

# PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DAS TOPOLOGIAS ELÉTRICAS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA A PARTIR DA IDENTIFICAÇÃO DE CONFORMIDADES

Sérgio Pires Pimentel – sergio\_pimentel@ufg.br

Sérgio Granato de Araújo – sgranato1@gmail.com

Enes Gonçalves Marra – enes.gm@gmail.com

Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC/UFG)

Marcelo Nogueira Bousquet – marcelo@geracaoenergia.eng.br

Espora Energética S/A, L&M Engenharia e Consultoria

**Resumo.** Este trabalho aborda o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica CA de forma que se atinja o maior número possível de conformidades em relação aos critérios de projeto estabelecidos. Além das diferenças conceituais entre as topologias elétrica e física que constituem um sistema fotovoltaico, também são apresentadas as justificativas para se buscar um dimensionamento tecnicamente correto. Apesar de haver várias metodologias de dimensionamento da topologia elétrica de um sistema fotovoltaico, muitas delas são redundantes e resultam em uma lista extensa de possíveis configurações que, normalmente, dificulta a escolha do projetista. Nesse contexto, este trabalho propõe um método de dimensionamento, seleção e classificação a partir do atendimento de conformidades das topologias elétricas que poderiam ser adotadas na elaboração de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Um suposto sistema fotovoltaico de 34 kWp foi utilizado como referência para exemplificar os procedimentos de cálculo e as razões técnicas de aplicação dos critérios de seleção. Para validar a proposta de dimensionamento apresentada, de um total de 54 topologias elétricas previamente definidas a partir das metodologias tradicionais de dimensionamento, apenas 3 foram identificadas pelo método proposto como sendo aquelas que atenderiam ao maior número de conformidades estipuladas pelo projetista. As etapas de cálculo do método proposto são discutidas separadamente e apresentadas em uma sequência que estimula a sua reaplicação, com e sem adaptações, em qualquer outro sistema fotovoltaico conectados à rede. Dessa forma, espera-se contribuir para um melhor entendimento do leitor interessado na área e, principalmente, em aprimorar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica dada a atratividade que essa forma de energia tem tido no Brasil e no exterior.

**Palavras-chave:** Sistema Fotovoltaico, Dimensionamento, Geração Distribuída

## 1. INTRODUÇÃO

Conforme (Abdel-Gawad, 2014) o aproveitamento da energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos (FV) está associado basicamente: a um sistema isolado da rede elétrica (*off-grid*), o qual supre a demanda de cargas remotas e/ou desconectadas da rede elétrica; ou a um sistema conectado à rede elétrica (*grid-tie*) que alimenta a(s) carga(s) local(is) e, também, é capaz de fornecer energia (potência ativa) à rede elétrica de forma simultânea ou não. Durante a etapa de dimensionamento (ou projeto) de um sistema FV relacionado a ambos os casos, o projetista deve especificar diversos parâmetros, tais como: quantidade e tipo de painéis FV; quantidade e tipo de inversores; disposição dos componentes na área disponível; diagramas de ligação; etc.. Em seguida, é preciso que analisar de forma conjunta todos os cálculos individuais de dimensionamento, porém alguns deles são conflitantes com outros fatores. Por exemplo, a instalação de vários painéis FV é capaz de aumentar a produção de energia da planta, porém isso também aumentará os custos de instalação e de manutenção. Portanto, de forma geral, o projeto de sistemas FV é um grande desafio (Kerekes, 2013).

Em meio às características operacionais e as decisões que envolvem a etapa de dimensionamento de um sistema FV, sabe-se que a sua topologia elétrica, seja ele um sistema FV conectado à rede elétrica ou não, é definida a partir da quantidade de painéis (ou módulos) fotovoltaicos que são conectados em série na composição de uma fileira (*string*) de painéis e, também, da quantidade de fileiras conectadas em paralelo na composição de um arranjo (*array*) fotovoltaico.

Vale ressaltar que a topologia elétrica de um sistema FV não corresponde necessariamente à sua topologia física. Esta última é caracterizada pela distribuição ou dispersão dos painéis sobre uma superfície de acordo com as dimensões, inclinações e sombreamento do local de instalação. Dessa forma, uma disposição lado a lado de painéis FV (tanto na horizontal, quanto na vertical) dispostos sobre o telhado de uma edificação não corresponde, necessariamente, a uma ou mais fileiras de painéis FV. Adicionalmente, a Fig. 1 exibe um exemplo de sistema FV no qual é possível distinguir a sua topologia elétrica (a fim de compor a tensão *Vout*) de sua topologia física (painéis ao longo de uma superfície).

Devidamente diferenciada da topologia física, a definição da topologia elétrica corresponde a um dos principais aspectos a ser considerado na etapa de dimensionamento de um sistema FV. E essa definição é considerada crítica uma vez que o subdimensionamento das fileiras poderá resultar em uma baixa eficiência do sistema FV, enquanto que o

sobredimensionamento poderá afetar o funcionamento do(s) inversor(es) do sistema FV e/ou comprometer os ajustes de seus sistemas de proteção (Woofenden, 2006). Diante disso, é possível concluir que a proposta de topologia elétrica para um sistema FV corresponde à determinação das prováveis configurações nas quais tais limites não são atingidos.

