

**INSTITUTO FEDERAL**  
Sul-rio-grandense

Câmpus  
Passo Fundo

EDUCAÇÃO  
**PÚBLICA**  
**100%**  
GRATUITA

# TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA: MÓDULOS, ARRANJOS, CÉLULA

Alexsander Furtado Carneiro

# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

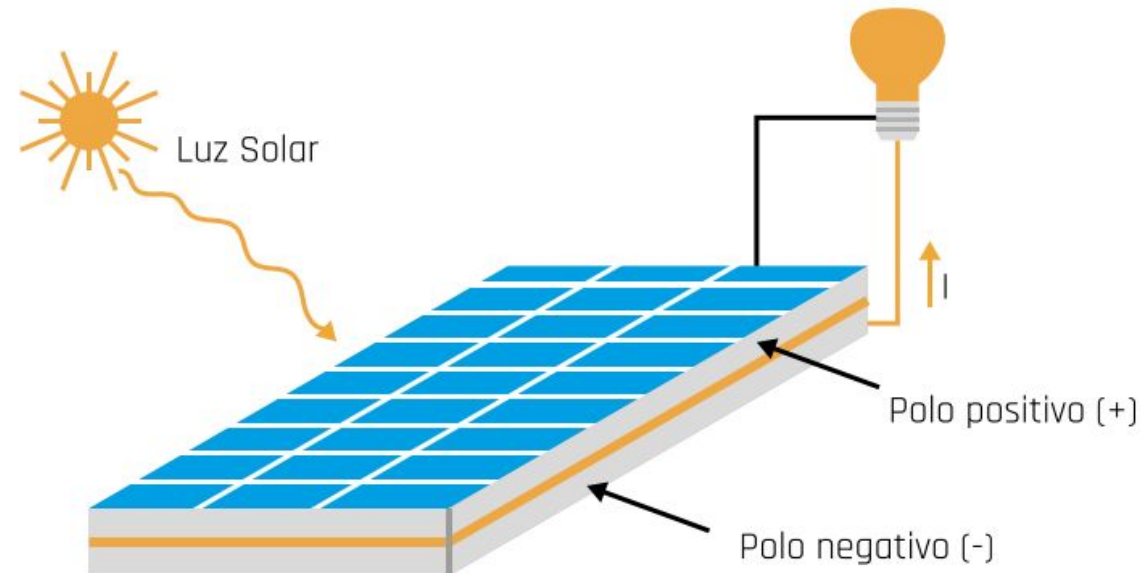
- A célula fotovoltaica é o elemento principal na geração de eletricidade a partir da energia solar.
- Quando uma célula fotovoltaica é exposta a luz surge uma tensão em seus terminais e assim a capacidade de gerar corrente elétrica.
- A palavra fotovoltaica vem de Foto, que tem sua raiz na língua grega que significa 'luz' e Voltaica, da unidade de medida de tensão elétrica volt

# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

- As células fotovoltaicas são feitas de materiais semicondutores onde o material que é mais utilizado para a fabricação das mesmas é o silício.
- No entanto, o silício por si só não é capaz de gerar muita eletricidade quando exposto à luz. Para conseguir níveis elevados de corrente elétrica o silício é misturado com outros materiais (a exemplo do fósforo e boro) para conseguir gerar eletricidade a níveis satisfatórios.

# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

- A mistura desses materiais com o silício faz com que a célula fotovoltaica gere corrente elétrica em apenas um sentido, em outras palavras as células fotovoltaicas geram corrente contínua.



# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

- Se expusermos uma célula fotovoltaica ao sol e ligarmos uma carga formando um circuito elétrico fechado podemos medir com um amperímetro a corrente gerada e com um voltímetro a tensão da célula aplicada a essa carga.
- De forma geral podemos dizer que a tensão nominal de uma célula fotovoltaica é da ordem de 0,5V e que sua corrente varia de acordo com a sua potência nominal.

# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

**Exemplo:** Dadas duas células fotovoltaicas, sendo uma de 2W e a outra de 3,6W, calcule a corrente nominal que essas células podem fornecer. Sabendo que a tensão nominal de uma célula fotovoltaica é de aproximadamente 0,5V, para calcular a corrente basta tomar mão da clássica equação de potência. Sendo assim, para a célula de 2W, teremos:

# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas mais comuns encontradas atualmente no mercado são de três tipos:

- silício monocristalino;
- silício policristalino;
- filme fino de silício.

# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

## SILÍCIO MONOCRISTALINO

- As células de silício monocristalino são as mais eficientes devido ao material utilizado apresentar um grau de pureza bastante elevado.
- Essas células podem apresentar uma eficiência na ordem de 18% comercialmente e chegar aos 25% de eficiência em laboratório, mas para que o silício apresente um grau de pureza muito elevado o seu processo de fabricação demanda de muito investimento e energia, o que eleva o preço final desse tipo de célula, tornando-a a mais cara dentre as três.



# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

## SILÍCIO MONOCRISTALINO



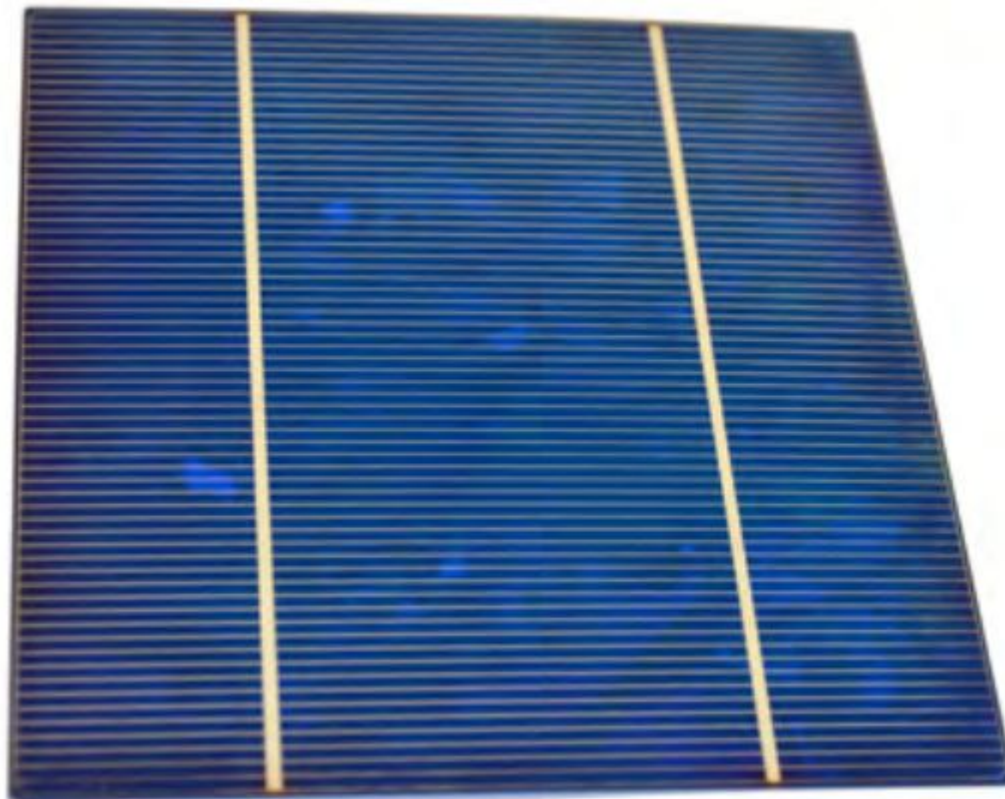
# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

