

# Análise do desempenho de inversores fotovoltaicos conectados à rede segundo ABNT NBR 16149 em diferentes cenários de impedância de rede

Igor A. B. de Bitencourt. Henrique H. Figueira. Leandro Michels.

*Instituto de Redes Inteligentes, Santa Maria, RS*

(Tel: 055-32208924; e-mail: [igor.labensaios@gepoc.ufsm.br](mailto:igor.labensaios@gepoc.ufsm.br), [henrique@inriufsm.com.br](mailto:henrique@inriufsm.com.br), [michels@gepoc.ufsm.br](mailto:michels@gepoc.ufsm.br) )

**Abstract:** The growth of Distributed Generation (DG) in the electricity grid can be a challenge in the electrical power system in terms of Electric Power Quality (QEE). The stability of photovoltaic inverters (PV) is essential for the proper functioning of these systems. Based on tests carried out on different models of PV inverters, this study demonstrates that these equipments can present deterioration of operation when inserted in a grid with high impedance. The tests were carried out in accordance with the Brazilian standards ABNT NBR 16149 and ABNT NBR 16150 to analyze the quality of energy supplied in two PV inverters with nominal power of 1.5 kW and 3 kW. The continuous component injection, the levels of total harmonic distortion and harmonics, the variation of voltage and frequency and the power factor of the inverters when inserted at different impedance levels at the common coupling point were analyzed.

**Resumo:** O crescimento da Geração Distribuída (GD) na rede elétrica pode ser um desafio no sistema elétrico de potência quanto à Qualidade de Energia Elétrica (QEE). A estabilidade de inversores fotovoltaicos (FV) é fundamental para o funcionamento adequado destes sistemas. Com base em ensaios realizados em diferentes modelos de inversores FV, este estudo demonstra que estes equipamentos podem apresentar deterioramento do funcionamento quando inseridos em uma rede com alta impedância. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas Brasileiras ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150 para analisar a qualidade de energia fornecida em dois inversores FV com potência nominal de 1,5 kW e 3 kW. Foi analisada a injeção de componente contínua, os níveis de distorção harmônica total e harmônicos, a variação de tensão e de frequência e o fator de potência dos inversores quando inseridos em diferentes níveis de impedância no ponto de acoplamento comum.

**Keywords:** ABNT NBR 16149; Distributed generation; Grid impedance; Quality of electrical energy; Grid-connected photovoltaic system;

**Palavras-chaves:** ABNT NBR 16149; Geração distribuída; Impedância de rede; Qualidade de energia elétrica; Sistema fotovoltaico conectado à rede;

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de alternativas sustentáveis para geração de energia elétrica é um tema em destaque atualmente. A possível escassez de combustíveis fósseis, juntamente com as grandes taxas de poluição gerada por estas fontes de energia, tornam cada vez mais clara a necessidade do desenvolvimento de fontes de energia renováveis. Nesse cenário, a integração entre sistemas de energia centralizada e distribuída é uma questão muito relevante para a expansão do sistema elétrico brasileiro.

Os avanços nas tecnologias de semicondutores contribuíram fortemente para o desenvolvimento de inversores fotovoltaicos, tornando a energia fotovoltaica mais competitiva no cenário mundial. Desta forma, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCE) vem ganhando destaque nos sistemas de Geração Distribuída (GD) (REN21, 2020).

Os inversores fotovoltaicos são os responsáveis pelo condicionamento da energia gerada pelo sol, nos quais devem entregar a energia com padrões mínimos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) com finalidade de manter a qualidade do sistema elétrico de potência (Pinto Neto, 2012). De acordo com a Portaria INMETRO nº 357 (2014) (INMETRO, 2014), inversores de até 10 kW conectados à rede devem estar em conformidade com os limites apresentados na ABNT NBR 16149 (ABNT, 2013a) e os procedimentos de ensaio definidos na ABNT NBR 16150 (ABNT, 2013b), além de incluir outros dois ensaios na própria portaria.

É importante ressaltar que a compatibilidade eletromagnética de baixa frequência, definida pela ABNT NBR 16149, é baseada nas normas internacionais IEC 61000-3-3 (IEC, 2017b), IEC 61000-3-11 (IEC, 2017a) e IEC 61000-3-5 (IEC, 2009). Estas normas especificam condições de teste, impedância de rede padrão e limites de variação de tensão para equipamentos conectados à rede.

Entretanto, os níveis de impedância no sistema elétrico brasileiro podem variar de acordo com a região e o ponto de conexão do sistema, uma vez que os níveis e configurações de tensão entre os transformadores não são padronizados e apresentam variações entre estados e municípios (Saccol *et al.*, 2019). Além disso, muitos sistemas FV, especialmente grandes usinas FV, estão localizados em áreas rurais, onde a impedância de rede equivalente correspondente é elevada podem levar a problemas de estabilidade dos inversores (Zhang *et al.*, 2020). Desta forma, a adoção de valores de impedância de referência, conforme definido nas normas europeias, nem sempre é o mais adequado para inversores no Brasil. Nesse sentido, ajustes nos valores de impedância definidos nas normas IEC 61000-3-3 e 61000-3-11 podem ser necessários para tornar os testes dos inversores compatíveis com a rede brasileira (Saccol *et al.*, 2019).