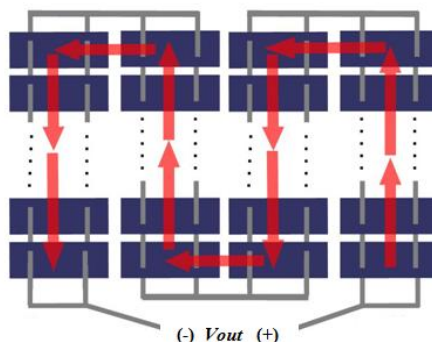


Figura 1- Diferenças entre a topologia elétrica (vermelho) e topologia física (azul) de um sistema FV.

Nesse contexto, um método de se identificar as topologias elétricas mais aptas e estabelecer uma ordem de prioridade a partir de um conjunto de possíveis configurações é discutido a seguir. Portanto, o objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia de seleção das fileiras inicialmente dimensionadas para um sistema FV conectado à rede elétrica a partir do levantamento do número de conformidades adicionais que cada uma atenderia.

## 2. DIMENSIONAMENTO DA TOPOLOGIA ELÉTRICA DO SISTEMA FV

É sabido que o total de painéis FV a serem utilizados na elaboração da topologia elétrica de um sistema FV pode ser obtido pela multiplicação da quantidade de painéis que formam uma fileira com a quantidade de fileiras que compõem o arranjo FV. E, também, que a busca (ou cálculo) dessas duas quantidades representa a etapa de projeto ou dimensionamento do sistema FV em análise. A etapa de dimensionamento é feita a partir das características elétricas do painel FV escolhido, da faixa da tensão de entrada do inversor, da faixa de corrente e de potência do inversor e, também, das condições de temperatura (valores máximo e mínimo) observadas no local de instalação. Segundo (SOLARPRO, 2009), durante a operação de um sistema FV devidamente dimensionado os valores da tensão e da corrente de saída do arranjo FV são correspondentes aos respectivos limites de operação determinados pelo(s) inversor(s) envolvido(s). Portanto, para isso, uma metodologia de dimensionamento deve ser seguida.

De forma a auxiliar os projetistas, fabricantes de inversores para sistemas FV conectados à rede disponibilizam instruções e ferramentas computacionais relacionadas ao dimensionamento de arranjos FV. Vale ressaltar que, apesar de algumas ferramentas computacionais fornecerem resultados detalhados sobre o sistema FV e de como melhorar sua eficiência, a principal função delas é oferecer ao projetista uma faixa de topologias aceitáveis para as condições estabelecidas no seu dimensionamento. A aceitação ou não das opções oferecidas caberá ao projetista já que, do ponto de vista legal, é ele o responsável técnico por aquele dimensionamento e não a empresa que elaborou a ferramenta que o auxiliou no processo. Portanto, o projetista deve conhecer as características desejadas para o sistema FV, as condições climáticas do local de instalação, os custos envolvidos e os dados auxiliares provenientes das ferramentas para que, diante disso, indique a opção mais indicada para aquele dimensionamento.

De acordo com (Kerekes, 2013) e (CRESESB, 2014), há diversos trabalhos e publicações elaborados como procedimentos de dimensionamento que apresentam, em sua maioria, metodologias idênticas ou muito semelhantes. Também por essa razão, o projeto de um arranjo FV ou de um sistema FV não se restringe a uma única solução. A seguir são apresentadas algumas metodologias de cálculo para dimensionamento do arranjo FV que correspondem às de maior uso.

### 2.1 Caso de estudo – Sistema FV conectado à rede elétrica de 34 kWp

Como forma de exemplificar as metodologias de cálculo apresentadas a seguir com relação ao dimensionamento de um arranjo FV, é proposto um sistema FV de 34 kWp a ser conectado em uma rede trifásica 220/380 V. Dada a potência do sistema FV desejado e, também, por tratar-se de um sistema trifásico, adotou-se a topologia da Fig. 2.

Considerou-se a utilização de dois inversores com potência de 15 kW cada ao invés de um único inversor com potência próxima de 34 kW. Essa opção de topologia foi escolhida no intuito de melhorar sua confiabilidade, reduzir os efeitos por somreamento e possibilitar o uso de inversores mais compactos e de menor custo. Outro ponto que influenciou essa escolha se deu a partir das dimensões físicas de um inversor trifásico de potência elevada. Ambos os inversores que compõem a topologia proposta na Fig. 2 correspondem ao modelo SUNNY TRIPOWER 15000TL-US, fabricado pela SMA. Alguns dados técnicos deste modelo de inversor são apresentados na Tab. 1.

