



# Investigação do Impacto de Geradores Fotovoltaicos em Ressonâncias Harmônicas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o Simscape™/MATLAB

**Palavras-Chave:** GERADOR FOTOVOLTAICO, HARMÔNICAS, SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**Autores/as:**

**JÚLIA GIATTI HIDALGO, FEEC, UNICAMP**

**Ma. BÁRBARA RESENDE ROSADO (coorientadora), FEEC, UNICAMP**

**Prof. Dr. WALMIR DE FREITAS FILHO (orientador), FEEC, UNICAMP**

## INTRODUÇÃO:

Recentemente, os sistemas de distribuição de energia elétrica passaram por uma mudança estrutural, deixando de ter um arranjo passivo e não supervisionado para um arranjo ativo com alto nível de automação. Com essa nova estruturação, há uma maior capacidade de atuação na rede devido a maior disponibilidade de dados (EPRI, 2012; MAURI, G. *et al.*, 2017). Dentre as tecnologias que possibilitaram essa maior capacidade de supervisão destacam-se: medidores inteligentes (KHAN, M. F. *et al.*, 2014), chaves controladas eletronicamente (PERETTO, L. *et al.*, 2015); reguladores de tensão com comunicação (CHAPUIS, A. e THAKER, M. N., 2006), (HITACHI); bancos de capacitores operados automaticamente, que podem ser instalados em redes de média tensão (MT) (HOLSOMBACK, V. L., 2013), como de costume, ou até mesmo dispersos pelo sistema nas redes de baixa tensão (BT) (VARENTEC, [s.d.]); compensadores dinâmicos de potência reativa baseados em chaves de eletrônica de potência (SEVERN, [s.d.]) e geradores distribuídos baseados em inversores (IBDGs, *Inverter Based Distributed Generator* em inglês) (DIAS, J. A. *et al.*, 2018). Esse cenário abre uma janela de oportunidades para adoção de melhores práticas de planejamento e operação, porém ele também é acompanhado por uma complexidade crescente de preocupações a respeito da qualidade de energia elétrica.

Nesse horizonte, destaca-se a grande inserção de geradores fotovoltaicos (FV), especialmente após 2012 com a Resolução Normativa nº 482 (ANEEL, 2012), marco regulatório a respeito da conexão de geradores distribuídos de pequeno porte que utilizem fontes renováveis de energia. A geração FV tem sido incentivada pois adequa-se à crescente preocupação da sociedade com questões ambientais por ser uma tecnologia de baixa emissão de carbono, além de contribuir para a diversificação da matriz energética, possibilitando o aumento da confiabilidade dos sistemas de energia.

Somente em 2021, o Brasil utilizou mais de 776 tep (tonelada equivalente de petróleo) em micro e minigeração distribuída, sendo que no ano anterior somente a geração fotovoltaica distribuída produziu mais de 9 TWh, com potência instalada de mais de 8,7 GW (EPE, 2022). Até julho de 2023, a capacidade instalada de geração distribuída (GD) solar fotovoltaica superou 22 GW (ANEEL,

[s.d.]a), totalizando mais de 30 GW de capacidade de geração por radiação solar instalada, considerando GD e geração centralizada (ANEEL, [s.d.]b).

Embora este aumento na instalação de geradores distribuídos proporcione diversos benefícios como uma maior diversidade da matriz energética, as concessionárias de distribuição se preocupam como a presença desses afetará seus procedimentos para planejar e operar os sistemas de distribuição. Um dos pontos de interesse das distribuidoras é se há a possibilidade de que esses geradores amplifiquem ou criem algum problema de qualidade de energia elétrica, em especial, a respeito de componentes harmônicas. Com o aumento da sua presença na rede, surge a possibilidade de ocorrência de ressonâncias harmônicas. Isto é, dentre as questões trazidas pela alta penetração de geração solar distribuída (WHITAKER, 2008), especialmente nos sistemas de baixa tensão de energia elétrica, destaca-se a preocupação com um excesso de distorção harmônica injetada pelo inversor (também chamada de distorção ativa) e a possibilidade de ocorrência de ressonância harmônica devido a interação com outros dispositivos presentes no sistema.

