

2023
DOCUMENTO
TÉCNICO

Dimensionamento de
Arranjos Fotovoltaicos



O inversor é um dos equipamentos mais importantes do sistema gerador fotovoltaico e, por esta razão, é necessário entender como dimensionar, de forma eficiente, o arranjo fotovoltaico que será conectado a ele. Além de garantir a operação correta e evitar danos aos equipamentos, pode proporcionar um melhor aproveitamento da irradiação solar e rendimento final do sistema.

O dimensionamento de um arranjo fotovoltaico depende de inúmeros fatores que estão previstos nos manuais das fabricantes e na NBR 16690. Para este artigo, o objetivo é apresentar, de forma prática, a influência da temperatura nos parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos e como estes devem ser considerados no dimensionamento de arranjos fotovoltaicos quando comparados com os parâmetros mínimos e máximos de entrada que o inversor fotovoltaico suporta.

A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DOS MÓDULOS FV

A temperatura é um dos fatores que mais influenciam a performance de operação de equipamentos eletrônicos e com os módulos fotovoltaicos não é diferente. Apesar de ser negligenciada, a influência da variação de temperatura nos parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos é relevante para o dimensionamento correto dos arranjos.

Atualmente, os datasheets dos módulos fotovoltaicos apresentam parâmetros elétricos obtidos em testes sob duas condições distintas, a *NMOT* (*Nominal Module Operating Temperature*) e *STC* (*Standard Test Condition*). Os valores em *NMOT* são obtidos com condições de teste de irradiância de 800 W/m², temperatura de 20°C, velocidade do vento de 1m/s e AM 1,5. Enquanto o teste sob *STC* tem como premissas uma irradiância de 1000 W/m², temperatura de 25°C e AM 1,5.

Dessa forma, os testes *NMOT* e *STC* são feitos sob condições distintas de temperaturas padronizadas em 20°C e 25°C, respectivamente. Contudo, em situações práticas, a temperatura real de operação pode variar significativamente além destes limites dependendo do local e região geográfica de onde serão instalados os módulos, e, por isso as fabricantes disponibilizam nos datasheets informações de como considerar o impacto da temperatura nos parâmetros elétricos do equipamento.

Para analisar a influência da temperatura no dimensionamento de um arranjo fotovoltaico, utilizaremos como exemplo os parâmetros elétricos na *STC* do datasheet de um módulo de 540W que pode ser visto na figura 1 abaixo.

PARAMÉTROS ELÉTRICOS NA STC						
Tipo	JAM72S30 -530/MR	JAM72S30 -535/MR	JAM72S30 -540/MR	JAM72S30 -545/MR	JAM72S30 -550/MR	JAM72S30 -555/MR
Potência Máxima(Pmax) [W]	530	535	540	545	550	555
Tensão de Circuito Aberto(Voc) [V]	49.30	49.45	49.60	49.75	49.90	50.02
Tensão na Potência Máxima(Vmp) [V]	41.31	41.47	41.84	41.80	41.96	42.11
Corrente de Curto-circuito(Isc) [A]	13.72	13.79	13.86	13.93	14.00	14.07
Corrente na Potência Máxima(Im _p) [A]	12.83	12.90	12.97	13.04	13.11	13.18
Eficiência do Módulo [%]	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5
Tolerância de Potência	±5W					
Coeficiente de Temperatura da Isc(α_{Isc})	+0.045%/°C					
Coeficiente de Temperatura da Voc(β_{Voc})	-0.275%/°C					
Coeficiente de Temperatura da Pmax(γ_{Pmp})	-0.350%/°C					
STC (Condições de Teste Padrão)	Irradiância 1000W/m ² , temperatura das células 25°C, AM1.5G					

Figura 1: parâmetros elétricos na STC para o módulo FV utilizado como exemplo.