Uma vez que os inversores são idênticos, pode-se presumir que os dois arranjos FV conectados a cada um dos inversores assim também o são. Assim, pode-se deduzir que cada inversor é responsável por processar metade da

potência total do sistema FV (34 kWp). Ou seja, cada inversor trifásico operará na condição de receber uma potência máxima de 17 kWp proveniente do arranjo FV conectado a ele. Portanto, cada inversor operará com um fator de dimensionamento do inversor (FDI) de  $FDI = 15 \text{ kW} / 17 \text{ kWp} = 0,88$ . Tal valor do fator FDI pode ser considerado adequado já que, de acordo com a curva exibida na Fig. 3, eficiência do inversor seria de aproximadamente 97% para um FDI próximo de 0,88.

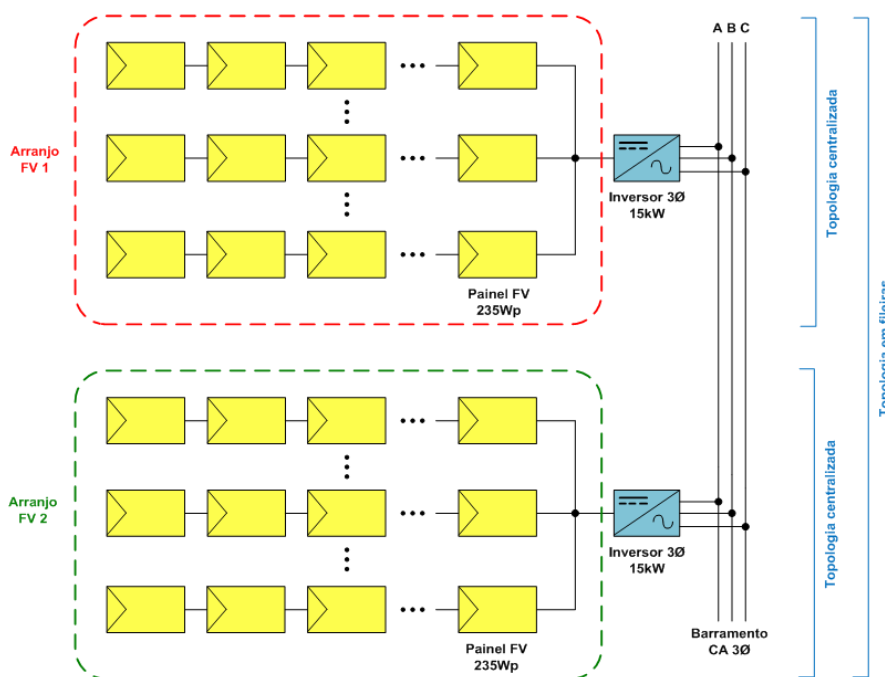


Figura 2- Topologia elétrica do sistema FV de 34 kWp considerado como caso de estudo.

Tabela 1 - Características elétricas do inversor trifásico SMA Sunny Tripower 15000TL-US.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potência máxima (FP = 1)	15,3 kW
Potência nominal (FP = 1)	15 kW
Tensão CC máxima	1000 V
Tensão de entrada (MPPT)	300 – 800 V
Corrente de entrada máxima	66 A

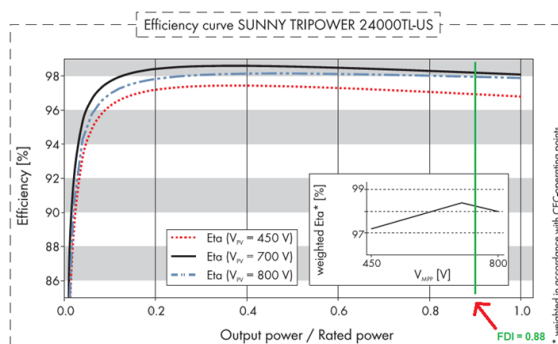


Figura 3- Curva de eficiência energética em função da potência de operação do inversor trifásico de 15 kW.

Com relação aos painéis FV da Fig. 2, todos eles são de tecnologia p-Si e correspondem ao modelo TBP156x156-60-P de 235Wp que é fabricado pela SUN-EARTH. Alguns dados técnicos deste modelo de painel FV são apresentados na Tab. 2 para as condições do padrão STC.

Além das características elétricas do painel FV e do inversor, é preciso conhecer também os dados meteorológicos do local de instalação do sistema FV. Para uma instalação do sistema FV da Fig. 2 na cidade de Goiânia/GO, a partir de registros históricos anuais, pode-se considerar que: a média de temperaturas mínimas atinge o seu menor valor (10 °C) no mês de julho; e a média de temperaturas máximas atinge o maior valor (33 °C) no mês de outubro.

## 2.2 Limite máximo de painéis FV em série por fileira

Em função da dependência da tensão de operação dos painéis FV com a temperatura, é preciso corrigir o valor da tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) – Eq. (2) – antes de se determinar o número máximo de painéis FV em série – Eq. (3). Essa correção é feita através do coeficiente de temperatura  $k_v$  específico do painel FV (fornecido pelo fabricante na condição STC) e da variação negativa de temperatura (LTD) verificada no local da instalação ao longo do ano – Eq. (1).

