

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP  
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE - IEE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA - PPGE**

**JOSÉ CESAR DE SOUZA ALMEIDA NETO**

**AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE DE INVERSORES PARA MICRO E MINI  
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA: A IMPLANTAÇÃO DA NBR 16150 E NBR IEC**

**62116**

**SÃO PAULO  
2017**

JOSÉ CESAR DE SOUZA ALMEIDA NETO

**AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE DE INVERSORES PARA MICRO E MINI  
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA: A IMPLANTAÇÃO DA NBR 16150 E NBR IEC  
62116**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
programa de Pós-Graduação em Energia do  
Instituto de Energia e Ambiente da Universidade  
de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles

Versão Corrigida

(Versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO  
2017

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVÊNACIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Almeida Neto, José Cesar de Souza.

Avaliação de conformidade de inversores para micro e mini geração fotovoltaica: a implantação da NBR 16150 e NBR IEC 62116 / José Cesar de Souza Almeida Neto; orientador: Roberto Zilles. — São Paulo, 2017.  
141.: il. 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

1. Energia solar. 2. Ensaio de equipamentos. 3. Inversores para conexão à rede. 4. Normas brasileiras. 5. Sistemas fotovoltaicos.  
I. Título.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Cesar Luiz Havir de Almeida e Maria Regina Havir de Almeida, pelo apoio durante toda minha vida e a todas as oportunidades que me presentearam e nunca me faltarem em nada.

Agradeço ao meu orientador, professor Roberto Zilles, pelos anos de orientação não somente durante o programa de mestrado, mas também durante a graduação em engenharia e na vida profissional.

Quero agradecer também ao Eng. João Acácio Gomes de Oliveira Neto e à DTA Engenharia pelas oportunidades de consultoria na área de engenharia durante o meu período de mestrado.

Agradeço também aos colegas de laboratório, André Ricardo Mocelin, Givaldo dos Reis e Tadeu Osano de Oliveira, pelos trabalhos desenvolvidos juntos e que foram a base desta dissertação.

Estendo também meus agradecimentos aos membros do Laboratório de sistemas Fotovoltaicos: Aimé, Alex, Aurélio, Cristina, Gilberto, Kauê, Marcelo, Maurício, professor Pinho, Teddy e Samuel, pelo companheirismo e convivência que, de uma forma ou outra, contribuíram para a realização do mestrado e ajudaram no meu desenvolvimento pessoal.

Agradeço aos membros da administração, laboratórios e infraestrutura do IEE, professores e membros da secretaria de pós-graduação que sempre me atenderam nas minhas necessidades relacionadas ao Programa de Pós-graduação em Energia.

Por fim agradeço ao Roberto Valer, por difundir a prática da dança de forró, atividade que me ajudou a superar barreiras e me tornar uma pessoa melhor.

## RESUMO

ALMEIDA NETO, José Cesar de Souza. **Avaliação de conformidade de inversores para micro e mini geração fotovoltaica: a implantação da NBR 16150 e NBR IEC 62116**, 2017, 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

No Brasil, a necessidade crescente por sistemas de geração solar fotovoltaica conectados à rede de distribuição levou ao desenvolvimento de normas brasileiras para a conformidade de inversores. Assim, de forma a atender a população em geral, foi publicada a Portaria 357, de 01 de agosto de 2014, do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), que inclui inversores para conexão à rede de potência nominal até 10 kW no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Por possuir os equipamentos necessários para a realização dos ensaios de conformidade com a portaria 357, o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo passa então a ser o primeiro laboratório acreditado pelo INMETRO para a realização desses ensaios. Este trabalho tem como objetivo resumir as experiências de aplicação das normas brasileiras no ensaio de inversores para o PBE no LSF, sendo levantados os resultados obtidos no ensaio de 15 inversores ao longo de três anos de operação da bancada de ensaio para sistemas conectados à rede. A partir deste levantamento conclui-se que, embora as normas brasileiras exijam rigor em seus requisitos, existem inversores capazes de atender aos requisitos normativos brasileiros, assim como existem inversores que necessitam de implementações nos respectivos *firmware* de controle para conseguirem atender todos os requisitos. Uma vez que as normas brasileiras são recentes, este trabalho também destaca pontos das normas que se beneficiariam de adequações no corpo do texto, a fim de melhorar as rotinas de ensaios em inversores e critérios de conformidade.

**Palavras-chave:** Energia solar, ensaio de equipamentos, inversores para conexão à rede, normas brasileiras, sistemas fotovoltaicos.

## ABSTRACT

ALMEIDA NETO, José Cesar de Souza. **Conformity evaluation for micro and mini photovoltaic generation inverters: NBR 16150 and NBR IEC 62116 implementation**, 2017, 141 f. Dissertation (Msc.) – Sao Paulo University Graduate Program on Energy, Sao Paulo, 2017.

In Brazil, the increasing demand for grid-tie photovoltaic systems lead to the development of the Brazilian standards for inverter quality and evaluation. In order to meet the general population demand, the National Institute for Metrology, Quality and Technology (INMETRO) published the normative nº 357 01/08/2014 to include inverters up to 10 kW in the Brazilian Labeling Program (PBE). For having all the equipment needed for inverter conformity evaluation in accordance with the normative nº 357, the Laboratory of Photovoltaic Systems (LSF) of the Institute of Energy and Environment of the University of Sao Paulo becomes the first INMETRO accredited laboratory for conducting the inverter evaluation in Brazil. This work's main goal is to summarize the experience acquired for the appliance of the Brazilian standards for inverter testing in the LSF. The results obtained for the test of 15 different inverters during the first three years' operating the inverter test bench are showed. Using the data shown this work concludes that, although the Brazilian standards are rigorous on its criteria, there are inverters capable of complying with the standards requirements and there are inverters that need further software and hardware development in order to comply with all the requirements. Since the Brazilian standards are in its first version, this work also aims to point out aspects of the standard that would benefit from text revising in order to improve the test conditions and conformity criteria.

**Keywords:** Solar energy, equipment testing, grid connected inverters, Brazilian standards, Photovoltaic systems.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 - Topologia de inversor com dois estágios (Fonte: Pinho e Galdino (2014)).	17
Figura 1-2 - Exemplos de topologias de conversores c.c./c.c. aplicados a inversores para SFCR.	19
Figura 1-3 - Topologias de circuitos inversores para conexão entre barramentos em c.c. e em c.a. (Adaptado de Ahmad e Singh (2017)).	21
Figura 1-4 - Exemplo de circuito referente a topologia H6 com grampo passivo (Fonte: Ahmad e Singh (2017)).	21
Figura 1-5 - Modelos de controle para injeção de corrente em sincronia com barramento em c.a. (Adaptado de Ahmad e Singh (2017)).	22
Figura 1-6 - Inversor com múltiplos SPMP (Fonte: INMETRO (2014)).	23
Figura 2-1 - Curva do FP em função da potência ativa de saída do inversor (Fonte: ABNT NBR 16149).	27
Figura 2-2 - Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência nominal superior a 6 kW (Fonte: ABNT NBR 16149).	28
Figura 2-3 - Característica de variação da tensão (Fonte: IEC (2013)).	36
Figura 2-4 - Fluxograma dos procedimentos de variação de tensão e frequência.	38
Figura 2-5 - Configuração dos equipamentos para os ensaios 15 e 16 (Fonte: INMETRO (2014)).	52
Figura 3-1 - Esquema de ligação dos equipamentos da bancada para ensaio de inversores para SFCR.	56
Figura 3-2 - Fonte c.c. para simulação de arranjos fotovoltaicos da marca Regatron.	57
Figura 3-3 - Painel de configuração de arranjo fotovoltaico pela fonte c.c. utilizada no LSF.	58
Figura 3-4 - Painel de comandos da fonte c.c. utilizada no LSF.	59
Figura 3-5 - Rotina em LabVIEW para envio de valores de irradiância de simulação da fonte Regatron.	59
Figura 3-6 - Fonte c.a. para simulação de rede elétrica da marca Supplier.	60
Figura 3-7 - Painel de configuração de testes da fonte c.a. utilizada no LSF.	61
Figura 3-8 - Rotina em LabVIEW para envio do comando iniciar geração da fonte Supplier.	62
Figura 3-9 - Banco de cargas RLC da marca Parwa.	63
Figura 3-10 - Painel de configuração do banco de cargas RLC utilizado no LSF.	64
Figura 3-11 - Vista frontal do osciloscópio Agilent DSO7014B.	65
Figura 3-12 - Vista frontal do analisador de energia Yokogawa WT3000.	66
Figura 3-13 - Rotina em LabVIEW para aquisição de dados a partir do analisador de energia Yokogawa WT 3000.	67
Figura 4-1 - Micro inversor para uso com um único módulo fotovoltaico (Fonte: Renesola).	70
Figura 4-2 - Resultados dos ensaios realizados para avaliar a distorção harmônica de corrente do inversor 9.	73
Figura 4-3 - Resultados dos ensaios de gradiente de injeção de potência ativa para o inversor 9 em 100 % de carregamento.	73
Figura 4-4 - Resultados dos ensaios de gradiente de injeção de potência ativa para o inversor 9 em 50 % de carregamento.	74

Figura 4-5 - Resultado da implementação da curva de FP para o inversor 9 em 10/09. ....	75
Figura 4-6 - Resultado da implementação da curva de FP para o inversor 9 em 29/09. ....	75
Figura 4-7 - Resultados dos ensaios de gradiente de injeção de potência ativa para o inversor 10 em 100 % de carregamento.....	78
Figura 4-8 - Resultados dos ensaios de gradiente de injeção de potência ativa para o inversor 10 em 50 % de carregamento.....	78
Figura 4-9 - Resultado da implementação da curva de FP para o inversor 10 em 29/02. ....	79
Figura 4-10 - Mostrador do equipamento Yokogawa WT3000 para o teste de cintilação. ....	82
Figura 4-11 - Resultados para ensaio de tempo de desconexão por sobretensão realizado em um inversor de 5 kW no LSF.....	89
Figura 4-12 - Resultados para ensaio de tempo de desconexão por subtensão realizado em um inversor de 5 kW no LSF.....	90
Figura 4-13 - Resultados para ensaio de tempo de desconexão por sobrefrequência realizado em um inversor de 5 kW no LSF. ....	92
Figura 4-14 - Resultados para ensaio de tempo de desconexão por subfrequência realizado em um inversor de 5 kW no LSF.....	93
Figura 4-15 - Resultados para as potências entregues em regime de sobrefrequência para os inversores testados no LSF. ....	95
Figura 4-16 - Resultados normalizados para as potências entregues em regime de sobrefrequência para os inversores testados no LSF. ....	95
Figura 4-17 - Primeira parte dos resultados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF. ....	96
Figura 4-18 - Segunda parte dos resultados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF. ....	96
Figura 4-19 - Primeira parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF. ....	97
Figura 4-20 - Segunda parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF. ....	97
Figura 4-21 - Primeira parte dos resultados dos ensaios de controle de potência ativa em 50 % de carregamento para os inversores testados no LSF. ....	98
Figura 4-22 - Segunda parte dos resultados dos ensaios de controle de potência ativa em 50 % de carregamento para os inversores testados no LSF. ....	98
Figura 4-23 - Primeira parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 50 % de carregamento para os inversores testados no LSF. ....	99
Figura 4-24 - Segunda parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF. ....	99
Figura 4-25 - Resultado do ensaio de deslocamento do angulo de fase de tensão em 90° para um inversor de 5 kW ensaiado no LSF.....	101
Figura 4-26 - Resultado do ensaio de deslocamento do angulo de fase de tensão em 180° para um inversor de 5 kW ensaiado no LSF.....	102
Figura 4-27 – DHT <sub>1</sub> de um SFCR trifásico em função do carregamento (Fonte: Gallo, Landi e Luiso (2012)). ....	114
Figura 4-28 - DHT de tensão de uma rede elétrica com SFCR trifásico em função do carregamento (Fonte: Gallo, Landi e Luiso (2012)). ....	114

Figura 4-29 - Distorção harmônica de tensão antes da conexão do inversor de 4,6 kW.....	116
Figura 4-30 - Distorção harmônica de tensão após a conexão do inversor de 4,6 kW.....	116
Figura 4-31 - Distorção harmônica de corrente do inversor de 4,6 kW para as conexões com o simulador de rede e rede elétrica. ....	117
Figura 4-32 - Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiação anual para a média nacional por faixas (Fonte: Pinto Neto (2012)).....	118
Figura 4-33 - Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiação anual para a média nacional por faixas (Fonte: Pinto Neto (2012)).....	119
Figura 4-34 - Operação de um inversor com potência superior a 6 kW e fator de potência fixo. ....	122
Figura 4-35 - Operação de um inversor com potência superior a 6 kW e fator de potência em rampa.....	123
Figura 4-36 - Curva de capacidade "triangular" e "retangular", para inversores com potência nominal total superior a 6 kW.....	124
Figura 4-37 - Área de operação para inversores com lastro de potência aparente. ....	125
Figura 4-38 - Sugestão de operação para inversores com potência nominal acima de 6 kW com fator de potência fixo. ....	125

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Critérios para componente contínua e harmônicos de corrente estabelecidos pela norma ABNT 16149 .....	26
Tabela 2-2 - Variáveis de configuração da curva de FP do sistema fotovoltaico.....	27
Tabela 2-3 - Eventos e tempo de atuação para condições anormais de operação da tensão da rede.....	29
Tabela 2-4 - Eventos e forma de atuação para condições anormais de operação da frequência da rede.....	30
Tabela 2-5 - Comandos externos necessários aos inversores. ....	31
Tabela 2-6 - Períodos de suportabilidade a sub tensões para inversores para SFCR. ....	32
Tabela 2-7 - Caracterização da análise do inversor para SFCR (> 6kW) em relação a um evento de subtensão. ....	33
Tabela 2-8 - Exatidões especificadas pela ABNT 16150 para medições realizadas nos ensaios. ....	35
Tabela 2-9 - Requisitos do simulador de rede c.a. pela norma ABNT NBR 16150.....	35
Tabela 2-10 - Requisitos do simulador de gerador fotovoltaico pela norma ABNT NBR 16150.....	36
Tabela 2-11 - Valores de configuração para os procedimentos de variação de tensão e frequência.....	39
Tabela 2-12 - Passos de frequência para avaliação do controle de potência em sobrefrequência.....	40
Tabela 2-13 - Situações de faltas da rede simuladas para avaliação de suportabilidade do inversor. ....	41
Tabela 2-14 - Requisitos do simulador de rede c.a. pela norma ABNT NBR IEC 62116. ....	45
Tabela 2-15 - Especificações para os elementos a compor a carga CA.....	45
Tabela 2-16 - Pontos de desequilíbrio de carga para a condição "A" de ensaio.....	47
Tabela 2-17 - Pontos de desequilíbrio de carga para as condições "B" e "C" de ensaio. ....	47
Tabela 2-18 - Relação entre ensaios da Portaria 357, itens das normas ABNT e inversores aplicáveis.....	50
Tabela 2-19 - Especificações dos instrumentos de medição segundo o ANEXO III da portaria 357.....	52
Tabela 2-20 - Especificações do simulador de rede c.a. segundo o ANEXO III da portaria 357. ....	52
Tabela 3-1 - Características elétricas: Fonte Regatron .....	57
Tabela 3-2 - Características elétricas: Fonte Supplier .....	60
Tabela 3-3 - Características elétricas: Carga RLC Parwa.....	63
Tabela 3-4 - Comparação entre os níveis de exatidão exigidos pela NBR 16150 e os valores do analisador de energia WT3000 .....	66
Tabela 4-1 - Resumo dos inversores ensaiados no LSF entre 2014 e 2016.....	68
Tabela 4-2 - Características do inversor número 4. ....	70
Tabela 4-3 - Resultados dos ensaios realizados no inversor número 4.....	71
Tabela 4-4 - Características do inversor número 9. ....	72
Tabela 4-5 - Resultados dos ensaios realizados no inversor número 9.....	76

Tabela 4-6 - Características do inversor número 10. ....	76
Tabela 4-7 - Resultados para a primeira implementação de <i>software</i> realizada no inversor 10. ....	77
Tabela 4-8 - Resultados dos ensaios realizados no inversor número 10.....	79
Tabela 4-9 - Características do inversor número 12. ....	80
Tabela 4-10 - Resultados dos ensaios realizados no inversor número 12.....	81
Tabela 4-11 - Resultado do ensaio de cintilação para inversor de 5 kW testado no LSF.....	82
Tabela 4-12 - Resumo dos resultados para ensaios de cintilação realizados no LSF. ....	83
Tabela 4-13 - Resumo dos resultados para ensaios de injeção de componente c.c. realizados no LSF.....	84
Tabela 4-14 - Resultados do ensaio de $DHT_1$ para um inversor de 5 kW testado no LSF. ....	85
Tabela 4-15 – Resumo dos resultados para ensaios de $DHT_1$ realizados no LSF.....	86
Tabela 4-16 - Resumo dos resultados para ensaios de FP realizados no LSF. ....	87
Tabela 4-17 - Resumo dos resultados para ensaios de injeção e demanda de reativos realizados no LSF. ....	88
Tabela 4-18 - Resumo dos resultados para ensaios de sobre e subtensão realizados no LSF. ....	91
Tabela 4-19 - Resumo dos resultados para ensaios de sobre / subfrequência realizados no LSF. ....	94
Tabela 4-20 - Resumo dos resultados para ensaios de reconexão realizados no LSF. ....	100
Tabela 4-21 - Resumo dos resultados do ensaio de deslocamento do angulo de fase de tensão em $90^\circ$ realizados no LSF.....	103
Tabela 4-22 - Resumo dos resultados do ensaio de deslocamento do angulo de fase de tensão em $180^\circ$ realizados no LSF.....	103
Tabela 4-23 – Resumo dos resultados para ensaios de desconexão realizados no LSF. ....	104
Tabela 4-24 - Resumo dos resultados para ensaios de inversão de polaridade realizados no LSF.....	105
Tabela 4-25 - Resumo dos resultados para ensaios de sobrecarga realizados no LSF. ....	106
Tabela 4-26 - Resultado do ensaio de anti-ilhamento para um inversor de 4,6 kW ensaiado no LSF.....	107
Tabela 4-27 - Resumo dos resultados para ensaios de anti-ilhamento realizados no LSF. ...	108
Tabela 4-28 - Exatidão do instrumento de medição Classe I segundo a IEC 61000-4-7. ....	112
Tabela 4-29 - Valores de $DHI_1$ de tensão do simulador de rede pela IEC 61000-3-2 .....	115
Tabela 4-30 - Parâmetros de ajuste de curva de fator de potência conforme a ABNT NBR 16149.....	121
Tabela 4-31 - Resumo dos modos de operação de FP para inversores.....	123
Tabela 4-32 - Variação do fator de potência do inversor em relação a oscilação de reativos para condição A de operação. ....	132
Tabela 4-33 - Variação do fator de potência do inversor em relação a oscilação de reativos para condição B de operação. ....	132
Tabela 4-34 - Variação do fator de potência do inversor em relação a oscilação de reativos para condição B de operação. ....	133
Tabela 4-35 - Variação de reativos para adequação aos pontos da norma ABNT NBR\IEC 62116.....	134

## ÍNDICE DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

c.a.: Corrente Alternada

c.c.: Corrente Contínua

DHI<sub>i</sub>: Distorção Harmônica Individual de Corrente

DHI<sub>v</sub>: Distorção Harmônica Individual de Tensão

DHT<sub>i</sub>: Distorção Harmônica Total de Corrente

DHT<sub>v</sub>: Distorção Harmônica Total de Tensão

*HBZVR: H-bridge zero voltage rectifier*

*HBZVR-D: H-bridge zero voltage rectifier with clamped diode*

*HERIC: Highly efficiency and reliable inverter concept*

IEE-USP: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LSF: Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

*NPC: Neutral point clamped*

PBE: Programa Brasileiro de Etiquetagem

PET: Planilha de Especificações Técnicas

PMP: Ponto de Máxima Potência

*SAG: Voltage sag*

*SEPIC: Single-ended primary-inductor converter*

SFCR: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

SFI: Sistemas Fotovoltaicos Isolados

SPMP: Seguimento do Ponto de Máxima Potência

*SWELL: Voltage swell*

TMC: Tensão de Modo Comum

# SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	15
Objetivo.....	16
Metodologia .....	16
1. INVERSORES FOTOVOLTAICOS .....	17
2. ANÁLISE DE NORMAS ABNT E PORTARIA 357.....	24
2.1. Normas ABNT .....	24
2.1.1. ABNT NBR 16149 .....	24
2.1.2. ABNT NBR 16150 .....	33
2.1.3. ABNT NBR IEC 62116.....	42
2.2. Portaria INMETRO 357 de 01 de agosto de 2014 .....	49
2.2.1. Portaria 357: Art. 4º .....	49
2.2.2. Portaria 357: Art. 7º .....	49
2.2.3. Portaria 357: Art. 9º .....	53
2.2.4. Portaria 357: Art. 10º .....	54
3. EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO E ARRANJO DA BANCADA DE ENSAIOS 55	
3.1. Simulador de arranjos fotovoltaicos.....	56
3.2. Simulador de rede c.a. ....	59
3.3. Banco de cargas RLC .....	62
3.4. Osciloscópio.....	64
3.5. Analisador de Energia Yokogawa.....	65
4. ENSAIOS REALIZADOS EM INVERSORES PARA SFCR E CONSIDERAÇÕES AS NORMAS ABNT E PORTARIA 357. ....	68
4.1. Ensaios de desenvolvimento .....	69
4.1.1. Inversor 4 .....	69
4.1.2. Inversor 9 .....	71
4.1.3. Inversor 10 .....	76
4.1.4. Inversor 12 .....	80
4.2. Resultados dos ensaios realizados em inversores para SFCR.....	81
4.2.1. 1º Ensaio – Cintilação .....	81
4.2.2. 2º Ensaio – Injeção de componente continua.....	84
4.2.3. 3º Ensaio – Harmônicos e distorção de forma de onda .....	85

4.2.4.	4° Ensaio – Fator de potência.....	86
4.2.5.	5° Ensaio – Injeção e demanda de potência reativa .....	87
4.2.6.	6° Ensaio – Sobre e subtensão.....	88
4.2.1.	7° Ensaio – Sobre e subfrequência .....	91
4.2.2.	8° Ensaio – Controle da potência ativa em sobrefrequência.....	95
4.2.1.	9° Ensaio – Reconexão.....	99
4.2.2.	10° Ensaio – Religamento automático fora de fase.....	100
4.2.3.	11°, 12° e 13° Ensaio – Modulação de potência ativa, modulação de potência reativa e desconexão do sistema fotovoltaico da rede .....	104
4.2.4.	14° Ensaio – Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede	105
4.2.5.	15° e 16° Ensaio – Proteção contra inversão de polaridade e sobrecarga .....	105
4.2.6.	17° Ensaio – Anti-ilhamento .....	106
4.3.	Considerações aos ensaios realizados .....	109
4.3.1.	1° Ensaio – Cintilação .....	109
4.3.2.	2° Ensaio – Injeção de componente continua.....	110
4.3.3.	3° Ensaio – Harmônicos e distorção de forma de onda .....	113
4.3.4.	4° Ensaio – Fator de potência.....	119
4.3.5.	5° Ensaio – Injeção e demanda de potência reativa .....	120
4.3.6.	6° Ensaio – Sobre e subtensão.....	126
4.3.7.	7° Ensaio – Sobre e subfrequência .....	126
4.3.8.	8° Ensaio – Controle da potência ativa em sobrefrequência .....	126
4.3.9.	9° Ensaio – Reconexão.....	127
4.3.10.	10° Ensaio – Religamento automático fora de fase .....	128
4.3.11.	11°, 12° e 13° Ensaio – Modulação de potência ativa, modulação de potência reativa e desconexão do sistema fotovoltaico da rede .....	128
4.3.12.	14° Ensaio – Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede	131
4.3.13.	15° e 16° Ensaio – Proteção contra inversão de polaridade e Sobrecarga..	131
4.3.14.	17° Ensaio – Anti-ilhamento .....	131
CONCLUSÕES .....		135
REFERÊNCIAS.....		136
APENDICE: SUGESTÕES PARA REVISÃO DOS TEXTOS DAS NORMAS BRASILEIRAS.....		139

## INTRODUÇÃO

No cenário brasileiro atual, novas tecnologias para geração de energia são avaliadas e desenvolvidas na tentativa de suprir a demanda energética do país e diminuir os custos da geração. Entre as alternativas existentes para resolução deste problema está a geração distribuída, com as unidades geradoras instaladas nos pontos de consumo do sistema de distribuição de energia. Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos ganham espaço e começam a ser difundidos, criando uma necessidade da população por equipamentos para instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em residências, centros comerciais e industriais.

Para atender a demanda da sociedade por equipamentos com qualidade, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, INMETRO, estabeleceu, ao longo dos anos, os critérios para testes e padrões de qualidade de diversos equipamentos para desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos isolados, (SFI), como: módulos fotovoltaicos, baterias, controladores de carga e inversores para SFI. Com a nova demanda criada pela geração distribuída, por sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, (SFCR), o INMETRO estabeleceu os critérios para avaliação de conformidade de inversores para SFCR, com base nas normas da ABNT, e incluiu estes equipamentos no Programa Brasileiro de Etiquetagem, PBE.

Os testes necessários para avaliar a conformidade determinada pelo INMETRO para inversores conectados à rede demandam diversos equipamentos, como: simuladores de rede, cargas e simuladores de arranjos fotovoltaicos, que também são necessários para desenvolvimento de pesquisa pelos laboratórios que trabalham com a tecnologia fotovoltaica. Assim, por possuir todos os equipamentos para o desenvolvimento dos testes de inversores conectados à rede, o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, LSF, do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo foi acreditado pelo INMETRO para a realização dos ensaios de avaliação de conformidade de inversores para SFCR comercializados no país.

Com o incremento da competitividade dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede e o crescente interesse da sociedade nos sistemas de micro e mini geração, regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelas Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015, é imprescindível o estabelecimento de requisitos mínimos de qualidade e segurança para a interface de conexão do inversor c.c./c.a. com a rede elétrica de distribuição.

## **Objetivo**

O trabalho tem como objetivo principal analisar as normas ABNT NBR 16149 ABNT NBR 16150, ABNT NBR IEC 62116 e a portaria 357 de 01 de agosto de 2014 do INMETRO visando estabelecer uma rotina para os ensaios de avaliação de conformidade e, a partir das experiências adquiridas, sugerir complementações às normas brasileiras, de forma a contribuir para a melhoria dos ensaios realizados em inversores para SFCR.

## **Metodologia**

A primeira parte deste trabalho consiste em caracterizar o inversor fotovoltaico para conexão à rede elétrica. São expostas as características de topologias de conversores c.c./c.c. e c.c./c.a., aplicados a arranjos fotovoltaicos, para geração da potência máxima e injeção de energia a rede elétrica, assim como exemplos de algoritmos de controle para operação dos conversores.

Na sequência é realizada a análise das normas ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150, ABNT NBR IEC 62116 e da portaria 357 de 01 de agosto de 2014, e descrição dos equipamentos do LSF para realização dos ensaios de inversores. São destacadas as características técnicas do analisador de energia, osciloscópio, fonte simuladora de arranjos fotovoltaicos, rede elétrica e carga RLC, assim como os esquemas de ligação entre estes equipamentos.