Fonte: JA Solar ([JAM72S30 530-555 MR \(jasolarbrasil.com.br\)](http://jasolarbrasil.com.br))

Dentro do datasheet é possível verificar três coeficientes que são relevantes no dimensionamento das strings do arranjo fotovoltaico: (1) Coeficiente de Temperatura da Isc; (2) Coeficiente de Temperatura da Voc; e; (3) Coeficiente de Temperatura da Pmax. Antes de analisar o que cada um indica, é importante entender que o sinal dos coeficientes indica aumento do parâmetro, enquanto os valores abaixo propiciam uma redução do parâmetro.

Quando o sinal é um valor positivo, temperaturas acima da condição de teste propiciam um aumento do parâmetro, enquanto os valores abaixo propiciam uma redução do parâmetro.

- 1) Coeficiente de Temperatura da Isc: indica a variação percentual da corrente de curto-circuito (Isc) do módulo por grau Celsius, quando submetido a temperatura diferente do teste, ou seja, 25°C. Como o sinal deste coeficiente é positivo, indica que **temperaturas mais altas causam uma elevação da corrente de curto do módulo (Isc)**.
- 2) Coeficiente de Temperatura da Voc: indica a variação percentual da tensão de circuito aberto (Voc) do módulo por grau Celsius, quando submetido a temperatura diferente do teste, ou seja, 25°C. Como o sinal deste coeficiente é negativo, indica que **temperaturas mais baixas causam uma elevação da tensão de circuito aberto (Voc)**.
- 3) Coeficiente de Temperatura da Pmax: indica a variação percentual da potência máxima (Pmp) do módulo por grau Celsius, quando submetido a temperatura diferente do teste, ou seja, 25°C. Como o sinal deste coeficiente é negativo, indica que **temperaturas mais baixas causam uma elevação da potência máxima do módulo (Pmp)**.

Para um exemplo prático de correção de parâmetros, utilizaremos o módulo JAM72S30-540/MR de 540W para mostrar como é feita a correção dos dados de corrente máxima de curto-circuito (Isc), corrente de potência máxima (Im_p), tensão de circuito aberto (Voc) e tensão de potência máxima (Vmp), conforme pode ser visto na figura 2 abaixo.

PARAMÊTROS ELÉTRICOS NA STC	
Tipo	JAM72S30 -540/MR
Potência Máxima(Pmax) [W]	540
Tensão de Circuito Aberto(Voc) [V]	49.60
Tensão na Potência Máxima(Vmp) [V]	41.84
Corrente de Curto-circuito(Isc) [A]	13.86
Corrente na Potência Máxima(Imp) [A]	12.97
Eficiência do Módulo [%]	20.9
Tolerância de Potência	±5W
Coefficiente de Temperatura da Isc(α_{Isc})	+0.045%/°C
Coefficiente de Temperatura da Voc(β_{Voc})	-0.275%/°C
Coefficiente de Temperatura da Pmax(γ_{Pmp})	-0.350%/°C

Figura 2: parâmetros elétricos na STC para o módulo JAM72S30-540/MR utilizado no exemplo.

Fonte: JA Solar ([JAM72S30 530-555 MR \(jasolarbrasil.com.br\)](http://JAM72S30 530-555 MR (jasolarbrasil.com.br)))

Neste exemplo, consideremos uma instalação de um sistema fotovoltaico em Campo Grande, no Mato Grosso do Sul, onde as temperaturas mínima e máxima já registradas são 5°C e 41°C, respectivamente, para correção dos parâmetros:

Corrente de curto-circuito (Isc): para correção da corrente de curto-circuito, consideramos a temperatura máxima de 41°C.

$$41^{\circ} \text{ C} - 25^{\circ} \text{ C} = 16^{\circ} \text{ C de diferença}$$

Logo, o percentual de variação da corrente será de: $16 \times 0,045 = 0,72\%$

$$\text{Valor corrigido} = 13,86 + 0,72\% = \mathbf{13,95 \text{ A}}$$

Atenção! Repare que a variação da corrente é muito pequena. Alguns projetistas optam por ignorar este efeito, visto que não é tão relevante para os cálculos.