Existem limites normativos a respeito da presença de componentes harmônicas na rede de distribuição (ANEEL, 2021), já que a presença dessas pode resultar no seguinte problema: se tais componentes possuírem a mesma frequência em que ocorre um valor de impedância máxima ou mínima para uma associação em paralelo entre um elemento capacitivo e um elemento indutivo, estas resultam na ocorrência do fenômeno de ressonância. A presença dessa componente senoidal com frequência múltipla da rede faz com que essa associação de valor máximo ou mínimo seja excitada, criando uma troca de energia entre os elementos indutivo e capacitivo, com potencial de amplificação dos valores de tensão ou corrente, o que pode resultar em danos a outros equipamentos conectados ao sistema. Um exemplo da associação ressonante é entre a rede, que possui comportamento majoritariamente indutivo, e bancos de capacitores em derivação conectados em redes de BT. Esses estão presentes na distribuição com o objetivo de auxiliar a manutenção de tensão e potência reativa da rede ao serem instalados de maneira mais dispersa e mais próximos dos centros de carga críticos.

Com base no exposto, o objetivo deste projeto é implementar um modelo de gerador fotovoltaico para i) avaliar se esses contribuem com distorções harmônicas

nas redes BT e ii) analisar a possibilidade de ocorrência de ressonâncias harmônicas na rede devido a interação entre tal equipamento e bancos de capacitores conectados em derivação.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

Há na literatura diversos modelos de geradores FVs que emulam seu comportamento de injeção de potência ativa (MENDES, *et al.*, 2019; DI FAZIO, A.R. e RUSSO, M., 2011; MULJADI, E. *et al.*, [s.d.]; EPRI, 2011). Porém, a grande maioria dos modelos empregados nem sempre considera efeitos de emissão de sinais distorcidos devido aos inversores de painéis fotovoltaicos. Por exemplo, no trabalho (RANGARAJAN S. S *et al.*, 2017), avalia-se o impacto que geradores fotovoltaicos distribuídos podem causar ao projetar um esquema de controle para um inversor de 1,25 MW baseado no controle de histerese com um filtro LC. Este trabalho evidencia a interação que o capacitor do filtro de saída pode ter com o equivalente de rede, de caráter indutivo.

Dentre essa gama de trabalhos, destaca-se o desenvolvido em (ARGÜELLO, A et al. 2023), o qual propõe um modelo de gerador fotovoltaico monofásico, e investiga a sua integração e seu impacto na qualidade de energia em sistemas de baixa tensão (BT). Desta forma, avalia-se o impacto dos geradores FV conectados em BT frente a distorções harmônicas devido a sua interface baseada em eletrônica de potência. Neste artigo, é descrito um modelo harmônico de entrada única e saída única para geradores FVs monofásicos e independente dos parâmetros da rede, permitindo que múltiplos desses dispositivos sejam considerados simultaneamente em análises de fluxo de potência harmônica. O modelo é validado com simulações de transientes eletromagnéticos e são feitos estudos de caracterização para determinar o impacto harmônico desses geradores fotovoltaicos em um sistema BT real. Os resultados demonstram que esses dispositivos podem aumentar o amortecimento do sistema para componentes harmônicas típicas de baixa ordem e é improvável que introduzam novas distorções nesta faixa de frequência.

## METODOLOGIA:

A Figura 1 apresenta um gerador fotovoltaico monofásico típico, com seu painel fotovoltaico conectado ao conversor CC/CC com controle do tipo rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, *Maximum Power Point Tracking* em inglês), conectado ao conversor de fonte de tensão CC/CA (VSC, *Voltage Source Converter* em inglês) e um filtro LC para limitar as distorções de alta frequência, composto por  $L_f$ , indutor do filtro de saída do gerador, e  $C_f$ , capacitor do filtro.

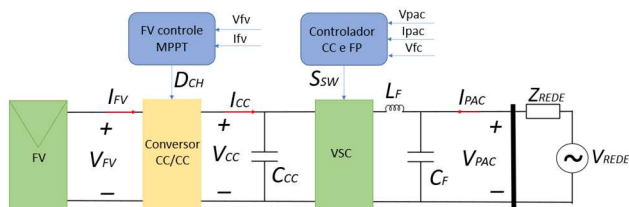


Figura 1 – Modelo típico de gerador fotovoltaico (IEEE, 2011).