Com a base teórica descrita e os equipamentos especificados são descritas as condições de realização dos ensaios desenvolvidos em inversores no LSF ao longo dos três primeiros anos de operação da bancada de ensaios de inversores para SFCR. São resumidos os resultados obtidos para cada ensaio em todos os inversores testados e realizada a comparação com os padrões de conformidade das normas brasileiras. Em relação aos ensaios realizados, também são abordados em detalhe as condições de ensaio de desenvolvimento de produto de quatro inversores encaminhados ao LSF para a realização de ajustes dos equipamentos.

O último capítulo apresenta comentários a respeito dos resultados obtidos para os ensaios realizados no LSF, referentes à conformidade dos inversores testados com os padrões normativos. Apresenta também aspectos da norma que podem ser beneficiados por adequações no texto de forma a trazer melhores condições de ensaio de equipamentos e desenvolvimento de produtos.

## 1. INVERSORES FOTOVOLTAICOS

Inversores são equipamentos eletrônicos capazes de transferir energia de um barramento em corrente contínua para um barramento em corrente alternada. Segundo Pinho e Galdino (2014), inversores para a aplicação fotovoltaica podem ser divididos em dois grupos, um para SFI e o outro para SFCR. Embora estes dois tipos possuam semelhança em seus princípios de funcionamento, os inversores para SFCR necessitam de rotinas de controle de operação a fim de conectar-se com a rede elétrica sem causar danos à mesma, ou seja, obedecendo os requisitos listados pela Portaria INMETRO 357 de 01 de agosto de 2014. A Figura 1-1 mostra uma visão geral das similaridades e diferenças nos inversores para aplicação fotovoltaica, em que o equipamento para conexão à rede tem seu barramento c.c. conectado, geralmente, a um arranjo de módulos fotovoltaicos e o seu barramento c.a. conectado à rede elétrica, já o equipamento para sistemas isolados tem seu barramento c.c. conectado, geralmente, a um banco de baterias e seu barramento c.a. as cargas, ainda assim os dois tipos de equipamentos possuem componentes semelhantes como módulos de conversores c.c./c.c. e c.c./c.a..

Como o foco deste trabalho é a aplicação das normas ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150 e ABNT NBR/IEC 62116 serão discutidos neste capítulo somente os inversores para SFCR, cujos parâmetros de conformidade são ditados pela Portaria 357.

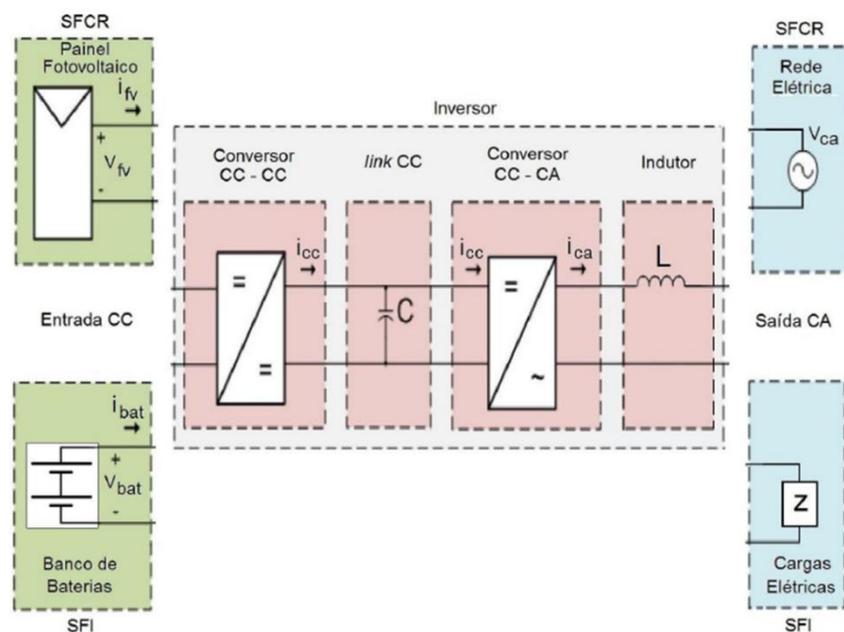


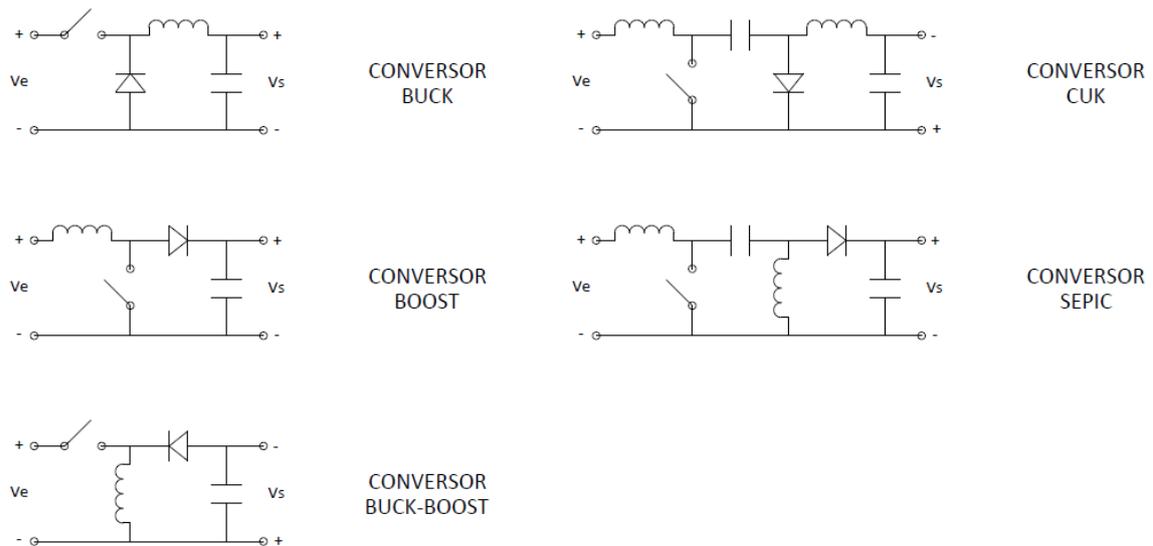
Figura 1-1 - Topologia de inversor com dois estágios (Fonte: Pinho e Galdino (2014)).

Ainda segundo Pinho e Galdino (2014), inversores para SFCR podem ser classificados em

- Inversores centrais: inversores trifásicos com potências nominais na ordem de centenas de kW até MW, utilizados em grandes centros de geração fotovoltaica compostos de diversos arranjos (*strings*) em paralelo;
- Inversores *multistring*: inversores trifásicos ou monofásicos com várias entradas c.c., cada uma contendo controle de seguimento de ponto de máxima potência, (SPMP), independente, tendo potência nominal da ordem de dezenas de kW;
- Inversores *string*: inversores monofásicos com apenas uma entrada c.c. e controle de SPMP, com potência nominal máxima de 10 kW;
- Módulo c.a.: módulo fotovoltaico conectado a um microinversor responsável pela conversão da c.c. fornecida pelo módulo.

Independentemente da classificação de um inversor para SFCR, o mesmo deve apresentar rotinas de controle tanto para a conexão com o barramento c.c. como para a conexão com o barramento c.a., com topologias de circuitos de controle capazes de acionar estas rotinas e assim realizar a transferência de energia entre os barramentos.

O estudo desenvolvido por Dursun e Gorgun (2017) faz uma análise de topologias de circuitos para conversores c.c./c.c. utilizados para compor inversores fotovoltaicos, sendo destacadas cinco diferentes topologias que podem ser vistas na Figura 1-2, essa diversidade de topologias exemplifica a quantidade e organização dos componentes existentes nos conversores cc./cc. dos inversores para conexão à rede.



**Figura 1-2 - Exemplos de topologias de conversores c.c./c.c. aplicados a inversores para SFCR.**

Para a aplicação fotovoltaica são aplicadas rotinas de controle às topologias vistas na Figura 1-2. Essas rotinas têm como objetivo o controle de tensão e corrente do arranjo de módulos fotovoltaicos ao qual o inversor está conectado. Assim a rotina visa obter o par de valores de tensão e corrente de forma a extrair a potência máxima do arranjo de módulos, de acordo com o nível de irradiância incidente sobre o arranjo, sendo este tipo de controle conhecido como SPMP.

De acordo com Pinho e Galdino (2014) existem cinco métodos de SPMP que são mais utilizados em inversores para aplicação fotovoltaica:

- Tensão fixa: consiste em manter um valor fixo de tensão do arranjo de módulos fotovoltaicos de forma que este esteja próximo da faixa de variação da tensão de potência máxima do arranjo;
- Tensão de circuito aberto: consiste em manter um valor de tensão do arranjo de módulos fotovoltaicos proporcional ao valor de circuito aberto do arranjo, sendo necessário abrir o circuito periodicamente para medir a tensão de circuito aberto do sistema devido a mudanças na irradiância incidente;
- Corrente de curto-circuito: similar ao método anterior, porém voltado a manter uma corrente proporcional à corrente de curto-circuito do sistema. Assim, o arranjo de módulos fotovoltaicos é periodicamente remetido ao curto-circuito a fim de avaliar as mudanças na corrente de curto-circuito devido à mudança de irradiância;

- Perturbe & observe: este método tem como princípio constantemente aumentar ou diminuir o valor de tensão do arranjo fotovoltaico e avaliar o resultado da potência entregue pelo arranjo. No caso de aumento da potência o método segue alterando a tensão da mesma maneira que o realizado previamente. Caso a potência diminua, o método inverte o tipo de atuação com base na atuação anterior;
- Condutância incremental: similar ao método anterior, porém avalia o sinal da derivada de potência em relação à tensão.

Com exceção do algoritmo do tipo tensão fixa, todos os outros métodos apresentados variam constantemente os valores de tensão e corrente do arranjo fotovoltaico para atingir o ponto de máxima potência, PMP, para diferentes níveis de irradiância incidentes sobre o arranjo fotovoltaico. Segundo Faranda e Leva (2008), o uso destas técnicas de controle, mesmo para níveis de irradiância fixos, não garante o ponto de operação do sistema no exato PMP do arranjo, mas leva a operação em pontos próximos, criando uma faixa de operação do sistema para cada situação de irradiância. Este efeito, somado ao tempo de adaptação do algoritmo à variação do PMP, devido a mudança de irradiância, leva a uma perda da máxima energia solar convertida pelo arranjo em um período de tempo, configurando uma eficiência característica de cada algoritmo de SPMP.

Além do algoritmo de controle do barramento c.c., é necessário aos inversores algoritmos de controle para a conexão com o barramento c.a., que podem ser orientados de diversas formas dependendo da topologia do inversor.

O estudo desenvolvido por Ahmad e Singh (2017) faz uma avaliação de 17 sistemas de controle para injeção de c.a. a partir de combinações de topologias de chaveamento e algoritmos de controle aplicados a inversores para SFCR sem transformador. São analisados parâmetros de qualidade da corrente, como injeção de componente de c.c. e  $DHT_I$ , e até mesmo eficiências características para as diferentes topologias conectadas a rede elétrica. A Figura 1-3 mostra os tipos de topologias consideradas no estudo, com a Figura 1-4 trazendo um exemplo do circuito associado a topologia H6 com isolamento galvânica do ponto comum de tensão e a Figura 1-5 trazendo as malhas de controle implementadas como rotinas destas topologias.

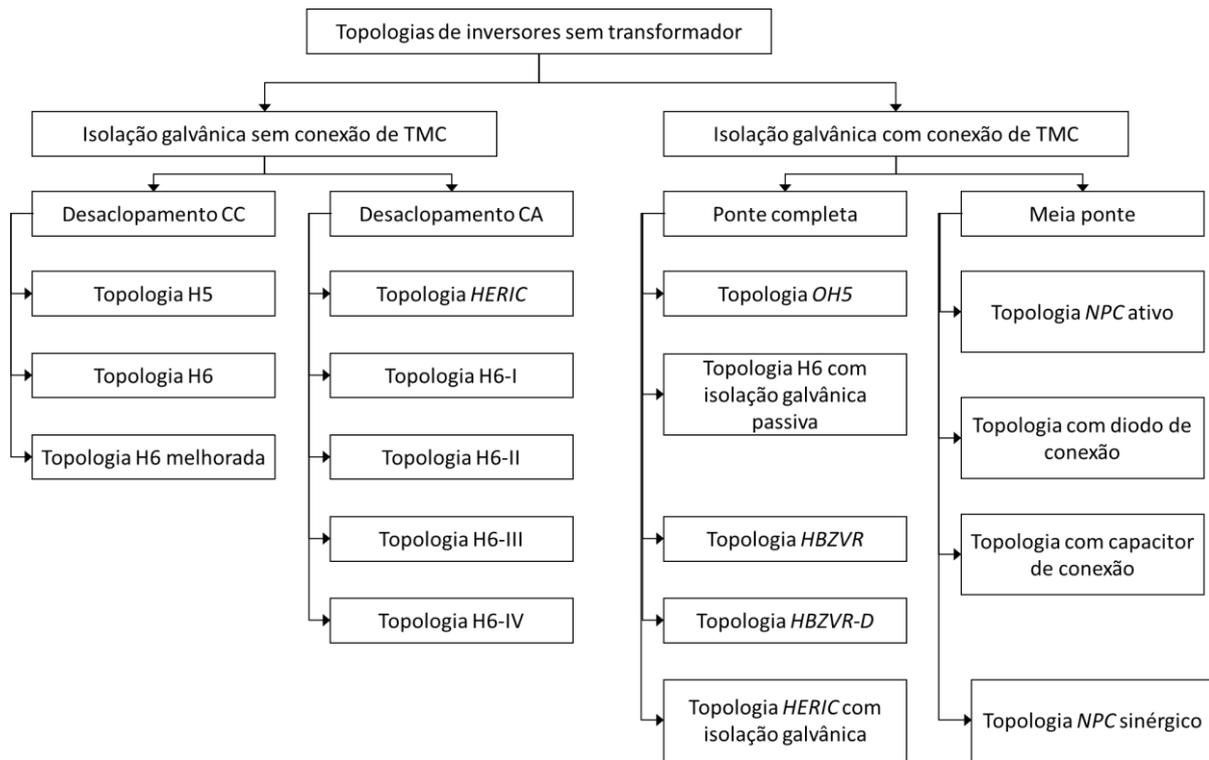


Figura 1-3 - Topologias de circuitos inversores para conexão entre barramentos em c.c. e em c.a. (Adaptado de Ahmad e Singh (2017)).

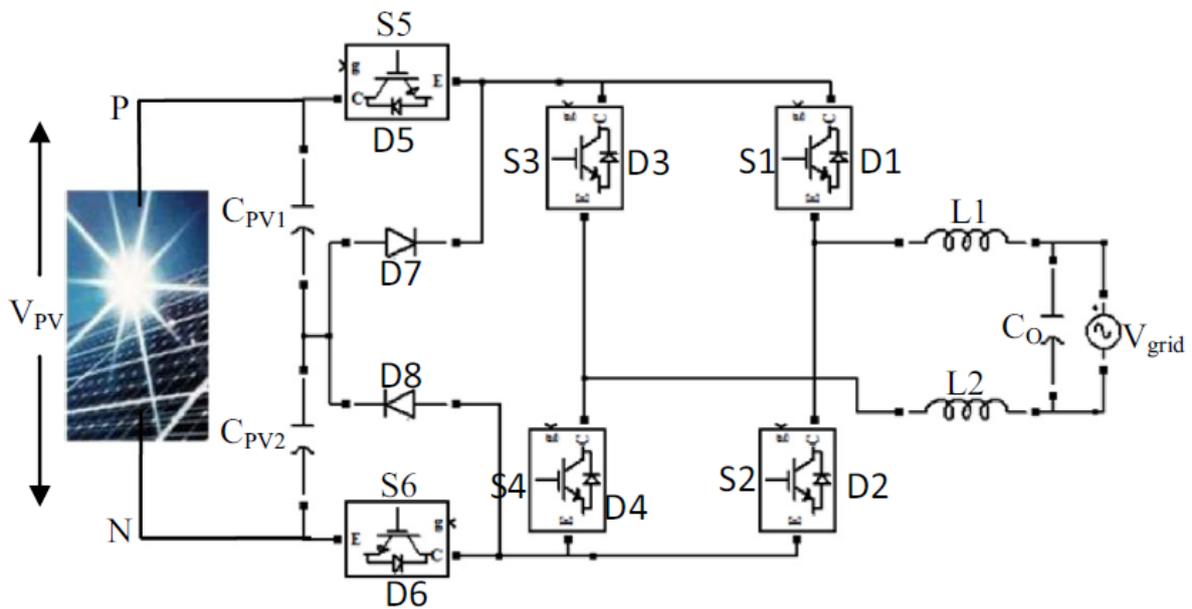
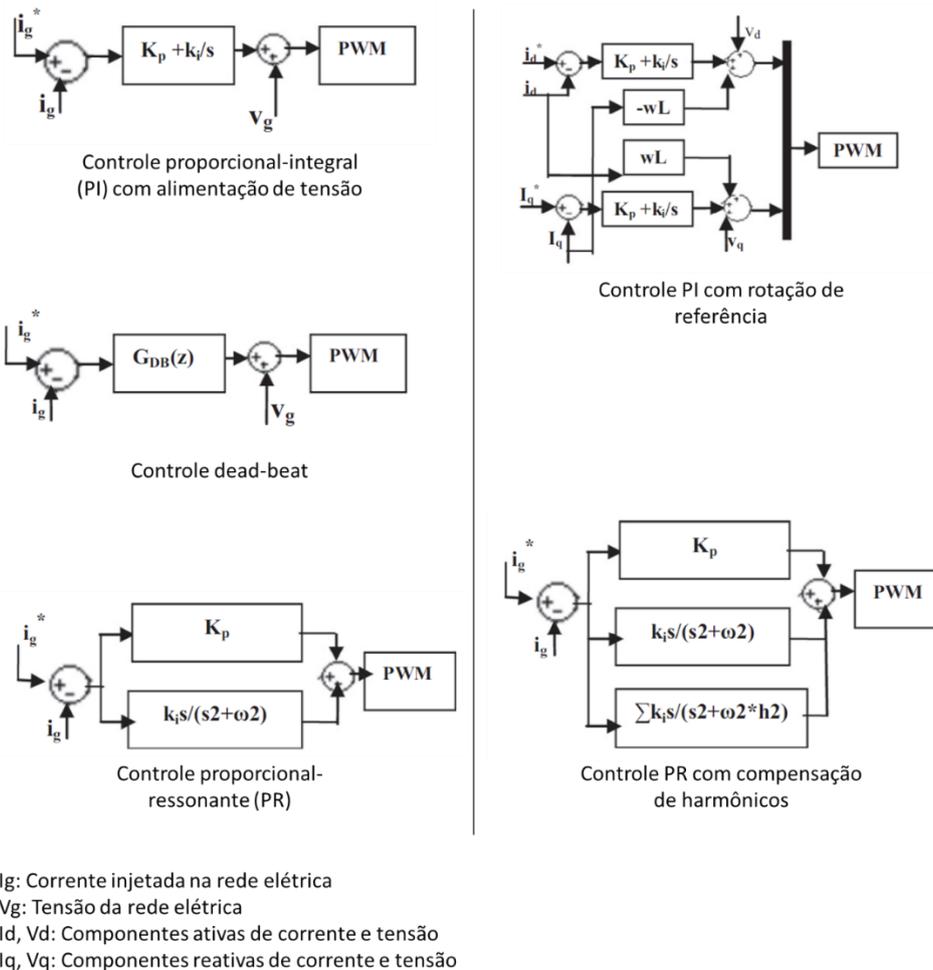


Figura 1-4 - Exemplo de circuito referente a topologia H6 com grampo passivo (Fonte: Ahmad e Singh (2017))



**Figura 1-5 - Modelos de controle para injeção de corrente em sincronia com barramento em c.a. (Adaptado de Ahmad e Singh (2017)).**

A avaliação da operação dos inversores, desenvolvida por Ahmad e Singh (2017), mostra que estes têm interações distintas com a rede caracterizando cada topologia ensaiada de acordo com parâmetros de qualidade de energia e eficiência de operação.

As topologias de circuito e rotinas de controle discutidas neste capítulo não esgotam todas as possibilidades para a implementação de inversores para SFCR. Porém, conforme visto, no âmbito da aplicação fotovoltaica, inversores possuem diferentes combinações de topologias de circuitos e rotinas de controle de barramentos, que possuem diferentes interações com a rede elétrica e com o arranjo de módulos fotovoltaicos.

Uma vez que este trabalho tem como foco as normas ABNT NBR 16150 e ABNT NBR IEC 62116, é necessário ressaltar que os textos das normas e da portaria INMETRO 357 não fazem referência direta à topologia do inversor a ser ensaiado. Ainda assim, fazem referência a topologias de inversores, por meio de figuras e descrição dos equipamentos de ensaio. A

Figura 1-6 mostra um exemplo da topologia de inversor a ser contemplado pelos ensaios, com múltiplos sistemas de SPMP e conexão com a rede elétrica.

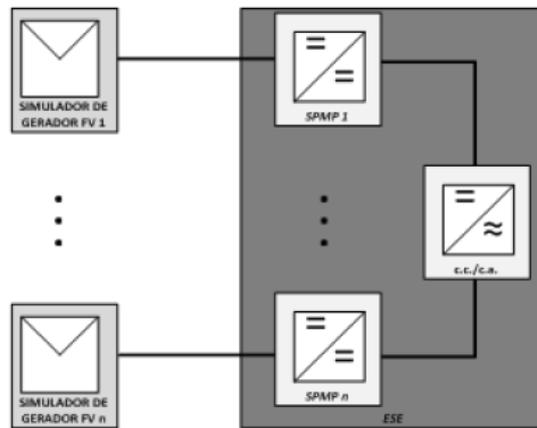


Figura 1-6 - Inversor com múltiplos SPMP (Fonte: INMETRO (2014)).

Assim como primeira recomendação deste trabalho, sugere-se a adequação do texto da portaria de forma a caracterizar o inversor fotovoltaico conforme as informações expostas neste capítulo, ou seja, um equipamento capaz de realizar a injeção de energia em um barramento em c.a. a partir de um ou mais barramentos em c.c. provenientes de arranjos fotovoltaicos

A partir da caracterização do inversor fotovoltaico realizada neste capítulo, o capítulo seguinte trará a análise das normas brasileiras que ditam os padrões e requisitos dos inversores para SFCR a serem comercializados no mercado brasileiro.

## 2. ANÁLISE DE NORMAS ABNT E PORTARIA 357

### 2.1. Normas ABNT

#### 2.1.1. ABNT NBR 16149

A norma ABNT NBR 16149 dispõe sobre as características de interface de conexão de sistemas fotovoltaicos com a rede elétrica de distribuição. Segundo esta norma, o fornecimento de energia pelo sistema fotovoltaico às cargas em corrente alternada locais e à rede elétrica é regido por práticas e normas referentes a tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência. O desvio dos padrões estabelecidos por norma caracteriza uma condição anormal de operação, cabendo ao sistema fotovoltaico a identificação de uma condição anormal e cessar o fornecimento à rede.

De forma, a caracterizar as condições anormais da rede e descrever o comportamento adequado ao sistema fotovoltaico frente à diversidade de contingências descritas, a norma ABNT NBR 16149 é sumarizada em 7 grandes itens, sendo estes:

1. Escopo
2. Referências normativas
3. Termos e definições
4. Compatibilidade com a rede
5. Segurança pessoal e proteção do sistema FV
6. Controle externo
7. Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede (*fault ride through – FRT*)

Os itens de 1 a 3 descrevem as bases gerais para aplicação da norma, cabe destacar as normas de referência do segundo item:

- IEC 60364-7-712, *Electrical installations of buildings – Part 7-712: Requirements for special installations or location – Solar photovoltaic (PV) power supply systems;*
- 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 connection;*

- 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 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.*

O terceiro item ainda destaca os seguintes termos utilizados pela norma:

- Fator de potência – FP
- Gerador fotovoltaico
- Interface de corrente contínua
- Distribuidora de energia
- Subsistema de monitoração e controle da desconexão por segurança
- Distorção harmônica total – THD
- Sistema FV – sistema fotovoltaico
- Inversor
- Inversor com função anti-ilhamento
- Ponto comum de conexão com a rede

O item “4 Compatibilidade com a rede” descreve em seus subitens os principais pontos em relação à qualidade da energia entregue pelo sistema fotovoltaico à rede elétrica, como cintilação, injeção de componente contínua, harmônicos e distorção na forma de onda, fator de potência e injeção ou demanda de potência reativa.

Os critérios estabelecidos para os limites de cintilação causada pelo sistema fotovoltaico são referenciados diretamente às normas IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-11 e IEC/TS 61000-3-5, tendo a aplicação destas normas conforme o valor de corrente de saída nominal do inversor.

Os critérios estabelecidos para injeção de componente contínua e distorção harmônica são descritos de forma sintética na Tabela 2-1.

**Tabela 2-1 - Critérios para componente contínua e harmônicos de corrente estabelecidos pela norma ABNT 16149**

Critério	Limite
Injeção de componente c.c. na rede elétrica *	< 0,5 %
Distorção harmônica total	< 5,0 %
Harmônicos ímpares - 3º a 9º	< 4,0 %
Harmônicos ímpares - 11º a 15º	< 2,0 %
Harmônicos ímpares - 17º a 21º	< 1,5 %
Harmônicos ímpares - 23º a 33º	< 0,6 %
Harmônicos pares - 2º a 8º	< 1,0 %
Harmônicos pares - 10º a 32º	< 0,8 %

\* Valor referente a corrente alternada nominal do sistema fotovoltaico, caso o valor exceda o limite, o sistema deve cessar o fornecimento de energia em até 1 s.  
 \*\* Valor referentes a distorção harmônica calculados sobre a componente fundamental.

Os critérios de fator de potência e injeção ou demanda de potência reativa são tratados em três grupos, de acordo com o nível de potência do sistema fotovoltaico. Porém, independentemente do grupo no qual o sistema fotovoltaico está inserido, os referidos critérios só são aplicáveis em situações onde a potência ativa injetada na rede é superior a 20 % da potência nominal do inversor.

Para o primeiro grupo, com potência nominal inferior ou igual a 3 kW, a norma exige a operação com fator de potência unitário dentro da tolerância de 0,98 indutivo a 0,98 capacitivo.

O segundo grupo, contendo inversores com potência nominal superior a 3 kW ou menor e igual a 6 kW, tem a necessidade de operação conforme o descrito para o primeiro grupo, porém adicionando a capacidade de operar com uma curva de controle do fator de potência configurável em função do carregamento do sistema. A Figura 2-1 mostra um exemplo da operação em curva do fator de potência para o segundo e terceiro grupos, onde dependendo do nível de carregamento do inversor o mesmo deve injetar potência a rede elétrica com um FP segundo os valores da curva. A Tabela 2-2 resume as variáveis necessárias para configuração da de FP. Cabe ressaltar que a operação em curva depende do valor de sobretensão da rede, ajustado em fábrica em 104 % da tensão nominal do sistema, e seu acionamento depende de um parâmetro de habilitação ou desabilitação. A operação em curva também deve cessar caso a tensão seja reduzida a níveis mais baixos de tensão da rede, com valor ajustado em fábrica em 100 % da tensão nominal do sistema.