Corrente de potência máxima (Imp): os datasheets de módulos não possuem um coeficiente para correção de *Imp*, porém, podemos utilizar o coeficiente de *Isc* para realizar esta correção. Conforme é mostrado na figura 3 abaixo, é possível notar que o aumento das correntes *Isc* e *Imp* é proporcional.

Corrente de Curto-circuito(Isc) [A]	13.72	13.79	13.86	13.93	14.00	14.07
Corrente na Potência Máxima(Imp) [A]	12.83	12.90	12.97	13.04	13.11	13.18

Figura 3: parâmetros de corrente Isc e Imp do módulo utilizado no exemplo.

Fonte: JA Solar ([JAM72S30 530-555 MR \(jasolarbrasil.com.br\)](http://JAM72S30 530-555 MR (jasolarbrasil.com.br)))

$$41^{\circ} \text{ C} - 25^{\circ} \text{ C} = 16^{\circ} \text{ C de diferença}$$

Logo, o percentual de variação da corrente será de:

$$16 \times 0,045 = 0,72\%$$

$$\text{Valor corrigido} = 12,97 + 0,72\% = \mathbf{13,06 \text{ A}}$$

Atenção! Repare que a variação da corrente é muito pequena. Alguns projetistas optam por ignorar este efeito, visto que não é tão relevante para os cálculos.

Tensão de circuito aberto (Voc): para correção da tensão de curto-circuito, consideramos a temperatura mínima de 5°C.

$$25^\circ \text{ C} - 5^\circ \text{ C} = 20^\circ \text{ C de diferença}$$

Logo, o percentual de variação da tensão será de:

$$20 \times 0,275 = 5,5\%$$

$$\text{Valor corrigido} = 49,6 + 5,5\% = \mathbf{52,3 \text{ V}}$$

Atenção! Repare que o valor de Voc varia 5,5%, que é um valor significativo para o dimensionamento. **De forma alguma esta variação deve ser negligenciada no projeto.**

Tensão de potência máxima (Vmp): os datasheets de módulos não possuem um coeficiente para correção de Vmp. Contudo, quando foi feita a correção de Imp no tópico 2, foi possível notar que a corrente Imp muda discretamente em função da variação da temperatura. Utilizando o princípio básico da lei de Ohm ($P = V \times I$), quando uma corrente se mantém “constante”, podemos concluir que a variação da potência é proporcional a variação de tensão. Dessa forma, podemos utilizar o coeficiente de Pmp para esta correção:

$$25^\circ \text{ C} - 5^\circ \text{ C} = 20^\circ \text{ C de diferença}$$

Logo, o percentual de variação da tensão será de:

$$20 \times 0,35 = 7\%$$

$$\text{Valor corrigido} = 41,6 + 7\% = \mathbf{44,5 \text{ V}}$$

Atenção! Repare que o valor de Vmp varia 7%, que é um valor significativo para o dimensionamento. **De forma alguma esta variação deve ser negligenciada no projeto.**

Parâmetro	Valor em STC	Valor corrigido para Campo Grande/MS	Variação
Corrente de curto-circuito (<i>Isc</i>)	13,86 A	13,95 A	0,72%
Corrente de potência máxima (<i>Imp</i>)	12,97 A	13,06 A	0,72%
Tensão de circuito aberto (<i>Voc</i>)	49,6 V	52,3 V	5,5%
Tensão de potência máxima (<i>Vmp</i>)	41,6 V	44,5 V	7%

Figura 4: Correção de parâmetros elétricos para o módulo JAM72S30-540/MR utilizado no exemplo.

Fonte: GoodWe

COMBINANDO O ARRANJO FV COM O INVERSOR

Depois de realizadas as devidas correções nos parâmetros elétricos do módulo, é necessário compará-los com os dados de entrada CC do inversor fotovoltaico. O dimensionamento do arranjo fotovoltaico, na visão do inversor, nada mais é do que a definição da quantidade de séries fotovoltaicas (ou *strings*) que podem ser conectadas ao equipamento, e qual a quantidade ideal de módulos que podem compor esta *string*.