Ainda no modelo típico de gerador FV,  $v_{PAC}$  e  $i_{PAC}$  são, respectivamente, a tensão e a corrente no ponto de acoplamento comum (PAC) com a rede elétrica. Por sua vez,  $v_{CC}$  e  $i_{CC}$  são a tensão e a corrente no lado CC do VSC respectivamente, e  $C_{CC}$  é o capacitor do barramento CC. Já

$I_{FV}$  é a corrente do barramento CC para o conversor CC/CC. A tensão de saída do inversor é dada por  $v_{VSC}$ , sendo  $v_{VSC} = v_{CC}S_{CH}$  e  $S_{CH}$  a função de comutação das chaves cuja forma de onda depende da topologia adotada para a ponte inversora, ou seja, é o conjunto de sinais gerados pelo modulador PWM para controlar o inversor em ponte completa. Todos os sinais mencionados estão no domínio do tempo.

Neste trabalho, a função de comutação do inversor é gerada internamente ao bloco inversor em ponte completa, cuja tensão de saída provém da saída do VSC. O sistema de controle de tensão aplicado ao inversor do gerador fotovoltaico segue a rede como referência de tensão, garantindo o sincronismo pelo PLL (*Phase-Locked Loop* em inglês). Por fim, na saída do inversor existe um filtro passa-baixas para evitar que componentes de alta frequência oriundas do chaveamento do inversor sejam transmitidas à rede. Com isso é possível obter um sinal de saída mais próximo da tensão de referência da rede.

O modelo de gerador FV é implementado no Simscape™ e se baseia no desenvolvido em (ARGÜELLO, A. et al., 2023). O controle do VSC é realizado no eixo  $dq$ , também conhecido como eixo direto e eixo em quadratura, e controla a tensão CA e a potência reativa na saída do PAC do conversor com a rede como mostra a Figura 2. O controle nos eixos  $dq$  oferece uma solução com sinais invariantes com o tempo, com formas de onda CC em condições de estado estacionário. Isso, por sua vez, permite a utilização de compensadores do tipo controlador PI com estruturas mais simples e de ordens dinâmicas menores. Além disso, pode-se obter erro nulo de rastreamento em estado estacionário ao incluir termos integrais nos compensadores. Ao representar um sistema trifásico nos eixos  $dq$ , a realização de análises e projetos de controle pode ser mais adequada (YAZDANI, A. e IRAVANI, R.). No modelo, utiliza-se o bloco da Transformada de Park no Simscape™ para transformar as componentes do domínio do tempo de um sistema trifásico  $abc$  para uma representação nos eixos em quadratura  $dq$  (MATHEWORKS®, [s.d.]).

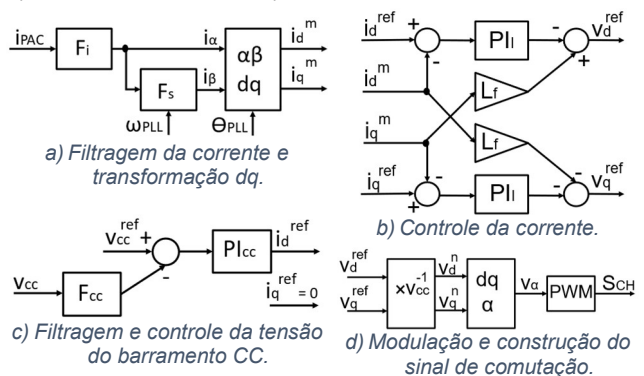


Figura 2 – Sistema de controle do VSC monofásico implementado.

Os blocos de controle apresentados na Figura 2 e pelas equações (1) à (5) são descritos a seguir:  $F_i$  é a função de transferência (FT) do filtro de corrente medida no PAC com frequência de corte  $\omega_i$  e fator de amortecimento  $\xi_i$  (1); já a FT do filtro de tensão medida no barramento CC,  $F_{CC}$ , tem frequência de corte  $\omega_{CC}$  e fator de amortecimento  $\xi_{CC}$  (2);  $PI_i$  é a FT do controlador proporcional-integral (PI) do controle atual, com ganhos proporcional e integral respectivamente  $K_{pi}$  e  $K_{Ii}$  (3);  $PI_{CC}$  é a FT do PI para controle de tensão CC com ganhos  $K_{pcc}$  e  $K_{Icc}$  (4);  $F_s$  é a FT de um atraso de 1/4 do período da fundamental, ou seja,  $T_s$  é 25% de  $f_1$  (5), sendo que esse atraso serve para criar o sinal fictício para a transformação do sinal monofásico  $ab$

para de quadratura  $dq$  ( $\alpha\beta/dq$ ). Para o controle do inversor, utiliza-se um atraso  $F_d$ , como descrito em (6), onde  $T_d = 1/f_s$  e  $f_s$  é a frequência de comutação do conversor.