Tabela 2 - Dados técnicos do painel FV de 235Wp da SUN-EARTH (TBP156x156-60-P) nas condições STC.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima potência de saída ( $P_{mp}$ )	235 W
Tensão no ponto de máxima potência ( $V_{mp}$ )	29,2 V
Corrente no ponto de máxima potência ( $I_{mp}$ )	8,05 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	36,7 V
Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ )	8,47 A
Coeficiente de temperatura p/ correção de tensão ( $k_v$ )	- 0,35 %/°C
Coeficiente de temperatura p/ correção de corrente ( $k_i$ )	+ 0,05 %/°C

$$LTD = (T_{\min, \text{°C}}) - 25 \text{ °C} = (10 \text{ °C}) - 25 \text{ °C} = -15 \text{ °C} \quad (1)$$

$$V_{oc_{\max}} = V_{oc_{STC}} + (LTD \cdot k_v \cdot V_{oc_{STC}}) = 36,7 \text{ V} + [(-15 \text{ °C}) \cdot (-0,0035/\text{°C}) \cdot (36,7 \text{ V})] = 38,63 \text{ V} \quad (2)$$

$$N_{\max} \leq \left( \frac{V_{inv_{\max}}}{V_{oc_{\max}}} = \frac{800 \text{ V}}{38,63 \text{ V}} = 20,71 \right) \rightarrow N_{\max} = 20 \quad (3)$$

Algumas metodologias semelhantes são baseadas no desvio da tensão do arranjo FV no ponto de máxima potência ( $V_{mp}$ ). Assim, de forma alternativa pode-se adotar a Eq. (4) e a Eq. (5). O valor máximo de fileiras foi mantido inalterado haja vista que o novo valor obtido por  $V_{mp}$  não atenderia também o critério de  $V_{oc}$  estabelecido na Eq. (3).

$$V_{mp_{\max}} = V_{mp_{STC}} + (LTD \cdot k_v \cdot V_{mp_{STC}}) = 29,2 \text{ V} + [(-15 \text{ °C}) \cdot (-0,0035/\text{°C}) \cdot (29,2 \text{ V})] = 30,73 \text{ V} \quad (4)$$

$$N_{\max} \leq \left( \frac{V_{inv_{\max}}}{V_{mp_{\max}}} = \frac{800 \text{ V}}{30,73 \text{ V}} = 26,03 \right) \rightarrow N_{\max} = 20 \text{ (inalterado)} \quad (5)$$

## 2.3 Limite mínimo de painéis FV em série por fileira

A mínima tensão permitida por fileira pode ser calculada a partir da correção do efeito da temperatura na tensão de cada painel FV no ponto de máxima potência ( $V_{mp}$ ). Por envolver o valor mínimo da tensão  $V_{mp}$ , ele está associado à operação em altas temperaturas. Por isso, a correção da tensão  $V_{mp}$  faz uso da variação positiva de temperatura (HTD).

Diferentemente da LTD, o cálculo da variação HTD leva em consideração a máxima temperatura ambiente no local de instalação ( $T_{\text{ambiente,max}}$ ) e, também, a máxima variação de temperatura no painel FV em relação à temperatura ambiente ( $\Delta T_{\text{painel,max}}$ ). Esta última é influenciada pela forma como os painéis são montados no topo da edificação. Para uma instalação rente ao telhado (acompanhando sua inclinação) pode-se considerar  $\Delta T_{\text{painel,max}} = 30 \text{ °C}$  [15].

$$HTD = (T_{\text{ambiente,max, °C}} + \Delta T_{\text{painel,max, °C}}) - 25 \text{ °C} = (33 \text{ °C} + 30 \text{ °C}) - 25 \text{ °C} = +38 \text{ °C} \quad (6)$$

$$V_{mp_{\min}} = V_{mp_{STC}} + (HTD \cdot k_v \cdot V_{mp_{STC}}) = 29,2 \text{ V} + [(38 \text{ °C}) \cdot (-0,0035/\text{°C}) \cdot (29,2 \text{ V})] = 25,32 \text{ V} \quad (7)$$

$$N_{\min} \geq \left( \frac{V_{inv_{\min}}}{V_{mp_{\min}}} = \frac{300 \text{ V}}{25,32 \text{ V}} = 11,85 \right) \rightarrow N_{\min} = 12 \quad (8)$$

De acordo com as Eq. (3), (5) e (8), pode-se concluir que cada fileira pode ser constituída por um total de 12 a 20 painéis FV conectados em série. Tamanho quantidade de configurações para as fileiras se deve à larga faixa de operação da tensão de entrada do inversor, que é de 300 V a 800 V. Em inversores de menor potência (< 5 kW), tal faixa tende a ser menor, normalmente entre 200 e 450 V.