## SILÍCIO POLICRISTALINO

- As células de silício policristalino apresentam uma desuniformidade em sua coloração devido ao processo de purificação do material ser menos exigente e mais barato.
- Essa produção menos exigente faz com que a eficiência desse tipo de célula seja mais baixa em relação à das células de silício monocristalino, podendo ficar em torno dos 13 e 15% nas células comerciais.

# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

## SILÍCIO POLICRISTALINO



# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

## FILME FINO DE SILÍCIO

- A tecnologia das células de filme fino de silício é mais recente que a tecnologia monocristalina e policristalina.
- O seu processo de fabricação se dá por meio do depósito de finas camadas de material a base de silício sobre uma superfície que pode ser rígida ou flexível.

# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

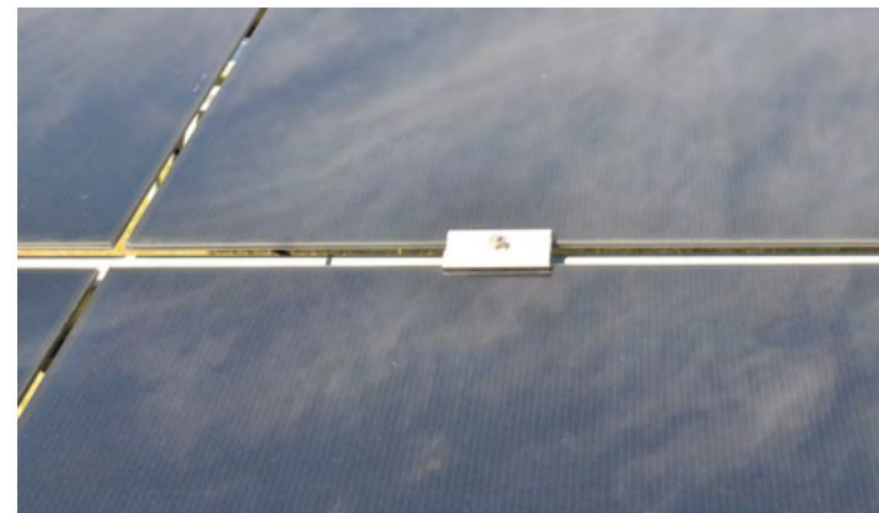
## FILME FINO DE SILÍCIO

- A tecnologia de filme fino mais empregada é a de silício amorfo.
- Essa tecnologia apresenta um baixo rendimento (entre 5 e 8%) e a desvantagem de diminuir sua eficiência no primeiro ano de uso devido à degradação pela exposição à radiação solar.
- Essa redução tende a se estabilizar após o primeiro ano de uso.

# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

## FILME FINO DE SILÍCIO

- Devido ao seu baixo custo de fabricação esse tipo de célula é muito utilizada em calculadoras, brinquedos e pequenos aparelhos eletrônicos que demandam uma baixa energia em seu funcionamento.
- As células de silício amorfo apresentam uma coloração escura e uniforme.



# TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Tipo de célula fotovoltaica	Eficiência em laboratório	Eficiência comercial
Silício Monocristalino	25%	15 a 18%
Silício Policristalino	20%	13 e 15%
Silício Amorfo	13%	5 a 8%

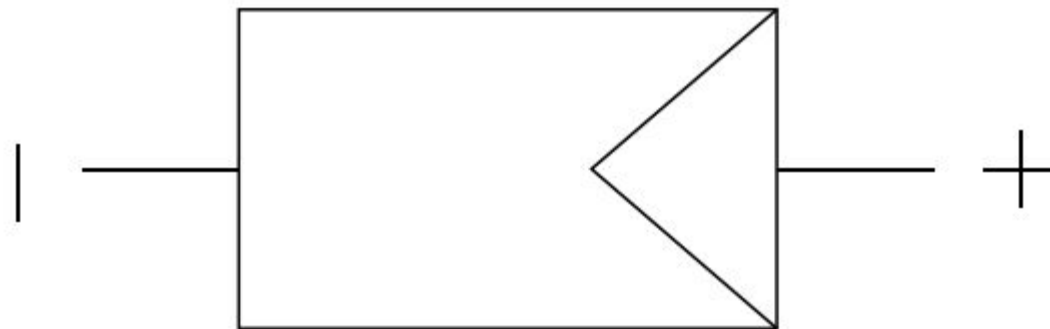
# MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- Vimos que as células fotovoltaicas geram tensões muito baixas (da ordem de 0,5V) se forem utilizadas individualmente.
- Em aplicações práticas se faz necessário o uso de tensões mais elevadas para alimentar cargas habituais.
- Os módulos fotovoltaicos (também chamados de painéis fotovoltaicos ou placas fotovoltaicas) são estruturas rígidas que comportam várias células interligadas em série para se obter uma tensão maior em seus terminais.



# MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

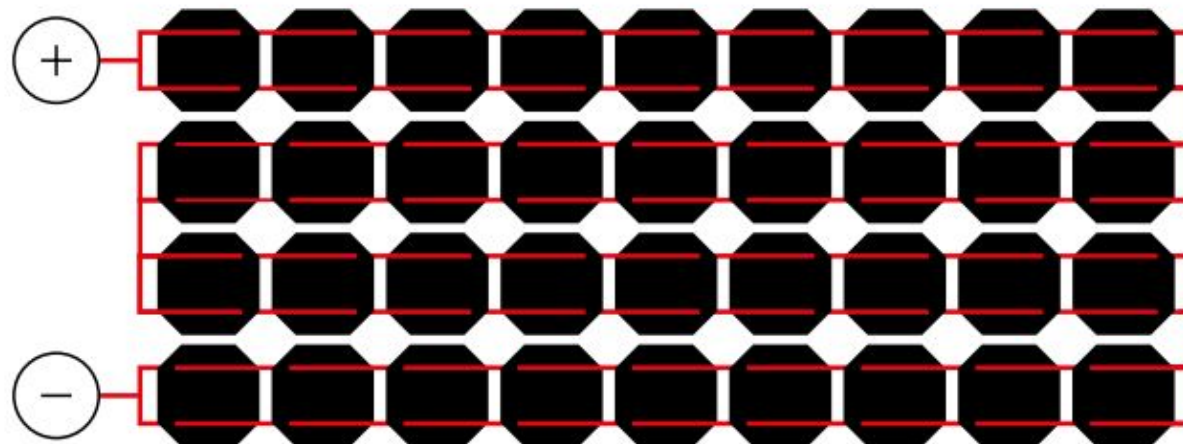
Quando vamos representar um módulo fotovoltaico em um diagrama elétrico utilizamos a simbologia abaixo:



# MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino apresentam conexões em série entre suas células, onde a parte superior de uma célula (pólo negativo) é conectada ao pólo inferior (pólo positivo) da próxima célula.

O número de células conectadas em série depende da tensão final desejada para o módulo.



# MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- É muito comum encontrarmos módulos fotovoltaicos com 36 células para aplicações de baixa e média potência, onde a tensão requerida dos módulos não é tão elevada.
- Para aplicações de maior potência é comum o uso de módulos fotovoltaicos de até 60 células, pois os equipamentos de condicionamento de potência em sistemas de maior porte utilizam tensões mais altas em suas entradas, com isso o número de módulos no projeto se torna reduzido.

# MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- Já os módulos de filme fino apresentam uma única célula, pois o material é depositado sobre toda a área do módulo desejado.
- Os módulos de filme fino geralmente apresentam uma tensão maior que os módulos de silício monocristalino e policristalino podendo chegar até 70V, no entanto a corrente de saída geralmente é reduzida.

# MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- Na construção de um módulo fotovoltaico as células são recobertas com lâminas plásticas transparentes para evitar o contato direto com a lâmina de vidro que fica na parte superior.
- A parte inferior do módulo é revestida com um material plástico um pouco mais rígido e a moldura é feita com peças de alumínio para dar rigidez e não comprometer o peso do módulo.

# MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- Por fim é instalada uma caixa de conexões elétricas, também conhecida como caixa de junção (do inglês Junction Box), na parte inferior do módulo onde são conectados os cabos de saída.



# CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- Um módulo fotovoltaico pode ser especificado por sua potência elétrica de pico nominal (Wp), no entanto, as características de tensão e corrente para módulos de mesma potência e de fabricantes diferentes podem variar um pouco.
- A potência nominal ou potência de pico que é informada pelo fabricante é a potência que o módulo pode fornecer levando em consideração as condições de teste padrão realizadas em laboratório (STC – do inglês Standard Test Conditions).

# CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- Após a fabricação de um módulo, o fabricante realiza testes de desempenho elétrico para traçar a curva característica do módulo e extrair alguns parâmetros importantes.
- Nesse teste, o módulo é colocado em uma câmara que simula níveis de radiação solar, temperatura e massa de ar fixa.
- A irradiância na qual o módulo é submetido é de  $1000 \text{ W/m}^2$ , a temperatura das células fotovoltaicas controlada em  $25^\circ\text{C}$  e a massa de ar (AM) de 1,5.