$$F_i = \frac{\omega_i^2}{s^2 - 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (1) \quad F_{cc} = \frac{\omega_{cc}^2}{s^2 - 2\xi_{cc}\omega_{cc}s + \omega_{cc}^2} \quad (2)$$

$$PI_i = K_{pi} + \frac{K_{Ii}}{s} \quad (3) \quad PI_{cc} = K_{pcc} + \frac{K_{Icc}}{s} \quad (4)$$

$$F_s = e^{(-T_s s)} \quad (5) \quad F_d = e^{(-T_d s)} \quad (6)$$

### SIMULAÇÃO NO SIMSCAPE™:

O circuito utilizado nas simulações é constituído de um painel solar com controle de tensão de saída feito por um conversor CC/CC com MPPT que está conectado ao inversor, conectados a um equivalente de uma rede real BT. O arranjo painel solar e conversor CC/CC com MPPT segue um modelo básico como descrito em (MATHWORKS<sup>R</sup>, [s.d.].b), não cabendo aqui detalhá-lo pois o foco do modelo está no controle do VSC. Entre o arranjo do painel com conversor e o inversor há um capacitor para minimizar possíveis ondulações na tensão CC devido ao chaveamento do inversor. Há também um amperímetro conectado entre o capacitor e o inversor, o qual fornece as medições de corrente para um osciloscópio e para o analisador de espectro, além de um voltímetro medindo a tensão nos pontos comuns e conectados ao osciloscópio e ao analisador de espectro. Os medidores inseridos servem para investigação dos resultados da simulação.

O inversor utilizado é o modelo disponível na biblioteca do Simscape™ em ponte completa com controle das chaves feito pelo rastreamento de uma tensão de referência, *i.e.*, o sinal gerado pelo controle do VSC. Ou seja, não é necessário implementar um bloco de PWM para operar o chaveamento do inversor, apenas fornecer a saída  $v_\alpha$  ao bloco. Como mostra a Figura 3, o inversor tem sua saída conectada a um filtro passa baixas com os mesmos parâmetros da simulação descritos em (ARGÜELLO, A. et al., 2023), e a saída desse filtro é conectada ao equivalente da rede utilizado para os estudos do mesmo trabalho. Por fim, esse equivalente é constituído de uma fonte de tensão conectada em série a um equivalente de uma rede elétrica BT real ( $R_{eq}$  e  $L_{eq}$ , respectivamente  $0,83 \Omega$  e  $55 \mu H$ ). O circuito apresentado na Figura 3 é o utilizado para simulações com fonte com distorção e um banco de capacitor em derivação.

capacitor, seu valor nominal é de  $1,1 \mu F$  e  $23,89$  var, podendo ter até 1,5 vez o seu valor, como mostra a Tabela 2. O valor do capacitor é escolhido com base nos resultados obtidos em (TORQUATO, R., et al., 2021), em que uma rede similar a utilizada (*i.e.*, utiliza-se o mesmo valor de impedância equivalente) é conectada a um banco de capacitor de  $1,1 \mu F$  e um gerador FV. Nesse arranjo de rede com gerador FV, o fenômeno de ressonância paralela ocorre em frequências em torno de  $20 kHz$ .

### RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados provêm de simulações no Simscape™ de diferentes cenários, cada um analisando os 3s iniciais. Cada caso simula o gerador FV conectado à rede simplificada de baixa tensão de  $240 V$  e  $60 Hz$  de um sistema de distribuição de energia elétrica real. A razão R/X da rede é de cerca de 40, conforme verificado em (7).

$$\frac{R}{X} \cong \frac{0,8300}{0,02073} = 40,04 \quad (7)$$

As quatro primeiras simulações feitas para analisar o impacto do gerador são:

- **Caso 1:** gerador FV modelado conectado ao equivalente da rede real e fonte ideal sem distorções;
- **Caso 2:** gerador FV modelado conectado ao equivalente da rede real e fonte com distorções;
- **Caso 3:** gerador FV modelado conectado ao equivalente da rede real com banco de capacitor em derivação de  $1,1 \mu F$  e a fonte ideal sem distorções;
- **Caso 4:** gerador FV modelado conectado ao equivalente da rede real com banco de capacitor em derivação de  $1,1 \mu F$  e fonte com distorções.