## 2.4 Número de fileiras por arranjo

Uma vez que os arranjos do sistema FV possuem a mesma topologia elétrica (Fig. 2), os cálculos a seguir refletem o dimensionamento do número de fileiras para apenas um dos arranjos. Se  $I_{inv_{\max}}$  corresponde à máxima corrente de

entrada do inversor selecionado, o limite máximo de fileiras em paralelo corresponde ao maior valor inteiro capaz de atender a Eq. (9) ou Eq. (10). Tais equações são redundantes e, por isso, o uso simultâneo delas no dimensionamento do mesmo projeto de sistema FV é desnecessário. A opção por qual delas utilizar é influenciada pela disponibilidade de informações fornecidas pelo fabricante do painel FV. Uma terceira opção de se obter o limite máximo de fileiras conectadas em paralelo é exibida na Eq. (11), a qual faz uso da potência de pico desejada para o sistema FV ( $P_{pico}$ ), da potência de pico de cada painel FV do arranjo ( $P_{mp}$ ) e o número de painéis por fileira ( $N_s$ ).

$$\#1 \quad N_{fileiras_{max}} \leq \left( \frac{I_{inv_{max}}}{I_{sc_{painel\_STC}}} = \frac{66 \text{ A}}{8,47 \text{ A}} = 7,79 \right) \rightarrow N_{fileiras_{max}} \leq 7 \quad (9)$$

$$\#2 \quad N_{fileiras_{max}} \leq \left( \frac{I_{inv_{max}}}{I_{mp_{painel\_STC}}} = \frac{66 \text{ A}}{8,05 \text{ A}} = 8,20 \right) \rightarrow N_{fileiras_{max}} \leq 8 \quad (10)$$

$$\#3 \quad N_{fileiras_{max}} \leq \left[ \frac{P_{pico_{desejada\_SFV}}}{\underbrace{N_s}_{\substack{\text{Painéis} \\ \text{por fileira}}} \cdot P_{mp_{painel\_STC}}} = \frac{(0,5 \cdot 34 \text{ kWp})}{N_s \cdot (0,235 \text{ kWp})} \leq \{6,03 \ 5,56 \ 5,17 \ 4,83 \ 4,52 \ 4,26 \ 4,02 \ 3,81 \ 3,62\} \right] \quad (11)$$

A partir da Eq. (11), nota-se que todos os valores máximos obtidos são inferiores a 6 (seis) fileiras em paralelo. Assim, de forma a satisfazer simultaneamente às duas metodologias anteriores, Eq. (9) e Eq. (10), pode-se considerar que cada arranjo do sistema FV será composto por até 6 (seis) fileiras associadas em paralelo.

### 3. SELEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS TOPOLOGIAS ELÉTRICAS MAIS ADEQUADAS

De acordo com o dimensionamento descrito na seção anterior, o sistema FV de 34 kW da Fig. 2 composto por dois arranjos poderá possuir, em cada arranjo, de uma a seis fileiras conectadas em paralelo, sendo que cada um dessas fileiras seria formada por 12 a 20 painéis FV conectados em série. Tais características conduzem a um cenário de 54 combinações possíveis para a topologia elétrica de cada arranjo do sistema FV e todas elas atendem os critérios apresentados até então. Porém, obviamente, há universo muito grande de opções com relação ao dimensionamento do sistema FV aqui considerado. Em acréscimo, pode-se presumir que diversas metodologias de dimensionamento de um sistema FV utilizadas atualmente também resultariam em um cenário com diversas combinações possíveis para a topologia elétrica. Diante disso, o que se propõe neste trabalho é a identificação de quais (ou de qual, no pior caso) das (pré-selecionadas) 54 combinações de topologias elétricas possíveis melhor atenderiam alguns critérios adicionais de projeto. Tais critérios adicionais, descritos a seguir, são relativos a um sistema FV conectado à rede elétrica.

#### 3.1 Valor da potência de pico em cada arranjo FV

Como o sistema FV proposto na Fig. 2 é de 34 kWp e todos os painéis são idênticos (0,235 kWp), cada um dos dois arranjos opera com uma potência de 17 kWp. Para uma variação de  $\pm 15\%$  em torno desse valor, a qual representaria possíveis variações meteorológicas e sazonais no local de instalação, os resultados exibidos da Tab. 3 podem ser classificados entre si. Os limites mínimo e máximo para uma variação de  $\pm 15\%$  em torno de 17 kWp correspondem a 14,45 kWp e 19,55 kWp, respectivamente. A partir da Tab. 3, nota-se que os valores destacados em amarelo são os que estariam dentro dessa faixa de tolerância, os valores em vermelho excederiam o limite máximo da faixa e os demais valores seriam inferiores ao limite mínimo. Portanto, com relação especificamente à potência de pico estimada para cada uma das 54 topologias elétricas possíveis (seção anterior), apenas 11 delas são consideradas adequadas para o sistema FV conectado à rede da Fig. 2.

Tabela 3 - Potência de pico do arranjo FV (em kWp) em função da topologia elétrica.