Atualmente, diversos trabalhos têm sido publicados sobre o desempenho de inversores em redes fracas. Em XU *et al.* (2013) é avaliado diferentes métodos de controle utilizados nos inversores, validando a estabilidade do sistema e a aplicabilidade de cada método no caso da rede fraca. Em JIA *et al.* (2017) é apresentada uma análise de estabilidade de pequenos sinais para múltiplos inversores FV em paralelo conectados à rede em diferentes intensidades rede. Em HÖCKEL *et al.* (2017) é discutido as instabilidades de tensão causadas pelos inversores em redes fracas, comprovando que a estabilidade dos inversores depende diretamente da impedância de rede no ponto de acoplamento comum. Em ZHANG *et al.* (2020) é fornecido um levantamento dos problemas de estabilidade de inversores FV em condições de rede fraca, discutindo os problemas de estabilidade nos circuitos de controle e na tensão de saída do inversor.

Neste contexto, este trabalho propõe uma análise comparativa do desempenho de inversores fotovoltaicos em diferentes cenários de impedância de rede. Neste estudo de caso foram realizados ensaios em dois inversores fotovoltaicos, com potência nominal de 1,5 kW e de 3 kW.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 trata dos principais critérios da ABNT NBR 16149 utilizados neste trabalho, a Seção 3 trata da bancada de ensaio utilizada para o desenvolvimento dos ensaios, a Seção 4 trata dos resultados e discussão obtidos, a Seção 5 apresenta uma breve conclusão do trabalho e, por fim, a Seção 6 apresenta as referências do trabalho.

## 2. Limites de operação segundo a ABNT NBR 16149

Devido ao elevado crescimento do uso de sistemas fotovoltaicos no Brasil nos últimos anos, a regulamentação destes sistemas tornou-se necessário como forma de não causar impactos na qualidade de energia fornecida pela rede. A ABNT NBR 16149 trata das características de interface e conexão entre sistemas fotovoltaicos e a distribuição brasileira de baixa tensão. As subseções a seguir abordam os principais tópicos desta norma relevantes neste trabalho.

### 2.1 Compatibilidade com a rede

A QEE fornecida pelo sistema fotovoltaico à rede elétrica é regida por práticas e normas referentes à tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência. O desvio dos padrões estabelecidos por essas normas caracteriza uma condição anormal de operação, devendo o sistema fotovoltaico ser capaz de identificar esse desvio e cessar o fornecimento de energia à rede.

A tensão, a potência e a frequência do sistema fotovoltaico devem ser compatíveis com a rede elétrica local. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede não regulam tensão, e sim a corrente injetada. Portanto, a faixa de operação normal de tensão do sistema é selecionada como uma função de proteção, que responde às condições anormais da rede no local de instalação.

A operação do sistema fotovoltaico não pode causar cintilação acima dos limites mencionados nas seções pertinentes da IEC 61000-3-3 (para sistemas com corrente inferior a 16 A), IEC 61000-3-11 (para sistemas com corrente superior a 16 A e inferior a 75 A) e IEC 61000-3-5 (para sistemas com corrente superior a 75 A). As normas mencionadas acima, estipulam condições de testes para a realização deste ensaio, estabelecendo procedimentos, circuitos e métodos de avaliação que devem ser usados nos testes de flutuação de tensão do equipamento. Assim, para a realização desses testes, o Equipamento Sob Ensaio (ESE) deve ser conectado à rede elétrica de acordo com o circuito da Fig. 1, onde R, S e T representam as fases da fonte de alimentação trifásica,  $Z_F$  representa a impedância de referência do condutor de fase e  $Z_N$  a impedância de referência do condutor neutro, ambos definidos de acordo com a norma IEC TR 60725 (IEC, 2012), onde estes valores de impedância estão resumidos na Tabela 1. Cabe ressaltar que essas normas foram elaboradas para atender ao sistema europeu de fornecimento de energia, o que pode se tornar inadequado em certas situações quando aplicado ao sistema brasileiro de distribuição de eletricidade.

**Tabela 1. Valores de referência de impedância conforme norma europeia IEC/TR 60725**

Parâmetro	Capacidade de corrente do condutor	
	Inferior a 100 A	Superior a 100 A
$Z_F$	$0,24 + j0,15 \Omega$	$0,15 + j0,15 \Omega$
$Z_N$	$0,16 + j0,10 \Omega$	$0,10 + j0,10 \Omega$

Quando a injeção de componente c.c. na rede for superior a 0,5% da corrente nominal do ESE, o sistema fotovoltaico deve cessar o fornecimento de energia à rede.