A fonte com distorções contém as seguintes componentes: 100% do valor nominal de tensão para a componente fundamental e 5% do valor da tensão nominal para as componentes em 3ª, 5ª e 7ª harmônicas. Essa fonte distorcida foi construída com base nas configurações utilizadas em (ARGÜELLO, A. et al., 2023) para um ensaio similar.

A Tabela 1 sumariza os resultados dos casos 1 a 4 com componentes superiores a  $0,01 V$  ou  $0,01 A$ . Analisando-os, conclui-se que geradores fotovoltaicos podem não representar riscos de introdução de distorções harmônicas nas redes de distribuição. Isso em razão de não serem observadas grandes diferenças entre os cenários simulados com o mesmo tipo de fonte, *i.e.*, comparando os casos 1 e 3 ou então 2 e 4. No entanto, mesmo em uma rede sem distorções, o nível de Distorção Harmônica Total (DHT) obtido para a tensão é de  $0,011\%$  enquanto para a corrente é de  $1,576\%$ , o que indica que os geradores podem contribuir para um ligeiro aumento da presença de distorções harmônicas na rede.

Em uma rede com distorções (casos 2 e 4), verifica-se que o gerador FV monofásico modelado pode atenuar as distorções no sinal de tensão, o que pode contribuir para o aumento de distorções no sinal de corrente. Para cenários com fonte distorcida como dos casos 2 e 4, mas sem gerador FV, os níveis de DHT obtidos são de  $8,68\%$  para a tensão e  $8,61\%$  para a corrente (caso 0). Além das distorções já presentes na rede, considerando a conexão do gerador FV, a presença de componentes em outras frequências e não provenientes da fonte com distorção ocorre possivelmente devido ao chaveamento do inversor, porém essas não estão listadas na Tabela 1 devido aos seus baixos valores (inferiores a  $0,01 V$  ou  $0,01 A$ ). Mesmo com esse indicativo de possível contribuição para os níveis de DHT, a presença do gerador não desrespeitou nenhum limite normativo (ANEEL, 2021), contribuindo com a

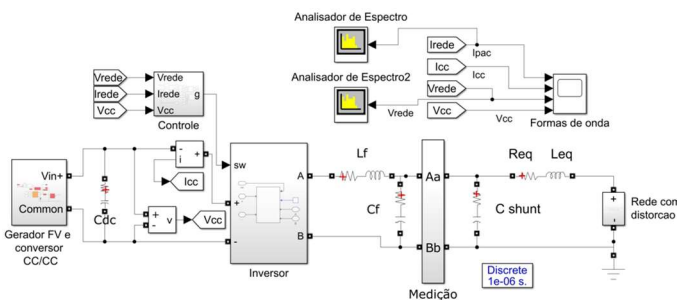


Figura 3 – Circuito do gerador acoplado a rede com distorção e capacitor em derivação construído no Simscape™.

### SIMULAÇÃO DE DIFERENTES CASOS:

Diferentes cenários são simulados no Simscape™ variando os parâmetros referentes aos elementos do sistema, tais como a injeção de distorções harmônicas pela fonte, além de alternar a presença ou não do banco de capacitor em derivação cujo valor nominal também é variável. Nos casos em que se simula com o banco de

suposição de que o impacto na tensão desse tipo de gerador distribuído é mínimo. Na realidade, esse pode até contribuir para atenuar distorções harmônicas pela redução do nível de DHT na tensão, como observado nos casos 2 e 4, de 8,68% (sem gerador FV) para 4,808% (com gerador FV).

Ao comparar os cenários com e sem capacitor para um mesmo tipo de rede (com ou sem distorção), nota-se que os valores das componentes de corrente e tensão não sofrem alterações notáveis ou sequer se alteram, o que sugere que a presença do capacitor não influencia o comportamento da rede com gerador FV ou que o gerador FV amorteceria o impacto trazido pelo capacitor. Assim, avaliando os dois cenários com capacitor (Caso 3 e Caso 4), nenhuma diferença significativa foi notada, pois por mais que possa existir uma pequena variação no valor da impedância equivalente (por componente harmônica, essa é desprezível).

