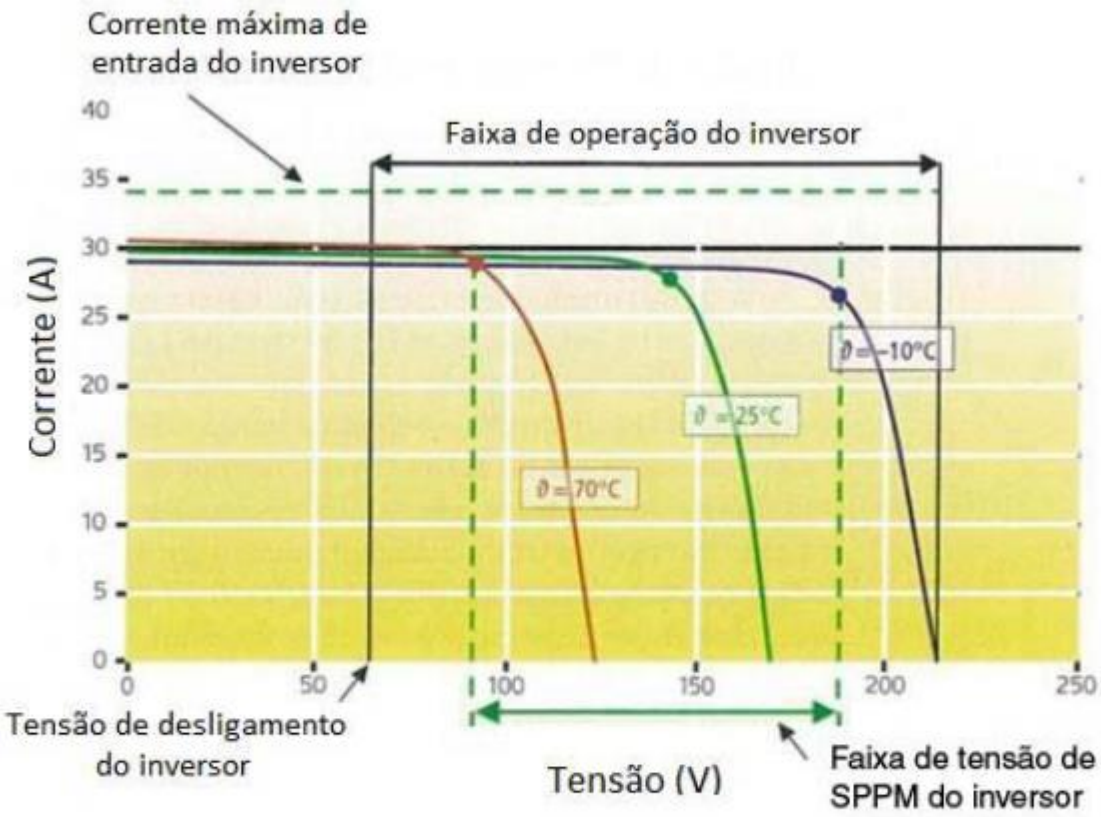


Figura 6.12 - Curvas I-V de um gerador FV em função da temperatura e a compatibilidade, com as janelas de tensão do SPPM e de operação do inversor. Fonte: Adaptado de (DGS, 2008).

Manual CRESESB



Conexão dos Painéis Fotovoltaicos com o Inversor CC-CA

1.Temperaturas ambientes médias extremas

Máxima : Tmax = 30,9 °C em fevereiro

Mínima: Tmin = 11,4 em junho

2.Temperatura estimada para os painéis fotovoltaicos

$$T_C = T_a + \frac{G_T}{800}[T_{NOC} - 20]\ 0{,}9$$

Para o PV escolhido: T_{NOC} = 45°C

T_{cmax}=30,9+(1000/800)x(45-20)x0,9= 30,9+28,1=59,0°C

T_{cmin}=11,4+(0/800)x(45-20)x0,9= 11,4+ 0 =11,4°C

3.Tensão de máxima potência nestas condições

Supondo $\gamma_{Vmp} = \gamma_{Voc}$ = -0,0034 °C^{-1} temos:

$$V_{mp} = V_{mp}^0\left(1 + \gamma_{mp}\left(T_C - T_C^0\right)\right)$$

V_{mpmin} = 30,1 x (1- 0,0034 x (59,0-25)) = 30,1 x 0,884 = 26,6V

V_{mpmax} = 30,1 x (1- 0,0034 x (11,4-25)) = 30,1 x 1,0462 = 31,5V



Faixa de número de PV por String

1.Número de painéis em série

$260 < N_{série} \times V_{mpmin}$ ou $N_{série} > 260/26,6$ ou $N_{série} > 10$

$N_{série} \times V_{mpmax} < 850$ ou $N_{série} < 850/ 31,5$ ou $N_{série} < 27$

Então temos: $\mathbf{10 < N_{série} < 27}$

Temos que instalar 118 PV em um inversor com 4 entradas isto daria uma média de 29,5 PV por entrada maior que 26 máximo.

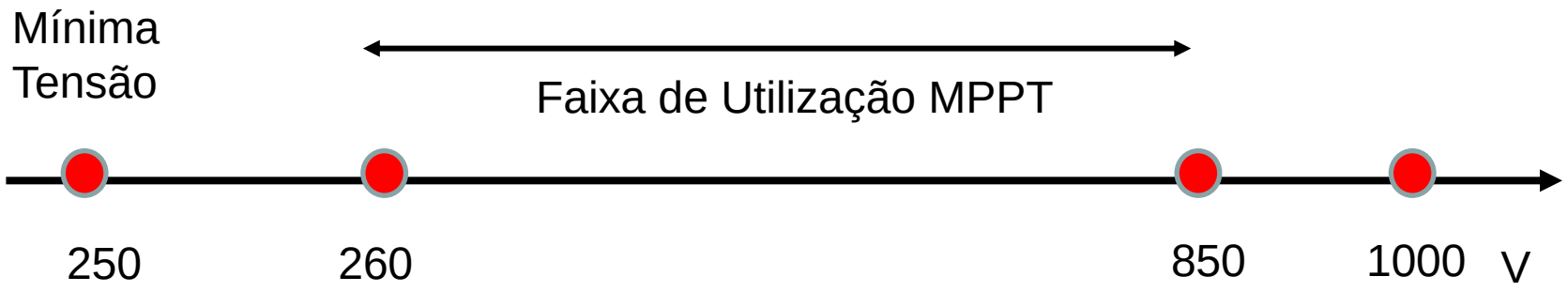
2.Número de strings (fileiras) em paralelo por entrada

Para cada entrada deve-se então verificar a possibilidade de strings em paralelo.

$$I_{SC} = I_{SC}^{0}\left(1 + \gamma_{SC}\left(T_C - T_C^{0}\right)\right)$$

$I_{SCmax} = 8,87 \times (1+0,00065 \times (59,0-25)) = 8,87 \times 1,022 = 9,06A$

$N_{//} \times I_{SCmax} < I_{maxstring}$; ($I_{maxstring} = 22A$) então $N// < 22/9,06$ ou $\mathbf{N// < 2,4}$





Verificação tensões circuito aberto

$$V_{OC} = V_{OC}^{0}\left(1 + \gamma_{OC}\left(T_C - T_C^{0}\right)\right)$$

V_{OCmin} = 37,2 x (1-0,0034 x (59,0-25)) = 37,2 x 0,884 = 32,9V;