Para este exemplo, utilizaremos o GW7000-MS-30 da linha MS G3 WHITE, que é um inversor monofásico da GoodWe com potência de saída de 7 kW e tensão 220Vac, tanto tensão fase-fase como fase-neutro, conforme dados mostrados na figura 5 abaixo.



Dados técnicos	GW7000-MS-30
Entrada CC	
Potência Máxima de Entrada (W)	12600
Tensão Máxima de Entrada (V)	600
Faixa de Operação MPPT (V)	40 ~ 560
Tensão de partida (V)	50
Tensão Nominal de Entrada (V)	360
Corrente Máxima de Entrada por MPPT (A)	20
Corrente Máxima de Curto por MPPT (A)	25
Número de MPPTs	3
Número de strings por MPPT	1

Figura 5: parâmetros elétricos do inversor MS G3 DE 7,0 kW da GoodWe.

Fonte: GoodWe ([MS G3 WHITE \(GoodWe.com\)](https://www.goodwe.com/pt-br/produto/inversor-monofasico-gw7000-ms-30))

1. Corrente CC

Para definição da quantidade de séries fotovoltaicas que podem ser conectadas ao MPPT do inversor, é necessário levar em consideração os dados de corrente CC. Existem dois parâmetros do inversor e do módulo FV para se atentar ao realizar esta combinação: *Isc* (corrente de curto-circuito) e *Imp* (corrente de operação). No inversor, o limite de corrente de entrada de operação (*Imp*) é o valor máximo que o inversor (ou o MPPT) consegue absorver e converter em energia. Enquanto o limite de corrente de curto-circuito (*Isc*) é a máxima corrente que o inversor (ou o MPPT) suporta sem ser danificado.

1.1 Corrente de Operação (*Imp*)

Em condições ideais, a corrente *Imp* dos módulos deve ser menor do que o parâmetro de limite de corrente máxima de entrada (*Imp*) do inversor FV. Caso esta corrente seja maior, o inversor vai limitar a corrente de entrada ao valor que ele suporta trabalhar, ou seja, o sistema vai deixar de aproveitar parte da potência e o módulo deixa de trabalhar na potência máxima.

Para o módulo utilizado como exemplo neste artigo, a corrente corrigida é de 13,06A, sendo menor que a corrente máxima suportada pelo inversor, que é de 20A. Dessa forma, o inversor vai trabalhar sem nenhum tipo de limitação na corrente de entrada, desde que seja conectada apenas uma *string* por MPPT.

1.2 Corrente de Curto-Circuito (Isc)

Em seguida, deve-se comparar também a corrente *Isc* do módulo com o limite de corrente máxima de curto (*Isc*) do inversor. A corrente de curto-circuito (*Isc*) do módulo fotovoltaico **NUNCA** deve ser superior ao limite de entrada do inversor, sob risco de danos ao equipamento e perda da garantia.

O valor de *Isc* corrigido, em nosso exemplo em Campo Grande com temperatura mínima de 5°C, do módulo JAM72S30-540/MR é de 13,95A, enquanto o limite de corrente *Isc* do inversor GW7000-MS-30 é de 25A, valor muito superior ao do módulo. Dessa forma, este módulo pode ser utilizado com o inversor sem danificar os componentes de entrada, desde que seja conectada apenas uma série fotovoltaica por MPPT.

A figura 6 apresenta um resumo das comparações entre correntes *Isc* e *Imp* do módulo e do inversor:

$I_{mp} \text{ módulo} < I_{mp} \text{ Inversor}$	OK
$I_{mp} \text{ módulo} > I_{mp} \text{ Inversor}$	Inversor limita a potência de entrada
$I_{sc} \text{ módulo} < I_{sc} \text{ Inversor}$	OK
$I_{sc} \text{ módulo} > I_{sc} \text{ Inversor}$	Dano ao inversor

Figura 6: resumo entre comparações de correntes *Isc* e *Imp* de módulos e inversores.