Nº de fileiras (por arranjo)	Nº de painéis FV por fileira								
	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2,82	3,06	3,29	3,53	3,76	4,00	4,23	4,47	4,70
2	5,64	6,11	6,58	7,05	7,52	7,99	8,46	8,93	9,40
3	8,46	9,17	9,87	10,58	11,28	11,99	12,69	13,40	14,10
4	11,28	12,22	13,16	14,10	15,04	15,98	16,92	17,86	18,80
5	14,10	15,28	16,45	17,63	18,80	19,98	21,15	22,33	23,50
6	16,92	18,33	19,74	21,15	22,56	23,97	25,38	26,79	28,20

#### 3.2 Valor do FDI no inversor do arranjo FV

Neste caso, a potência do inversor é mantida fixa em seu valor nominal (15 kW) e o FDI é, então, calculado a partir dos valores estimados da potência de pico apresentados na Tab. 3. Diante dessas possibilidades, os valores obtidos para o FDI do inversor em cada arranjo FV são apresentados na Tab. 4. Durante o dimensionamento do sistema FV da Fig. 2, considerou-se para ambos os inversores de 15kW um FDI igual a 0,88. Conforme é apresentado na Fig. 3, cada inversor utilizado apresenta uma eficiência praticamente constante na faixa que vai de 60 a 100% de sua potência nominal. Ou seja, pode-se operar o inversor sob uma eficiência praticamente constante no caso do FDI oscilar entre 0,75 e 1,00. Sendo assim, apenas as 13 (treze) topologias destacadas em amarelo na Tab. 4 podem ser consideradas adequadas para o sistema FV conectado à rede da Fig. 2.

Tabela 4 - FDI do inversor de 15 kW para o arranjo FV em função da topologia elétrica.

Nº de fileiras (por arranjo)	Nº de painéis FV por fileira								
	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	5,32	4,91	4,56	4,26	3,99	3,75	3,55	3,36	3,19
2	2,66	2,45	2,28	2,13	1,99	1,88	1,77	1,68	1,60
3	1,77	1,64	1,52	1,42	1,33	1,25	1,18	1,12	1,06
4	1,33	1,23	1,14	1,06	1,00	0,94	0,89	0,84	0,80
5	1,06	0,98	0,91	0,85	0,80	0,75	0,71	0,67	0,64
6	0,89	0,82	0,76	0,71	0,66	0,63	0,59	0,56	0,53

### 3.3 Número total de painéis por arranjo FV

Uma vez que a quantidade de painéis por arranjo corresponde à simples multiplicação entre o número de fileiras do arranjo e o número de painéis FV por fileira (para o caso de fileiras idênticas), a Tab. 5 exibe o total de painéis envolvidos em cada arranjo de 17 kWp da Fig. 2. Pode-se concluir que as topologias constituídas por até 3 (três) fileiras conectadas em paralelo (27 topologias no total) são sempre consideradas como sendo as mais apropriadas para o arranjo de 17 kWp. Além delas, outras 11 topologias também estão entre as selecionadas. A identificação dessas 38 (27+11) topologias deve-se ao fato de que são necessários 72,34 (ou 73) painéis compor cada arranjo de 17 kWp.

Tabela 5 – Número total de painéis do arranjo FV em função da topologia elétrica.

Nº de fileiras (por arranjo)	Nº de painéis FV por fileira								
	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	24	26	28	30	32	34	36	38	40
3	36	39	42	45	48	51	54	57	60
4	48	52	56	60	64	68	72	76	80
5	60	65	70	75	80	85	90	95	100
6	72	78	84	90	96	102	108	114	120

### 3.4 Área ocupada pelos painéis na edificação

Uma vez que cada painel 0,235 kWp ocuparia uma área da cobertura da edificação de 1,63 m<sup>2</sup> (aproximadamente), a área mínima exigida por cada uma das 54 topologias elétricas possíveis da Tab. 5 é exibida na Tab. 6. Apesar da aparente semelhança entre elas, as topologias selecionadas nos respectivos critérios não são equivalentes uma vez que são baseadas em critérios diferentes. Com relação ao critério da área ocupada, a seleção de topologias foi baseada na ultrapassagem ou não da área disponível para instalação de cada arranjo no topo da edificação. Em resumo, o telhado da edificação considerada é composto por duas (quedas d') águas de 273,3 m<sup>2</sup> cada (1 arranjo por queda), com inclinação de 10° (aproximadamente) e desvio de 15° em relação ao norte geográfico. Sendo assim, conforme a Tab. 6, qualquer topologia possível constituída por até 4 (quatro) fileiras estaria apta ser alocada na área disponível para a instalação dos painéis do arranjo FV. Diferentemente do que ocorre na seleção de topologias a partir do número total de painéis, na qual apenas àquelas constituídas por até 3 (três) fileiras foram as mais indicadas. Mesmo que ainda existam outras topologias também consideradas aptas, pode-se concluir que a seleção de um total de 38 (Tab. 5) ou 43 (Tab. 6) topologias em um universo de 54 possíveis indica que os critérios “número total de painéis” e “mínima área ocupada” (por arranjo) não contribuem significativamente para o objetivo inicial: selecionar e identificar o menor número possível de topologias elétricas a partir de critérios técnicos adicionais.