A energia injetada pelo sistema fotovoltaico deve ter baixos níveis de distorção harmônica de corrente para garantir que nenhum efeito adverso ocorra em outro equipamento conectado à rede. A Distorção Harmônica Total (THD) de corrente deve ser inferior a 5% em relação à corrente

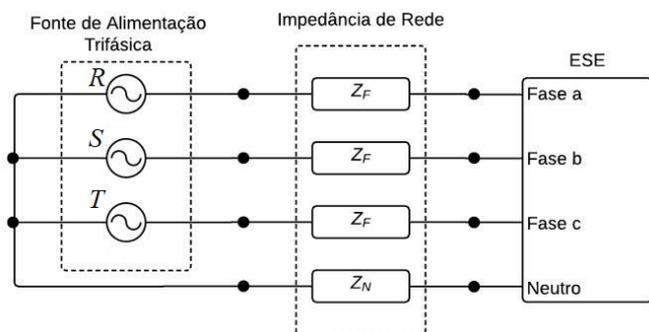


Fig. 1 Rede de referência para testes de cintilação

fundamental na potência nominal do inversor. Além disso, cada harmônica individual deve estar limitada aos valores indicados na Tabela 2.

**Tabela 2. Limite de distorção harmônica de corrente**

Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4,0%
11° a 15°	< 2,0%
17° a 21°	< 1,5%
23° a 33°	< 0,6%
Harmônicas pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1,0%
10° a 32°	< 0,5%

Para sistemas fotovoltaicos com potência nominal menor ou igual a 3 kW, quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do inversor, o sistema fotovoltaico deve apresentar fator de potência (FP) igual a 1 ajustado de fábrica, com tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo.

### 2.2 Segurança pessoal e proteção do sistema FV

Os critérios de proteção do sistema fotovoltaico e de segurança pessoal, como perda de tensão da rede, variações de tensão e frequência, proteção contra ilhamento, reconexão, aterramento, proteção contra curto-circuito, isolamento e seccionamento e religamento automático fora de fase, devem ser garantidos para a operação segura e correta do SFCCR, a fim de evitar danos no equipamento e situações de risco e acidentes pessoais.

Os limites de tensão e frequência para operação do sistema fotovoltaico estabelecidos pela ABNT NBR 16149 são apresentados na Tabela 3. O sistema fotovoltaico deve perceber uma condição anormal de tensão e cessar o fornecimento à rede quando as condições de regime normal de operação não forem cumpridas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho seguiu-se as definições da ABNT NBR 16150, onde são especificados os procedimentos de ensaio bem como os equipamentos utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia. Os equipamentos utilizados são descritos nas seguintes subseções.

**Tabela 3. Respostas às condições anormais de tensão e frequência**

Tensão no ponto comum de conexão (% em relação à Tensão Nominal)	Tempo máximo de desligamento (s)
$V < 80$	0,4
$80 \leq V \leq 110$	Regime normal de operação
$110 < V$	0,2
Frequência da rede (Hz)	Tempo máximo de desligamento (s)
$f < 57,5$	0,2
$57,5 \leq f \leq 62,0$	Regime normal de operação
$62,0 < f$	0,2

### 3.1 Simulador de rede c.a.

O simulador de rede c.a. é responsável por simular as condições encontradas em uma rede c.a. convencional, além de ser capaz de simular falhas ou condições anormais, como variações de tensão, frequência, deslocamento de fase, entre outros. O equipamento utilizado neste trabalho é uma fonte de alimentação c.a. trifásica, modelo FCATQ 10000-60-40 PFC55450, do fabricante Supplier, nas quais as características atendem a todos os requisitos da ABNT NBR 16150.

### 3.2 Simulador de gerador fotovoltaico

O simulador de gerador fotovoltaico é responsável por fornecer energia para o ESE, simulando a curva I-V com comportamento similar de um gerador fotovoltaico, permitindo a realização de ensaios em qualquer ponto de operação do inversor. O uso destes simuladores é essencial para os ensaios, pois eliminam a dependência da radiação solar, além de possibilitarem a repetibilidade dos ensaios. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi o simulador fotovoltaico, modelo N8957APV, do fabricante Keysight, nas quais as características atendem a todos os requisitos da ABNT NBR 16150.

### 3.3 Analisador de energia

Para garantir medidas corretas com níveis de exatidão que atendem à norma ABNT NBR 16150, o analisador de energia é um equipamento adequado para as medidas das grandezas de interesse dos ensaios. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi um analisador de energia, modelo LMG 670, do fabricante Zimmer, no qual atende a todos os requisitos da ABNT NBR 16150. Para a medição de corrente foram utilizadas ponteiras de corrente, modelo PTC-200, capazes de realizar leituras de até 200 A.