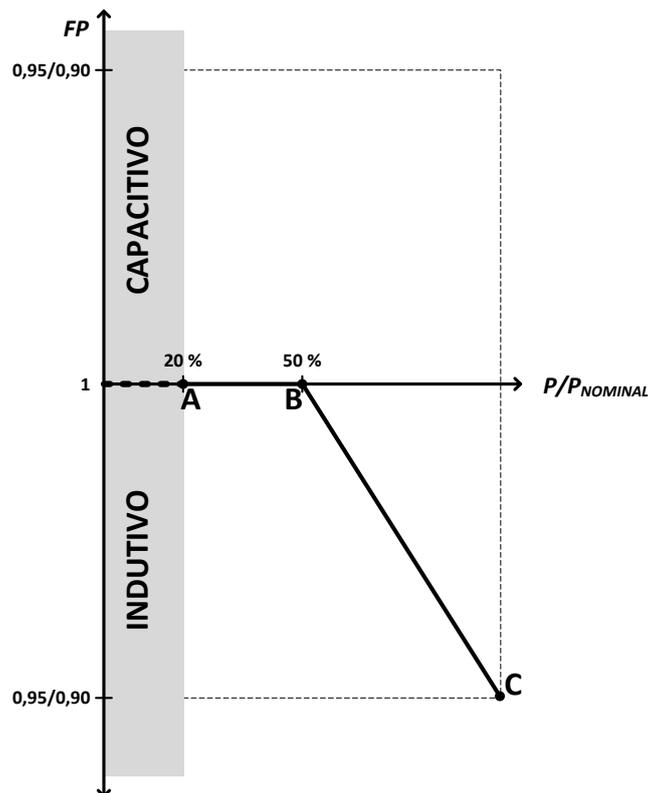


Figura 2-1 - Curva do FP em função da potência ativa de saída do inversor (Fonte: ABNT NBR 16149)

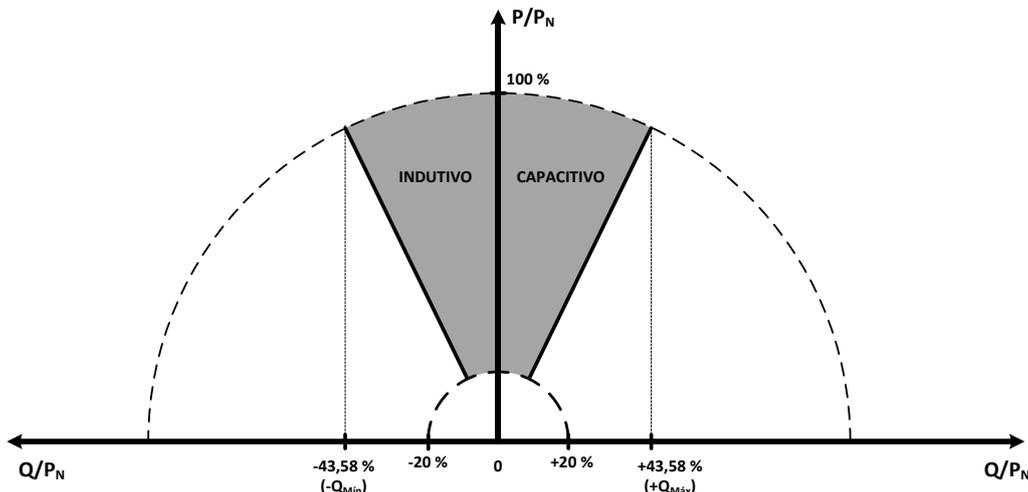
Tabela 2-2 - Variáveis de configuração da curva de FP do sistema fotovoltaico.

Critério	Limite	
	Curva de fator de potência habilitada	Verdadeiro / Falso
Tensão de ativação da curva (% da tensão nominal)	100 % ~ 110 %	
Tensão de desativação da curva (% da tensão nominal)	90 % ~ 100 %	
	% de Pnom*	FP
Nível de potência para início do controle (A)**	20 % ~ 100 %	1,00
Nível de potência para início da variação do fator de potência (B)**	20 % ~ 100 %	1,00
Nível de potência para fim da variação do fator de potência (C)**	20 % ~ 100 %	0,95 indutivo ~ 0,95 capacitivo

\* Pnom: potência nominal do sistema fotovoltaico  
 \*\* Pressupõe-se que os valores de potência estejam sempre na ordem crescente  $A \leq B \leq C$ .

O terceiro grupo, representado por inversores com potência nominal acima de 6 kW, possui a opção de operação de forma análoga aos sistemas do segundo grupo, com uma única diferença na faixa de operação do fator de potência (especificamente a variável “C” da Tabela

2-2) que deve ser capaz de assumir valores de fator de potência entre 0,90 indutivo e 0,90 capacitivo. Além da operação conforme a curva de fator de potência para os sistemas do segundo grupo, os sistemas do terceiro grupo têm a possibilidade de operar com o controle de reativos conforme a Figura 2-2. Para os sistemas do terceiro grupo ainda existe a recomendação da norma para operações por meio de potência reativa fixa ou controle externo.



**Figura 2-2 - Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência nominal superior a 6 kW (Fonte: ABNT NBR 16149)**

Terminadas as considerações da norma em relação à qualidade da energia entregue pelo sistema fotovoltaico à rede elétrica, o item subsequente, “5 Segurança pessoal e proteção do sistema FV”, trata, principalmente, das características do inversor em relação a análise da rede elétrica conectada e medidas de controle necessárias durante a ocorrência de operações anormais da rede. Neste item ainda constam os critérios relativos a aterramento, proteção contra curto-circuito, isolamento e seccionamento no ponto de conexão do sistema fotovoltaico com a rede elétrica, tendo como referência a norma IEC 60364-7-712.

Segundo a norma o inversor deve analisar a rede elétrica em dois aspectos, o nível de tensão da rede elétrica e a frequência da rede, e, constatada uma condição de operação anormal, atuar de forma a reduzir ou cessar a injeção de energia a rede.

A análise de tensão de rede pelo inversor tem como base a verificação do valor de tensão em relação a uma faixa de operação correspondente a 80 % e 110 % do valor da tensão nominal da rede elétrica. A condição de operação normal da rede é caracterizada por qualquer valor de tensão contido na referida faixa de tensão incluindo os valores limites. Como medida de controle relativa a constatação de operação anormal pelo valor de tensão da rede, a norma especifica a atuação do inversor no sentido de cessar a injeção de energia a rede elétrica.

Porém, dependendo do tipo de evento constatado pelo sistema fotovoltaico, o tempo necessário para o mesmo cessar o fornecimento de energia a rede varia. A Tabela 2-3 caracteriza, de forma resumida, os eventos, relativos a variação do valor de tensão da rede, que o inversor deve ser capaz de identificar e o tempo de atuação limite para o cessar de injeção de energia a rede.

**Tabela 2-3 - Eventos e tempo de atuação para condições anormais de operação da tensão da rede.**

Evento	Descrição	Tempo máximo para atuação (s)
Sobre tensão	O valor da tensão da rede elétrica é superior a 110 % do valor nominal	0,2
Sub tensão	O valor da tensão da rede elétrica é inferior a 80 % do valor nominal	0,4
Ilhamento	Perda de tensão na rede elétrica	2,0

Mesmo na ausência dos eventos da Tabela 2-3, durante as condições normais de operação, o inversor está sujeito ao deslocamento angular de fase da onda senoidal de tensão da rede elétrica. As normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150 tratam desta situação em conjunto. Assim, uma vez detectado um deslocamento angular abrupto da forma de onda de tensão o inversor deve suportar o descompasso de tensão e continuar o fornecimento de energia.

Ainda sobre a análise do nível de tensão da rede elétrica, o item “7 Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede (*fault ride through – FRT*)”, complementa a análise de tensão para um determinado grupo de sistemas fotovoltaicos, em relação ao evento de subtensão (Tabela 2-3), e será discorrido mais adiante neste capítulo.

Simultaneamente a análise da tensão da rede elétrica, o inversor deve ser capaz de realizar a análise da frequência de rede. A norma descreve dois modos de atuação do sistema no caso de operação anormal da rede em relação à frequência. O primeiro modo de atuação é reduzir a potência ativa injetada à rede, o segundo modo é cessar o fornecimento de energia à rede. A Tabela 2-4 mostra, de forma resumida, os eventos, relativos a variação de frequência e a atuação cabível ao sistema fotovoltaico.

**Tabela 2-4 - Eventos e forma de atuação para condições anormais de operação da frequência da rede.**

Evento	Descrição	Atuação
Sub frequência	A frequência da rede elétrica é inferior a 57,5 Hz	Cessar o fornecimento de energia a rede (tempo limite de atuação 0,2 s)
Sobre frequência - 1	A frequência da rede elétrica é superior a 60,5 Hz e inferior a 62,0 Hz	Reduzir a injeção de potência ativa em relação ao valor injetado em 60,5 Hz e proporcional ao valor de frequência registrado.
Sobre frequência - 2	A frequência da rede elétrica é superior a 62,0 Hz	Cessar o fornecimento de energia a rede (tempo limite de atuação 0,2 s)

Conforme a Tabela 2-4, para valores de frequência de rede fora da faixa de 57,5 Hz até 62,0 Hz, o inversor deve atuar em até 0,2 s cessando o fornecimento de energia a rede elétrica. Porém, para valores de frequência dentro da faixa de 60,5 Hz até 62,0 Hz, o sistema deve ser capaz de atuar de forma a reduzir a potência ativa injetada na rede.

A redução de potência ativa em sobrefrequência deve ser proporcional ao valor de potência injetada pelo sistema no instante em que a frequência de rede atinge o valor de 60,5 Hz. A partir deste valor de frequência, a redução da potência injetada pelo sistema deve obedecer a uma taxa proporcional de  $-40 \% P_{60,5}/\text{Hz}$ , em relação a diferença entre a sobrefrequência da rede e o valor de 60,5 Hz. Como requerimento adicional para este controle, o inversor não deve excursionar a potência injetada conforme a variação da frequência, mas sim, manter o menor valor de potência atingido devido ao maior nível de sobrefrequência detectado.

Além da análise e atuação pela detecção de condições anormais de operação, os inversores devem analisar a rede de forma a detectar o retorno às condições normais de operação da rede elétrica e novamente atuar de forma a reestabelecer o fornecimento de energia a plena carga.

Em sua maioria, as medidas de atuação do inversor devido à detecção de condições anormais de operação levam o inversor a cessar o fornecimento de energia à rede elétrica pelo sistema fotovoltaico, com exceção do controle de potência ativa em sobrefrequência.

Uma vez acionado o controle de potência ativa em sobrefrequência, o inversor deve manter o nível mais baixo de injeção de potência ativa devido ao maior nível de sobrefrequência detectado. Porém, uma vez detectado o retorno do valor da frequência a uma

faixa entre 59,95 Hz e 60,05 Hz por um período de 300 s, o sistema deve reestabelecer a injeção de potência ativa a plena carga gradualmente, com uma taxa de proporção de 20 %  $P_{60,5}/\text{min}$ . De forma análoga, caso o sistema cesse o fornecimento de energia devido a sobrefrequência, uma vez detectada a condição normal de operação, ele deve retomar a injeção de potência com a taxa de proporção referida.

Aos demais eventos, que levam ao cessar do fornecimento de energia pelo inversor, é estabelecido um intervalo de tempo igual ou superior a 20 s e igual ou inferior a 300 s para o reestabelecimento da injeção de potência a rede pelo inversor, uma vez detectadas as condições normais de operação da rede.

Definidos os critérios de qualidade de energia, análise de rede e atuação do inversor, o item da norma “6 Controle externo” trata dos critérios de controle por um operador remoto, que o inversor deve ser capaz de receber.

A norma estabelece três tipos de comando que o inversor deve receber de um operador remoto, sendo um comando “Desconexão/reconexão do sistema fotovoltaico da rede” aplicável a todos os sistemas e os demais comandos aplicáveis a sistemas com potência nominal superior a 6 kW. A Tabela 2-5 traz um resumo de cada comando, suas descrições, a potência de sistema aplicável e o tempo limite para atuação do inversor.

**Tabela 2-5 - Comandos externos necessários aos inversores.**

Comando	Descrição	Nível de potência dos sistemas aplicáveis	Tempo para atuação
Desconexão/reconexão do sistema fotovoltaico da rede	Ao receber o comando, o sistema deve se desconectar ou se conectar da rede elétrica.	Todos os níveis de potência	60 s
Limitação de potência ativa	Cria um valor limite para a potência ativa máxima que pode ser injetada na rede.	> 6 kW	60 s
Comando de potência reativa	Cria um valor fixo para a potência reativa a ser injetada na rede.	> 6 kW	10 s

Em relação aos comandos de potência ativa e reativa a norma ainda possui observações quanto ao modo como os valores de potência devem ser enviados ao inversor. Para ambos os casos, o valor de potência deve ser enviado em forma de porcentagem da potência nominal do sistema em passos não superiores a 10 %. O resultado após o envio destes comandos e a

atuação do inversor será o valor de potência requerido, com tolerância de  $\pm 2,5 \%$  da potência nominal do sistema.

Estabelecidos os critérios para o controle do inversor por operadores remotos, o último item da norma, “7 Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede (*fault ride through – FRT*)”, traz a complementação dos critérios de análise do nível de tensão da rede elétrica pelos sistema fotovoltaicos com potência nominal superior ou igual a 6 kW.

Conforme descrito anteriormente neste capítulo, o inversor deve identificar o evento em que o nível de tensão da rede elétrica é inferior a 80 % e cessar o fornecimento de energia em até 0,4 s. Ainda assim, é requerido aos sistemas com potência igual ou superior a 6 kW um período de tempo logo após a detecção do evento, em que o inversor pode cessar ou não o fornecimento de energia a rede. Caso o sistema cesse o fornecimento, uma vez retornadas as condições normais de operação dentro do período estabelecido, o inversor deve imediatamente retornar a injeção energia à rede, sendo este período referido neste texto como período de suportabilidade.

O tempo total para um período de suportabilidade, devido a um evento de subtensão, é definido pelo nível de subtensão detectado pelo inversor, a Tabela 2-6 descreve os níveis de sub tensões e os valores de tempo para os períodos de suportabilidade.

**Tabela 2-6 - Períodos de suportabilidade a sub tensões para inversores para SFCR.**

Faixa de tensão da rede	Período de suportabilidade
80 % a 40 % de $V_{nom}$	0,3 s
inferior a 40 % de $V_{nom}$	0,2 s

Após o período de suportabilidade, persistindo o evento de subtensão, qualquer atuação do inversor no sentido de reestabelecer o fornecimento de energia a rede deve seguir o intervalo de tempo de reestabelecimento do fornecimento, conforme a ser exposto pelo item 5 da norma, após verificadas as condições de operação normais da rede.

Considerando o período de suportabilidade descrito e o tempo máximo para atuação do inversor durante o evento de subtensão, três períodos distintos devem ser avaliados pelo inversor. Cada um destes períodos possui suas próprias considerações quanto à atuação do sistema em relação a cessar o fornecimento de energia a rede após a detecção do nível de subtensão. A Tabela 2-7 resume estas considerações pela ordem temporal a partir da detecção do evento de subtensão.

**Tabela 2-7 - Caracterização da análise do inversor para SFCR (> 6kW) em relação a um evento de subtensão.**

Valor de subtensão	Considerações	Período			
		0 ~ 0,2 s	0,2 ~ 0,3 s	0,3 ~ 0,4 s	após 0,4 s
80 % à 40 % de Vnom	Cessar o fornecimento de energia	Permitido	Permitido	Permitido	Necessário
	Tempo de reestabelecimento do fornecimento	Imediato	Imediato	de 20 a 300 s	de 20 a 300 s
inferior à 40 % de Vnom	Cessar o fornecimento de energia	Permitido	Permitido	Permitido	Necessário
	Tempo de reestabelecimento do fornecimento	Imediato	de 20 a 300 s	de 20 a 300 s	de 20 a 300 s

Com base na leitura e interpretação da norma ABNT 16149 analisadas neste item são expostas no Capítulo 4 sugestões de revisão de alguns pontos, de forma melhorar as condições de ensaio e critérios de avaliação.

#### 2.1.2. ABNT NBR 16150

A norma ABNT NBR 16150 trata dos procedimentos a serem adotados para a caracterização do inversor mediante as condições descritas no capítulo anterior. Nesta norma estão caracterizados os equipamentos necessários para o desenvolvimento dos testes de inversores, como simulador de arranjo fotovoltaico, simulador de rede elétrica, carga RLC, equipamentos de medição e exatidões associadas a estes.

De forma similar à norma ABNT NBR 16149, a 16150 está sumarizada em 6 grandes itens, conforme disposto:

1. Escopo;
2. Referências normativas;
3. Termos e definições;
4. Instrumentos de medição;
5. Requisitos para equipamentos;
6. Procedimento de ensaio.

Os três primeiros itens da norma descrevem as bases para sua aplicação, sendo necessário o destaque das normas de referência:

- ABNT NBR 16149, Sistemas fotovoltaicos (FV) – Característica da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição;
- ABNT NBR IEC 62116, Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica;
- 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 connection;*
- IEC 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 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 61000-4-7, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto;*
- IEC 62109-1, *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems – Part 1: General requirements;*
- IEC 62109-2, *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems - Part 2: Particular requirements for inverters.*

Adicionalmente os termos de referência tratados pelo terceiro grande item da norma são destacados da mesma forma:

- Fator de potência – FP;
- Gerador fotovoltaico;
- Ponto de máxima potência;
- Fator de forma – FF;
- Distorção harmônica total – THD;
- Inversor;
- Seguimento do ponto de máxima potência – SPMP;

- Equipamento sob ensaio – ESE.

O item “4 Instrumentos de medição” descreve as exatidões necessárias aos equipamentos de medição para aferição de formas de onda, tensão, frequência, corrente, potência, qualidade de energia e tempo de reconexão, a Tabela 2-8, resume os valores de exatidão das grandezas de medição para os ensaios.

**Tabela 2-8 - Exatidões especificadas pela ABNT 16150 para medições realizadas nos ensaios.**

Tipo de medição	Parâmetro	Exatidão
Forma de onda	Taxa de amostragem	10 kHz
	Tensão	1 % Vnom
	Corrente	1 % Inom
Valor eficaz	Tensão	0,2 % Vnom
	Corrente	1 % Inom
	Frequência	0,01 Hz
	Potência	0,5 % Pnom
	Fator de potência	0,5 %
	Componente contínua de corrente	0,5 %
	Harmônicos de corrente*	5 % Imd ou 0,15 % Inom
	Ângulo de fase da tensão	1°
Reconexão	Tempo	1 s

Vnom, Inom, Pnom: Tensão, corrente e potência nominais do inversor

Imd: Corrente medida

Vfe, Ife, Pfe: Tensão, corrente e potência do fundo de escala do equipamento de medição

\* As condições de exatidão de harmônicas de corrente estão relacionadas ao valor medido para cada harmônico em relação ao valor 3 % da corrente nominal; a exatidão atribuída depende do valor medido estar acima ou abaixo deste valor de referência.

De forma semelhante ao item 4, o item “5 Requisitos para equipamentos”, especifica as características dos simuladores de rede c.a. e gerador fotovoltaico. Os requisitos destes equipamentos estão resumidos na Tabela 2-9 e na Tabela 2-10, respectivamente.

**Tabela 2-9 - Requisitos do simulador de rede c.a. pela norma ABNT NBR 16150.**

Item	Especificação
Tempo de variação de frequência e tensão	16 ms
Deslocamentos de fase de tensão	90° e 180°
Passo de tensão	0,4 % Vnom
THD de tensão	2,5 %
Passo de frequência	0,1 Hz
Erro de defasagem	± 1,5°

Vnom: Tensão nominal do ensaio

Tabela 2-10 - Requisitos do simulador de gerador fotovoltaico pela norma ABNT NBR 16150.

Item	Especificação
Potência de saída	Suficiente para permitir a entrega de 100% da potência de saída do inversor e outros níveis especificados pelas condições de ensaio.
Velocidade de resposta	Devido a uma variação de 5% de potência, causada por um degrau de tensão, a acomodação da corrente dentro do valor de 10 % do valor de final deve ser realizada em até 1 ms.
Estabilidade	A potência de saída deve permanecer dentro de 1% do nível especificado durante o ensaio, desconsiderando o efeito de SPMP.
Fator de forma	de 0,25 a 0,80

O último item da norma ABNT NBR 16150, “6 Procedimento de ensaio”, descreve os passos na operação dos equipamentos de laboratório para avaliação dos aspectos de interface do inversor com a rede elétrica dispostos pela norma ABNT NBR 16149.

O primeiro procedimento tratado pela 16150, corresponde a avaliação do efeito de cintilação que pode ser causado pela injeção de energia do inversor fotovoltaico na rede elétrica. O procedimento de avaliação do efeito de cintilação é realizado observando-se a flutuação de tensão causada pela operação do inversor no ponto de conexão do equipamento com a fonte em ensaio, conforme o exemplo da Figura 2-3, e a partir destas observações são calculados os valores de mérito de cintilação de curta duração e cintilação de longa duração ( $P_{st}$  e  $P_{lt}$ ), sendo necessário ao inversor obter valores inferiores a 1,0 e 0,65 para cada parâmetro, respectivamente. Os parâmetros  $P_{st}$  e  $P_{lt}$  são calculados a partir dos valores de variação de tensão relativa estacionária ( $d_c$ ), variação de tensão relativa máxima ( $d_{max}$ ) e variação de tensão característica ( $d(t)$ ). As normas IEC trazem adendos específicos para a condição de operação de diversos tipos de equipamentos para a avaliação de cintilação, porém, não há especificações para avaliação de inversores para conexão com a rede elétrica.

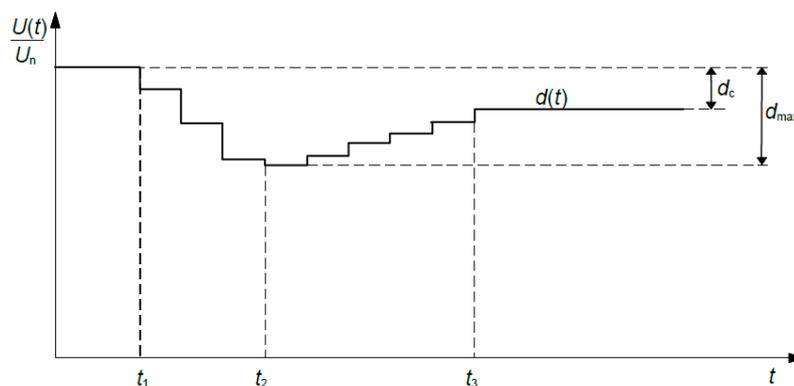


Figura 2-3 - Característica de variação da tensão (Fonte: IEC (2013))

Em sequência ao procedimento para avaliação do efeito de cintilação, são tratados os procedimentos para avaliação da injeção de componente de corrente contínua, harmônicos e distorção de forma de onda, fator de potência, fator de potência com curva do FP e injeção/demanda de potência reativa. Estes procedimentos são, essencialmente, idênticos entre si, e consistem em configurar os níveis de fornecimento de potência pelo simulador fotovoltaico de forma a permitir ao inversor o fornecimento dos níveis de potência de saída avaliados pelo ensaio, conectar os equipamentos do ensaio, variar dos níveis de potência do simulador fotovoltaico e registrar os parâmetros avaliados para cada teste.

Embora o procedimento descrito acima seja a base destes ensaios é necessário destacar as diferenças de procedimento entre cada um.

Primeiramente, o procedimento para avaliação de injeção de componente c.c. requer “deslocar a corrente de saída” de forma a alterar o nível de injeção de componente contínua injetada pelo equipamento a rede elétrica. Desta forma, uma vez configurados os níveis de potência em cada passo do ensaio, é necessário alterar a corrente entregue pelo inversor a rede elétrica e verificar se há a ocorrência de desconexão do inversor da rede elétrica, e se a desconexão ocorre em um período de, no máximo, um segundo.

O procedimento para avaliação dos níveis de harmônicos entregues à rede elétrica possui uma peculiaridade que não existe nos procedimentos dos demais ensaios contemplados pela norma ABNT NBR 16150. Este procedimento requer que o operador configure o simulador fotovoltaico de forma que o nível de tensão entregue ao inversor seja um valor correspondente ao menor valor da faixa de tensão de seguimento do ponto de máxima potência do inversor.

Os demais procedimentos, referentes a avaliação de fator de potência e de potência reativa, requerem, além do procedimento geral descrito anteriormente, a configuração prévia do inversor para operar de acordo com os níveis de fator de potência e de reativos esperado para cada ensaio. No caso do procedimento para avaliação de curva de fator de potência, também é necessária a configuração do simulador de rede c.a. para elevar a tensão de rede a um valor acima da tensão de ativação da curva.

As avaliações de fator de potência têm uma tolerância de  $\pm 0,025$  sobre o valor medido para adequação aos valores tratados pela norma ABNT NBR 16149 e as avaliações de injeção

ou demanda de reativos tem uma tolerância de  $\pm 2,5\%$  em relação a potência nominal do inversor.

Após os procedimentos para avaliação de fator de potência e injeção ou demanda de reativos, a norma dispõe sobre os ensaios de variação de tensão e de variação de frequência. De forma similar ao agrupamento dos procedimentos descritos anteriormente, estes dois procedimentos, possuem sequências de passos que podem ser resumidos conforme a Figura 2-4, que descrevem a avaliação do comportamento do inversor frente a sobretensões, subtensões, sobrefrequências e subfrequências.