Fonte: GoodWe

2. Tensão CC

Em relação a quantidade de módulos que podem ser conectados em série para compor a *string*, deve-se considerar as tensões. A partir do inversor, a tensão máxima de operação (*Vmp*) dos módulos é aquela que o inversor vai estar sujeito quando o sistema estiver em operação. Enquanto a tensão de circuito aberto (*Voc*) do módulo é a máxima tensão que o inversor será submetido quando o circuito estiver aberto, ou seja, sem fluxo de corrente.

Em vista disso, a tensão *Vmp* da *string* deve ser o suficiente para partir o equipamento, ao mesmo tempo que a tensão *Voc* não deve ser superior a máxima tensão que o inversor suporta sem ter sua isolação rompida.

Sendo assim, é comum realizar dois cálculos, um para definir a quantidade mínima e outro para definir a quantidade máxima de módulos que uma *string* fotovoltaica deve possuir. Porém, existem dois parâmetros do inversor que devem ser levados em consideração no dimensionamento de arranjos fotovoltaicos para que o sistema tenha um bom desempenho: a “**Faixa de Operação MPPT**” e a “**Tensão Nominal de Entrada**”, que serão exemplificados a seguir.

2.1 Tensão de Operação (Vmp)

Na definição de quantidade mínima de módulos a serem conectados no inversor fotovoltaico, é necessário dividir a tensão mínima de inicialização do inversor pelo *Vmp* do módulo fotovoltaico. Esta quantidade, para o exemplo adotado seria de: $50V_{cc} \div 44,5V_{cc} = 1,2$ módulos. Arredondando este número para cima, **o valor mínimo é de 2 módulos por série fotovoltaica.**

É recomendado dimensionar as séries fotovoltaicas para que apresentem tensão de V_{mp} dentro da “Faixa de Operação MPPT” do inversor. Caso esta tensão esteja abaixo ou acima desses parâmetros, o inversor pode ter uma eficiência de conversão CC/CA reduzida e a geração de energia do sistema será menor que o esperado.

No exemplo adotado, esta faixa é de 40 Vcc a 560 Vcc para o inversor GW7000-MS-30, e o ideal é que o dimensionamento preveja no mínimo 1 módulo, e no máximo 12 módulos ($560V_{cc} \div 44,5 V_{cc} = 12,6$) na string. Contudo, conforme cálculo anterior, para a partida do equipamento são necessários no mínimo 2 módulos na série fotovoltaica.

Além do mais, um outro parâmetro do inversor deve ser levado em consideração: a “Tensão Nominal de Entrada”. Este valor é um dado de tensão CC que representa quando o inversor vai operar em sua máxima eficiência, então é sugerido que a série fotovoltaica possua uma tensão V_{mp} próxima a ele. Para o exemplo que estamos tratando neste artigo, o dado do inversor GW7000-MS-30 é de 360 Vcc, e o ideal seria dimensionar uma série fotovoltaica com $360 V_{cc} \div 44,5 V_{cc} = 8,08$ módulos. Sendo assim, a quantidade ideal é de 8 módulos por string.

2.2 Tensão de Circuito Aberto (Voc)

Para o cálculo de quantidade máxima de módulos em uma série fotovoltaica, a tensão máxima de entrada do inversor deve ser dividida pela tensão de V_{oc} dos módulos na temperatura mínima possível no local de instalação. Para o exemplo tratado neste artigo (Campo Grande), dividindo-se a tensão de máxima de entrada do inversor pela tensão de V_{oc} do módulo corrigida para 5°C, esta quantidade seria de: $600V_{cc} \div 52,3V_{cc} = 11,47$ módulos. Arredondando este número para baixo, o **valor máximo é de 11 módulos por série fotovoltaica** -.