### 3.3 Equipamento sob ensaio

Neste estudo foram utilizados dois modelos de inversores fotovoltaicos, uma amostra de cada modelo. Os modelos utilizados não foram identificados a fim de preservar o nome dos fabricantes. As especificações das amostras utilizadas são descritas na Tabela 4.

**Tabela 4. Especificações técnicas dos inversores fotovoltaicos analisados**

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2
Potência (W)	1500	3000
Tensão (V)	220	220
Forma de conexão com a rede	Monofásico	Monofásico
Tensão de SPMP mínima (V)	125	125
Tensão de SPMP máxima (V)	400	380
Tensão CC máxima (V)	450	440
Corrente CC máxima (A)	12	10

### 3.4 Carga de impedância de rede

Para poder inserir os inversores em diferentes condições de impedância de rede, um banco resistivo e indutivo foi construído de modo que diferentes arranjos de impedância pudessem ser configurados. Deste modo, para simular redes com baixa impedância, média impedância e alta impedância foi construída uma carga trifásica ajustável por meio de disjuntores com capacidade de suportar até 35 A por fase. O esquema de ligação desta carga é apresentado na Fig. 2 e o protótipo construído apresentado na Fig. 3. Cabe ressaltar que os inversores utilizados nos ensaios são monofásicos, porém os ensaios foram realizados em fases distintas da carga construída.

Neste trabalho foram utilizados 3 arranjos distintos de impedância para os testes nos inversores, conforme Tabela 5.

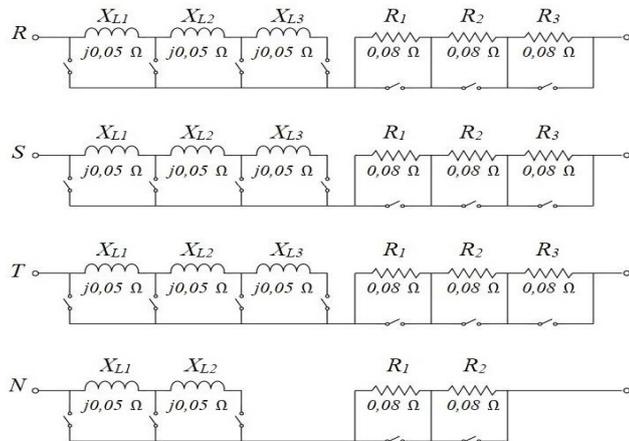


Fig. 2 Esquemático da carga de impedância de rede.

### 3.4 Ensaios realizados

Os ensaios realizados para analisar o desempenho dos inversores nos diferentes cenários de impedância de rede quanto à QEE foram os seguintes:

- Injeção de componente c.c.;
- Harmônicos e THD;
- Tensão de desconexão;
- Frequência de desconexão;
- Fator de Potência.



Fig. 3 Protótipo montado da carga de impedância de rede.

**Tabela 5. Condições de impedância de rede**

Arranjo	Indutor	Resistor	Impedância equivalente ( $\Omega$ )
$Z_1$	$X_{L1}$	$R_1$	$0,08 + j0,05$
$Z_2$	$X_{L1}+X_{L2}$	$R_1+R_2$	$0,16 + j0,10$
$Z_3$	$X_{L1}+X_{L2}+X_{L3}$	$R_1+R_2+R_3$	$0,24 + j0,15$
$Z_N$	$X_{L1}+X_{L2}$	$R_1+R_2$	$0,16 + j0,10$

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção apresenta os resultados obtidos dos ensaios especificados acima, realizados nas amostras apresentadas na Tabela 4, onde cada ensaio foi reproduzido com uma impedância de rede mencionada na Tabela 5. Cabe ressaltar que a impedância de neutro  $Z_N$  utilizada para todos os casos foi fixada com valor de  $0,16 + j0,1 \Omega$ .

**Tabela 6. Resultados dos ensaios de injeção de componente c.c.**

		Potência nominal		
		33%	66%	100%
<b>Amostra 1</b>	<b>P<sub>ca.</sub> (W)</b>	495,2	990,3	1500,9
	<b>I<sub>c.c.</sub> (mA)</b>	1,8	0,5	-2,3
	<b>Amostra 2</b>	<b>P<sub>ca.</sub> (W)</b>	990,0	1980,8
	<b>I<sub>c.c.</sub> (mA)</b>	22,9	-169,0	-307,2
		Potência nominal		
		33%	66%	100%
<b>Amostra 1</b>	<b>P<sub>ca.</sub> (W)</b>	495,3	990,4	1500,9
	<b>I<sub>c.c.</sub> (mA)</b>	0,6	1,9	2,1
	<b>Amostra 2</b>	<b>P<sub>ca.</sub> (W)</b>	990,0	1980,1
	<b>I<sub>c.c.</sub> (mA)</b>	-5,1	-200,1	-243
		Potência nominal		
		33%	66%	100%
<b>Amostra 1</b>	<b>P<sub>ca.</sub> (W)</b>	495,1	990,7	1501,0
	<b>I<sub>c.c.</sub> (mA)</b>	-2,1	-0,3	0,7
	<b>Amostra 2</b>	<b>P<sub>ca.</sub> (W)</b>	989,7	1988,8
	<b>I<sub>c.c.</sub> (mA)</b>	18,1	-168,8	-550,5