Tabela 1 – Quadro comparativo dos casos 1 a 4 cenários com gerador FV.

Sinal	Hz	Amplitude				DHT (%)				
		Caso				Caso				
		1	2	3	4	0	1	2	3	4
V <sub>cc</sub>	0	348,2 V	348,2 V	348,2 V	348,2 V	-	-	-	-	-
	60	0,038 V	0,087 V	0,032 V	0,087 V	-	-	-	-	-
	120	2,189 V	2,888 V	2,189 V	2,887 V	-	-	-	-	-
	180	0,011 V	0,017 V	0,010 V	0,016 V	-	-	-	-	-
	240	0,016 V	0,075 V	0,016 V	0,075 V	-	-	-	-	-
	360	-	0,116 V	-	0,117 V	-	-	-	-	-
	480	-	0,141 V	-	0,141 V	-	-	-	-	-
	600	-	0,011 V	-	0,011 V	-	-	-	-	-
	9,99.10 <sup>3</sup>	0,031 V	0,031 V	0,031 V	0,031 V	-	-	-	-	-
V <sub>pac</sub>	60	340,1 V	340,2 V	340,1 V	340,2 V	8,68	0,011	4,808	0,011	4,809
	180	0,038 V	9,391 V	0,038 V	9,392 V	-	-	-	-	-
	300	-	9,308 V	-	9,310 V	-	-	-	-	-
	420	-	9,623 V	-	9,628 V	-	-	-	-	-
	540	-	0,026 V	-	0,026 V	-	-	-	-	-
I <sub>cc</sub>	0	2,846 A	2,847 A	2,846 A	2,848 A	-	-	-	-	-
	120	1,442 A	1,900 A	1,442 A	1,899 A	-	-	-	-	-
	240	0,027 A	0,027 A	0,027 A	0,088 A	-	-	-	-	-
	360	-	0,230 A	-	0,229 A	-	-	-	-	-
	480	-	0,369 A	-	0,369 A	-	-	-	-	-
	600	-	0,035 A	-	0,035 A	-	-	-	-	-
	720	-	0,024 A	-	0,24 A	-	-	-	-	-
I <sub>pac</sub>	0	-	0,011 A	0,011 A	0,011 A	-	-	-	-	-
	60	2,916 A	2,983 A	2,914 A	2,983 A	8,61	1,577	51,86	1,576	51,83
	180	0,046 A	0,913 A	0,045 A	0,913 A	-	-	-	-	-
	300	-	1,016 A	-	1,015 A	-	-	-	-	-
	420	-	0,725 A	-	0,725 A	-	-	-	-	-
	540	-	0,031 A	-	0,031 A	-	-	-	-	-
Z	60	116,6 Ω	114,0 Ω	116,7 Ω	114,0 Ω	-	-	-	-	-
	180	-	10,29 Ω	-	10,29 Ω	-	-	-	-	-
	300	-	9,161 Ω	-	9,172 Ω	-	-	-	-	-
	420	-	13,27 Ω	-	13,28 Ω	-	-	-	-	-

A presença de componentes harmônicas pares no sinal da corrente do barramento CC do inversor aparenta ocorrer devido ao chaveamento do inversor em conjunto com a injeção de distorções pela fonte equivalente da rede, podendo afetar o gerador e sua durabilidade. Isso ressalta a importância dos limites de distorções harmônicas impostos pelas agências reguladoras.

As últimas linhas da Tabela 1 sugerem que, independentemente do tipo de fonte da rede (com ou sem distorções) ou da presença de banco de capacitor, o valor da impedância equivalente do gerador FV vista pela rede se mantém praticamente constante para cada componente de frequência analisada. Isso indica que o valor de

impedância do gerador independe de parâmetros da rede. Para completar esta análise da impedância do gerador FV, simulam-se novos cenários – descritos nos casos 5 a 29 na Tabela 2 – variando a distorção presente na rede, seu equivalente e o capacitor em derivação com o auxílio de um script no MATLAB que automatizou a simulação.