A figura 7 apresenta um resumo das operações para cálculo de quantidade mínima e máxima de módulos em uma série fotovoltaica quando considerados os parâmetros de tensão do inversor.

$Tensão\ de\ partida\ do\ inversor \div V_{mp}\ do\ módulo$	Quantidade mínima de módulos para partida do inversor
$Faixa\ de\ Operação\ MPPT\ do\ inversor \div V_{mp}\ do\ módulo$	Quantidades mínima e máxima de módulos por <i>string</i> para o funcionamento correto do MPPT
$Tensão\ Nominal\ de\ Entrada\ do\ inversor \div V_{mp}\ do\ módulo$	Quantidade ideal de módulos por <i>string</i> para melhor eficiência
$Tensão\ máxima\ de\ entrada\ do\ inversor \div V_{oc}\ do\ módulo$	Quantidade máxima de módulos que a <i>string</i> deve possuir

Figura 7: operações para cálculo de quantidade mínima e máxima de módulos em uma série fotovoltaica

Fonte: GoodWe

Ainda, o último parâmetro a ser analisado é a quantidade máxima de módulos que podem ser conectados ao arranjo fotovoltaico do inversor. Para o inversor GW7000-MS-30 da GoodWe, a potência máxima de entrada é de 12.600 W enquanto a potência máxima do módulo é de 540 W, sendo assim, a quantidade máxima é de $12600 \div$

540 = 23 módulos

Segue abaixo um resumo para definição do arranjo fotovoltaico que pode ser conectado ao inversor GW7000-MS-30 da GoodWe utilizando-se dos módulos JAM72S30-540/MR para dimensionamento em Campo Grande/MT:

Pode-se conectar no máximo uma série fotovoltaica por MPPT;

A quantidade mínima é de 2 módulos por série;

A quantidade máxima é de 11 módulos por série;

Para melhor eficiência do MPPT, sugere-se a conexão de 8 módulos por série.

Não se deve exceder a quantidade de 23 módulos.

Por fim, é importante ressaltar que não se deve conectar strings com tensões diferentes em paralelo, ou seja, quantidades de módulos diferentes na mesma MPPT de um inversor, sob **risco de perda de garantia do equipamento**. Além de sobrecarregar o circuito *boost* do inversor, que é o circuito que faz o “nivelamento” entre as tensões de entrada, é previsto pela norma NBR 16690 que esta diferença não deve exceder 5%.

Conclusão

Conforme demonstrado neste artigo, além das normativas vigentes e as determinações dos fabricantes, um dos principais fatores a serem considerados no dimensionamento de arranjos fotovoltaicos é a variação de temperatura local. Isso ocorre porque essa variação afeta os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos, principalmente os valores de tensão de V_{mp} e V_{oc} , que são determinantes para a definição das quantidades mínimas e máximas de módulos por série fotovoltaica. Essas variações podem influenciar na eficiência final de conversão do inversor e até mesmo causar danos ao equipamento caso o limite de tensão máxima suportada seja excedido.

Outros fatores a serem considerados durante o dimensionamento do projeto são as correntes de operação (I_{mp}) e de curto-circuito (I_{sc}) dos módulos, que são menos afetadas pela variação de temperatura, mas ainda assim exigem atenção para garantir a compatibilidade com o inversor. Isso visa evitar limitações em casos extremos e reduzir o risco de danos ao inversor. Portanto, para um arranjo bem definido, é importante prestar atenção aos parâmetros de trabalho dos módulos e aos limites de entrada de tensão, corrente e potência máxima do inversor.

Siga a **Comunidade Solar da GoodWe (community.goodwe.com)** para conferir todos os artigos técnicos, vídeos orientativos, webinars e atividades lançadas pela GoodWe e pela GoodWe Solar Academy.

Aviso

As informações contidas neste documento estão sujeitas a alterações sem aviso prévio e não constituem qualquer tipo de garantia. Consulte a Academia Solar GoodWe através do e-mail academy@goodwe.com para obter a versão mais recente.