### 4.1 Injeção de componente c.c.

O inversor fotovoltaico deve parar de fornecer energia à rede em até um segundo caso a injeção de componente c.c. for superior a 0,5% da corrente nominal do inversor. Desta maneira, de acordo com os limites estabelecidos pela ABNT

NBR 16149, nota-se que a amostra 2 reprovou neste ensaio para as curvas de 66% e 100% da potência nominal em todos os cenários.

Os resultados dos ensaios de injeção de componente c.c. realizados nas amostras 1 e 2 são apresentados na Tabela 6.

#### 4.2 Harmônicos e THD

O ESE é considerado em conformidade se a distorção harmônica total de corrente for inferior a 5% em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Além disso, cada harmônica individual de corrente deve estar limitada aos valores apresentados na Tabela 2.

A amostra 1 foi aprovada em todos os ensaios de harmônicos e THD, ao passo que a amostra 2 teve seus ensaios reprovados em todas as condições de impedância, apresentado uma distorção harmônica total muito elevada

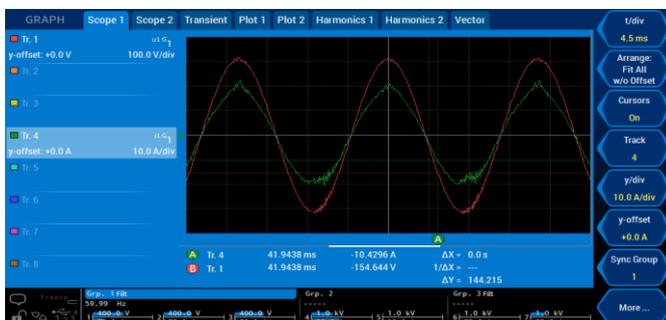
para as condições de impedância  $Z_2$  e  $Z_3$ , e um desvio nas harmônicas pares na condição de  $Z_1$ .

Os resultados dos ensaios de harmônicos e THD da amostra 1 e 2 podem ser analisados nas Fig. 4(a) até Fig. 6(a). As Fig 4(b) até 6(b) mostram a forma de onda de tensão e corrente da amostra 2, evidenciando a instabilidade do sistema ao passo que a intensidade de rede vai aumentando. A critério de comparação, a Fig. 7 apresenta a forma de onda de tensão e corrente da amostra 1 para o pior caso de impedância ( $Z_3$ ), evidenciando um bom desempenho do controle de corrente do inversor no pior caso da rede. O comportamento desta amostra mostrou-se satisfatório em todas as condições de impedância utilizadas nos ensaios.

Analisando os resultados da amostra 2, é possível notar um grande impacto à medida que a impedância da rede aumenta. Isto evidencia que o ESE não tem um controle de corrente adequado para redes com níveis de impedância maiores.

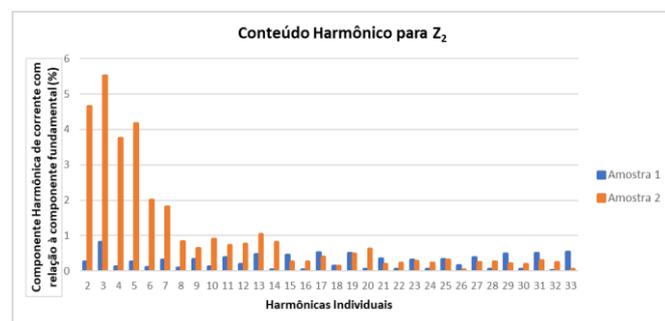


(a)

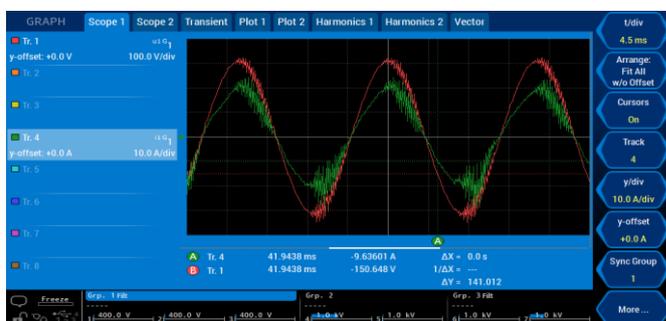


(b)

Fig. 4 Harmônicos e THD para  $Z_1$ : (a) Conteúdo harmônico e (b) Forma de onda da tensão (vermelho) e corrente (verde) da amostra 2 para  $Z_1$