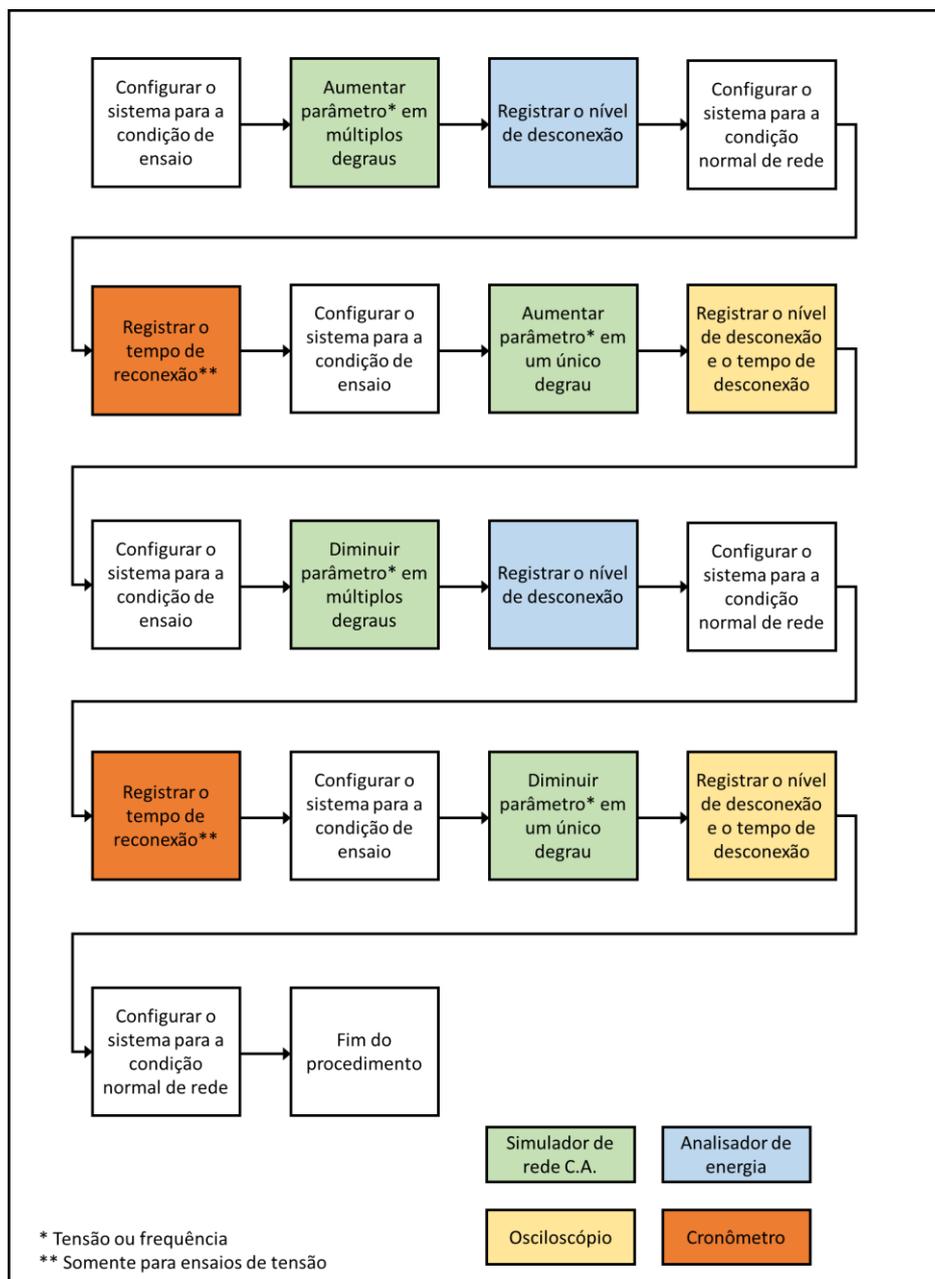


Figura 2-4 - Fluxograma dos procedimentos de variação de tensão e frequência.

Como complementação da informação contida na Figura 2-4, a Tabela 2-11, descreve os valores associados pela norma para realização dos procedimentos e avaliação dos resultados.

**Tabela 2-11 - Valores de configuração para os procedimentos de variação de tensão e frequência.**

Procedimento	Condição inicial de ensaio			Degrau	Tolerância para critério de conformidade**
	Potência de saída do inversor	Tensão de rede	Frequência de rede		
Sobretensão - Tensão de desconexão	100 % Pnom	108 % Vnom	60 Hz	0,4 % Vnom	+2 % Vnom
Sobretensão - Tempo de desconexão	100 % Pnom	Vdso - 2 V	60 Hz	Valor livre*	+2 %
Subtensão - Tensão de desconexão	100 % Pnom	88 % Vnom	60 Hz	0,4 % Vnom	±2 % Vnom
Subtensão - Tempo de desconexão	100 % Pnom	110 % Vdsu	60 Hz	Valor livre*	±2 %
Sobrefrequência - Frequência de desconexão	100 % Pnom	100 % Vnom	60 Hz	0,1 Hz	0,1 Hz
Sobrefrequência - Tempo de desconexão	100 % Pnom	100 % Vnom	60 Hz	Valor livre*	±2 %
Subfrequência - Frequência de desconexão	100 % Pnom	100 % Vnom	58 Hz	0,1 Hz	0,1 Hz
Subfrequência - Tempo de desconexão	100 % Pnom	100 % Vnom	60 Hz	Valor livre*	±2 %

Vnom, Pnom: Tensão e potência nominal do ensaio

Vdso, Vdsu: Tensões de desconexão por sobre e sub tensão

\* Valor que ultrapasse o valor de desconexão medido no procedimento anterior

\*\* Tolerância em relação aos valores estabelecidos na norma ABNT NBR 16149

Ainda em relação a Figura 2-4, após o retorno as condições normais de operação da rede, durante os ensaios de variação de tensão, são realizadas as medições do tempo necessário para que o inversor retorne a injetar energia na rede elétrica, estes valores deverão estar em conformidade com o estabelecido pela norma ABNT NBR 16149 para os valores de tempo de reconexão do inversor.

Conforme descrito pela norma ABNT NBR 16149, em uma situação de sobrefrequência, o inversor deve controlar a potência injetada na rede elétrica. Desta forma, após a descrição dos procedimentos para ensaios de variação de tensão e frequência na rede, a norma ABNT NBR 16150 descreve o procedimento para avaliação do controle de potência ativa em sobrefrequência.

O procedimento para avaliação do controle de potência consiste em alterar a frequência da rede elétrica em degraus, medir e registrar os valores de potência entregues pelo inversor a rede elétrica. Uma vez passados todos os degraus de sobrefrequência que o inversor deve suportar sem se desconectar, é realizada a redução de frequência de forma a avaliar as condições de reestabelecimento da entrega de potência do inversor em conformidade com os

critérios estabelecidos pela norma ABNT 16149. Os degraus de redução de frequência são seguidos por períodos de avaliação, com medições a cada 30 segundos de forma a garantir a avaliação do reestabelecimento. A Tabela 2-12 resume os degraus de frequência utilizados no ensaio e os valores esperados.

**Tabela 2-12 - Passos de frequência para avaliação do controle de potência em sobrefrequência.**

Degrau do ensaio	Frequência	Potência de saída do inversor	Período mínimo de medição
1	60,0 Hz	100% ou 50% Pnom	Medição única
2	60,2 Hz	100% ou 50% Pnom	Medição única
3	60,5 Hz	100% ou 50% Pnom	Medição única
4	61,0 Hz	80% ou 40% Pnom	Medição única
5	61,5 Hz	60% ou 30% Pnom	Medição única
6	61,9 Hz	44% ou 22% Pnom	Medição única
7	60,2 Hz	44% ou 22% Pnom	330 s
8	60,0 Hz	100% ou 50% Pnom	540 s*

Pnom: Potência nominal do ensaio

\* Valor mínimo necessário com base nas condições de gradiente de potência e tempo de verificação das condições de rede.

O procedimento de controle de potência é aplicado para a potência nominal de saída do inversor e para metade da potência nominal de saída. Os valores de potência registrados devem estar dentro do limite de tolerância de  $\pm 2,5 \%$  em relação a potência nominal do inversor.

Após a caracterização dos procedimentos para ensaios de variação de tensão e frequência, a norma trata dos ensaios de tempo de reconexão e religamento automático fora de fase. O procedimento para avaliação do tempo de reconexão é descrito conforme mencionado nos parágrafos referentes aos ensaios de variação de frequência. Assim, o procedimento para avaliação da resposta do inversor frente a deslocamentos de  $90^\circ$  e  $180^\circ$  na fase da tensão de rede consiste em manter as condições padrão do simulador fotovoltaico e simulador de rede c.a., simular dois deslocamentos de fase e medir e registrar a corrente entregue pelo inversor a rede elétrica.

Os procedimentos seguintes ao procedimento de religamento automático fora de fase correspondem aos ensaios de limitação de potência ativa, comando de potência reativa e desconexão e reconexão do inversor da rede, nesta ordem. Este grupo de três ensaios dependem da interface de comunicação entre o inversor e um sistema de envio de comandos remotos, que deve ser fornecido junto com inversor pelo fabricante.

O procedimento de limitação de potência consiste em configurar os simuladores do sistema de forma a manter o inversor operando em sua potência nominal e aplicar uma sequência de comandos que reduzam em 10% da potência de saída a potência injetada pelo inversor a rede. A cada comando são registrados o tempo de acomodação da nova potência de saída e o valor da potência injetada.

Semelhante ao procedimento de limitação de potência, o procedimento de comando de potência reativa consiste em configurar os simuladores do sistema de forma a manter o inversor operando em 50% de sua potência nominal, e enviar três comandos, de forma a variar a potência reativa entregue pelo inversor em indutiva, nula e capacitiva, com valores iguais a 43,58 % da potência ativa nominal do inversor. Semelhante ao procedimento anterior, a cada comando são registrados o tempo de acomodação da nova potência de saída e o valor da potência reativa injetada.

Os procedimentos de limitação de potência ativa e comando de potência ativa, semelhante ao ensaio de controle de potência, colocam como critério de conformidade a necessidade de os valores registrados estarem dentro do limite de tolerância de  $\pm 2,5 \%$  em relação a potência nominal do inversor

O terceiro procedimento, desconexão e reconexão do inversor, consiste em configurar os simuladores do sistema de forma a manter o inversor operando em sua potência nominal e aplicar uma sequência de comandos que realize a desconexão e reconexão do inversor da rede elétrica. A cada comando são registrados o tempo de acomodação da nova potência de saída e o valor da potência reativa injetada.

O último procedimento descrito pela norma ABNT NBR 16150 remete à avaliação dos requisitos de suportabilidade a subtensões decorrente a faltas na rede. Este procedimento impõe ao inversor quatro situações de afundamento de tensão, resumidas na Tabela 2-13.

**Tabela 2-13 - Situações de faltas da rede simuladas para avaliação de suportabilidade do inversor.**

Tipo de falta	Afundamento de tensão	Duração
Trifásica simétrica	5 % Vnom	190 ms
Trifásica simétrica	45 % Vnom	290 ms
Bifásica assimétrica	5 % Vnom	190 ms
Bifásica assimétrica	45 % Vnom	290 ms

Vnom: Tensão nominal do ensaio

Desta forma o procedimento consiste em configurar os simuladores do sistema de forma a manter o inversor em sua condição nominal de operação, e enviar uma sequência de comandos ao simulador de rede c.a. simulando as condições resumidas na Tabela 2-13. Após cada comando são registradas tensões, correntes e potências ativa e reativa para cada fase.

A análise e interpretação da norma ABNT NBR 16150 e de seus procedimentos, realizadas neste item, são a base dos apontamentos realizados no capítulo 4 deste trabalho.

### 2.1.3. ABNT NBR IEC 62116

A norma ABNT NBR IEC 62116 é uma tradução da norma IEC de mesma numeração. O texto da norma descreve as características e procedimentos para o teste da função de anti-ilhamento, necessária a todos os inversores conectados à rede elétrica. Na norma são descritos padrões de tempo de desconexão assim como situações de consumo de carga para verificar se existe o equilíbrio entre carga e geração para a ocorrência de uma situação de funcionamento ilhado do sistema na eventual queda da rede elétrica.

De forma similar as normas ABNT NBR 16149 e 16150, a norma ABNT NBR IEC 62116 está sumarizada em 7 grandes itens, conforme disposto:

1. Escopo e objetivo;
2. Referências normativas;
3. Termos e definições;
4. Circuito de ensaio;
5. Equipamentos de ensaio;
6. Ensaio de inversor monofásico ou polifásico;
7. Documentação.

A norma ainda conta com uma seção de anexos informativos com os seguintes tópicos:

- Anexo A. Ilhamento em sistemas FV;
- Anexo B. Ensaio para dispositivo externo de detecção de ilhamento (relé);
- Anexo C. Sinal de bloqueio da alimentação.

Os três primeiros itens da norma descrevem as bases para sua aplicação, sendo necessário o destaque das normas de referência:

- IEC 61727, *Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface*;
- IEC/TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems - Terms, definitions and symbols*.

Adicionalmente os termos de referência tratados pelo terceiro grande item da norma são destacados da mesma forma:

- Simulador de gerador FV;
- ESE (equipamento sob ensaio);
- SPMP (seguimento do ponto de máxima potência);
- Inversor com função anti-ilhamento;
- Ilha;
- Ilha intencional;
- Fator de qualidade,  $Q_f$ ;
- Tempo de permanência da alimentação,  $t_R$ ;
- Sinal de interrupção;
- Ilha não intencional.

O quarto item da norma dispõe sobre o circuito de ensaio e as variáveis a serem medidas, o circuito é composto pela associação de uma fonte de alimentação c.c., inversor, osciloscópio, carga c.a. e fonte de alimentação c.a., ao todo são 20 variáveis necessárias para registrar as condições do fluxo de energia no barramento de corrente contínua na entrada do inversor, no barramento de corrente alternada na saída do inversor e no barramento de conexão com a rede elétrica alternada. Destaca-se entre o barramento na saída do inversor e o barramento de conexão com a rede a presença do ramal de ligação com a carga c.a., o que permite manipular o fluxo de potência de forma a gerar as condições de ilhamento, que serão descritas nos próximos itens da norma.

Item “5 Equipamentos de ensaio”, de forma similar ao quinto item da norma ABNT NBR 16150, descreve as especificações dos equipamentos que compõem o ensaio, considerando os instrumentos de medição.

O primeiro tópico abordado por este item são as características necessárias aos instrumentos de medição do ensaio:

- Registro de forma de onda de todas as fases do circuito;
- Registro de tensão e corrente de forma a determinar fluxos de potência ativa e reativa, na frequência fundamental de ensaio;
- Taxa de amostragem de 10 kHz;
- Precisão de 1 % da tensão e corrente nominais de saída do inversor.

Em sequência são descritos os tipos de fonte de alimentação c.c. permitidos para a realização do ensaio e suas características principais. A norma considera como fonte de alimentação c.c.:

- Simulador de gerador FV: Consiste em uma fonte c.c. capaz de simular tensão, corrente e tempo de resposta de um gerador fotovoltaico;
- Fonte de alimentação c.c., com limitação de tensão e corrente, com resistência em série: Consiste em uma fonte c.c. capaz de limitar tensão e corrente em conjuntos com uma resistência em série e uma resistência paralela (opcional) que seja capaz de simular a tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito e o fator de forma necessários ao ensaio;
- Gerador FV: Consiste em uma associação de módulos fotovoltaicos capaz de fornecer a máxima potência do inversor nas tensões máximas e mínimas operacionais de entrada.

Em relação às características do simulador fotovoltaico e fonte de alimentação c.c. com resistências conectadas, são definidas especificações, semelhantes as contidas na Tabela 2-10, porém com uma alteração do valor de estabilidade de potência de 2 % em relação ao nível de potência de ensaio. O gerador FV por sua vez possui restrições quanto ao seu uso, conforme descrito a seguir:

- A potência de saída do gerador FV não deve variar mais do que 2 % durante o ensaio;
- Devem ser medidas e registradas as condições climáticas durante o ensaio (irradiância, temperatura, etc.)

Os dois últimos equipamentos especificados neste item da norma são a fonte de alimentação c.a. e as cargas c.a.. As especificações da fonte em corrente alternada, são descritas na Tabela 2-14.

**Tabela 2-14 - Requisitos do simulador de rede c.a. pela norma ABNT NBR IEC 62116.**

Item	Especificação
Tensão	$V_{nom} \pm 2 \%$
THD de tensão	$< 2,5 \%$
Frequência	$F_{nom} \pm 0,1 \text{ Hz}$
Defasagem	$120,0^\circ \pm 1,5^\circ$

*V<sub>nom</sub>, F<sub>nom</sub>: Tensão e frequência nominal do ensaio*

As cargas c.a. são especificadas como um banco de elementos resistivos, indutivos e capacitivos que apresentem as características contidas na Tabela 2-15.

**Tabela 2-15 - Especificações para os elementos a compor a carga CA.**

Elemento	Especificação
Resistivo	Não indutivo
	Pouca variação por efeito térmico
Indutivo	Baixas perdas
	THD de corrente inferior a 2 %
Capacitivo	Baixa resistência série
	Baixa indutância

A norma ainda traz a possibilidade de utilização de cargas eletrônicas no ensaio, mediante a comprovação de que o seu uso não trará resultados diferentes dos obtidos com o uso dos elementos caracterizados na Tabela 2-15.

O sexto item da norma trata dos procedimentos para avaliação da proteção contra situações de ilhamento, a que o inversor pode estar sujeito durante sua operação. Os procedimentos tratados neste item referem-se tanto a inversores monofásicos ou polifásicos ligados em 50 Hz ou 60 Hz.

Antes de iniciar a descrição dos passos do ensaio o texto da norma faz um comentário sobre as condições de operação do inversor para o ensaio, ao todo são descritas três condições de operação, definidas como “A”, “B” e “C”, onde são considerados os parâmetros de potência de saída, tensão de entrada e ajustes de desligamento do inversor. O comentário também discorre sobre as variações que podem ocorrer no tempo de desconexão do inversor em situação de ilhamento, devido aos ajustes de desconexão por variações de tensão e frequência, sendo sugeridos pela norma o tempo de desconexão em 2 segundos para valores de tensão  $\pm 15 \%$  em relação ao valor nominal da tensão de rede, e tempo de desconexão de 1 segundo em relação a valores de frequência  $\pm 1,5 \text{ Hz}$  em relação ao valor nominal de frequência da rede.

Após as considerações sobre as condições de operação durante o ensaio, são descritos os passos para realização do mesmo. De forma resumida são oito passos desde a conexão do inversor até a última medição, porém cada passo tem sua própria rotina de ajustes no sistema de forma a criar todas as condições de ensaio.

Os três primeiros passos do ensaio referem-se à obtenção dos valores base de potência ativa e reativa para referência das condições de ensaio, são descritas as ordens nos ajustes na fonte de alimentação c.c. e no inversor para medição e registro destes valores. Em nota, o segundo passo refere a obtenção dos níveis de potência das condições “A” e “B” por meio de ajuste da fonte de alimentação c.c., e a obtenção do nível de potência da condição “C” por meio do controle do próprio inversor para limitação de potência de saída, se houver este tipo de controle.

O quarto passo refere-se ao ajuste do parâmetro  $Q_f$  e das potências reativas indutivas e capacitivas do ensaio ( $Q_L$  e  $Q_C$ ). É definido um valor para  $Q_f = 1,0 \pm 0,05$  com base em um estudo realizado no Japão (não são feitas demais considerações em relação a este estudo), a partir deste valor são definidos os valores de  $Q_L$  e  $Q_C$  de forma a compensar a energia reativa entregue pelo inversor a rede. Também é feita a referência ao uso da componente resistiva do banco de cargas de forma a dissipar toda a potência ativa entregue pelo inversor.

Os passos cinco e seis descrevem as conexões do sistema de forma a obter o ponto de equilíbrio, onde a corrente fundamental (em 50 Hz ou 60 Hz) entregue a rede é menor do que 1 % da corrente nominal do inversor, e o procedimento de abertura da conexão com a rede elétrica e medição do tempo de desconexão do sistema.

O oitavo passo faz referência aos pontos de fluxo de potência fora do ponto de equilíbrio na condição “A” de operação do inversor. Primeiramente são colocados cinco pontos onde a composição do par de fluxo de potência ativa e reativa fluindo para rede varia em valores de 0 % e  $\pm 5$  % (excluindo o par 0;0), os valores percentuais são referentes aos valores obtidos no segundo passo. No caso de em algum ponto o tempo de desconexão do inversor for superior ao limite da norma, são adicionados 16 novos pontos de ensaio, onde os pares de potência são compostos por valores de 0 %,  $\pm 5$  % e  $\pm 10$  % (excluindo os pontos já apresentados anteriormente). A Tabela 2-16 resume a composição de pontos de desequilíbrio para ensaio na condição “A”.

**Tabela 2-16 - Pontos de desequilíbrio de carga para a condição "A" de ensaio.**

Variação em % das cargas ativa e reativa com relação ao valor nominal				
- 10, + 10	- 5, + 10	0, + 10	+ 5, + 10	+ 10, + 10
- 10, + 5	- 5, + 5	0, + 5	+ 5, + 5	+ 10, + 5
- 10, 0	- 5, 0		+ 5, 0	+ 10, 0
- 10, - 5	- 5, - 5	0, - 5	+ 5, - 5	+ 10, - 5
- 10, - 10	- 5, - 10	0, - 10	+ 5, - 10	+ 10, - 10

O nono passo do procedimento faz referência aos pontos de desequilíbrio nas condições “B” e “C”. São definidos dez pontos de fluxo de potência para cada condição, onde o fluxo de potência ativa para a rede é mantido em 0 % e a partir do ponto de equilíbrio a potência reativa varia em 1 % entre os valores de  $\pm 5$  % da potência reativa atribuída no segundo passo. A Tabela 2-17 resume a composição de pontos de desequilíbrio para ensaio nas condições “B” e “C”.

**Tabela 2-17 - Pontos de desequilíbrio de carga para as condições "B" e "C" de ensaio.**

<b>Variação em % nas cargas ativa e reativa com relação ao valor nominal</b>
0, - 5
0, - 4
0, - 3
0, - 2
0, - 1
0, 1
0, 2
0, 3
0, 4
0, 5

Desconsiderando a possibilidade de uma não conformidade no tempo de desconexão para o primeiro grupo de pontos da condição “A”. No total a norma requer a simulação de 31 pontos de fluxo de potência para avaliação da proteção do inversor contra a situação de ilhamento. Considerando uma não conformidade em algum dos pontos do primeiro grupo da condição “A”, são adicionados 16 novos pontos, com uma soma total de 47 situações as serem simuladas durante o ensaio.

O sexto item da norma termina com as considerações a respeito do critério de aprovação do ensaio. Segundo este critério o inversor é considerado em conformidade se o tempo de permanência de alimentação para cada ponto for inferior a 2 segundos ou respeita os requisitos locais.

O item “7 Documentação” apresenta os dados a serem apresentados após a realização do ensaio e detalha, por meio de tabelas, exemplos de apresentação destes dados, sendo três as principais tabelas apresentadas:

- Especificações do inversor;
- Lista de condições ensaiadas e tempo de permanência da alimentação;
- Especificações dos equipamentos de ensaio.

Além destes tópicos a norma recomenda a apresentação do diagrama de blocos do circuito de ensaio, qualquer detalhe de configuração do procedimento de ensaio julgado necessário e a especificação do critério de aprovação.

A norma termina com três anexos, conforme especificado anteriormente, de caráter informativo.

O “anexo A” discorre sobre a situação de ilhamento que pode ocorrer durante a operação de um sistema fotovoltaico. No texto são abordadas as principais razões para a perda de rede, os problemas ocasionados por uma operação em ilha do sistema e algumas considerações a respeito da detecção da situação de ilhamento. No texto também existe um item dedicado ao impacto da distorção total da demanda no ilhamento, sendo este um índice de mérito discutido pela norma IEE 519-1992.

O “anexo B” faz considerações a respeito do uso de um sistema de proteção contra ilhamento externo ao inversor. Desta forma são descritos adendos aos itens da norma referentes a:

- Circuito de ensaio;
- Equipamentos de ensaio;
- Fonte de entrada c.a.;
- Procedimento de ensaio;
- Documentação.

O “anexo C” por sua vez faz considerações ao sinal de bloqueio da alimentação que pode ser fornecido pelo inversor. A principal consideração sobre este sinal é a de que embora seja um sinal de controle do equipamento para coordenação de suas proteções, este sinal não corresponde exatamente com o instante em que o inversor cessa o fornecimento de energia à rede. Desta forma é preferível o monitoramento da corrente de saída do inversor para avaliar o evento de interrupção do fornecimento de energia a rede.

## **2.2. Portaria INMETRO 357 de 01 de agosto de 2014**

A Portaria INMETRO 357 de 01 de agosto de 2014 foi desenvolvida para adequar o texto da Portaria nº 004/2011 de forma a contemplar os requisitos de avaliação da conformidade para inversores para sistemas conectados à rede com potência nominal de até 10 kW.

Visando a caracterização dos ensaios a serem desenvolvidos no laboratório de forma adequada a regulamentação do INMETRO para inversores conectados a rede, são destacados quatro artigos do texto da portaria descritos a seguir.

### **2.2.1. Portaria 357: Art. 4º**

O artigo quatro da portaria 357 estabelece que, a partir da publicação da mesma, inversores para sistemas conectados à rede com potência nominal de até 10 kW serão contemplados pelos requisitos de avaliação da conformidade para etiquetagem junto ao INMETRO.

### **2.2.2. Portaria 357: Art. 7º**

O artigo sete da portaria 357 inclui uma segunda parte ao texto do “ANEXO III” da Portaria nº 004/2011, descrevendo as normas e procedimentos para etiquetagem de inversores c.c./c.a. para SFCR.

O texto da segunda parte do “ANEXO III” inicia trazendo a relação dos ensaios a serem realizados para etiquetagem de inversores conectados à rede, a Tabela 2-18 expõe estes ensaios com a numeração conforme o texto do anexo e, com base na descrição dos itens das normas ABNT NBR 16149, ABNT 16150 e ABNT NBR IEC 62116, faz a relação entre os ensaios estabelecidos, os itens de cada norma referentes a cada ensaio e a potência de inversor ao qual o ensaio é aplicável.

**Tabela 2-18 - Relação entre ensaios da Portaria 357, itens das normas ABNT e inversores aplicáveis.**

Número	Teste	Item ABNT NBR 16149	Item ABNT NBR 16150	Item ABNT NBR IEC 62116	Portaria 357 - ANEXO III	Inversor aplicável
1	Cintilação	4.3	6.1	---	---	Todos
2	Injeção de componente continua	4.4	6.2	---	---	Todos
3	Harmônicos e distorção de forma de onda	4.6	6.3	---	---	Todos
4	Fator de potência	4.7 - 4.7.1	6.4 - 6.4.1	---	---	Todos
5	Injeção/ demanda de potência reativa	4.7 - 4.7.2	6.4 - 6.4.2	---	---	3 kW < P <sub>nom</sub> ≤ 6kW
		4.7 - 4.7.2 - 4.7 - 4.7.3	6.4 - 6.4.2 - 6.5	---	---	P <sub>nom</sub> > 6kW
6	Sobre/ sub tensão	5.2 - 5.2.1	6.6 - 6.6.1 - 6.6.2 - 6.6.3 - 6.6.4	---	---	Todos
7	Sobre/ sub frequência	5.2 - 5.2.2	6.7 - 6.7.1 - 6.7.2 - 6.7.3 - 6.7.4	---	---	Todos
8	Controle da potência ativa em sobrefrequência	5.2 - 5.2.2	6.8	---	---	Todos
9	Reconexão	5.4	6.9	---	---	Todos
10	Religamento automático fora de fase	5.8	6.10	---	---	Todos
11	Modulação de potência ativa	6 - 6.1	6.11	---	---	P <sub>nom</sub> > 6kW
12	Modulação de potência reativa	6 - 6.2	6.12	---	---	P <sub>nom</sub> > 6kW
13	Desconexão do sistema fotovoltaico da rede	6 - 6.3	6.13	---	---	Todos
14	Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede	7	6.14	---	---	P <sub>nom</sub> ≥ 6 kW
15	Proteção contra inversão de polaridade	---	---	---	Procedimentos de Ensaio 15	Todos
16	Sobrecarga	---	---	---	Procedimentos de Ensaio 16	Todos
17	Anti-ilhamento	---	---	6 - 6.1 - 6.2	---	Todos

P<sub>nom</sub>: potência nominal do inversor

O texto do anexo faz referência aos ensaios de números 1 a 14 e de número 17 as normas descritas nos itens 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3, os ensaios de números 15 e 16 tem sua caracterização

e procedimentos descritos pelo texto do “ANEXO III”. Assim, de forma análoga as normas ABNT descritas anteriormente, a segunda parte do “ANEXO III” da portaria 357 é dividida em seis grandes itens, sendo estes:

- I - Amostragem;
- II - Instrumentos de medida;
- III - Aparelhos e componentes;
- IV - Configuração dos dispositivos para ensaio;
- V - Definições;
- Procedimentos de ensaio. (Item não numerado)

Os quatro primeiros itens descrevem as condições gerais para a realização dos ensaios 15 e 16. Desta forma, para a realização destes ensaios o texto requer dois inversores (amostras) de mesmo modelo e os seguintes instrumentos de medida e equipamentos:

- Voltímetro;
- Amperímetro;
- Osciloscópio;
- Analisador de energia;
- Termômetro;
- Simulador de gerador fotovoltaico;
- Simulador de rede c.a..