### 3.5 Relação das tensões $V_{oc}$ e $V_{mp}$ do arranjo FV com a tensão CA da rede elétrica

Tradicionalmente, analisa-se o acoplamento das tensões de pico do arranjo FV com a faixa de operação da tensão de entrada do(s) inversor(es) considerado(s). Isso pode ser considerado suficiente para o caso de um sistema FV isolado



mas não para um conectado à rede elétrica. Isso porque a tensão CC de entrada de um conversor CC/CA (inversor) está relacionada, conforme sua topologia, com a tensão CC (interna) de seu barramento CC. E esta última, por sua vez, está relacionada com o valor de pico da tensão CA gerada em seus terminais de saída mediante a estratégia de modulação utilizada. Se há padrões de tensão a serem seguidos para a conexão CA do sistema FV à rede elétrica, tais padrões interferem indiretamente nos valores desejados para as tensões de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e no ponto de máxima potência ( $V_{mp}$ ) dos arranjos que compõem o sistema FV da Fig. 2. Dessa forma, optou-se por analisar também esses dois critérios adicionais nesta etapa de seleção e identificação das topologias mais adequadas.

Tabela 6 – Área (em m<sup>2</sup>) ocupada por cada quantidade de painéis FV exibida na Tab. 5.

Nº de fileiras (por arranjo)	Nº de painéis FV por fileira								
	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	19,55	21,18	22,80	24,43	26,06	27,69	29,32	30,95	32,58
2	39,09	42,35	45,61	48,87	52,12	55,38	58,64	61,90	65,15
3	58,64	63,53	68,41	73,30	78,19	83,07	87,96	92,85	97,73
4	78,19	84,70	91,22	97,73	104,25	110,76	117,28	123,79	130,31
5	97,73	105,88	114,02	122,16	130,31	138,45	146,60	154,74	162,89
6	117,28	127,05	136,82	146,60	156,37	166,14	175,92	185,69	195,46

De acordo com os dados do painel FV apresentados na Tab. 2, a Tab. 7 exibe os valores esperados das tensões  $V_{oc}$  e  $V_{mp}$  para todas 54 topologias elétricas possíveis (por arranjo FV) para o sistema FV exibido na Fig. 2. Uma vez que a tensão total da fileira é dada apenas pela quantidade de painéis FV em série que a compõe, os parâmetros da Tab. 7 independem da quantidade de fileiras conectadas em paralelo na composição de cada arranjo FV.

Tabela 7 – Valores das tensões (em V) do arranjo FV em função da composição das fileiras.

Nº de painéis FV por fileira	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tensão $V_{oc}$	440,4	477,1	513,8	550,5	587,2	623,9	660,6	697,3	734,0
Tensão $V_{mp}$	350,4	379,6	408,8	438,0	467,2	496,4	525,6	554,8	584,0

Por tratar-se de um inversor trifásico com saídas 220/380 V, o pico da tensão de linha em seus terminais de saída CA deve ser compatível com o pico de tensão de linha CA rede elétrica (de distribuição, em baixa tensão), o qual vale 538,89 V (=380√2). Para uma variação de ±5% no valor de pico da tensão de linha (511,94 V até 565,83 V), conforme a Tab. 7 apenas 4 (quatro) topologias, sendo 2 (duas) através da tensão  $V_{oc}$  e 2 (duas) através da tensão  $V_{mp}$ , podem ser consideradas adequadas para o sistema FV conectado à rede da Fig. 2.

### 3.6 Sobreposição das topologias selecionadas e identificação das conformidades

Após a seleção das topologias elétricas do arranjo FV que melhor atendem individualmente os 6 (seis) critérios de seleção adicionais que foram adotados até aqui, pode-se determinar quais delas também são assim consideradas quando todos os critérios são analisados de forma conjunta. Dessa forma, é possível classificá-las de acordo com a quantidade de conformidades (ou critérios) atendidas simultaneamente. A Tab. 8 apresenta um quadro comparativo do desempenho de todas as topologias selecionadas até então com relação ao número de conformidades atendidas.

Tabela 8 – Comparativo de desempenho das topologias selecionadas e identificação do nº de conformidades.

Item avaliado	Topologia elétrica do arranjo FV – Formato: [Nº fileiras] x [Nº painéis por fileira]															
	6x12	6x13	6x14	5x12	5x13	5x14	5x15	5x16	5x17	4x15	4x16	4x17	4x18	4x19	4x20	
Potência de pico	●	●			●	●	●	●			●	●	●	●	●	
FDI	●	●	●		●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	
Nº painéis FV	●			●	●	●				●	●	●	●	●	●	
Área necessária	●	●		●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	
Tensão $V_{oc}$			●			●	●			●						
Tensão $V_{mp}$													●	●		
Conformidades	4	3	2	2	4	5	4	3	1	3	4	4	5	5	4	
Potência (kWp)	-	-	-	-	-	16,4	-	-	-	-	-	-	-	16,9	17,9	-

De acordo com os dados exibidos na Tab. 8, as topologias elétricas denominadas “5x14”, “4x18” e “4x19” são aquelas que apresentariam, de forma simultânea, a maior quantidade (cinco) de conformidades utilizadas na seleção das 54 possíveis topologias elétricas para o arranjo FV da Fig. 2. Especificamente com relação à potência de pico (teórica) do arranjo FV (Tab. 3) e à quantidade de painéis FV envolvidos por fileira (Tab. 5), as três topologias destacadas na cor verde na Tab. 8 podem ser ordenadas na sequência: “4x19” (76 painéis/17,86 kWp); “4x18” (72 painéis/16,92 kWp); e