(a)

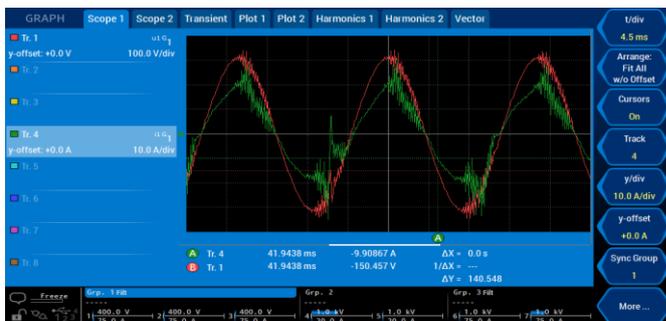


(b)

Fig. 5 Harmônicos e THD para  $Z_2$ : (a) Conteúdo harmônico e (b) Forma de onda da tensão (vermelho) e corrente (verde) da amostra 2 para  $Z_2$



(a)



(b)

Fig. 6 Harmônicos e THD para  $Z_3$ : (a) Conteúdo harmônico e (b) Forma de onda da tensão (vermelho) e corrente (verde) da amostra 2 para  $Z_3$

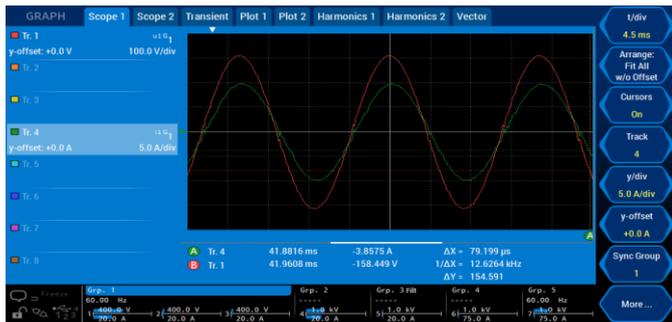


Fig. 7 Forma de onda da tensão (vermelho) e corrente (verde) da amostra 1 para  $Z_3$ .

### 3 Tensão de desconexão

O ESE é considerado em conformidade se os critérios mencionados na Tabela 3 forem cumpridos, com uma tolerância de aprovação de + 2% para sobretensão e  $\pm$  2% para subtensão.

Este ensaio não foi realizado na condição de impedância  $Z_3$  para a amostra 2, a fim de evitar a queima do ESE, pois este apresentou um comportamento crítico de operação observados nos ensaios de harmônicos e THD. A Tabela 7 apresenta os limites de tensão dos ensaios realizados.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de tensão de desconexão

Amostra 1	Tensão de desconexão por sobretensão (V)	Tensão de desconexão por subtensão (V)
$Z_1$	245,6	176,1
$Z_2$	245,6	176,6
$Z_3$	245,6	176,6
Amostra 2	Tensão de desconexão por sobretensão (V)	Tensão de desconexão por subtensão (V)
$Z_1$	243,6	176,1
$Z_2$	240,6	176,6
$Z_3$	Não realizado	Não realizado

Para os ensaios de sobretensão e subtensão, considerando a tolerância de aprovação, ambas as amostras foram aprovadas em todas as condições de impedância, com exceção da amostra 2 para o ensaio de sobretensão na condição  $Z_2$ .

### 4.4 Frequência de desconexão

O ESE é considerado em conformidade se os critérios mencionados na Tabela 3 forem cumpridos, com uma tolerância de aprovação de  $\pm$  0,1 Hz para ambos os casos.

Este ensaio não foi realizado na condição de impedância  $Z_3$  para a amostra 2, pelo mesmo motivo mencionado no ensaio anterior. A Tabela 8 apresenta os limites de frequência dos ensaios realizados.

Ambas as amostras foram aprovadas nos ensaios de frequência de desconexão em todas as condições de impedância de rede.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de frequência de desconexão

Amostra 1	Frequência de desconexão por sobrefrequência (Hz)	Frequência de desconexão por subfrequência (Hz)
$Z_1$	62,0	57,5
$Z_2$	62,0	57,5
$Z_3$	62,0	57,5
Amostra 2	Frequência de desconexão por sobrefrequência (Hz)	Frequência de desconexão por subfrequência (Hz)
$Z_1$	62,0	57,5
$Z_2$	62,1	57,5
$Z_3$	Não realizado	Não realizado

### 4.5 Fator de potência

O ESE é considerado em conformidade se o fator de potência ajustado de fábrica for igual a 1, com tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo, quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20 % da potência nominal do inversor.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de fator de potência.