As características dos cinco primeiros equipamentos listados são mostradas na Tabela 2-19. O simulador de gerador fotovoltaico tem sua especificação idêntica a norma ABNT NBR 16150, conforme descrito na Tabela 2-10. A especificação do simulador de fonte c.a. também ocorre de forma similar a especificação feita pela norma ABNT NBR 16150 e pode ser vista na Tabela 2-20.

Tabela 2-19 - Especificações dos instrumentos de medição segundo o ANEXO III da portaria 357.

Instrumento de medição	Exatidão
Voltímetro	$\leq 0,5 \%$
Amperímetro	$\leq 1,0 \%$
Analísador de energia	0,1 % Pmd + 0,1 % Pfe Energia melhor ou igual à precisão de potência + 0,1 % da leitura de tempo
Termômetro	$\leq 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Pmd: Potência medida  
Pfe: Potência do fundo de escala

Tabela 2-20 - Especificações do simulador de rede c.a. segundo o ANEXO III da portaria 357.

Item	Especificação
Passo de tensão	0,1 V
THD de tensão	$< 2,5 \%$
Passo de frequência	0,1 Hz
Erro de defasagem	$\pm 1,5^\circ$

A configuração dos equipamentos para a realização dos ensaios pode ser vista na Figura 2-5. O texto da portaria também destaca as seguintes definições:

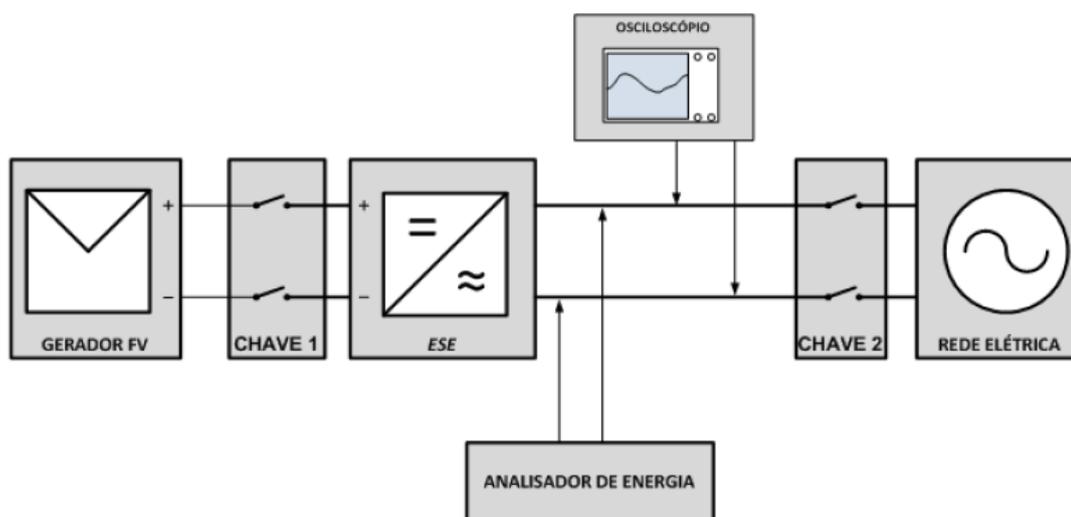


Figura 2-5 - Configuração dos equipamentos para os ensaios 15 e 16 (Fonte: INMETRO (2014))

- Ponto de máxima potência  $P_{MP}$ ;
- Fator de forma FF;
- Seguimento do ponto de máxima potência SPMP.

Terminadas as descrições bases para a realização dos ensaios 15 e 16 o anexo passa ao procedimento para a realização do ensaio de número 15.

O procedimento para o ensaio 15 consiste em configurar os simuladores do sistema de forma a manter o inversor em sua condição nominal de operação, porém com a conexão do barramento c.c. em inversão de polaridade. Após cinco minutos em operação com o barramento invertido, o sistema é desligado e o barramento c.c. reconfigurado para a polaridade correta de conexão com o inversor, o sistema então é religado. Se após cinco minutos de operação for constatada a operação correta do inversor, por meio de avaliação do fluxo de potência para a rede e inspeção visual do equipamento, o mesmo está em conformidade com a portaria.

O procedimento para o ensaio 16 consiste em configurar os simuladores do sistema de forma a fornecer ao inversor 120 % de sua potência nominal e manter o sistema operando nesta condição por 15 minutos. Após esse intervalo a potência do simulador fotovoltaico é reduzida de forma que o inversor opere em sua condição nominal de operação. Se após cinco minutos de operação for constatada a operação correta do inversor, por meio de avaliação do fluxo de potência para a rede e inspeção visual do equipamento, o mesmo está em conformidade com a portaria.

### 2.2.3. Portaria 357: Art. 9º

O artigo nove da portaria 357 estabelece os dados necessários para identificação do inversor, que devem constar na embalagem e no corpo do produto. Os itens necessários aos inversores para conexão à rede são:

- Inversor c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos de conexão à rede;
- Modelo e código;
- Número de série;
- Tensão c.c. Máxima;
- Faixa de Operação do Seguimento do Ponto de Máxima Potência;
- Corrente c.c. Máxima;
- Potência c.a. Nominal;
- Tensão c.a. Nominal;
- Frequência Nominal;
- Corrente c.a. Máxima
- Grau de Proteção (IP).

#### 2.2.4. Portaria 357: Art. 10º

O artigo dez da portaria 357 estabelece a planilha de especificações técnicas para cadastro dos inversores no PBE e ensaio destes.

A leitura da documentação pertinente ao PBE permite desenvolver os próximos capítulos deste trabalho, com a apresentação dos equipamentos da bancada de ensaio em inversores para SFCR, resultados dos ensaios realizados no LSF e comentários acerca destes e dos documentos discutidos neste capítulo.

### **3. EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO E ARRANJO DA BANCADA DE ENSAIOS**

Este capítulo lista os principais equipamentos do LSF para a realização dos ensaios em inversores conectados à rede, sendo levantadas as principais características de cada equipamento.

O LSF dispõe de equipamentos adequados ao ensaio de inversores monofásicos de potência nominal até 10 kW, sendo estes:

- Simulador de arranjos fotovoltaicos;
- Simulador de rede c.a.;
- Banco de cargas RLC;
- Osciloscópio;
- Analisador de energia.

Estes equipamentos são conectados entre si, em conjunto com o inversor a ser ensaiado, de forma a constituir a bancada de ensaios de inversor para SFCR do LSF. A Figura 3-1 mostra o esquema de ligação dos equipamentos da bancada.

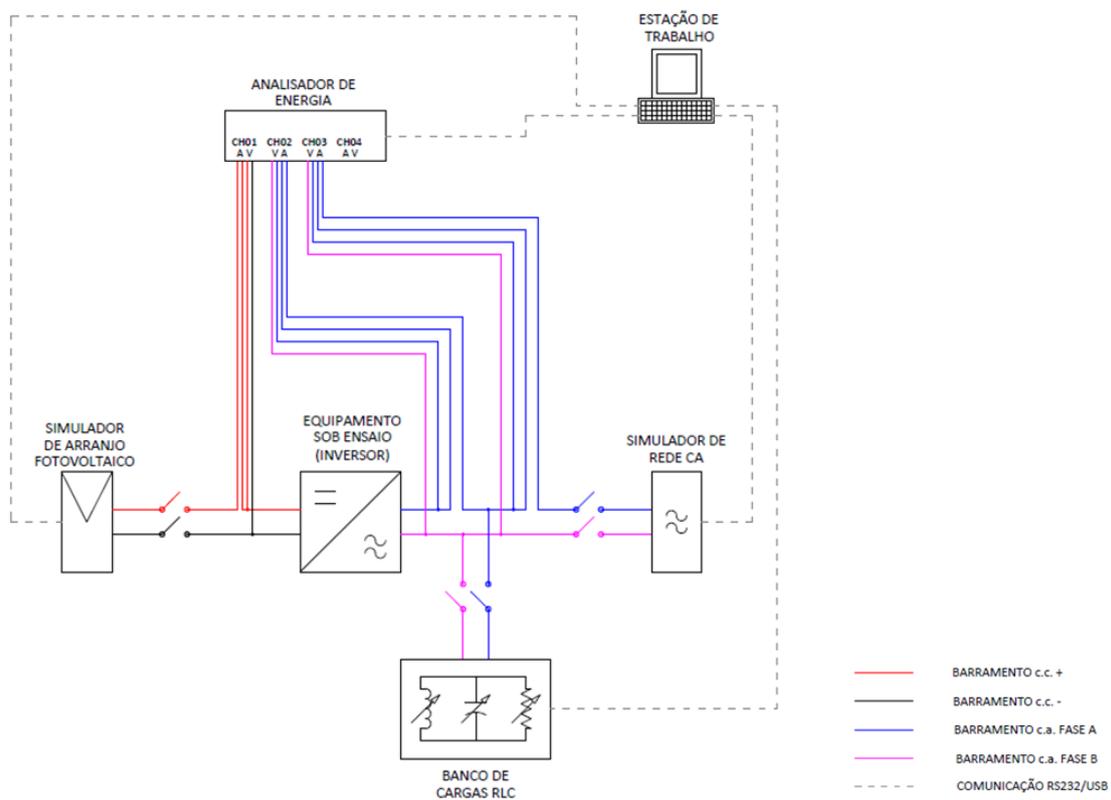


Figura 3-1 - Esquema de ligação dos equipamentos da bancada para ensaio de inversores para SFCR.

### 3.1. Simulador de arranjos fotovoltaicos

O LSF utiliza uma fonte c.c. da marca Regatron capaz de simular arranjos fotovoltaicos de acordo com as especificações do usuário. A Figura 3-2 mostra a fonte utilizada no LSF e a Tabela 3-1 traz as suas características elétricas.



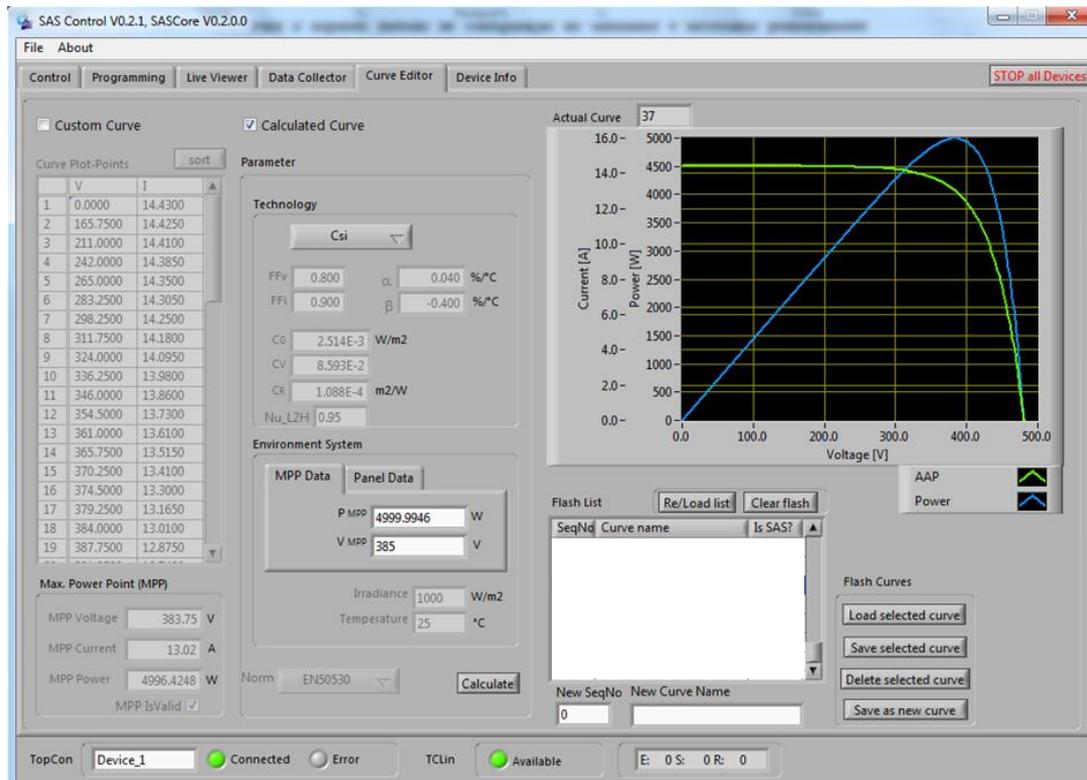
Figura 3-2 - Fonte c.c. para simulação de arranjos fotovoltaicos da marca Regatron.

Tabela 3-1 - Características elétricas: Fonte Regatron

Entrada	
Tensão nominal (Vac)	400 V 3Ø
Corrente nominal (Iac)	32 A
Frequência	60 Hz
Corrente de curto-circuito	10 kA
Saída	
Potência nominal (Pcc)	16 kW
Tensão máxima (Vcc)	1000 V
Corrente máxima (Icc)	20 A

Pelos dados da Tabela 3-1 verifica-se que a fonte tem capacidade para simulação de um arranjo de módulos fotovoltaicos de no máximo 16 kWp. Porém uma análise da forma de onda da corrente entregue pela fonte acima de 18 A mostra oscilações de cerca de 0,5 A entorno do valor desejado. Assim durante as simulações de arranjos fotovoltaicos realizadas no laboratório foi possível obter arranjos com correntes de curto-circuito abaixo de 18 A de

até 10 kWp. A Figura 3-3 traz o painel de configuração de arranjo fotovoltaico pelo *software* de controle da fonte.



**Figura 3-3 - Painel de configuração de arranjo fotovoltaico pela fonte c.c. utilizada no LSF.**

O *software* permite ao usuário duas maneiras para configurar o arranjo de módulos a ser simulado pela fonte. O primeiro método é a inserção de uma lista de pares de tensão e corrente para serem simulados pela fonte, o segundo método é o cálculo de uma curva pelo próprio software a partir da especificação dos parâmetros do arranjo desejado.

Para o segundo método de configuração do simulador é necessário primeiramente especificar o tipo de tecnologia do arranjo a ser simulado, filme fino ou silício cristalino, ou caracterizar os parâmetros da tecnologia, como coeficientes de perdas por temperatura e outros. Após a especificação dos parâmetros da tecnologia do arranjo são especificados dois parâmetros de operação do arranjo, máxima potência e a tensão de máxima potência do arranjo ou a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito do arranjo.

A partir da curva configurada é possível enviar comandos para a fonte de forma a simular alterações de irradiância e temperatura do arranjo simulado. A Figura 3-4 mostra o painel de envio de comandos do software de controle da fonte.

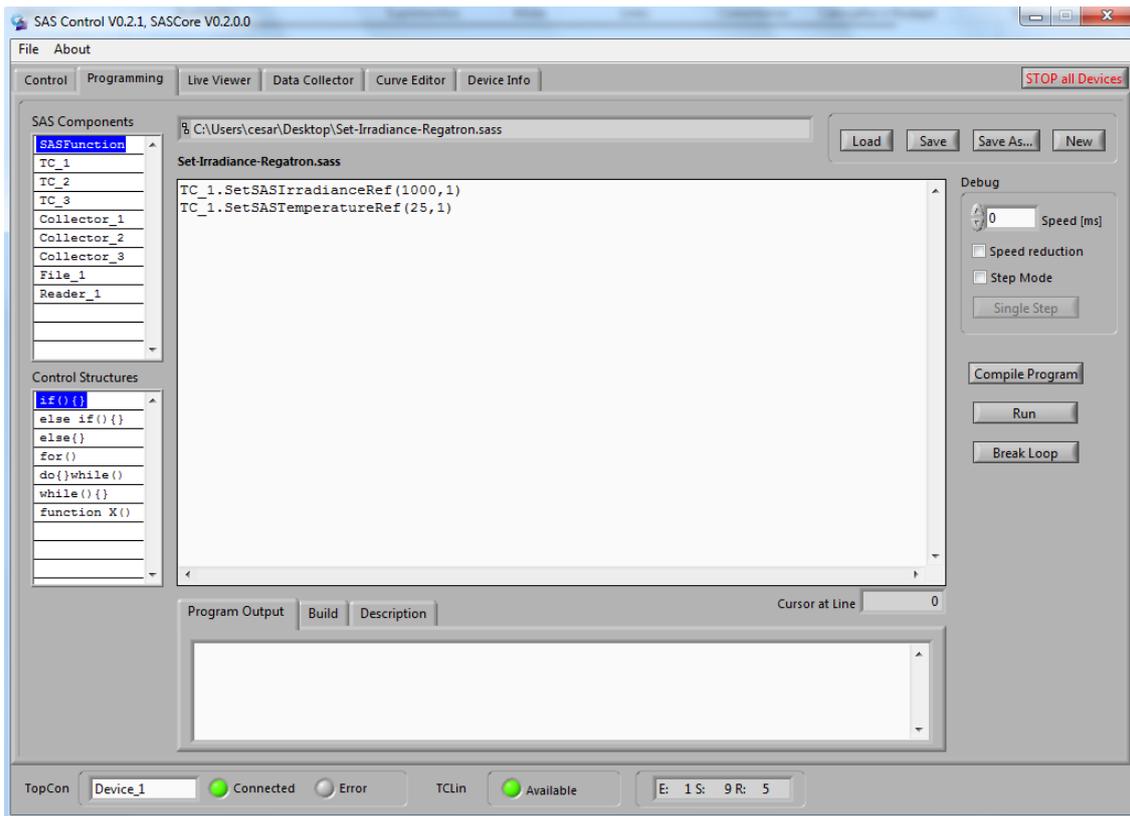


Figura 3-4 - Painel de comandos da fonte c.c. utilizada no LSF.

A fonte Regatron ainda possui uma biblioteca para programação em linguagem LabVIEW, a Figura 3-5 mostra um exemplo de rotina para envio de um novo valor de irradiância para simulação do arranjo fotovoltaico configurado, que foi implementado aos ensaios do LSF.

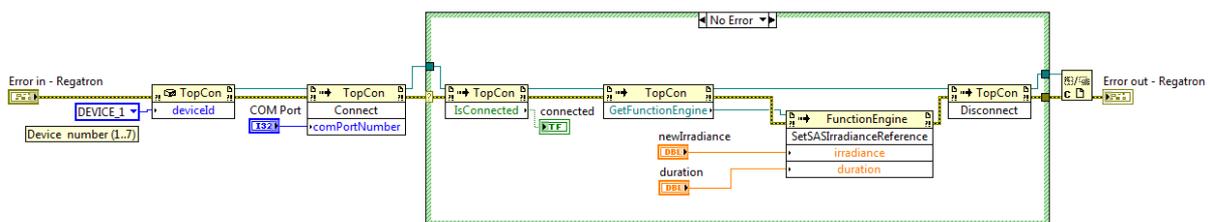


Figura 3-5 - Rotina em LabVIEW para envio de valores de irradiância de simulação da fonte Regatron.

### 3.2. Simulador de rede c.a.

Os ensaios realizados em inversores da SFCR, em sua maioria, tratam das interações entre o inversor e a rede elétrica de distribuição. Assim de forma a avaliar as situações de

interação com a rede, como variações de tensão e frequência, e injeção de energia pelo inversor é necessária uma fonte de quatro quadrantes capaz de simular uma rede elétrica c.a. e, desta forma, injetar e receber potência ativa e reativa e simular situações de rede de acordo com a necessidade de ensaio. No LSF é utilizada uma fonte c.a. simuladora de rede monofásica da marca Supplier, conforme visto na Figura 3-6. A Tabela 3-2 traz as características elétricas da fonte c.a. utilizada no LSF.



**Figura 3-6 - Fonte c.a. para simulação de rede elétrica da marca Supplier.**

**Tabela 3-2 - Características elétricas: Fonte Supplier**

Entrada	
Tensão nominal ( $V_{in}$ )	220 V
Frequência ( $f_{in}$ )	50/60 Hz
Saida	
Tensão de operação ( $V_{out}$ )	0-330 V
Corrente máxima ( $I_{out}$ )	68 A
Potência máxima ( $P_{out}$ )	15 kVA
Frequência ( $f_{out}$ )	15-150 Hz



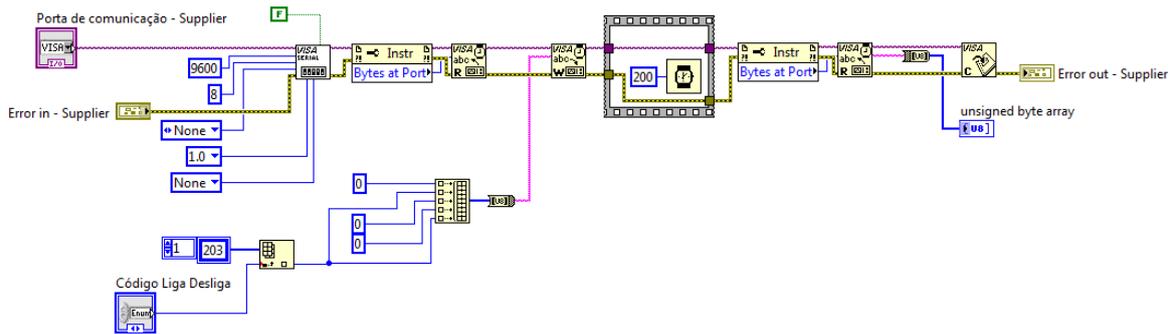


Figura 3-8 - Rotina em LabVIEW para envio do comando iniciar geração da fonte Supplier.

### 3.3. Banco de cargas RLC

Nos ensaios de proteção contra a situação de operação em ilhamento do inversor é necessário que toda a energia fornecida pelo inversor seja consumida no ponto de conexão com a rede elétrica. Para isto é recomendado pela norma ABNT NBR/IEC 62116 o uso de um banco de cargas resistiva, indutiva e capacitiva (RLC) de forma a consumir a energia gerada pelo inversor no ponto de conexão com a rede.

O LSF utiliza em seus ensaios o banco de cargas RLC monofásico da marca Parwa para criar a situação de operação em ilhamento necessária aos ensaios da norma ABNT NBR/IEC 62116. O painel frontal do banco de cargas pode ser visto na Figura 3-9. A Tabela 3-3 descreve as características elétricas principais do banco RLC.



**Figura 3-9 - Banco de cargas RLC da marca Parwa**

**Tabela 3-3 - Características elétricas: Carga RLC Parwa**

Entrada	
Tensão de entrada	220 V
Frequência	60 Hz
Potência ativa	10 kW
Potência reativa capacitiva	10 kVAr
Potência reativa indutiva	10 kVAr

A operação do banco pode ser realizada de duas formas, a primeira pelo painel frontal do banco, a segunda por meio do software de controle do banco conforme visto na Figura 3-10.

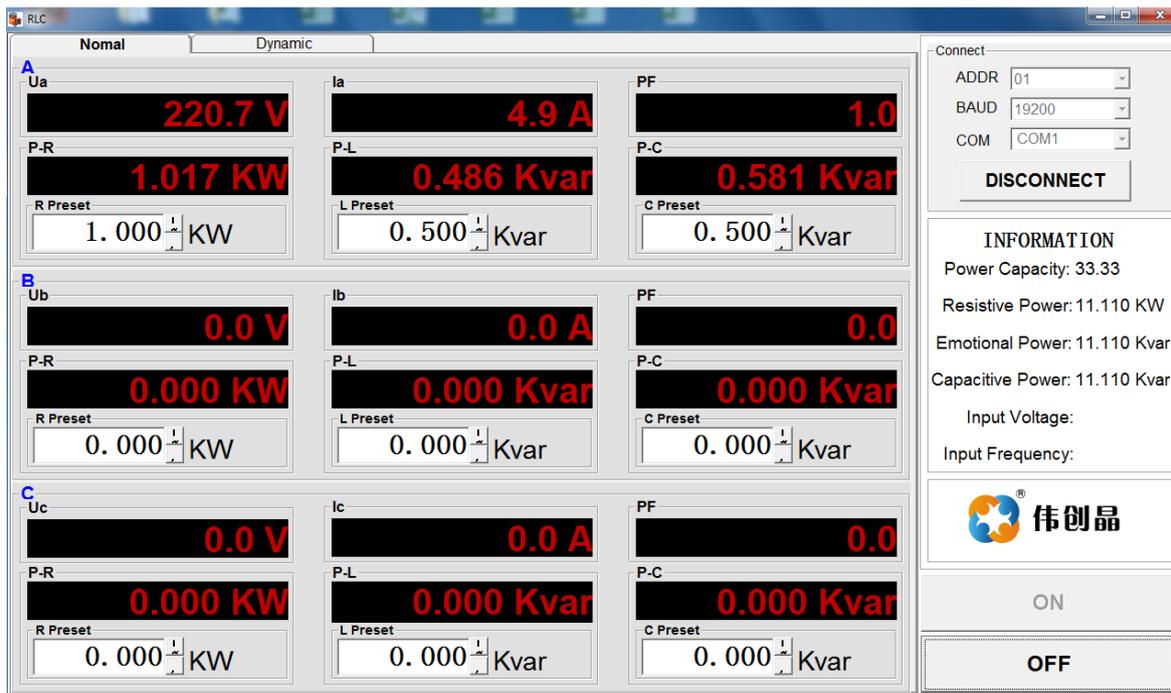


Figura 3-10 - Painel de configuração do banco de cargas RLC utilizado no LSF.

### 3.4. Osciloscópio

O LSF possui um osciloscópio da marca Agilent modelo DSO7014B para avaliação de formas de onda dos ensaios realizados em inversores para SFCR. Este modelo apresenta modos de gatilho que permitem a detecção de efeitos de variação de tensão, frequência e degrau de fase da tensão, sendo um equipamento aplicado a ensaios que requerem a avaliação da resposta do inversor frente a estas situações de rede.