A seguir, a Tabela 2 descreve os casos 5 a 29 e seus resultados. Observa-se que a impedância equivalente do gerador FV vista pela rede permanece praticamente constante em 60 Hz, indicando que independentemente do arranjo da rede ou das distorções que a fonte injeta, seu valor será em torno da média de 114,9 Ω. Da mesma forma, nas demais componentes harmônicas, a impedância para cada componente em frequência também se manteve constante ou com valores nem 10% maiores ou menores que a média. Ou seja, os resultados indicam que geradores fotovoltaicos podem ser modelados como dispositivos lineares para ordens baixas de harmônicas, validando o que foi desenvolvido em (ARGÜELLO, A. et al., 2023).

Tabela 2 – Quadro comparativo dos casos 5 a 29.

Caso	Fator multiplicativo do:		Distorção (% por harmônica)			Impedância (Ω)							
	Equivalente de rede	Capacitor em derivação	Frequência			Frequência							
			60 Hz	Ordem harmônica			Ordem harmônica						
			3 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	Fund.	3 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>				
5	1	-	3	-	-	115,7	10,50	-	-				
6	1	-	-	3	-	115,6	-	9,257	-				
7	1	-	-	-	3	116,0	-	-	13,40				
8	1	-	5	-	-	114,2	10,62	-	-				
9	1	-	-	5	-	113,8	-	8,886	-				
10	1	-	-	-	5	114,9	-	-	13,40				
11	1,5	-	3	-	-	115,7	10,50	-	-				
12	1,5	-	-	3	-	115,6	-	9,257	-				
13	1,5	-	-	-	3	116,0	-	-	13,40				
14	1,5	-	5	-	-	114,2	10,62	-	-				
15	1,5	-	-	5	-	113,8	-	8,886	-				
16	1,5	-	-	-	5	114,9	-	-	13,40				
17	1	1	3	-	-	115,7	10,51	-	-				
18	1	1	-	3	-	115,6	-	9,267	-				
19	1	1	-	-	3	116,0	-	-	13,42				
20	1	1	5	-	-	114,2	10,63	-	-				
21	1	1	-	5	-	113,8	-	8,896	-				
22	1	1	-	-	5	114,9	-	-	13,42				
23	1,5	1,5	3	-	-	115,7	10,51	-	-				
24	1,5	1,5	-	3	-	115,6	-	9,267	-				
25	1,5	1,5	-	-	3	116,0	-	-	13,42				
26	1,5	1,5	5	-	-	114,2	10,62	-	-				
27	1,5	1,5	-	5	-	113,8	-	8,896	-				
28	1,5	1,5	-	-	5	114,9	-	-	13,41				
29	1,5	1,5	5	5	5	109,8	10,39	9,178	13,28				

## CONCLUSÕES:

Neste trabalho foi implementado um modelo de gerador fotovoltaico no Simscape™ com base em (ARGÜELLO, A. et al., 2023), realizando simulações de transitório eletromagnético (EMT, *Eletromagnetic Transient Simulations* em inglês). O modelo desenvolvido é uma boa alternativa para simulações EMT já que a modelagem do gerador FV independe de parâmetros da rede, permitindo a execução de simulações mais simples.

Os sistemas de controle implementados abordam o problema de modelagem de geradores fotovoltaicos monofásicos visando simplificar a simulação, além utilizar

coordenadas ortogonais (eixo  $dq$ ) para modelar o sistema de controle do VSC do gerador FV, minimizando o tratamento dos sinais. O circuito equivalente modelado do gerador permitiu avaliar o impacto desses dispositivos na qualidade de energia, sugerindo que esses não aparentam injetar componentes harmônicas significativas na rede. Da mesma forma, com base nas análises feitas, geradores FV podem ser modelados como dispositivos lineares para cada componente em baixas frequências, o que pode facilitar análises de fluxo de potência harmônico. Por fim, nos estudos feitos nenhum caso de ressonância foi observado, sendo necessários novos ensaios variando parâmetros do capacitor em derivação.

O trabalho desenvolvido abre espaço para que novas pesquisas sejam desenvolvidas na temática de simulações EMT e relacionadas a problemas de qualidade de energia elétrica envolvendo geradores fotovoltaicos em redes de distribuição de energia elétrica em baixa tensão.