Tabela 9. Resultados dos ensaios de fator de potência

$Z_1$	Amostra 1		Amostra 2	
Potência nominal	$P_{ca}$ (W)	FP	$P_{ca}$ (W)	FP
10%	147,6	0,762	300,4	0,954
20%	299,3	0,950	596,8	0,988
30%	449,3	0,986	899,4	0,995
50%	750,5	0,984	1498,4	0,998
75%	1125,0	0,984	2253,3	0,998
100%	1499,0	0,992	3005,8	0,999
$Z_2$	Amostra 1		Amostra 2	
Potência nominal	$P_{ca}$ (W)	FP	$P_{ca}$ (W)	FP
10%	149,3	0,767	299,9	0,954
20%	299,1	0,934	597,5	0,988
30%	449,7	0,986	898,2	0,996
50%	749,3	0,985	1500,2	0,998
75%	1125,4	0,984	2250,4	0,998
100%	1501,8	0,992	3007,7	0,984
$Z_3$	Amostra 1		Amostra 2	
Potência nominal	$P_{ca}$ (W)	FP	$P_{ca}$ (W)	FP
10%	149,3	0,770	299,3	0,958
20%	299,0	0,934	598,7	0,988
30%	449,2	0,986	899,1	0,996
50%	750,6	0,985	1502,1	0,998
75%	1124,1	0,984	2249,9	0,995
100%	1500,8	0,992	2998,3	0,971

Ambas as amostras foram aprovadas para os ensaios de fator de potência em todas as condições de impedância, exceto a amostra 2 para a condição de impedância  $Z_3$ , novamente devido à instabilidade do controle de corrente do inversor.

#### 4.5 Análise e discussão dos resultados

A partir dos ensaios realizados, verificou-se que as amostras apresentaram um desempenho muito diferente entre si. A amostra 1 apresentou um bom desempenho, aprovando em todos os ensaios realizados, enquanto a amostra 2 apresentou um desempenho insatisfatório.

Os ensaios de injeção de componente c.c. e de harmônicos e THD apresentaram os resultados mais críticos, quando comparados aos limites de aprovação definidos pela ABNT NBR 16149.

Nos ensaios de injeção de componente c.c, a amostra 2 teve seus testes reprovados nas curvas de 66% e 100% da potência nominal para os três níveis de impedância.

Nos ensaios de harmônicos e THD, os limites das harmônicas

**Tabela 10. Desvios percentuais de reprovação dos ensaios**

(continua)

Injeção de Componente c.c.							
ESE	Imp.	Componente c.c (mA)			Desvio (%)		Limite (mA)
		Potência nominal					
		33%	66%	100%	66%	100%	
1	Z1	1,8	0,5	-2,3	-	-	±34,1
	Z2	0,6	1,9	2,1	-	-	
	Z3	-2,1	-0,3	0,7	-	-	
2	Z1	22,9	-169,0	-307,2	147	350,5	±68,2
	Z2	-5,1	200,1	-243,0	193	256,4	
	Z3	18,1	-168,8	-550,5	147	707,4	
Distorção Harmônica Total (THD)							
ESE	Imp.	Potência nominal					Limite (%)
		100%					
		THD (%)		Desvio (%)			
1	Z1	1,97		-		5,00	
	Z2	1,88		-			
	Z3	1,77		-			
2	Z1	4,03		-		5,00	
	Z2	9,87		4,87			
	Z3	34,42		29,42			
Tensão de desconexão por sobretensão							
ESE	Imp.	Potência nominal					Limite (V)
		100%					
		Tensão (V)		Desvio (%)			
1	Z1	245,6		1,49		242,0	
	Z2	245,6		1,49			
	Z3	245,6		1,49			
2	Z1	243,6		0,66		242,0	
	Z2	240,6		-0,58			

individuais da amostra 2 foram reprovados para todos os níveis de impedância, ao passo que a THD foi reprovada para os níveis  $Z_2$  e  $Z_3$ .

Os ensaios de tensão de desconexão, de frequência de desconexão e de fator de potência, tiveram bons resultados para ambas as amostras. Para os testes de tensão e frequência, considerando a tolerância de aprovação dos limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, ambas as amostras foram aprovadas para todos os níveis de impedância. Ao passo que, no ensaio de fator de potência, a amostra 2 teve o ensaio reprovado na curva de 100% da potência nominal para o nível  $Z_3$  de impedância.

A Tabela 10 apresenta um comparativo dos ensaios indicando os desvios percentuais dos resultados reprovados em relação ao limite de aprovação das amostras.

Os resultados extraídos dos ensaios através do analisador de energia podem ser acessados no seguinte link: <https://drive.google.com/drive/folders/1W2GU4KbtLUew1-6fm5xltSXMvzPPy3JB?usp=sharing>.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma breve análise da QEE injetada na rede de dois inversores fotovoltaicos distintos, apresentando resultados de ensaios com base na ABNT NBR 16149 e da ABNT NBR 16150 inseridos em diferentes cenários de impedância de rede.