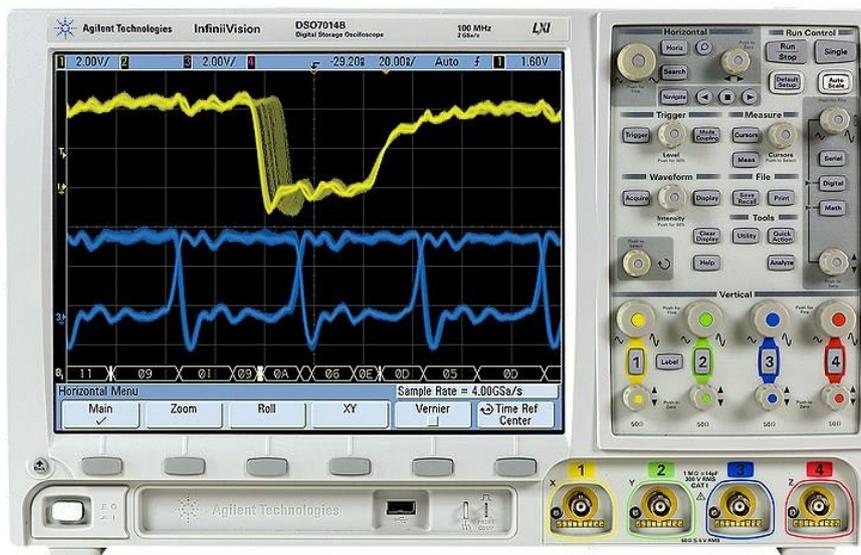


Figura 3-11 - Vista frontal do osciloscópio Agilent DSO7014B

O osciloscópio possui envio de dados de formas de onda em formato de imagens ou planilha de dados para manipulação por software.

### 3.5. Analisador de Energia Yokogawa

O principal equipamento de medição utilizado nos ensaios em inversores para SFCR é o analisador de energia, equipamento capaz de realizar a leitura de tensão, corrente, potência e índices de mérito de qualidade de energia. O LSF adquiriu um analisador de energia da marca Yokogawa modelo WT 3000 para o desenvolvimento de ensaios em seu laboratório. A Figura 3-12 traz a visão do painel frontal do equipamento.



Figura 3-12 - Vista frontal do analisador de energia Yokogawa WT3000

A Tabela 3-4 faz a comparação entre os níveis de exatidão exigidos pela norma NBR 16150 e os valores fornecidos no manual do fabricante do equipamento.

Tabela 3-4 - Comparação entre os níveis de exatidão exigidos pela NBR 16150 e os valores do analisador de energia WT3000

Medida	Exatidão pela norma	Exatidão do equipamento
Tensão	0,2 % Vnom	0,01 % Vmd + 0,03 % Vfe
Corrente	1 % Inom	0,01 % Imd + 0,03 % Ife
Frequência	0,01 Hz	0,05 % fmed
Potência	0,5 % Pnom	0,02 % Pmd + 0,04 % Pfe
Fator de potência	0,5 %	0,02 %
Componente contínua de corrente	0,5 %	0,05 % Imd + 0,05 % Ife
Harmônicos de corrente*	5 % Imd ou 0,15 % Inom	2,5 % Imd + 0,05 % Ife **
Ângulo de fase da tensão	1°	0,01° ***

Vnom, Inom, Pnom: Tensão, corrente e potência nominais do inversor  
 Vmd, Imd, Pmd, fmed: Tensão, corrente, potência e frequência medidas  
 Vfe, Ife, Pfe: Tensão, corrente e potência do fundo de escala

\* As condições de exatidão de harmônicas de corrente estão relacionadas ao valor da medido para cada harmônica em relação ao valor 3,00% da corrente nominal, a exatidão atribuída depende do valor medido estar acima ou abaixo deste valor de referência.

\*\* O valor de exatidão considerado é de pior caso, para valores de frequências entre 1 KHz e 2,5 KHz, para valores de frequências mais baixos o equipamento possui menores valores de exatidão.

\*\*\* Valor máximo obtido através da formula de exatidão fornecida pelo fabricante do equipamento

O analisador de energia WT 3000 possui uma biblioteca de comunicação em linguagem LabVIEW que permite a configuração do equipamento e aquisição de dados. A partir da aplicação desta biblioteca, é possível coordenar a aquisição de formas de onda para realizar o mesmo tipo de leitura realizado pelo osciloscópio, além das leituras de análise de energia

normalmente realizadas pelo equipamento. A Figura 3-13 traz um exemplo de rotina em linguagem LabVIEW para aquisição de dados a partir do analisador de energia WT 3000.

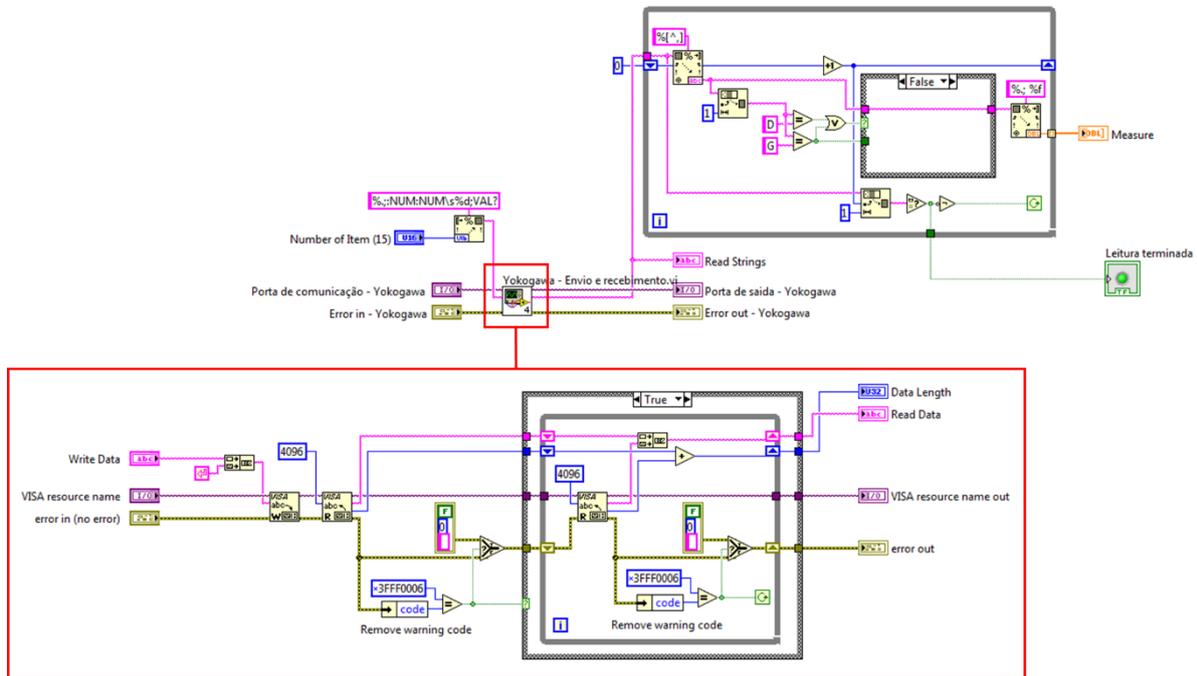


Figura 3-13 - Rotina em LabVIEW para aquisição de dados a partir do analisador de energia Yokogawa WT 3000.

Com a apresentação dos equipamentos que constituem a bancada de ensaios de inversores para SFCR do LSF o próximo capítulo traz os resultados obtidos para os ensaios de inversores realizados no LSF.

#### 4. ENSAIOS REALIZADOS EM INVERSORES PARA SFCR E CONSIDERAÇÕES AS NORMAS ABNT E PORTARIA 357.

Este capítulo apresenta os ensaios realizados em inversores durante os anos de 2014, 2015 e 2016, aplicando as normas ABNT NBR 16149, NBR 16150, NBR IEC 62116 e a Portaria INMETRO 357/2014. Apresenta também as correlações entre estes documentos e sugere complementação visando aperfeiçoar os procedimentos de avaliação de conformidade de inversores para SFCR do PBE. Todas as considerações e sugestões de alteração dos textos das normas estão contidas no APÊNDICE anexado a este trabalho.

Conforme as leituras realizadas nos itens anteriores e com base na Tabela 2-18, este capítulo estabelece as correlações entre os documentos diretamente relacionados ao ensaio de inversores. Com base nos ensaios realizados em inversores durante os anos de 2014, 2015 e 2016, serão sugeridas complementações aos documentos de forma a melhorar os serviços prestados pelo PBE em relação a qualificação de inversores conectados à rede elétrica.

Ao longo dos anos de 2014, 2015 e 2016 o LSF ensaiou e atuou no desenvolvimento de 14 modelos diferentes de inversores segundo as instruções da portaria 357. A Tabela 4-1 faz um resumo das potências dos modelos submetidos a ensaios no LSF de acordo com a data de entrega do relatório de conclusão dos ensaios aos respectivos fornecedores dos inversores.

**Tabela 4-1 - Resumo dos inversores ensaiados no LSF entre 2014 e 2016.**

Inversor	Potência (W)	Data	Tipo de ensaio	Em conformidade com as normas
1	1.500	09/14	Etiquetagem	Sim
2	3.000	09/14	Etiquetagem	Sim
3	4.600	09/14	Etiquetagem	Sim
4	250	10/14	Desenvolvimento	Não
5	2.000	02/15	Etiquetagem	Sim
6	700	03/15	Etiquetagem	Não
7	1.500	03/15	Etiquetagem	Não
8	2.000	03/15	Etiquetagem	Não
9	4.600	09/15	Desenvolvimento	Não
10	5.000	11/15	Desenvolvimento	Não
11	4.600	12/15	Etiquetagem	Sim
12	1.000	08/16	Desenvolvimento e etiquetagem	Sim
13	1.500	12/16	Etiquetagem	Sim
14	3.000	12/16	Etiquetagem	Sim
15	5.000	12/16	Etiquetagem	Sim

Ainda em relação a Tabela 4-1, apenas um modelo de inversor, com potência nominal 4.600 W, foi ensaiado duas vezes, uma vez em 2014 e outra em 2015, para acompanhamento do registro junto ao INMETRO. Além dos inversores da Tabela 4-1, durante o mesmo período foram realizadas consultas para ensaios de etiquetagem de 20 outros modelos de inversores de diversos fabricantes que foram suspensos pelos fornecedores antes do início dos ensaios.

#### **4.1. Ensaios de desenvolvimento**

Ao longo dos três primeiros anos de operação o LSF realizou ensaios de etiquetagem e ensaios de desenvolvimento. Os ensaios de etiquetagem consistem na realização da bateria de ensaios conforme descrito na Tabela 2-18 e têm como objetivo a análise de conformidade dos inversores com os padrões das normas brasileiras e a Portaria 357. Os ensaios de desenvolvimento consistem na realização de itens específicos das normas segundo requisição do fornecedor do inversor, análise dos resultados e implementação de alterações ao inversor de forma a atender os requisitos do PBE.

A Tabela 4-1 traz a relação dos inversores que foram submetidos a rotinas de desenvolvimento no LSF. Os inversores números 4, 9, 10 e 12, todos de diferentes potências, apresentaram características próprias e necessidades específicas para realização dos ensaios e implementação de soluções aos equipamentos ensaiados. Este item apresenta o desenvolvimento realizado nestes modelos.

##### **4.1.1. Inversor 4**

O inversor número quatro é um modelo de inversor com a potência nominal de 250 W dimensionado para uso em conjunto com um único módulo fotovoltaico, sendo considerado um microinversor para módulo c.a.. A Figura 4-1 mostra um exemplo deste tipo de equipamento.



**Figura 4-1 - Micro inversor para uso com um único módulo fotovoltaico (Fonte: Renesola).**

O modelo de microinversor em desenvolvimento ensaiado no LSF possui características físicas semelhantes às do modelo visto na Figura 4-1, assim o modelo ensaiado não dispunha de porta de comunicação para mudança de parâmetros do equipamento. Somente era possível conectar o equipamento ao simulador de rede c.a. e ao simulador de arranjos fotovoltaicos. A Tabela 4-2 traz as características do inversor número quatro.

**Tabela 4-2 - Características do inversor número 4.**

Características - Inversor 4		
Entrada c.c.	Potência máxima (W)	300
	Tensão máxima (V)	50
	Corrente máxima (A)	10
	Faixa de SPPM (V)	24 ~ 50
	Faixa de tensão (V)	24 ~ 50
Saída c.a.	Faixa de frequência (Hz)	49,2 ~ 60,2
	Faixa de fator de potência	0,99 ~ 1,00
	Potência nominal (W)	250
	Potência máxima (W)	260

A princípio seriam realizados todos os ensaios listados na Portaria 357, porém quando foi verificada a não conformidade do inversor com os ensaios de variação de tensão e frequência os ensaios foram suspensos para que o fornecedor pudesse adequar o equipamento, uma vez que não era possível realizar as modificações necessárias no LSF, e dar sequência aos ensaios. A Tabela 4-3 apresenta um resumo dos ensaios realizados e dos pontos de conformidade com as normas brasileiras.

Tabela 4-3 - Resultados dos ensaios realizados no inversor número 4.

Resultados - Inversor número 4 - 250 W		
Número	Ensaio	Resultado
1	Cintilação	Conforme
2	Injeção de componente continua	Conforme
3	Harmônicos e distorção de forma de onda	Conforme
4	Fator de potência	Conforme
5	Injeção/ demanda de potência reativa	Não aplicável
6	Sobre/ subtensão	Não conforme
7	Sobre/ subfrequência	Não conforme
8	Controle da potência ativa em sobrefrequência	Não ensaiado
9	Reconexão	Não ensaiado
10	Religamento automático fora de fase	Não ensaiado
11	Modulação de potência ativa	Não aplicável
12	Modulação de potência reativa	Não aplicável
13	Desconexão do sistema fotovoltaico da rede	Não ensaiado
14	Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede	Não aplicável
15	Proteção contra inversão de polaridade	Não ensaiado
16	Sobrecarga	Não ensaiado
17	Anti-ilhamento	Não ensaiado

Como não houve interesse em continuar os ensaios de desenvolvimento do equipamento, os resultados dos ensaios mostram que os parâmetros de qualidade de energia, verificados pelos ensaios de 1 a 4, estão em conformidade com a norma, mas é necessário implementar rotinas de controle no equipamento para adequar os níveis de conexão e desconexão do equipamento. Outro problema encontrado foi a indisponibilidade de uma porta de comunicação no corpo do equipamento, que permitisse o envio de comandos para a realização do ensaio número 13.

#### 4.1.2. Inversor 9

O inversor número nove é um modelo de inversor de 4.600 W de potência nominal, com a opção de operação com um ou dois arranjos (*strings*) de módulos fotovoltaicos, sendo caracterizado como um inversor *multistring*. A Tabela 4-4 traz as características do inversor número nove.

**Tabela 4-4 - Características do inversor número 9.**

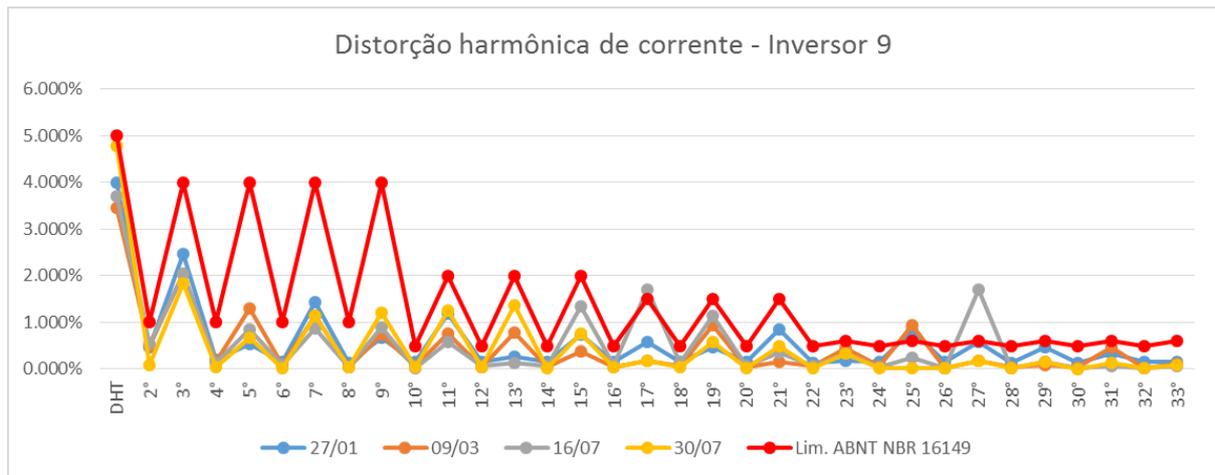
Características - Inversor 9		
Entrada c.c.	Potência máxima (W)	5.500
	Tensão máxima (V)	600
	Corrente máxima (A)	30
	Faixa de SPPM (V)	150 ~ 500
	Faixa de tensão (V)	150 ~ 600
Saída c.a.	Faixa de frequência (Hz)	45 ~ 55
	Faixa de fator de potência	0,9 ~ 1,0
	Potência nominal (W)	4.600
	Potência máxima (W)	4.600

O inversor número nove foi inicialmente avaliado para os 14 primeiros ensaios da Portaria 357. Durante esta primeira avaliação, três ensaios apresentaram não conformidade com as normas brasileiras, sendo estes:

- 3 – Harmônicos e distorção de forma de onda;
- 5 – Injeção / demanda de potência reativa;
- 8 – Controle de potência ativa em sobrefrequência.

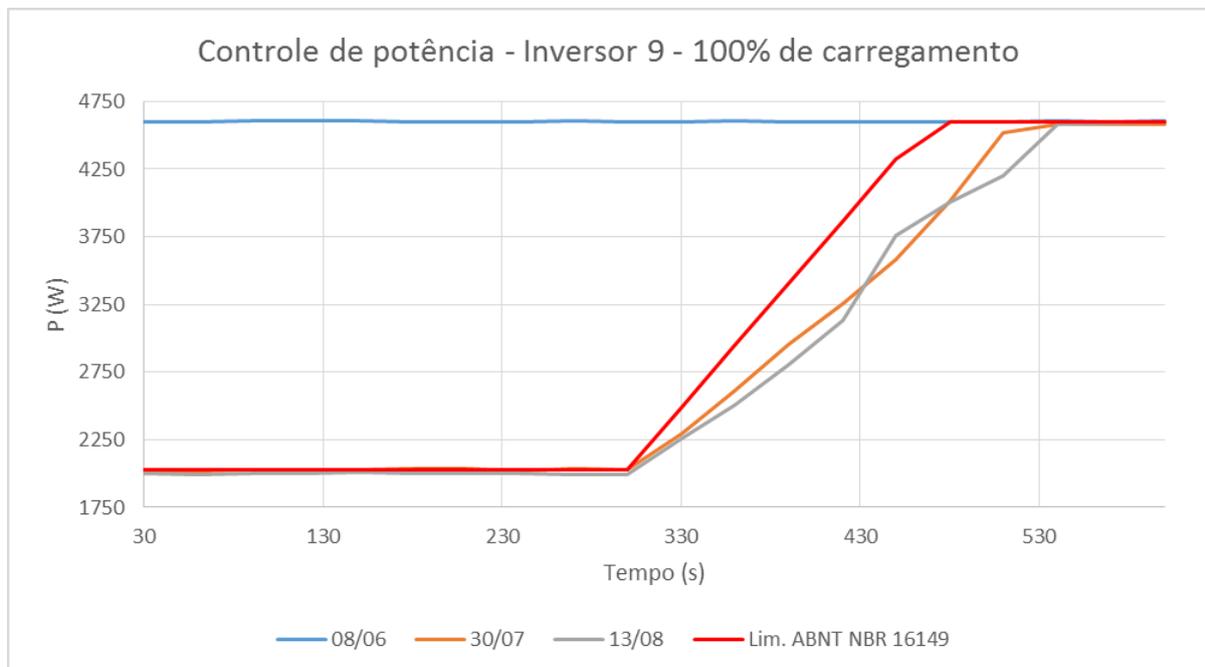
As não conformidades foram então levadas ao fornecedor do equipamento que providenciou o contato com a equipe técnica, que se encontrava em outro país. Através deste contato a equipe técnica disponibilizou *software* de programação do inversor e novas rotinas de controle com os ajustes e funções necessárias para atendimento das normas brasileiras. Este processo, no entanto, durou cerca de oito meses e foi suspenso devido a problemas na implementação da função de proteção contra a situação de ilhamento.

A Figura 4-2 mostra os resultados obtidos para a correção dos níveis de harmônicos de corrente, através da coleta de dados e troca de informações com a equipe técnica responsável ao longo de seis meses. No gráfico da figura são vistos os limites das normas brasileiras em relação aos níveis de harmônicos, para os ensaios realizados em 27/01, 09/03 e 16/07 é possível visualizar que alguns valores obtidos ultrapassam os valores limites estabelecidos, somente o ensaio realizado em 30/07 foi capaz de obter os valores abaixo dos limites de norma.

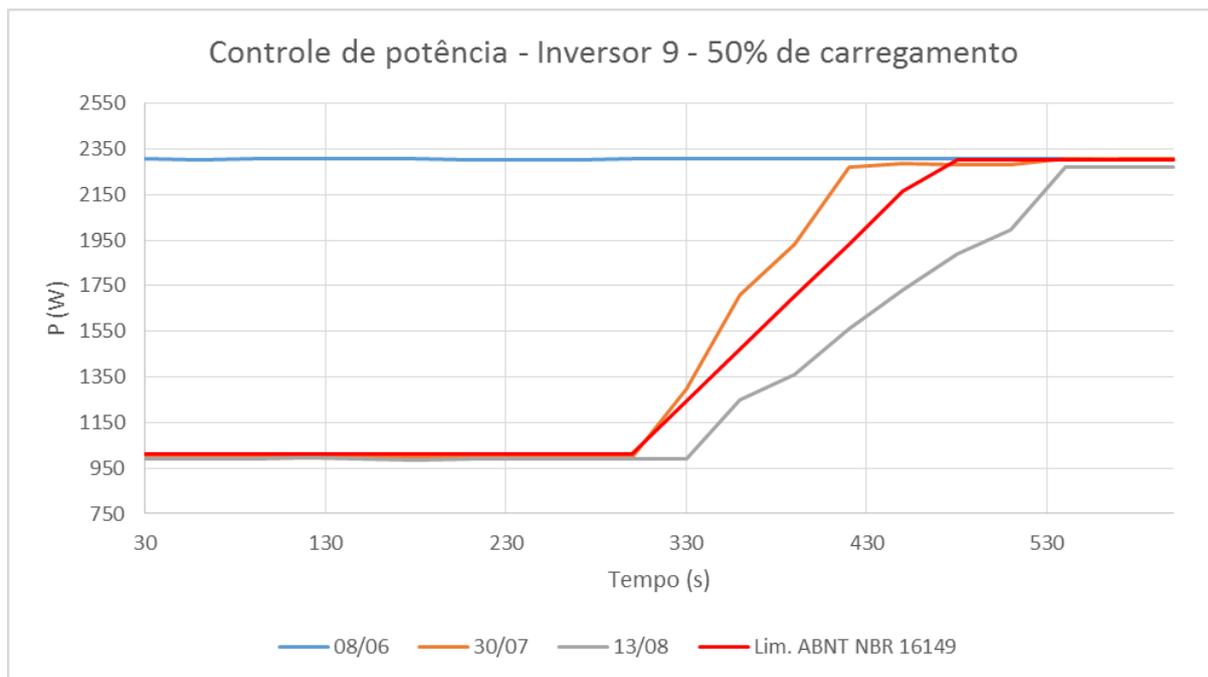


**Figura 4-2 - Resultados dos ensaios realizados para avaliar a distorção harmônica de corrente do inversor 9.**

Em conjunto com as implementações dos níveis de harmônicos também foram realizadas investigações no algoritmo de controle de potência ativa em sobrefrequência. A princípio o equipamento realizava o controle da potência ativa conforme a especificação das normas, com exceção do gradiente de injeção de potência. Assim o inversor originalmente aumentava e diminuía instantaneamente a potência ativa de saída de acordo com a frequência da rede. A Figura 4-3 mostra os resultados da implementação do algoritmo de controle de gradiente de injeção de potência ativa para a condição de entrega de 100 % da potência nominal do inversor, a Figura 4-4 mostra os resultados obtidos para a condição de entrega de 50 %.



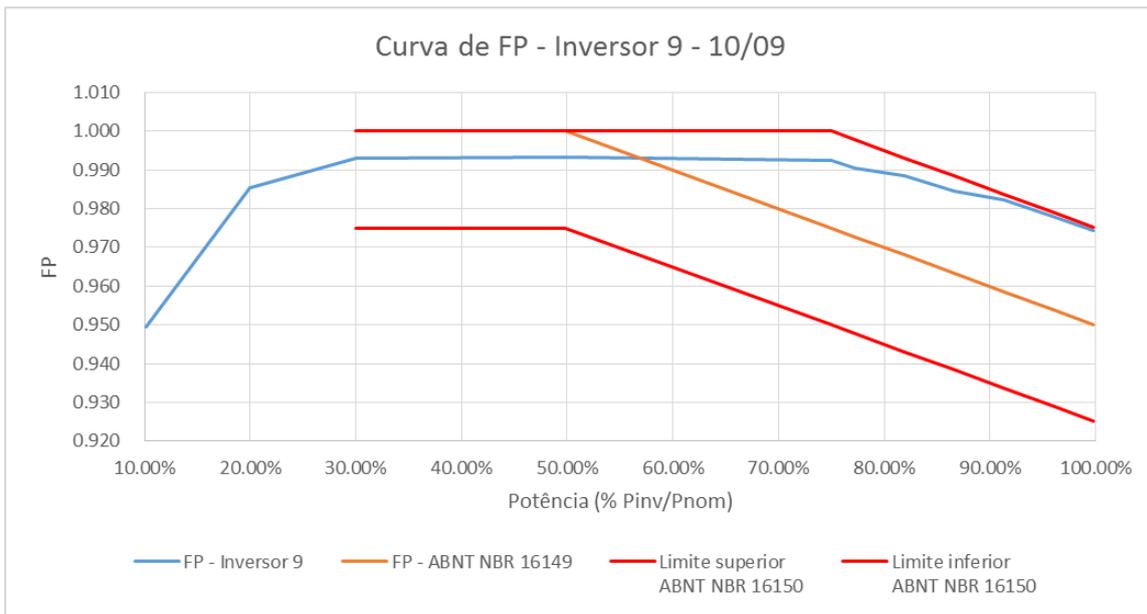
**Figura 4-3 - Resultados dos ensaios de gradiente de injeção de potência ativa para o inversor 9 em 100 % de carregamento.**



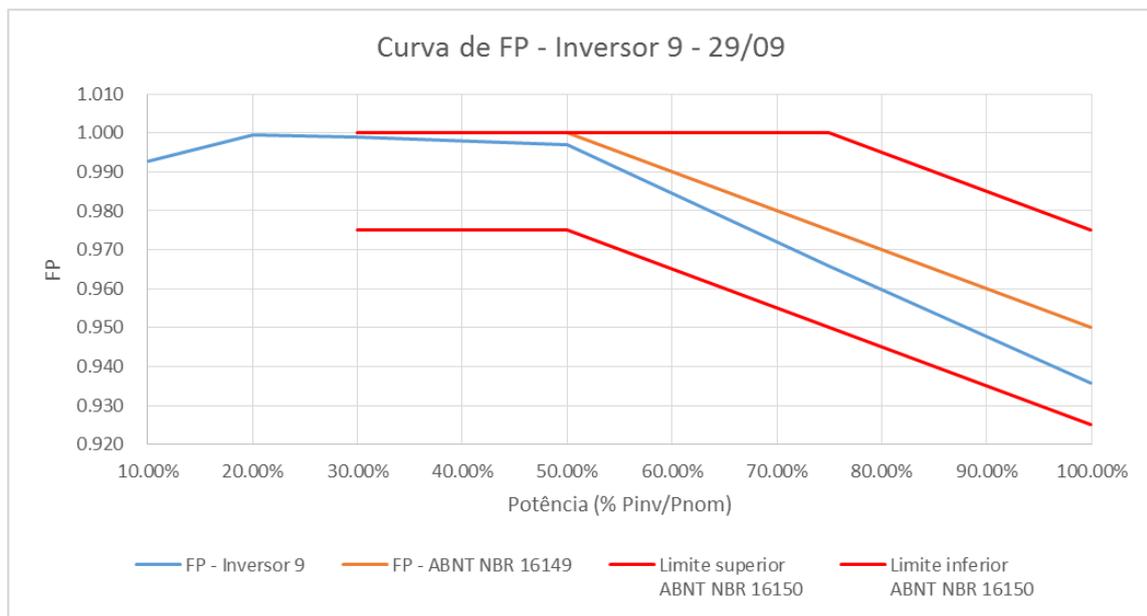
**Figura 4-4 - Resultados dos ensaios de gradiente de injeção de potência ativa para o inversor 9 em 50 % de carregamento.**

As figuras acima mostram que mesmo a conformidade obtida no ensaio de 30/07 para a condição de entrega de 100 % da potência nominal não garante a conformidade para a situação de entrega de 50 % da potência nominal do inversor. Isto é observado na Figura 4-4 através da diferença na inclinação das curvas de resultado e limite, para o caso do carregamento a 50 %, o gradiente de injeção de potência para o ensaio do dia 30/07 demonstrou uma inclinação superior ao limite da norma brasileira. Assim após esse teste foi necessária uma nova adequação de *software* de forma a atender esta condição das normas brasileiras.