“5x14” (70 painéis/16,45 kWp). É preciso ressaltar que apesar da topologia “4x19” ser identificada como a mais adequada (por possuir a maior potência) para o sistema FV da Fig. 2, as outras duas topologias também atenderiam todos os critérios adotados nas etapas de dimensionamento, seleção e identificação de conformidades. Portanto, a escolha de qual delas utilizar é novamente de responsabilidade do projetista. Felizmente, neste momento, essa escolha envolve apenas 3 (três) configurações e não todas as 54 combinações previamente selecionadas.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram descritas as principais metodologias de cálculo adotadas ao se dimensionar a topologia elétrica de um sistema FV conectado à rede elétrica. Detalhes dos procedimentos foram discutidos ao longo do dimensionamento de forma a proporcionar uma sequência de projeto tecnicamente justificada e de fácil entendimento pelos interessados no correto dimensionamento do sistema FV em análise.

Além disso, como forma de exemplificar as metodologias apresentadas, foram apresentados os dados relativos ao dimensionamento de um possível sistema FV de 34 kWp. Após um pré-dimensionamento das topologias elétricas mais adequadas, estas (54 topologias) foram comparadas em relação ao atendimento de outros critérios adicionais (conformidades) relacionados à operação de um SFV conectado à rede elétrica. Ao final de uma nova seleção, classificação e identificação de conformidades atendidas, foram identificadas 3 (três) topologias elétricas como sendo as mais adequadas. Apesar dos cálculos apresentados serem baseados em sistema FV constituído por inversores trifásicos na topologia centralizada, os autores concordam que a proposta de dimensionamento apresentada neste documento pode ser facilmente adaptada às novas condições do sistema FV de interesse, mesmo que ele seja monofásico. E que essas possíveis adaptações não modificariam os critérios e a sequência de ações sugerida na proposta.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem aos anônimos revisores pelas suas valiosas contribuições e, também, à Espora Energética S/A pelo apoio financeiro recebido. Este trabalho está inserido nas atividades de pesquisa em andamento de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) denominado “Instalação de um Sistema de Geração Solar Fotovoltaica de 34 kWp em telhado de um prédio da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG)” e devidamente registrado junto à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

#### REFERÊNCIAS

- Abdel-Gawad, H., Sood, V. K., 2014. Overview of Connection Topologies for Grid-connected PV Systems. CCECE 2014. Toronto, Canada.
- CRESESB, 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. 2ª Edição. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.
- Kerekes, T., Koutroulis, E., Séra, D., Teodorescu, R., Katsanevakis, M., 2013. An Optimization Method for Designing Large PV plants. IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 3, n. 2, April 2013. pp.814-822.
- SOLARPRO, 2009. Array to Inverter Matching. Página da Internet: <http://solarprofessional.com/articles/design-installation/array-to-inverter-matching>. Acesso em: Novembro 2015.
- Woofenden, I., 2006. Photovoltaic: cell, module, string, array. Home Power, June & July 2006. Nº 113. Página da Internet: [http://www.homepower.com/view/?file=HP113\\_pg106\\_WordPower](http://www.homepower.com/view/?file=HP113_pg106_WordPower). Acesso em: Novembro 2015.
- Zilles, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A. B., Oliveira, S. H. F., 2012. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. 1ª Ed: Oficina de Textos. São Paulo, 2012. ISBN 978-85-7975-052-6.

#### PROPOSAL OF SIZING AND SELECTING OF ELECTRICAL TOPOLOGIES TO A GRID-CONNECTED PV SYSTEM BASED ON AMOUNT OF ACHIEVED COMPLIANCES

**Abstract.** *This work is related to the design of a PV system connected to the grid-utility in order to achieve the largest possible number of conformities according to the design criteria. In addition to the conceptual differences between the electrical and physical topologies of a PV system, the reasons for achieving a technically and correct sizing are also presented. Although there is several design methodologies related to the electrical topology of a PV system, many of them are redundant and they result in a large number of possible configurations which stickles the designer's selection. In this context, this work proposes a design method, selection and classification of electrical topologies based on the number of achieved compliances that could constitute a grid-connected photovoltaic system. A hypothetical 34 kWp PV system is adopted as a reference to illustrate the calculation procedures and the technical reasons defined to the selection criteria. In order to validate the proposed design, from an amount of 54 electrical topologies previously selected by traditional methods of sizing, only 3 of them were identified by this proposed method as those serving the largest number of compliances defined by the designer. The calculation steps of the proposed method are discussed separately and presented in a sequence that stimulates its reuse, with and without adaptations to other configurations of PV systems. By this, the authors hope to contribute to a better understanding of people interested on that area of research and especially at a refined sizing method of PV systems connected to the grid-utility.*

**Key words:** *Photovoltaic Systems, Design, Distributed Generation*