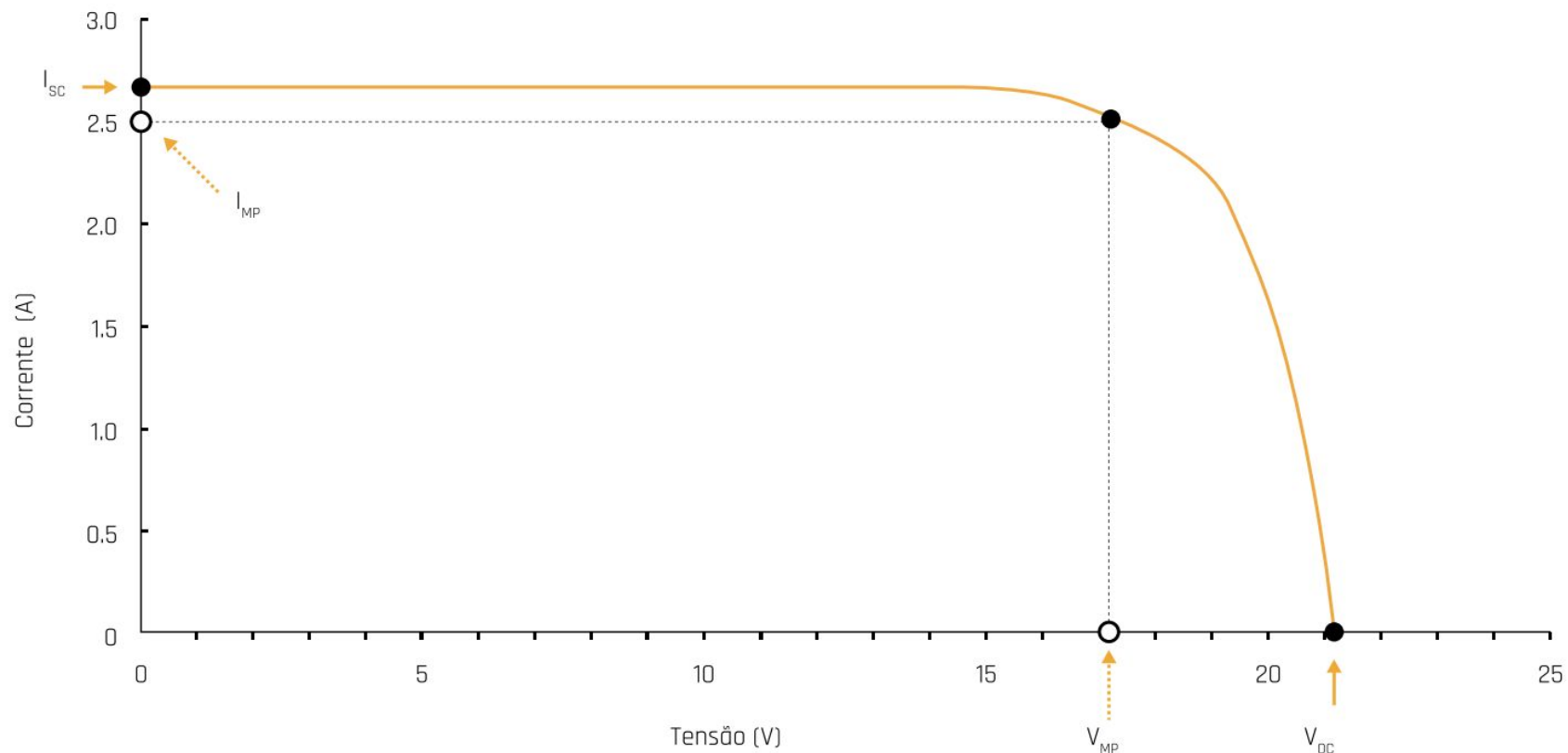


# CURVA CARACTERÍSTICA $I \times V$ DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

- O módulo fotovoltaico apresenta uma curva característica diferente das curvas de fontes de tensão convencionais.
- Mantendo um nível de irradiância fixa sobre o plano frontal do módulo fotovoltaico, a tensão e a corrente do mesmo dependem da carga que está conectada em seus terminais.

# CURVA CARACTERÍSTICA I x V DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

A relação entre a tensão e a corrente de um módulo fotovoltaico é mostrada na figura.



# CURVA CARACTERÍSTICA $I \times V$ DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

O ponto de operação do módulo pode excursionar por toda a curva traçada acima a depender da carga conectada. Podemos notar alguns pontos singulares nesta curva, tais como:

**$I_{sc}$  – Corrente de Curto Circuito:** Corrente máxima que um módulo fotovoltaico pode fornecer. Como o próprio nome diz, a mesma é obtida a partir de um curto circuito em seus terminais. Para realizar a medição de  $I_{sc}$  basta fazer um curto circuito nos terminais do módulo e medir a corrente que flui com um amperímetro. Na curva exemplo esse valor é de aproximadamente 2,7A.

# CURVA CARACTERÍSTICA $I \times V$ DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

O ponto de operação do módulo pode excursionar por toda a curva traçada acima a depender da carga conectada. Podemos notar alguns pontos singulares nesta curva, tais como:

**$I_{sc}$  – Corrente de Curto Circuito:** Corrente máxima que um módulo fotovoltaico pode fornecer. Como o próprio nome diz, a mesma é obtida a partir de um curto circuito em seus terminais. Para realizar a medição de  $I_{sc}$  basta fazer um curto circuito nos terminais do módulo e medir a corrente que flui com um amperímetro. Na curva exemplo esse valor é de aproximadamente 2,7A.

# CURVA CARACTERÍSTICA $I \times V$ DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

**$V_{oc}$  – Tensão de Circuito Aberto:** Máxima tensão entre os terminais de um módulo. É quando o mesmo não está fornecendo corrente elétrica. Pode ser medida com um voltímetro ligado aos terminais do módulo fotovoltaico sem que o mesmo esteja alimentando qualquer carga, ou seja, em circuito aberto. Na curva exemplo essa tensão é de 21V.

**$I_{MP}$  – Corrente de Máxima Potência:** Valor de corrente que corresponde à situação na qual o módulo fornece máxima potência. Na curva essa corrente vale 2,5A.

# CURVA CARACTERÍSTICA I x V DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

**$V_{MP}$  – Tensão de Máxima Potência:** Valor de tensão que corresponde à situação na qual o módulo fornece máxima potência. Na curva essa tensão é de 17V.

**$P_{MP}$  – Ponto de Máxima Potência:** Máxima potência que o módulo fotovoltaico pode entregar para um determinado nível de irradiância solar. É calculado como sendo o produto  $V_{MP} \times I_{MP}$ , portanto, se levarmos em consideração que essa curva foi traçada a partir das condições de teste padrão (STC = irradiância de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , temperatura de célula de  $25^\circ\text{C}$  e massa de ar de 1,5), podemos estimar que a potência desse módulo é de aproximadamente  $17\text{A} \times 2,5\text{A} = 42,5\text{W}$ .

# FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

O principal fator que influencia a geração fotovoltaica é o nível de irradiância solar que chega até as células fotovoltaicas, mas existe outro fator que pode também influenciar na geração que é a temperatura das células.

# FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

## INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR

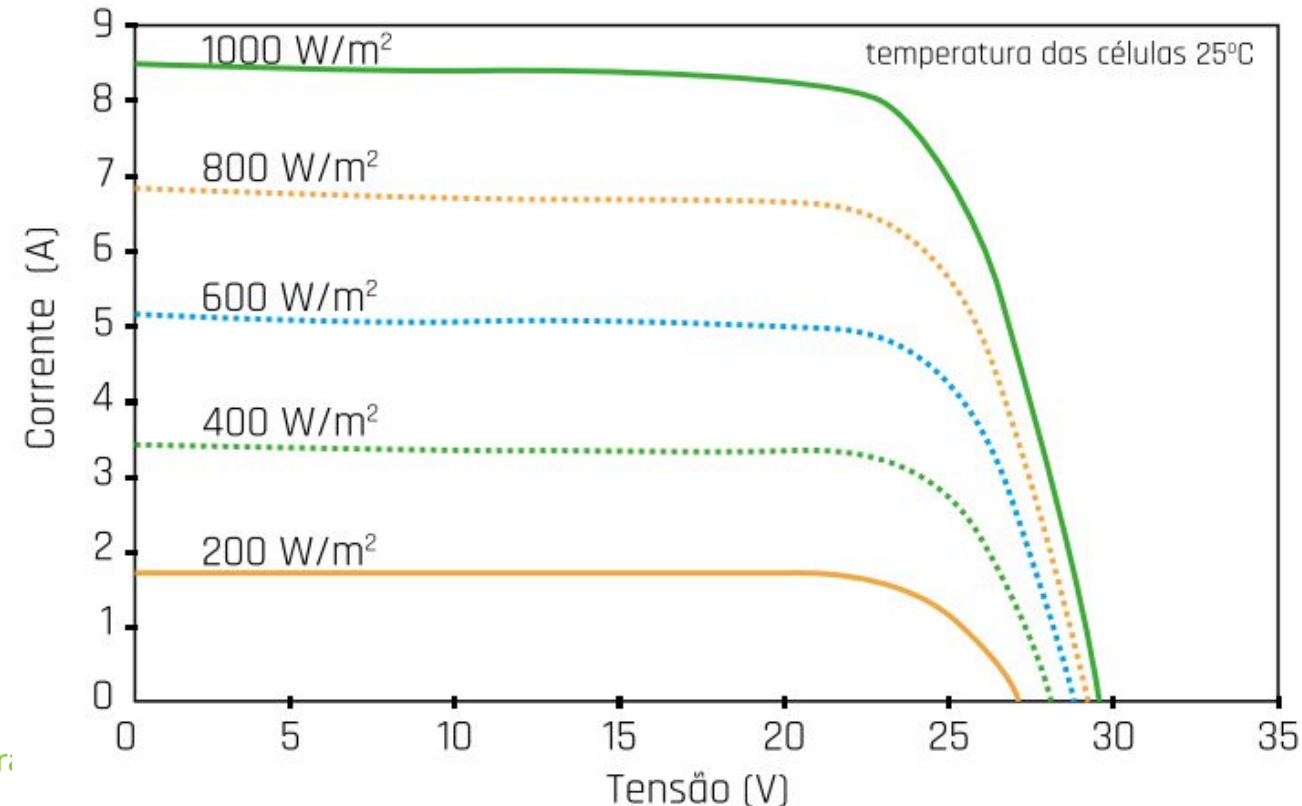
- A corrente elétrica que o módulo fotovoltaico pode fornecer depende diretamente da intensidade da radiação solar que incide sobre as células.
- Com uma irradiância de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  o módulo é capaz de fornecer a corrente máxima especificada em sua etiqueta (sob temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ).
- Com pouca luz a corrente fornecida pelo módulo é muito pequena e sua capacidade de gerar energia é severamente reduzida.



# FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

## INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR

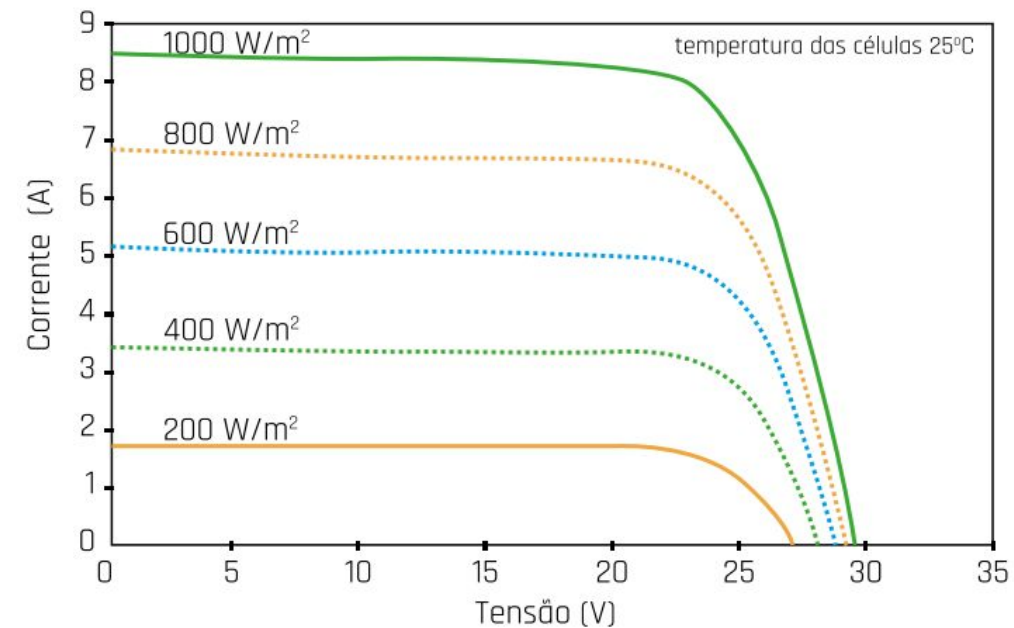
O gráfico ao lado as diferentes curvas I-V para diferentes níveis de irradiância.



# FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

## INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR

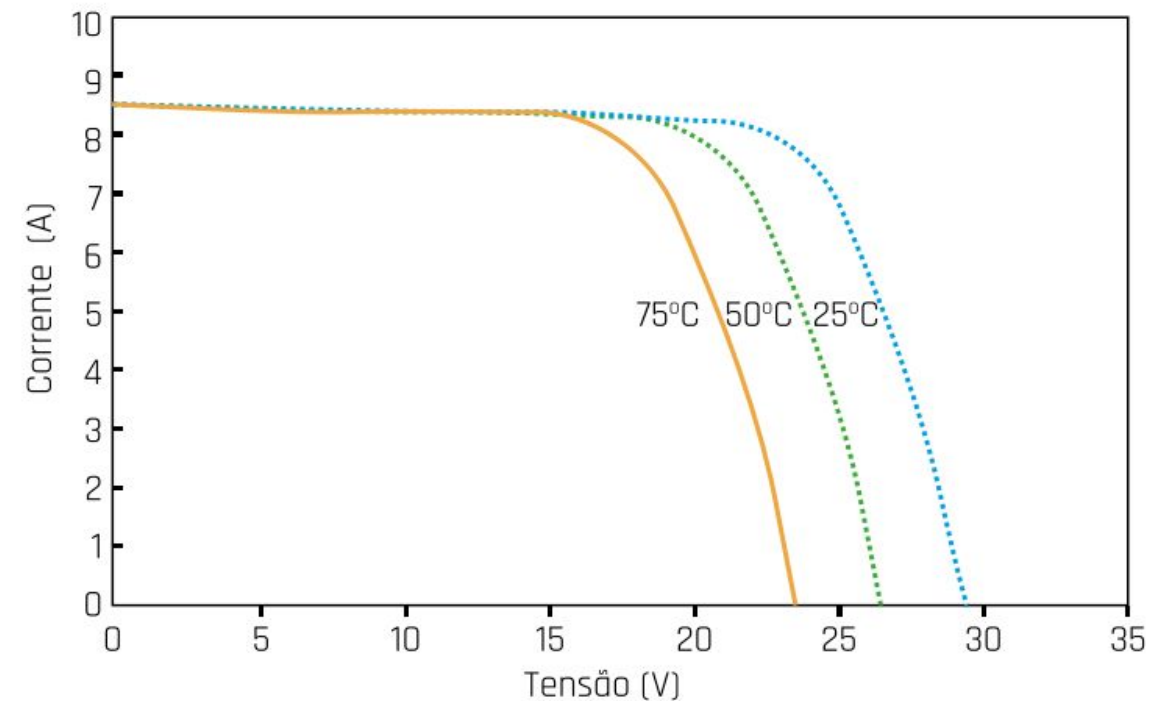
- Notamos que à medida que a irradiância solar diminui, a corrente gerada pelo módulo cai quase que proporcionalmente enquanto a tensão do módulo pouco sofre com esse efeito.
- Concluimos que quanto menor a irradiância solar incidente no módulo menor será a potência gerada pelo mesmo.



# FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

## INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

- A temperatura tem influência sobre a tensão que o módulo apresenta em seus terminais e, conseqüentemente, na potência fornecida pelo mesmo.
- Em temperaturas mais baixas a tensão aumenta e em temperaturas mais altas a tensão diminui.



# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- No dimensionamento da geração fotovoltaica, o projetista tem que identificar as características elétricas do módulo fotovoltaico a ser instalado no sistema.
- Com exceção de pequenos sistemas de baixa potência, costuma-se associar módulos fotovoltaicos para atingir uma faixa de tensão, corrente ou potência na qual um único módulo não é capaz de produzir.

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

- Os módulos podem ser conectados em ligações série e/ou paralelo, dependendo da corrente e tensão desejadas, para formar painéis fotovoltaicos com potência mais elevada.
- Ao definir como serão associadas os módulos, é necessário ter informações de como deverá ser a instalação e quais componentes serão utilizados, pois as tensões e correntes resultantes devem ter plena compatibilidade com esses componentes.

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Veamos a seguir como são feitas as associações de módulos fotovoltaicos:

- MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE
- MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM PARALELO

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE (STRING)

- Associamos módulos fotovoltaicos em série quando o projeto necessita que a geração fotovoltaica atinja valores de tensão nos quais os módulos comerciais não apresentem.
- A conexão em série é feita do terminal positivo de um módulo ao terminal negativo de outro, e assim por diante. As caixas de conexões na sua face posterior ou cabos pré-instalados facilitam esta conexão.

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE (STRING)

- Deve-se utilizar cabos e conexões específicos para uso em sistemas fotovoltaicos, que são protegidos contra os efeitos da radiação e das intempéries.
- Um detalhe importante é que os módulos fotovoltaicos conectados em série devem ser de mesmo tipo e modelo mantendo a unicidade das características elétricas entre eles para evitar que um módulo fotovoltaico de menor capacidade de geração (seja de potência menor ou de corrente menor) limite a capacidade de geração dos módulos de maior capacidade.



# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE (STRING)

- De maneira análoga à conexão das células fotovoltaicas, quando a ligação dos módulos é série, as tensões são somadas e a corrente (para módulos iguais) não é afetada, ou seja:

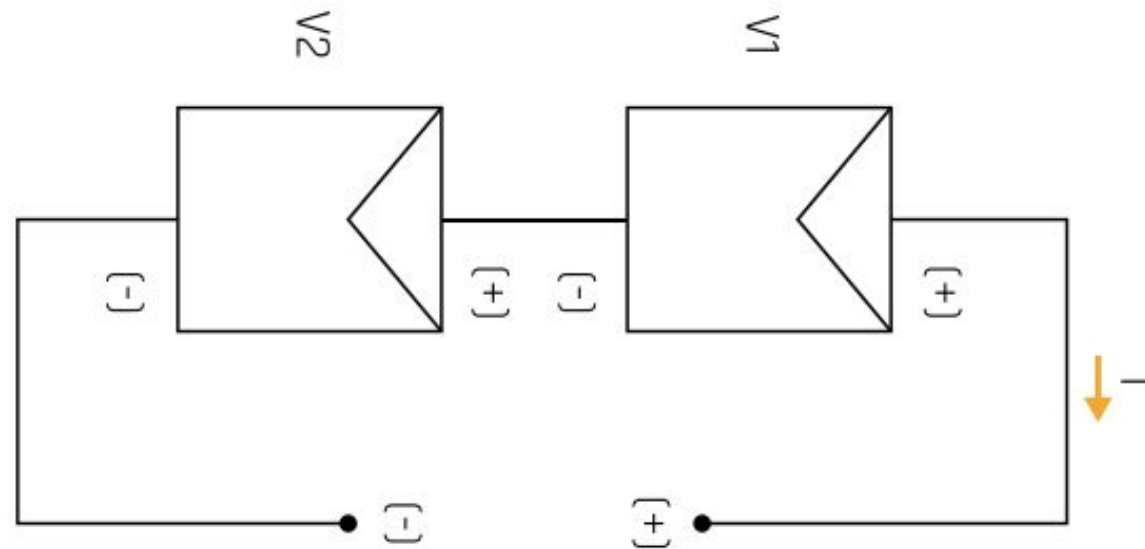
$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE (STRING)

A figura ilustra a associação série entre dois módulos fotovoltaicos:

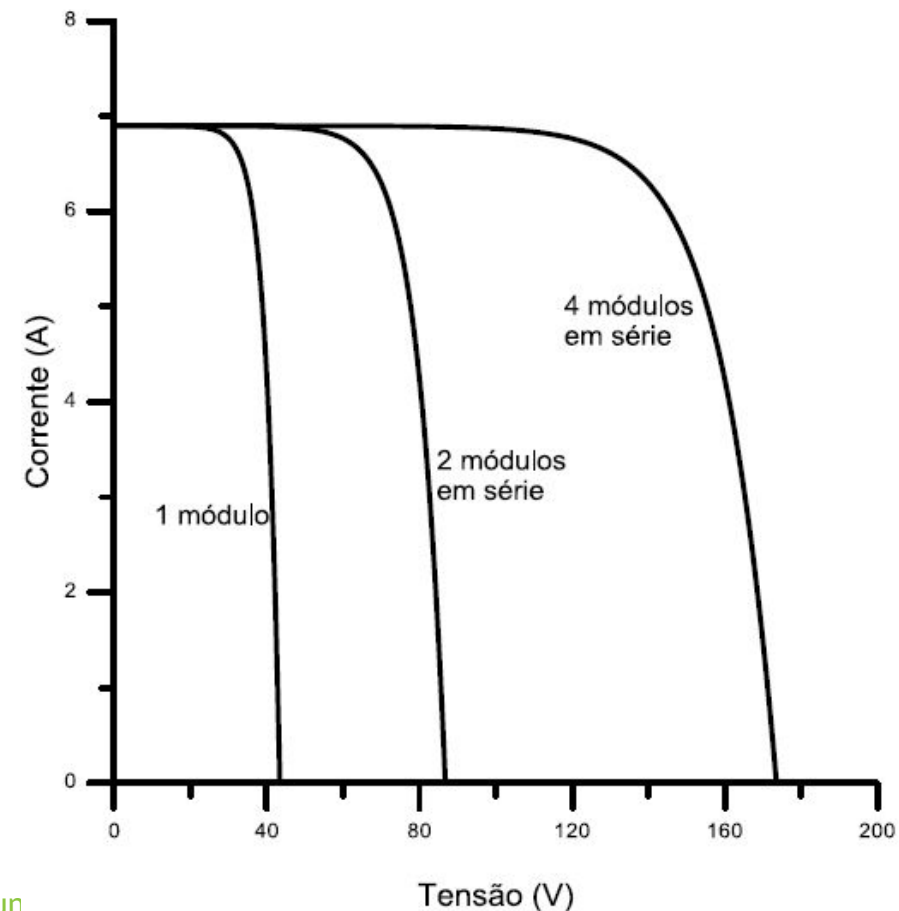


Damos o nome de string a um conjunto de módulos conectados em série.

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE (STRING)

O efeito da conexão em série de módulos idênticos está ilustrado na Figura, através da curva característica  $I$ - $V$ :



# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE (STRING)

Exemplo: Vejamos o resultado de uma conexão série entre dois módulos fotovoltaicos que apresentam para as condições de teste padrão STC as seguintes características elétricas:

Características elétricas para 1000W/m<sup>2</sup> e 25°C

Potência de pico (Wp)	140W
Tensão de circuito aberto (VOC)	22,1V
Tensão de máxima potência (VMP)	17,7V
Corrente de curto circuito (ISC)	8,68A
Corrente de máxima potência (IMP)	7,91A

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE (STRING)

- Uma vez realizada a conexão série, as correntes que fluem por cada módulo são sempre iguais entre si, mas para que a corrente não seja afetada em relação à corrente de um módulo individual, consideram-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura.
- Caso haja uma dispersão de características elétricas ou um sombreamento parcial, a corrente do conjunto conectado em série é limitada pelo módulo com a menor corrente individual.

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

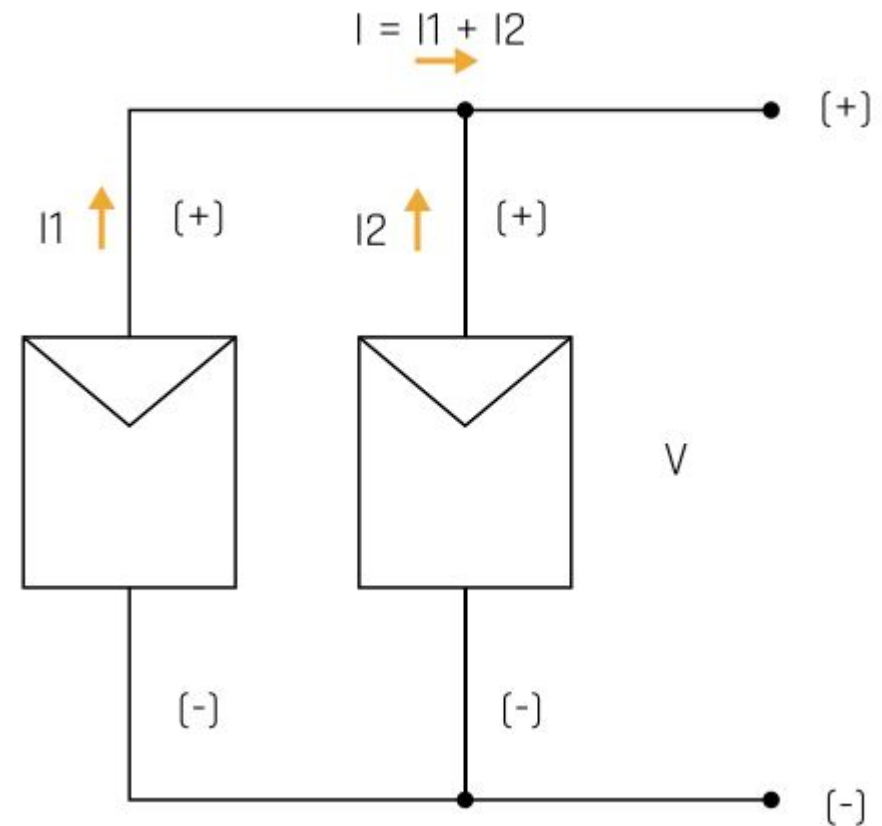
## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM PARALELO

- Ao associar módulos fotovoltaicos em paralelo as correntes geradas por cada módulo se somam e a tensão entre eles permanece a mesma.
- A conexão em paralelo é feita unindo-se os terminais positivos de todos os módulos entre si e procedendo-se da mesma forma com os terminais negativos.

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM PARALELO

Veamos o diagrama de uma associação em paralelo entre dois módulos fotovoltaicos:



# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM PARALELO

- Esta conexão resulta na soma das correntes sem alteração da tensão, ou seja:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