Após atendimento dos requisitos de distorção harmônica de corrente e controle de potência ativa em sobrefrequência, foi implementada a operação em curva de fator de potência do inversor. A Figura 4-5 mostra o primeiro resultado positivo obtido para o controle de fator de potência do inversor, a Figura 4-6 mostra o resultado final obtido através da troca de informações com a equipe técnica do equipamento.



**Figura 4-5 - Resultado da implementação da curva de FP para o inversor 9 em 10/09.**



**Figura 4-6 - Resultado da implementação da curva de FP para o inversor 9 em 29/09.**

Os resultados da Figura 4-6 mostram que foi possível aproximar a curva de fator de potência para valores mais próximos da curva padrão da norma ABNT NBR 16149, mesmo que o resultado anteriormente obtido estivesse dentro dos limites estabelecidos pela norma.

Mesmo em conformidade com os 14 primeiros ensaios descritos pela Portaria 357 o inversor não apresentou proteção contra a situação de ilhamento, assim foram suspensos novos ensaios de desenvolvimento pelo fornecedor do equipamento. Também não foram realizados os ensaios de números 15 e 16 pois estes poderiam causar danos a amostra de

ensaio e inviabilizar novos ensaios de desenvolvimento para a proteção contra operação ilhada. A Tabela 4-5 mostra a condição final de desenvolvimento do inversor número 9.

**Tabela 4-5 - Resultados dos ensaios realizados no inversor número 9.**

Resultados - Inversor número 9 - 4.600 W		
Número	Ensaio	Resultado
1	Cintilação	Conforme
2	Injeção de componente continua	Conforme
3	Harmônicos e distorção de forma de onda	Conforme
4	Fator de potência	Conforme
5	Injeção/ demanda de potência reativa	Conforme
6	Sobre/ subtensão	Conforme
7	Sobre/ subfrequência	Conforme
8	Controle da potência ativa em sobrefrequência	Conforme
9	Reconexão	Conforme
10	Religamento automático fora de fase	Conforme
11	Modulação de potência ativa	Não aplicável
12	Modulação de potência reativa	Não aplicável
13	Desconexão do sistema fotovoltaico da rede	Conforme
14	Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede	Não aplicável
15	Proteção contra inversão de polaridade	Não ensaiado
16	Sobrecarga	Não ensaiado
17	Anti-ilhamento	Não conforme

#### 4.1.3. Inversor 10

O inversor número dez é um modelo de inversor *multistring* de 5.000 W de potência nominal, com a opção de operação com um ou dois arranjos de módulos fotovoltaicos. A Tabela 4-6 traz as características do inversor número dez.

**Tabela 4-6 - Características do inversor número 10.**

Características - Inversor 10		
Entrada c.c.	Potência máxima (W)	5.800
	Tensão máxima (V)	600
	Corrente máxima (A)	22
	Faixa de SPPM (V)	100 ~ 500
	Faixa de tensão (V)	100 ~ 600
Saída c.a.	Faixa de frequência (Hz)	57 ~ 62
	Faixa de fator de potência	0,8 ~ 1,0
	Potência nominal (W)	5.000
	Potência máxima (W)	5.000

O inversor número 10 não apresentou problemas quanto a harmônicos de corrente e outros parâmetros de qualidade de energia. Porém, originalmente não possuía a opção de operação com curva de fator de potência, alguns dos pontos de tensão de desconexão por tensão não estavam em conformidade com as normas brasileiras e, embora fosse realizado o controle de fator de potência, o gradiente de injeção de potência apresentou valores maiores do que as referências da norma. O inversor também apresentou instabilidades para operação na condição C do ensaio de proteção contra situações de ilhamento.

Uma vez repassados os resultados para a equipe técnica do equipamento foram realizadas duas implementações de *software* de controle. Ainda assim não foi atingida a conformidade para o ensaio de curva do fator de potência, pois o inversor não apresentou um método para alterar os parâmetros da curva conforme disposto na Tabela 2-2 e havia problemas de instabilidade durante a operação a plena carga do inversor.

A Tabela 4-7 mostra os resultados obtidos para as implementações de *software* realizadas no inversor 10 referentes a tensão de desconexão, tempo de reconexão e proteção anti-ilhamento.

**Tabela 4-7 - Resultados para a primeira implementação de *software* realizada no inversor 10.**

Valores de tensão de desconexão e tempo de reconexão		
	16/10	13/11
Sobretensão de desconexão (V)	248	241
Tempo de reconexão (s)	322	200
Proteção contra ilhamento		
	Tempo de desconexão (ms)	
	16/10	13/11
Condição A - Equilíbrio	217	198 *
Condição B - Equilíbrio	219	39
Condição C - Equilíbrio	X *	246
* O inversor apresentou instabilidade de operação nestas condições		

Após obter os resultados da Tabela 4-7 o fornecedor do inversor requisitou a avaliação de uma nova implementação de *software* a fim de resolver inconsistências com a operação do inversor em situação de entrega da potência nominal do inversor, gradiente de injeção de potência ativa e operação com curva de fator de potência. A Figura 4-7 mostra o resultado desta segunda implementação para o gradiente de injeção de potência ativa para o nível de carregamento de 100 % da potência nominal do inversor e a Figura 4-8 mostra o resultado

para a condição de carregamento de 50 %. A Figura 4-9 mostra o resultado para a operação com curva de fator de potência.

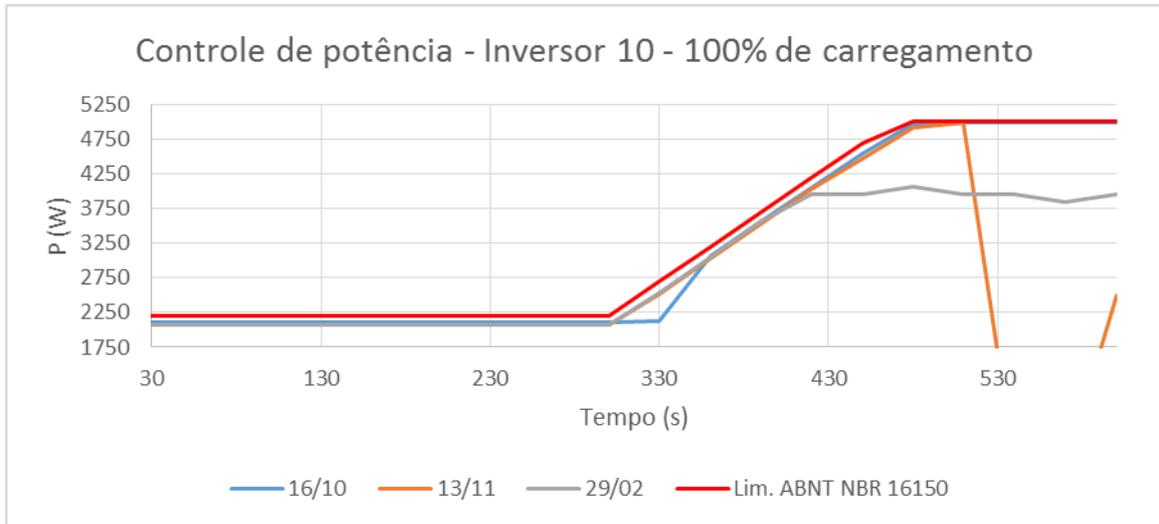


Figura 4-7 - Resultados dos ensaios de gradiente de injeção de potência ativa para o inversor 10 em 100 % de carregamento.

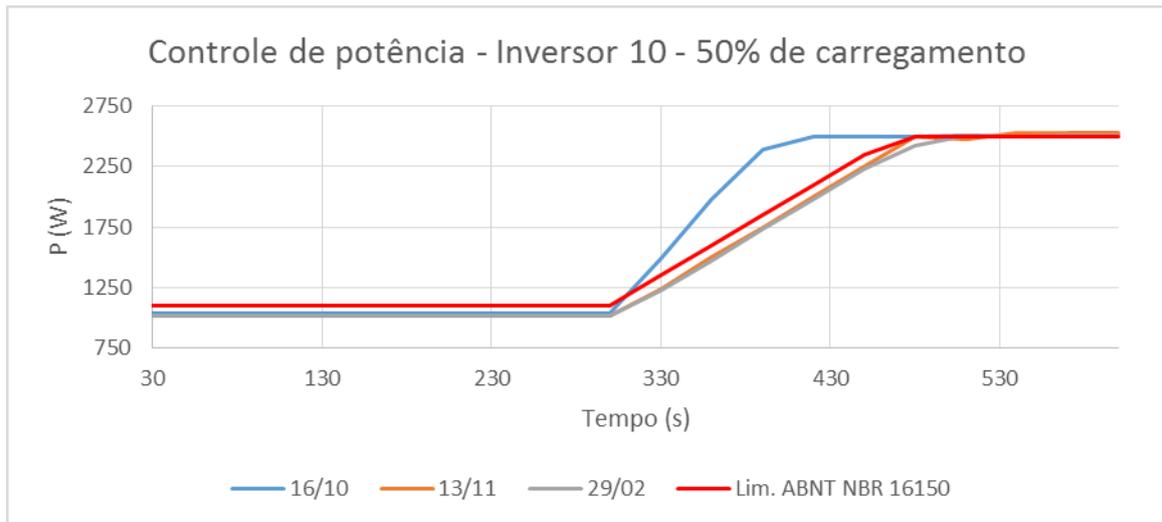
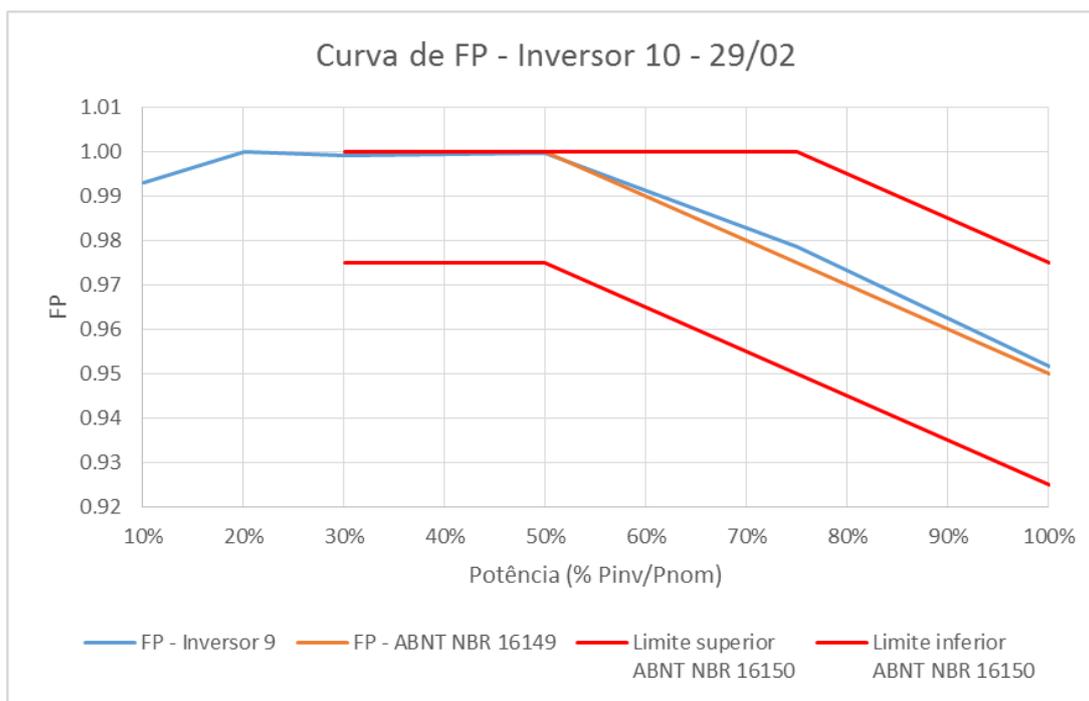


Figura 4-8 - Resultados dos ensaios de gradiente de injeção de potência ativa para o inversor 10 em 50 % de carregamento.



**Figura 4-9 - Resultado da implementação da curva de FP para o inversor 10 em 29/02.**

Com os resultados obtidos a partir da segunda implementação o fornecedor do inversor suspendeu os ensaios e não requisitou novas avaliações do equipamento. A Tabela 4-8 traz o resumo dos resultados da última avaliação realizada no inversor número dez.

**Tabela 4-8 - Resultados dos ensaios realizados no inversor número 10.**

Resultados - Inversor número 10 - 5.000 W		
Número	Ensaio	Resultado
1	Cintilação	Conforme
2	Injeção de componente continua	Conforme
3	Harmônicos e distorção de forma de onda	Conforme
4	Fator de potência	Conforme
5	Injeção/ demanda de potência reativa	Não conforme
6	Sobre/ subtensão	Conforme
7	Sobre/ subfrequência	Conforme
8	Controle da potência ativa em sobrefrequência	Não conforme
9	Reconexão	Conforme
10	Religamento automático fora de fase	Conforme
11	Modulação de potência ativa	Não aplicável
12	Modulação de potência reativa	Não aplicável
13	Desconexão do sistema fotovoltaico da rede	Conforme
14	Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede	Não aplicável
15	Proteção contra inversão de polaridade	Não ensaiado
16	Sobrecarga	Não ensaiado
17	Anti-ilhamento	Não conforme

#### 4.1.4. Inversor 12

O inversor número 12 é um modelo de inversor *string* de 1.000 W de potência nominal. A Tabela 4-9 traz as características do inversor número 12.

**Tabela 4-9 - Características do inversor número 12.**

Características - Inversor 12		
Entrada c.c.	Potência máxima (W)	1.000
	Tensão máxima (V)	200
	Corrente máxima (A)	10
	Faixa de SPPM (V)	60 ~ 180
	Faixa de tensão (V)	60 ~ 200
Saída c.a.	Faixa de frequência (Hz)	57,5 ~ 62,0
	Faixa de fator de potência	1
	Potência nominal (W)	1.000
	Potência máxima (W)	1.100

A equipe técnica responsável pelo desenvolvimento do equipamento esteve presente durante os ensaios de desenvolvimento. Desta forma, uma vez verificada uma não conformidade em algum dos ensaios os técnicos responsáveis alteravam o *software* de controle do equipamento para adequar o comportamento do inversor as necessidades das normas brasileiras.

Após realizadas todas as alterações necessárias foram realizados os testes de etiquetagem e confirmada a adequação do equipamento com os requisitos das normas brasileiras. A Tabela 4-10 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios realizados para a etiquetagem do equipamento.

**Tabela 4-10 - Resultados dos ensaios realizados no inversor número 12.**

Resultados - Inversor número 12 - 1.000 W		
Número	Ensaio	Resultado
1	Cintilação	Conforme
2	Injeção de componente continua	Conforme
3	Harmônicos e distorção de forma de onda	Conforme
4	Fator de potência	Conforme
5	Injeção/ demanda de potência reativa	Não aplicável
6	Sobre/ subtensão	Conforme
7	Sobre/ subfrequência	Conforme
8	Controle da potência ativa em sobrefrequência	Conforme
9	Reconexão	Conforme
10	Religamento automático fora de fase	Conforme
11	Modulação de potência ativa	Não aplicável
12	Modulação de potência reativa	Não aplicável
13	Desconexão do sistema fotovoltaico da rede	Conforme
14	Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede	Não aplicável
15	Proteção contra inversão de polaridade	Conforme
16	Sobrecarga	Conforme
17	Anti-ilhamento	Conforme

## **4.2. Resultados dos ensaios realizados em inversores para SFCR**

### **4.2.1. 1º Ensaio – Cintilação**

Os ensaios de cintilação realizados no LSF contaram com a rotina implementada no equipamento analisador de energia Yokogawa WT3000. Esta rotina é um opcional do equipamento desenvolvida pelo próprio fabricante de forma a atender as normas IEC que tratam deste assunto. A Figura 4-10 exemplifica o mostrador do equipamento para o teste de cintilação. A Tabela 4-11 mostra os dados coletados para um inversor de 5 kW testado no LSF. Cabe ressaltar que a necessidade de avaliação do efeito de cintilação de longa duração leva a necessidade de um ensaio que tem um tempo de medição de duas horas.



Figura 4-10 - Mostrador do equipamento Yokogawa WT3000 para o teste de cintilação.

Tabela 4-11 - Resultado do ensaio de cintilação para inversor de 5 kW testado no LSF.

Dados do Ensaio - Cintilação						
Tempo de amostra (min)		10				
Numero de amostras		12				
Tempo total (min)		120				
	dc (%)	dmax (%)	d(t) [ms]	Pst	Plt	
Limites	3.30	4.00	500	1.00	0.65	
1	0.33	1.16	0	0.22		
2	0.38	0.61	0	0.11		
3	0.63	1	0	0.11		
4	0.23	1.32	0	0.11		
5	0.19	0.59	0	0.08		
6	0.31	0.48	0	0.13		
7	0.51	0.75	0	0.14		
8	0.30	1.3	0	0.19		
9	0.44	1.33	0	0.24		
10	0.18	0.31	0	0.08		
11	0.49	1.08	0	0.23		
12	0.78	1.39	0	0.32		
Total					0.19	
	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	

A fim de resumir os resultados dos testes de cintilação realizados no LSF, a Tabela 4-12 apresenta os resultados das médias dos índices de mérito avaliados pelas normas IEC para o ensaio de cintilação.

Tabela 4-12 - Resumo dos resultados para ensaios de cintilação realizados no LSF.

Inversor	Potência (W)	Índices de mérito para ensaio de cintilação				
		dc (%) VL = 3.30	dmax (%) VL = 4.00	d(t) [ms] VL = 500.00	Pst VL = 1.00	Plt VL = 0.65
1	1.500	0,29	1,31	0,00	0,25	0,25
2	3.000	0,26	0,98	0,00	0,19	0,22
3	4.600	0,30	1,13	0,00	0,17	0,19
4	250	0,26	1,02	0,00	0,24	0,25
5	2.000	0,26	1,27	0,00	0,30	0,31
6	700	0,27	1,26	0,00	0,29	0,30
7	1.500	0,30	1,21	0,00	0,26	0,27
8	2.000	0,30	1,07	0,00	0,23	0,26
9	4.600	0,28	0,88	0,00	0,26	0,27
10	5.000	0,40	0,94	0,00	0,16	0,19
11	4.600	0,28	1,14	0,00	0,22	0,24
12	1.000	0,36	0,48	0,00	0,08	0,08
13	1.500	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08
14	3.000	0,14	0,19	0,00	0,07	0,07
15	5.000	0,25	1,23	0,00	0,25	0,27

VL: Valor limite para conformidade

A análise da Tabela 4-12 permite verificar que entre os inversores testados no LSF não existem diferenças consideráveis nos resultados obtidos entre os equipamentos para o efeito de cintilação. Desta forma, pode-se inferir que o efeito de cintilação causado pelos inversores é menor do que o avaliado pelo ensaio e as medições obtidas refletem as características do arranjo de ensaio do laboratório.

O ensaio de avaliação do efeito de cintilação para inversores de SFCR é realizado seguindo as orientações das normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150 que remetem as normas IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-11 e IEC/TS 61000-3-5.

Como principal contribuição para a melhoria dos ensaios desenvolvidos nos laboratórios e melhor atendimento do programa de etiquetagem a sociedade, sugere-se uma mudança na redação das normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150 de forma a incluir as considerações da norma IEC/TR 61000-3-15, em que se refere aos parâmetros de avaliação de cintilação para sistemas de geração distribuída em baixa tensão.

Além da recomendação em abordar outros aspectos das normas IEC, é recomendado uma avaliação dos procedimentos para ensaio de cintilação de forma a criar uma norma de referência similar ao conteúdo das normas IEC, porém visando o cenário brasileiro.

#### 4.2.2. 2º Ensaio – Injeção de componente continua

Os ensaios de injeção de componente contínua realizados no LSF foram realizados com adequações aos procedimentos da norma ABNT NBR 16150. As adequações constituem em avaliar o nível de componente c.c. conforme o valor limite da norma ABNT NBR 16149 e caso o inversor passe a injetar a corrente alternada a rede com um conteúdo c.c. superior a 0,5 % da corrente fundamental este deve se desligar em até um segundo. Estas adequações serão discutidas no Item 4.3.2. O resumo dos resultados dos ensaios do laboratório pode ser visto na Tabela 4-13.

**Tabela 4-13 - Resumo dos resultados para ensaios de injeção de componente c.c. realizados no LSF.**

Inversor	Potência (W)	% de componente CC		
		100 % Pnom	66 % Pnom	33 % Pnom
1	1.500	0,20%	0,20%	0,25%
2	3.000	0,04%	0,05%	0,06%
3	4.600	0,04%	0,05%	0,06%
4	250	0,07%	0,07%	0,04%
5	2.000	0,16%	0,16%	0,15%
6	700	0,42%	0,45%	0,39%
7*	1.500	0,64%	0,65%	0,64%
8	2.000	0,25%	0,36%	0,38%
9**	4.600	0,00%	0,00%	0,00%
10	5.000	0,06%	0,10%	0,12%
11	4.600	0,00%	0,01%	0,01%
12	1.000	0,14%	0,19%	0,35%
13	1.500	0,35%	0,26%	0,37%
14	3.000	0,07%	0,25%	0,24%
15	5.000	0,08%	0,14%	0,19%

Pnom: Potência nominal do inversor

\* Este inversor ultrapasou os limites de injeção de componente CC e não se desconectou da rede elétrica.

\*\* Este inversor apresenta transformador na saída de conexão com a rede elétrica e portanto o parâmetro de corrente CC não foi avaliado.

A Tabela 4-13 mostra que apenas um dos equipamentos testados pelo laboratório não esteve em conformidade com os valores da norma, ainda assim os valores obtidos para os demais equipamentos possuem ordem de grandeza próxima ao limite estabelecido pela norma.

#### 4.2.3. 3º Ensaio – Harmônicos e distorção de forma de onda

Os ensaios de harmônicos e distorção de forma de onda realizados no LSF seguiram as orientações das normas brasileiras durante o seu desenvolvimento. Porém, a falta de concordância entre os textos das normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150 levou a adoção de critérios de avaliação da conformidade de forma a permitir a validação dos ensaios realizados. Estes critérios são discutidos no Item 4.3.3 deste trabalho.

A Tabela 4-14 mostra os resultados de um inversor de 5 kW que foi ensaiado no laboratório, essa tabela serve como base para entendimento da Tabela 4-15 que resume os valores obtidos para  $DHT_I$  em todos os inversores ensaiados no LSF, na qual estão suprimidos os dados referentes aos valores dos harmônicos individuais.

**Tabela 4-14 - Resultados do ensaio de  $DHT_I$  para um inversor de 5 kW testado no LSF.**

Harmônicos							
	P(W):	5.006,42	3.750,13	2.501,99	1.501,88	1.003,15	500,18
	It <sub>hd</sub> (%)	2,893%	3,208%	4,062%	5,342%	6,464%	7,398%
Impares							
Nº	Critério	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
3	< 4,0%	2,136%	2,187%	2,750%	4,073%	5,542%	6,438%
5		0,766%	1,006%	1,554%	1,664%	2,360%	1,517%
7		0,672%	1,099%	1,541%	2,191%	0,835%	1,442%
9		0,780%	1,027%	0,937%	0,367%	1,377%	1,031%
11	< 2,0%	0,808%	0,774%	0,444%	0,588%	0,249%	1,108%
13		0,582%	0,210%	0,752%	0,886%	0,312%	1,227%
15		0,242%	0,149%	0,333%	0,597%	0,811%	0,401%
17	< 1,5%	0,070%	0,364%	0,379%	0,916%	0,237%	0,499%
19		0,303%	0,236%	0,802%	0,125%	0,145%	0,621%
21		0,365%	0,076%	0,572%	0,601%	0,221%	0,814%
23	< 0,6%	0,046%	0,522%	0,070%	0,197%	0,621%	0,384%
25		0,182%	0,472%	0,412%	0,315%	0,295%	0,188%
27		0,257%	0,371%	0,297%	0,351%	0,165%	0,286%
29		0,291%	0,159%	0,166%	0,261%	0,312%	0,413%
31		0,289%	0,148%	0,313%	0,404%	0,075%	0,301%
33		0,104%	0,215%	0,403%	0,201%	0,123%	0,683%
Pares							
Nº	Critério	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
2	< 1,0%	0,607%	0,579%	0,591%	0,700%	0,715%	0,734%
4		0,094%	0,128%	0,157%	0,262%	0,408%	0,463%
6		0,063%	0,086%	0,150%	0,228%	0,331%	0,261%
8		0,049%	0,077%	0,119%	0,263%	0,353%	0,429%
10	< 0,5%	0,028%	0,057%	0,058%	0,212%	0,211%	0,207%
12		0,071%	0,035%	0,047%	0,074%	0,163%	0,092%
14		0,053%	0,020%	0,084%	0,060%	0,064%	0,118%
16		0,038%	0,031%	0,085%	0,092%	0,059%	0,132%
18		0,013%	0,047%	0,149%	0,072%	0,059%	0,077%
20		0,015%	0,018%	0,117%	0,026%	0,090%	0,145%
22		0,056%	0,088%	0,087%	0,043%	0,036%	0,095%
24		0,037%	0,069%	0,078%	0,097%	0,098%	0,095%
26		0,038%	0,102%	0,063%	0,030%	0,036%	0,127%
28		0,068%	0,081%	0,049%	0,035%	0,078%	0,107%
30		0,069%	0,051%	0,043%	0,100%	0,087%	0,099%
32		0,064%	0,073%	0,070%	0,057%	0,105%	0,172%

Tabela 4-15 – Resumo dos resultados para ensaios de  $DHT_I$  realizados no LSF.