V_{OCmax} = 37,2 x (1- 0,0034x(11,4-25))= 37,2 x 1,046 = 38,9 V

String com 15 painéis série 15 x 38,9 = 583,5 V [máximo] < 1000V

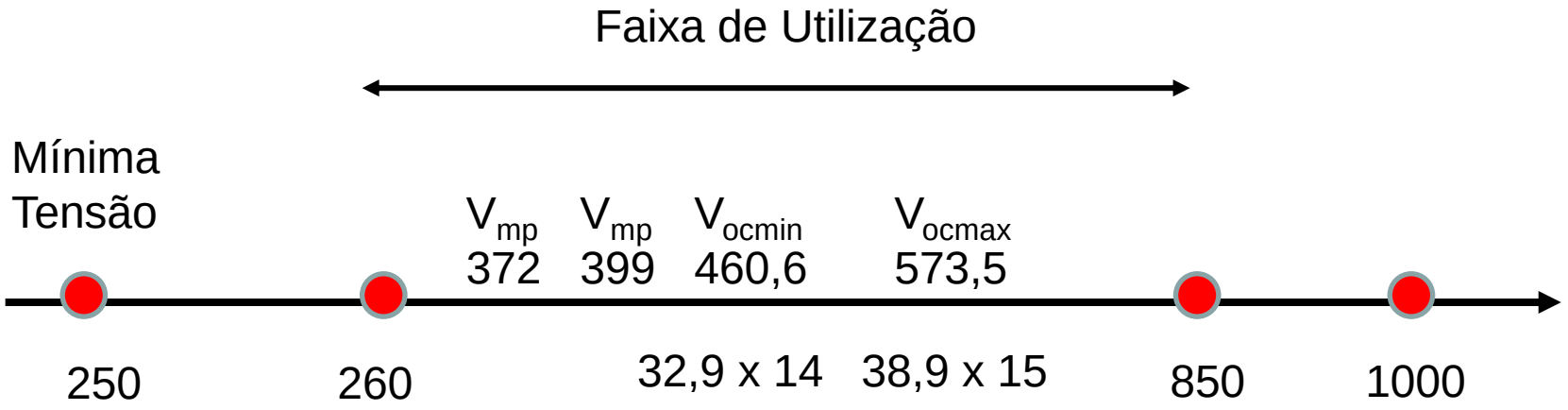
String com 14 painéis série 14 x 32,9 = 460,6 V [mínimo]



Configuração dos Strings

Configuração de String Típico: $10 < N_{série} < 27$; N//< 2,4 ; 118 PFV /4 ST = 29,5

Proposta por string: 2 conjuntos em paralelo de 15 painéis FV em série
STRING A : 2 conjuntos // de 15 PFV em série (total 30 pFV)
STRING B : 2 conjuntos // de 15 PFV em série (total 30 pFV)
STRING C : 2 conjuntos // de 15 pFV em série (total 30 pFV)
STRING D : 2 conjuntos // de 14 pFV em série (total 28 pFV)
Total 118 PFV; P= 0,99x215,6x118=25186 Wp
(FDI operacional = 0,79) $I_{MPtotal}$ = 64,5 A