## BIBLIOGRAFIA:

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Anexo VIII da Resolução Normativa ANEEL Nº 956, 7 de dezembro de 2021, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, 17 de abril de 2012**, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), Geração Distribuída**, [s.d.]a. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiY2VmMmUwN2QYWFjOS00ZDE3LWl3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYtctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSlmMi0jR9>>. Acessado em 24 de julho de 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), Matriz Elétrica Brasileira**, [s.d.]b. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYtctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSlmMi0jR9>>. Acessado em 24 de julho de 2023.
- ARGÜELLO, A. *et al.* **Modeling of Single-Phase Photovoltaic Generators for System-Wide Harmonic Power Flow Studies**. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 38, no. 2, p. 914-926, 2023.
- CHAPUIS, A. e THAKER, M. N. **System and method for communicating with a voltage regulator**. U.S. Patent No. 7,049,798, 2006.
- DIAS, J. A. *et al.* **Study of Communication Between Distributed Generation Devices in an Smart Grid Environment**. IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 3, p. 777-784, 2018.
- DI FAZIO, A.R. e RUSSO, M. Photovoltaic Generator Modelling for Power System Simulation Studies. 17th Power Systems Computation Conference (PSCC), Estocolmo, 2011.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). **IEEE Guide for the Application of Shunt Power Capacitors**. IEEE Std 1036-2010 (Revision of IEEE Std 1036-1992), vol., no., pp.1-88, 17 janeiro. 2011.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional**, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acessado em 20 de junho de 2023.
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Generic Models e Model Validation for Wind and Solar PV Generation**. Palo Alto, CA, 2011.
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Integrating Smart Distributed Energy Resources with Distribution Management Systems**. An EPRI Overview on Managing Distributed Energy Resources, 2012.
- HITACHI ENERGY. **Line voltage regulator**, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/transformers/distribution-transformers/dry-type-transformers/line-voltage-regulators/line-voltage-regulator-for-low-voltage-grids>>. Acessado em 6 de junho de 2023.
- HOLSOMBACK, V. L. **Capacitor monitoring systems and methods of metering and monitoring capacitor bank**. U.S. Patente No. 8,547,109. 1, 2013.
- KHAN, M. F. *et al.* **Communication technologies for smart metering infrastructure**. 2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer science, p. 1-5, 2014.
- MATHWORKS<sup>®</sup>. **Park Transform**, [s.d.]a. Disponível em: <<https://www.math.com/help/sps/ref/sinusoidalmeasureme ntpll.html>>. Acessado em 06 de junho de 2023.
- MATHWORKS<sup>®</sup>. **Solar PV System with MPPT Using Boost Converter**, [s.d.]b. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/sps/ug/solar-pv-system-maximum-power-point-tracking-using-boost-converter.html>>. Acessado em 28 de julho de 2023.
- MAURI, G. *et al.* **Control and Automation Systems for Electricity Distribution Networks (EDN) of the future**. CIGRE (International Council on Large Electric Systems), 2017.
- MENDES, M. A. *et al.* **Simplified Single-phase PV Generator Model for Distribution Feeders with High Penetration of Power Electronics-based Systems**. 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), p. 1-7, 2019.
- MULJADI, E. *et al.* (National Renewable Energy Laboratory), **PSCAD Modules Representing PV Generator**, [s.d.].
- PERETTO, L. *et al.* **High accuracy measurement capabilities integrated into reclosers for MV power networks**. 23rd International Conference on Electricity Distribution, CIRED, 2015.
- RANGARAJAN S. S. *et al.* **Harmonic resonance repercussions of PV and associated distributed generators on distribution systems**. 2017 North American Power Symposium (NAPS), Morgantown, EUA, 2017, p. 1-6.
- SEVERN DRIVES & ENERGY. **SVG Statcom Line Products**, [s.d.].
- TORQUATO, R. *et al.* **Impact Assessment of High-Frequency Distortions Produced by PV Inverters**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 5, p. 2978-2987, 2021.
- VARENTEC. **ENGO® V10.4 Product Description**, [s.d.].
- WHITAKER, C. *et al.* **Renewable Systems Interconnection Study: Distributed Photovoltaic Systems Design and Technology Requirements**. Sandia Report SAND2008-0946 P, 2008.
- YAZDANI, A. e IRAVANI, R. **Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications**, [s.d.].

## AGRADECIMENTOS:

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelos processos nº 2020/10043-2, 2022/08549-0, 2022/11103-4, 2023/02056-5 e 2023/01719-0.