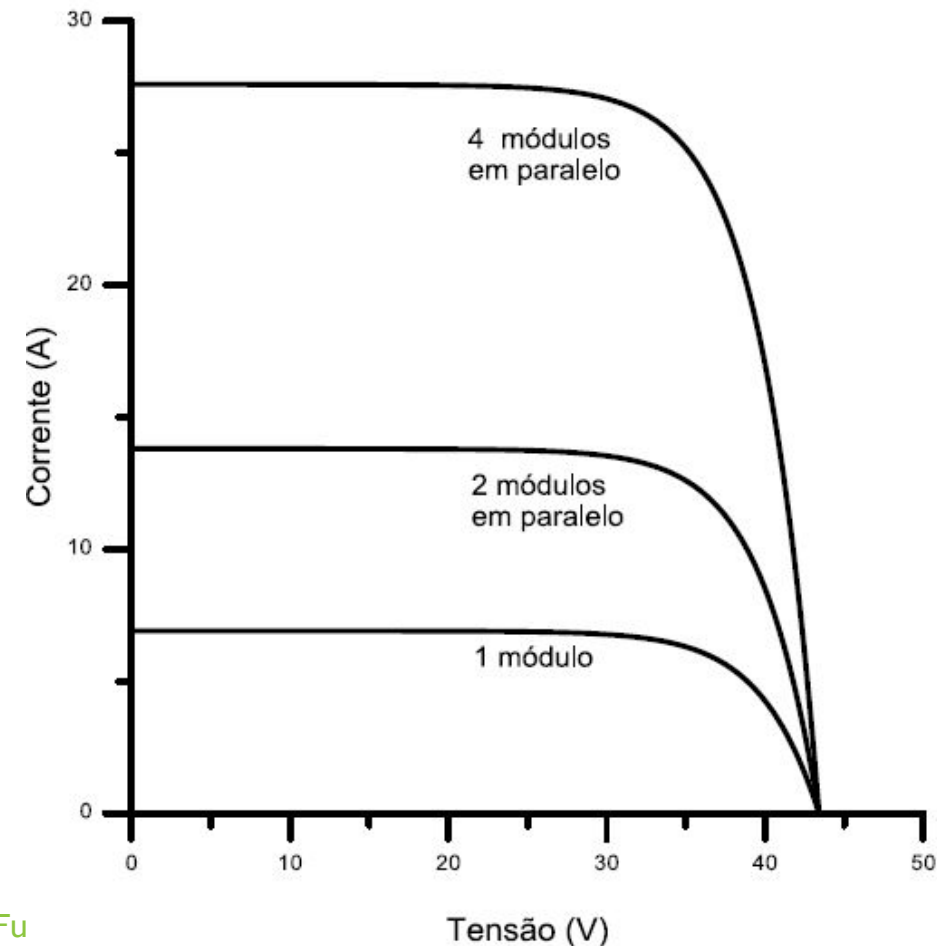
$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$



# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM PARALELO

A Figura ilustra o efeito da soma das correntes em módulos idênticos conectados em paralelo, através da curva característica  $I$ - $V$ .



# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM PARALELO

Exemplo: Utilizando os mesmos módulos fotovoltaicos do exemplo anterior, teremos como resultado de uma associação paralela o seguinte:

Características elétricas para  $1000\text{W}/\text{m}^2$  e  $25^\circ\text{C}$

Potência de pico (Wp)	140W
Tensão de circuito aberto (VOC)	22,1V
Tensão de máxima potência (VMP)	17,7V
Corrente de curto circuito (ISC)	8,68A
Corrente de máxima potência (IMP)	7,91A

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

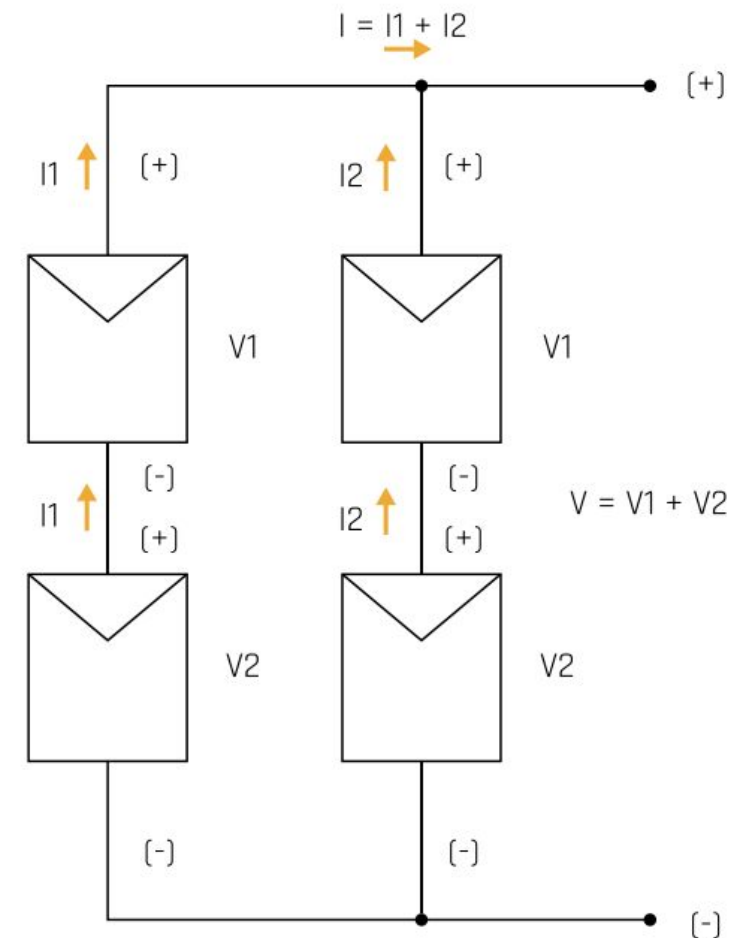
## ASSOCIAÇÃO MISTA (SÉRIE – PARALELA)

- É muito comum a associação mista entre módulos fotovoltaicos aplicados a projetos de médio/grande porte para atingir níveis de tensões e potências mais altas do que um simples string pode chegar.
- Ao conectarmos strings em paralelo estaremos somando as correntes de cada string e no final de tudo somando as potências de todos os módulos fotovoltaicos.

# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## ASSOCIAÇÃO MISTA (SÉRIE – PARALELA)

Note que na figura como é feita uma associação mista:



# ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## ASSOCIAÇÃO MISTA (SÉRIE – PARALELA)

**Exemplo:** Conectando em paralelo dois strings iguais ao do exemplo anterior,teremos: As tensões finais serão as tensões dos strings que é resultado da soma de dois módulos em série:

Características elétricas para 1000W/m<sup>2</sup> e 25°C

Potência de pico (Wp)	140W
Tensão de circuito aberto (VOC)	22,1V
Tensão de máxima potência (VMP)	17,7V
Corrente de curto circuito (ISC)	8,68A
Corrente de máxima potência (IMP)	7,91A

# EFEITOS DE SOMBREAMENTO

## ASSOCIAÇÃO MISTA (SÉRIE – PARALELA)

**Exemplo:** Conectando em paralelo dois strings iguais ao do exemplo anterior,teremos: As tensões finais serão as tensões dos strings que é resultado da soma de dois módulos em série:

Características elétricas para 1000W/m<sup>2</sup> e 25°C

Potência de pico (Wp)	140W
Tensão de circuito aberto (VOC)	22,1V
Tensão de máxima potência (VMP)	17,7V
Corrente de curto circuito (ISC)	8,68A
Corrente de máxima potência (IMP)	7,91A

# REFERÊNCIAS

Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos

**MUITO**  
**OBRIGADO**

Alexander Furtado Carneiro

Professor de Eletrotécnica

**[www.ifsul.edu.br](http://www.ifsul.edu.br)**  
E-mail de contato  
**TELEFONE DE CONTATO**