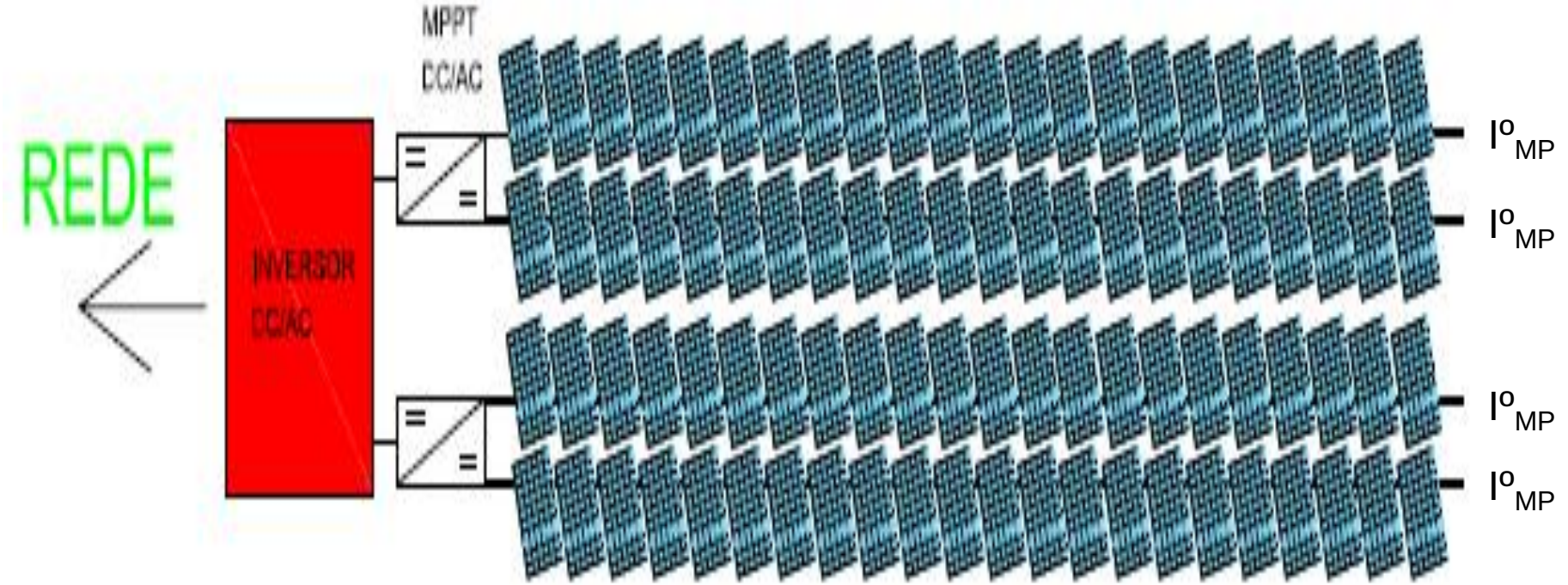


Esquema de Conexão Painéis FV e Inversor



INVERSOR	15 painéis FV ; V_{OCmax} = 573,5V ; I_{SCmax} = 9,06A
	15 painéis FV ; V_{OCmax} = 573,5V ; I_{SCmax} = 9,06A
	15 painéis FV ; V_{OCmax} = 573,5V ; I_{SCmax} = 9,06A
	15 painéis FV ; V_{OCmax} = 573,5V ; I_{SCmax} = 9,06A
	15 painéis FV ; V_{OCmax} = 573,5V ; I_{SCmax} = 9,06A
	15 painéis FV ; V_{OCmax} = 573,5V ; I_{SCmax} = 9,06A
	14 painéis FV ; V_{OCmax} = 544,6V ; I_{SCmax} = 9,06A
	14 painéis FV ; V_{OCmax} = 544,6V ; I_{SCmax} = 9,06A

GERADOR FOTOVOLTAICO COM 4 STRINGS E 2 SPMP



$$V°_G = N_{série} \times V°_{MP}$$



Solar Power Plants: PV or Thermal

	W	W	kW	kW	MW	MW	MW
kWh/m²a	<10	10 a 200	0,2 a 2	2 a 50	0,05 a 3	0,02 a 2	6 a 600

2400 · 2000 · 1600 · 1200 · 800 · 400 · 0

- Mini e micro PV (relógios e calculadoras)
- Sistema PV isolado (residencial)
- Sistema PV isolado (vilarejos)
- Sistema PV conectado a rede (telhados de fábricas, shoppings, hospitais)
- Sistemas PV conectado a rede (geradoras locais em área própria)
- Sistemas Térmicos tipo prato/stirling
- Sistemas Térmicos Tipo Calha Parabólica ou Tipo Torre Central.

Volker Quaschning and Manuel B Muriel
Solar Power- Photovoltaics or Solar Thermal Power Plants
VGB Congress Power Plants 2001