A norma brasileira para certificação de inversores fotovoltaicos ABNT NBR 16150 define o uso de uma impedância de rede em série com o emulador de rede apenas para o ensaio de cintilação. Através dos resultados deste trabalho foi demonstrado nos ensaios de harmônicos e THD e de injeção de componente contínua um desempenho deteriorado da amostra 2 quando conectada em uma rede com alta impedância. Nos testes de injeção de componente c.c., os desvios percentuais apresentados foram de 147% a 707,4% em relação aos limites permitidos; enquanto nos testes de THD foram de 4,87% a 29,42% à medida em que a impedância aumentava.

Este tipo de comportamento comprometerá a QEE fornecida pela rede elétrica. Por isso é muito importante levar em consideração os níveis de impedância da rede no ponto de acoplamento comum em um SFCR, optando pelo uso de inversores FV que possuam um controle robusto a variação da impedância da rede.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT (2013a) 'ABNT NBR 16149 Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição'.

**Tabela 10. Desvios percentuais de reprovação dos ensaios**

(conclusão)

Tensão de desconexão por subtensão						
ESE	Imp.	Potência nominal				
		100%				
		Tensão (V)	Desvio (%)	Limite (V)		
1	Z1	176,1	0,06	176,0		
	Z2	176,6	0,34			
	Z3	176,6	0,34			
2	Z1	176,1	0,06	176,0		
	Z2	176,6	0,34			
Frequência de desconexão por sobrefrequência						
ESE	Imp.	Potência nominal				
		100%				
		Frequência (Hz)	Desvio (%)	Limite (Hz)		
1	Z1	62,0	-	62,0		
	Z2	62,0	-			
	Z3	62,0	-			
2	Z1	62,0	-	62,0		
	Z2	62,1	0,16			
Frequência de desconexão por subfrequência						
ESE	Imp.	Potência nominal				
		100%				
		Frequência (Hz)	Desvio (%)	Limite (Hz)		
1	Z1	57,5	-	57,5		
	Z2	57,5	-			
	Z3	57,5	-			
2	Z1	57,5	-	57,5		
	Z2	57,5	-			
Fator de potência						
ESE	Potência nominal					Limite
	30%	50%	75%	100%	100%	
	Fator de potência					
1	0,986	0,984	0,984	0,992	-	±0,98
	0,986	0,985	0,984	0,992	-	
	0,986	0,985	0,984	0,992	-	
2	0,995	0,998	0,998	0,999	-	±0,98
	0,996	0,998	0,998	0,984	-	
	0,996	0,998	0,995	0,971	-0,41	

ABNT (2013b) 'ABNT NBR 16150 Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade'.

Ferreira, R. *et al.* (2019) *Electrical Expansion in South America: Centralized or Distributed Generation for Brazil and Colombia*, *IEEE Power and Energy Magazine*. IEEE.

doi: 10.1109/MPE.2018.2884113.

Höckel, M. *et al.* (2017) 'Measurement of voltage instabilities caused by inverters in weak grids', *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), pp. 770–774. doi: 10.1049/oap-cired.2017.0997.

IEC (2009) 'IEC TS 61000-3-5 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-5: Limits - Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 75 A'.

IEC (2012) 'IEC TR 60725 Technical Report'. IEC.

IEC (2017a) 'IEC 61000-3-11 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-11: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems - Equipment with rated current  $\leq 75$  A and subject to conditional connection'.

IEC (2017b) 'IEC 61000-3-3 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-3: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current  $\leq 16$  A per phase and not subject to conditional c'.

INMETRO (2014) 'Portaria n.º 357, de 01 de agosto de 2014', p. 10. Available at: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002145.pdf>.

Jia, Q. *et al.* (2017) 'Small signal stability analysis of paralleled inverters for multiple photovoltaic generation units connected to weak grid', *The Journal of Engineering*, 2017(13), pp. 2015–2020. doi: 10.1049/joe.2017.0683.

Pinto Neto, A. F. de C. (2012) *QUALIFICAÇÃO E ETIQUETAGEM DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE*. USP.

REN21 (2020) *Renewables 2020 Global Status Report, REN21 Secretariat*. Available at: <http://www.ren21.net/resources/publications/>.

Saccol, G. A. *et al.* (2019) 'Reference Grid Impedance for Tests of Grid-connected Power Converters for Distributed Energy Resources: The Brazilian Case', *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference, COBEP/SPEC 2019*. doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065649.

Xu, J., Xie, S. and Tang, T. (2013) 'Evaluations of current control in weak grid case for grid-connected LCL-filtered inverter', *IET Power Electronics*, 6(2), pp. 227–234. doi: 10.1049/iet-pel.2012.0192.

Zhang, Q. *et al.* (2020) 'Stability problems of PV inverter in weak grid: a review', *IET Power Electronics*, 13(11), pp. 2165–2174. doi: 10.1049/iet-pel.2019.1049.