Inversor	Potência (W)	Valor de DHT					
		100 % Pnom	75 % Pnom	50 % Pnom	30 % Pnom	20 % Pnom	10 % Pnom
1	1.500	1,60%	1,84%	2,56%	5,51%	9,92%	20,24%
2	3.000	1,33%	1,58%	2,14%	5,03%	8,41%	19,18%
3	4.600	1,33%	1,52%	1,93%	4,13%	7,43%	15,54%
4	250	2,50%	2,67%	3,16%	4,48%	5,34%	8,33%
5	2.000	3,85%	4,57%	5,07%	5,60%	7,96%	17,35%
6	700	5,11%	5,88%	7,20%	9,11%	10,31%	11,01%
7	1.500	6,54%	6,96%	8,23%	9,85%	11,29%	13,34%
8	2.000	6,43%	6,50%	7,15%	8,72%	10,02%	12,10%
9	4.600	4,05%	4,23%	5,44%	8,44%	9,93%	11,08%
10	5.000	2,89%	3,21%	4,06%	5,34%	6,46%	7,40%
11	4.600	1,19%	1,40%	1,86%	3,33%	5,20%	10,16%
12	1.000	3,01%	4,05%	5,30%	8,46%	12,58%	21,00%
13	1.500	1,77%	1,77%	2,22%	5,28%	8,64%	9,27%
14	3.000	1,67%	1,94%	2,82%	4,06%	5,71%	9,55%
15	5.000	2,80%	2,89%	3,64%	5,88%	8,43%	18,59%

Pnom: Potência nominal do inversor

A Tabela 4-15 mostra que todos os inversores que estavam em conformidade com os parâmetros da norma para a condição de 100 % da potência nominal também estavam de acordo com os parâmetros para a condição de 75 % da potência nominal. A análise dos resultados para 50 % da potência nominal mostra que a maior parte dos inversores testados é capaz de atingir o valor de  $DHT_I$  necessário para estar em conformidade com a norma, porém, apresentam algum valor de  $DHI_I$  não conforme com os valores de referência. Os valores de  $DHI_I$  não são exibidos devido à grande quantidade de dados existentes, conforme visto na Figura 4-15.

#### 4.2.4. 4º Ensaio – Fator de potência

Os ensaios de FP foram realizados de forma análoga ao ensaio de harmônicos e distorção de forma de onda, seguindo as diretrizes das normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150, porém, com a adoção de interpretações de forma a convergir a avaliação feita pelas normas. A Tabela 4-16 apresenta um resumo dos resultados dos inversores ensaiados no LSF.

**Tabela 4-16 - Resumo dos resultados para ensaios de FP realizados no LSF.**

Inversor	Potência (W)	Valor de FP					
		100 % Pnom	75 % Pnom	50 % Pnom	30 % Pnom	20 % Pnom	10 % Pnom
1	1.500	0,9915	0,9846	0,9871	0,9841	0,9547	0,6816
2	3.000	0,9959	0,9924	0,9862	0,9924	0,9989	0,8864
3	4.600	0,9964	0,9932	0,9847	0,9895	0,9942	0,9561
4	250	0,9968	0,9950	0,9911	0,9771	0,9506	0,8188
5	2.000	0,9982	0,9974	0,9951	0,9870	0,9747	0,9303
6	700	0,9858	0,9721	0,9332	0,8357	0,7001	0,4592
7	1.500	0,9948	0,9908	0,9787	0,9453	0,8889	0,7116
8	2.000	0,9996	0,9978	0,9918	0,9726	0,9384	0,8066
9	4.600	0,9967	0,9970	0,9976	0,9989	0,9997	0,9935
10	5.000	0,9997	0,9985	0,9948	0,9973	0,9990	0,9046
11	4.600	0,9998	1,0000	1,0000	0,9976	0,9978	0,9785
12	1.000	0,9876	0,9864	0,9840	0,9785	0,9727	0,9475
13	1.500	0,9980	0,9953	1,0000	0,9912	0,9985	0,8410
14	3.000	1,0000	0,9997	0,9976	1,0000	0,9926	0,9096
15	5.000	0,9999	0,9998	0,9973	0,9992	0,9952	0,9171

Pnom: Potência nominal do inversor

Conforme apresentado na Tabela 4-16 a maioria dos inversores ensaiados foi capaz de atender os requisitos das normas. Alguns equipamentos operaram com FP abaixo de 0,98, porém dentro da tolerância de 0,975.

#### 4.2.5. 5º Ensaio – Injeção e demanda de potência reativa

Conforme descrito na Tabela 2-18 o quinto ensaio aborda diferentes itens das normas brasileiras. No laboratório foram adotados os procedimentos de curva de fator de potência e injeção/demanda de potência reativa para a realização do quinto ensaio da Portaria 357.

Durante os ensaios realizados no LSF apenas cinco modelos possuíam potência nominal acima de 3 kW, mas nenhum modelo possuía potência superior a 6 kW. Desta forma os foram ensaiados apenas os procedimentos referentes a curva de FP das normas brasileiras. A Tabela 4-17 remete aos resultados obtidos para ensaio de curva de FP para os inversores ensaiados no LSF.

**Tabela 4-17 - Resumo dos resultados para ensaios de injeção e demanda de reativos realizados no LSF.**

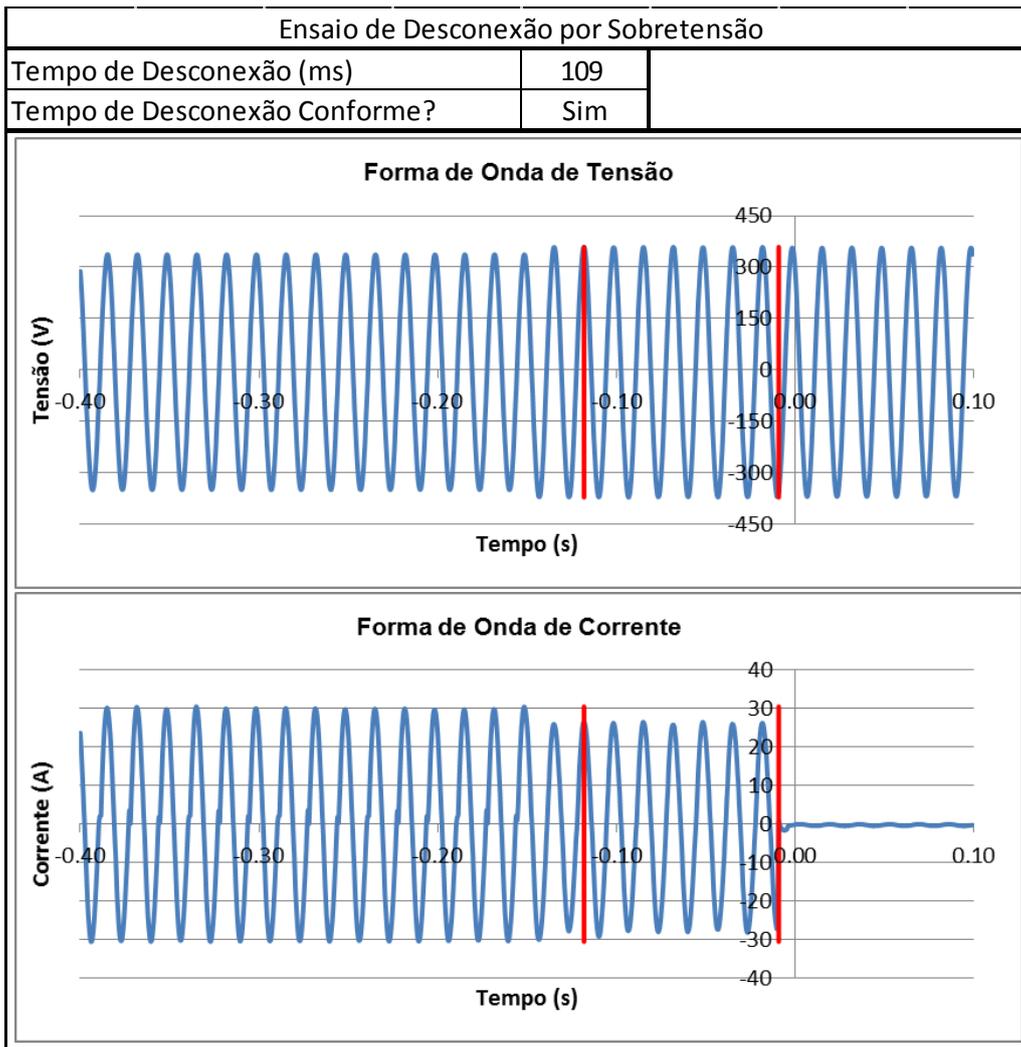
Inversor	Potência (W)	Valor de curva de FP					
		100 % Pnom	75 % Pnom	50 % Pnom	30 % Pnom	20 % Pnom	10 % Pnom
3	4.600	0,949	0,977	0,997	0,999	1,000	0,892
9	4.600	0,936	0,966	0,997	0,999	1,000	0,993
10	5.000	0,952	0,979	1,000	0,999	1,000	0,993
11	4.600	0,948	0,971	1,000	0,995	0,997	0,980
15	5.000	0,947	0,974	0,995	0,993	0,937	0,716

Pnom: Potência nominal do inversor

Os resultados mostram que os valores obtidos estão de acordo com o esperado e desta forma os inversores são capazes de realizar o controle de curva de fator de potência. Porém, cabe destacar que, os inversores de números nove e dez originalmente não possuíam este tipo de controle. Através dos ensaios de desenvolvimento realizados no LSF e coordenação com a equipe técnica dos equipamentos, foram implementados ao *software* de controle dos inversores o modo de operação em curva de FP.

#### 4.2.6. 6º Ensaio – Sobre e subtensão

O ensaio de avaliação do comportamento do inversor sobre condições de sobre / subtensão foi realizado segundo as recomendações das normas brasileiras sem a necessidade de adotar interpretações dos textos das normas. A Figura 4-11 mostra a avaliação do tempo de desconexão por sobretensão em um inversor de 5 kW testado no LSF, as barras verticais indicam o intervalo de tempo considerado desde a detecção do evento de sobretensão até o cessar do fornecimento de corrente a rede elétrica. A Figura 4-12 faz a avaliação do tempo de desconexão para o evento de subtensão, de forma análoga ao evento de sobretensão as barras verticais mostram o intervalo de tempo considerado. A Tabela 4-18 resume os resultados obtidos para os inversores ensaiados no LSF.



**Figura 4-11 - Resultados para ensaio de tempo de desconexão por sobretensão realizado em um inversor de 5 kW no LSF.**

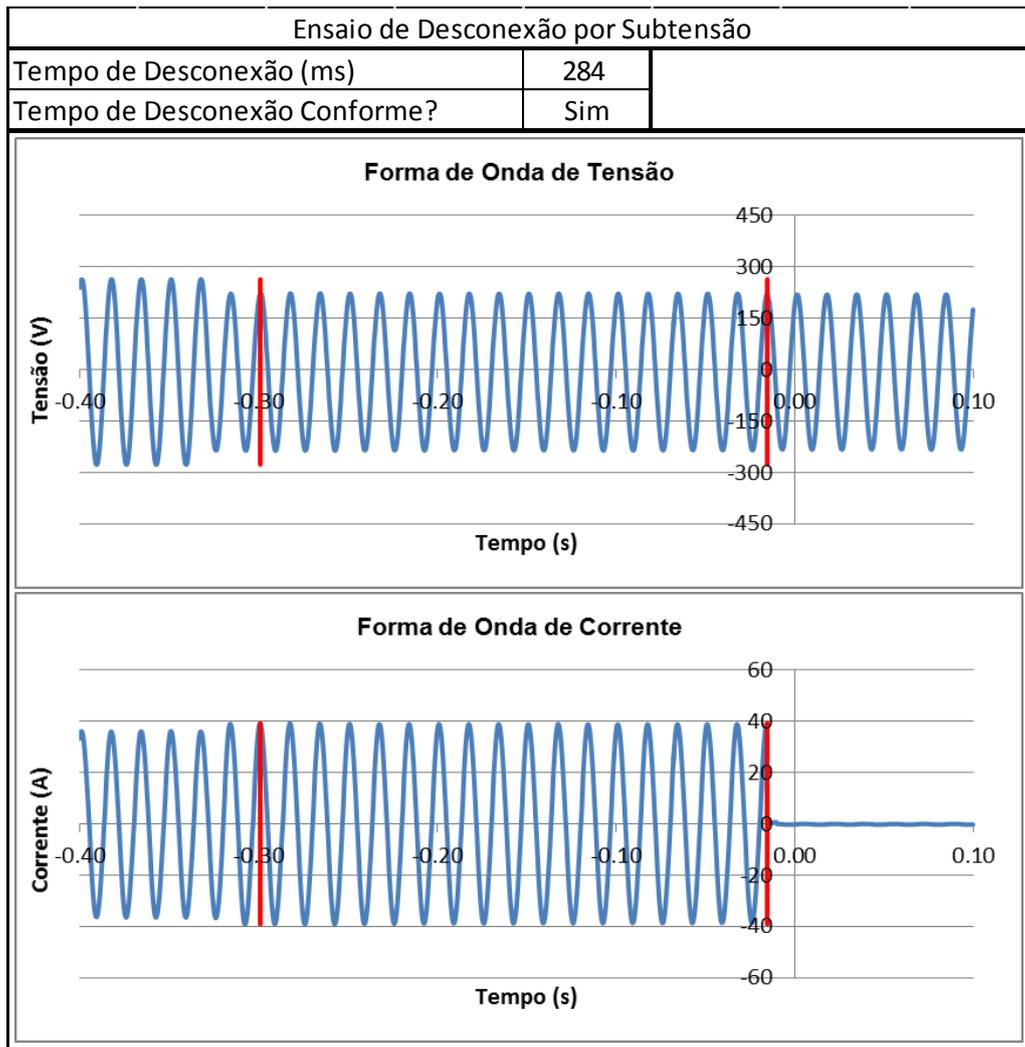


Figura 4-12 - Resultados para ensaio de tempo de desconexão por subtensão realizado em um inversor de 5 kW no LSF.

**Tabela 4-18 - Resumo dos resultados para ensaios de sobre e subtensão realizados no LSF.**

Inversor	Potência (W)	Sobretensão		Subtensão	
		Valor de desconexão (% Vnom)	Tempo de desconexão (ms)	Valor de desconexão (% Vnom)	Tempo de desconexão (ms)
1	1.500	110%	146	80%	153
2	3.000	111%	130	80%	132
3	4.600	111%	153	80%	149
4	250	118%	171	76%	59
5	2.000	110%	165	80%	62
6	700	110%	118	80%	270
7	1.500	110%	135	80%	289
8	2.000	110%	139	80%	289
9	4.600	110%	57	80%	65
10	5.000	110%	44	80%	124
11	4.600	110%	109	79%	136
12	1.000	110%	34	81%	2
13	1.500	111%	116	80%	124
14	3.000	111%	123	80%	115
15	5.000	110%	44	80%	124

Vnom: Tensão nominal do inversor

Os resultados obtidos para os ensaios de condições anormais de tensão mostraram que a maioria dos inversores para SFCR ensaiados no laboratório tem capacidade para atender aos requisitos das normas brasileiras. Porém, cabe ressaltar que durante os testes de desenvolvimento alguns dos inversores tiveram seus níveis de detecção ajustados a fim de atenderem os limites das normas brasileiras.

O inversor de número quatro passou por ensaios de desenvolvimento. Porém não possuía nenhum tipo de sistema para configuração dos parâmetros do inversor. Desta forma, sua parametrização ficou como responsabilidade do fornecedor do equipamento. O resultado da Tabela 4-18 mostra a última configuração do equipamento antes de serem suspensos os ensaios neste equipamento.

#### 4.2.1. 7º Ensaio – Sobre e subfrequência

O ensaio de avaliação do comportamento do inversor frente a condições de sobrefrequência e subfrequência da tensão da rede elétrica foi realizado conforme os procedimentos da norma. Como os procedimentos do ensaio de variação de frequência e controle de potência ativa em sobrefrequência utilizam a mesma referência de item da norma ABNT NBR 16149. Adotou-se como pratica do laboratório a medição e o registro não

somente da frequência de desconexão do inversor, mas também os níveis de potência para cada degrau de frequência.

A Figura 4-13 e a Figura 4-14 mostram a avaliação do tempo de desconexão por sobrefrequência e subfrequência, respectivamente, para um inversor de 5 kW ensaiado no LSF. A Tabela 4-19 resume os resultados obtidos através dos ensaios de inversores ensaiados no LSF.

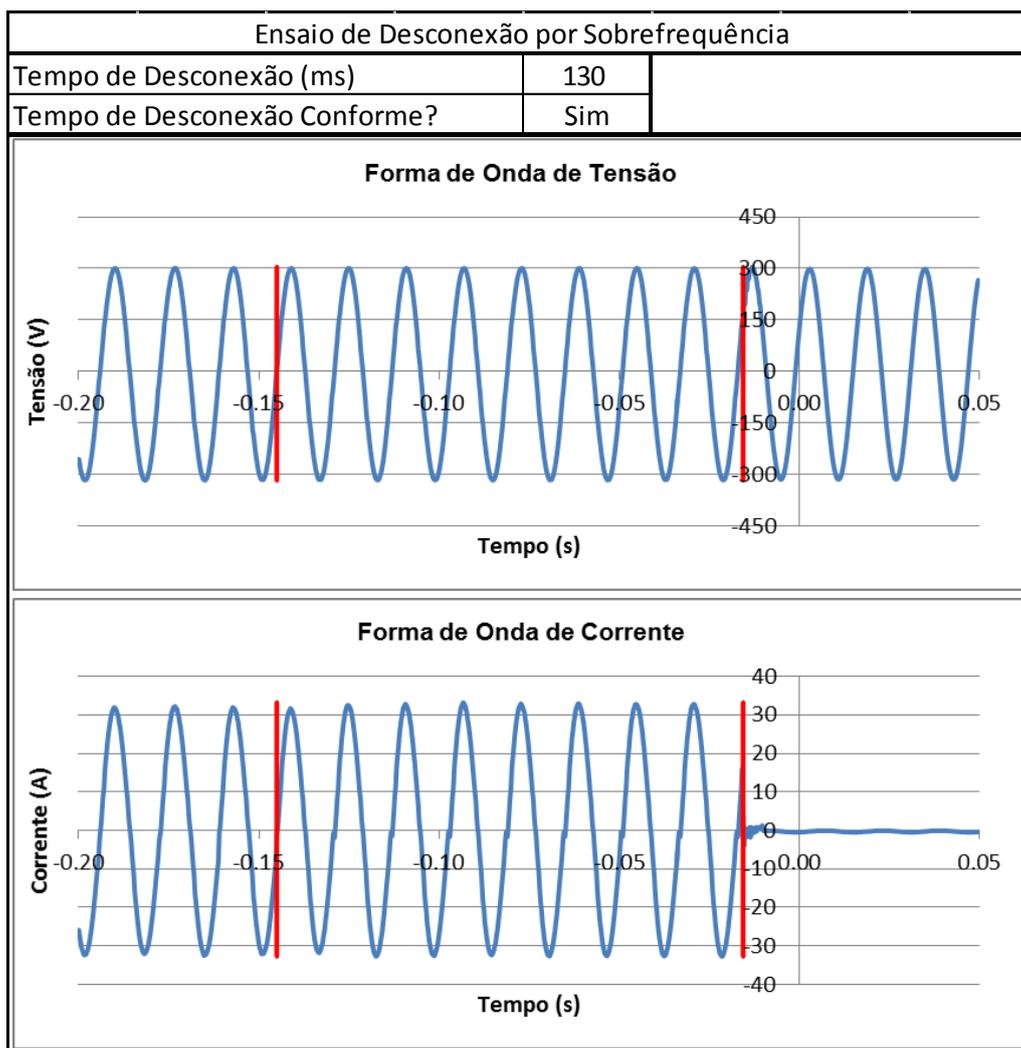
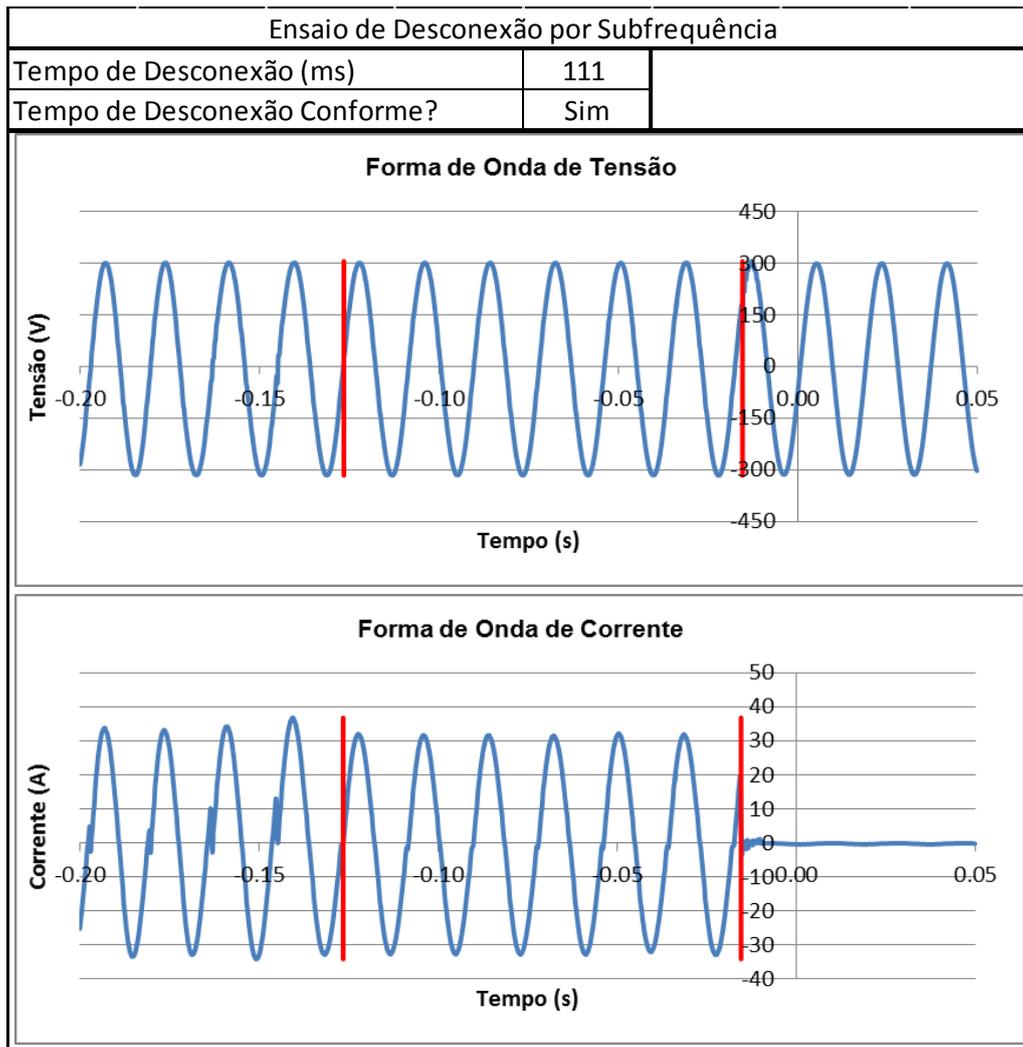


Figura 4-13 - Resultados para ensaio de tempo de desconexão por sobrefrequência realizado em um inversor de 5 kW no LSF.



**Figura 4-14 - Resultados para ensaio de tempo de desconexão por subfrequência realizado em um inversor de 5 kW no LSF.**

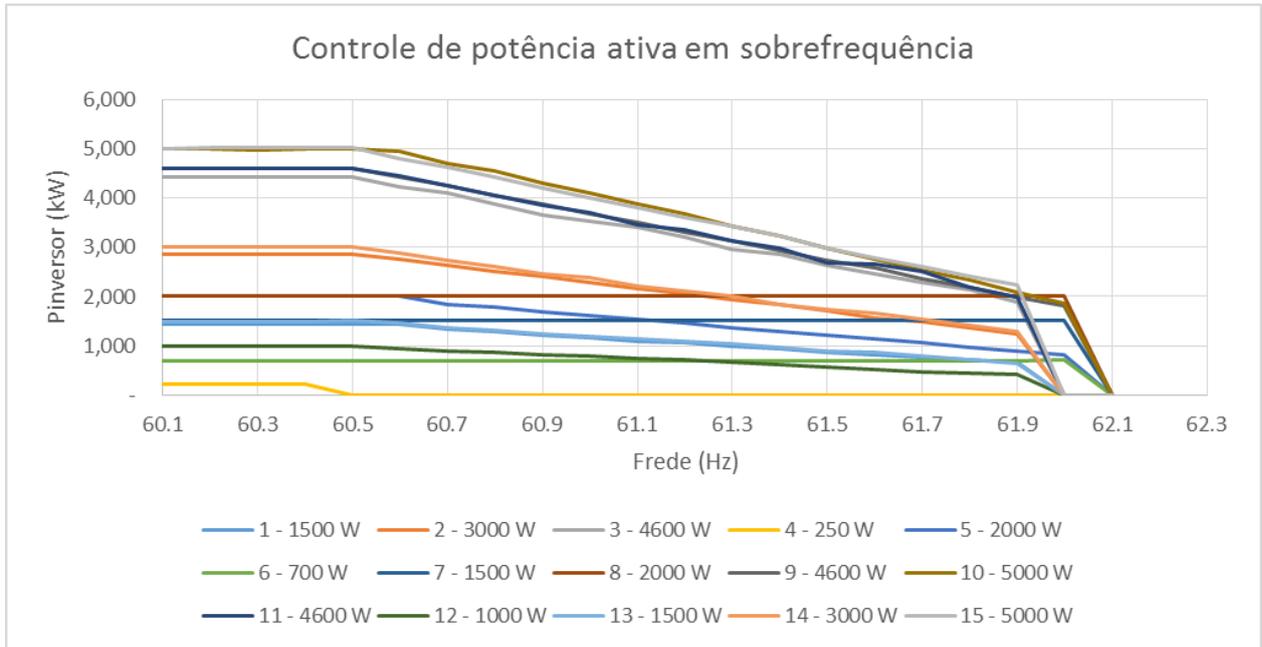
**Tabela 4-19 - Resumo dos resultados para ensaios de sobre / subfrequência realizados no LSF.**

Inversor	Potência (W)	Sobrefrequência		Subfrequência	
		Valor de desconexão (Hz)	Tempo de desconexão (ms)	Valor de desconexão (Hz)	Tempo de desconexão (ms)
1	1.500	62,0	66	57,5	65
2	3.000	62,0	118	57,5	115
3	4.600	62,0	155	57,5	126
4	250	60,5	4	57,5	4
5	2.000	62,1	138	57,5	14
6	700	62,1	109	57,5	126
7	1.500	62,1	92	57,5	124
8	2.000	62,1	125	57,5	123
9	4.600	62,0	86	57,5	86
10	5.000	62,1	130	57,5	111
11	4.600	62,0	33	57,5	41
12	1.000	62,0	52	57,5	35
13	1.500	62,0	25	57,5	31
14	3.000	62,0	26	57,5	27
15	5.000	62,0	33	57,4	41

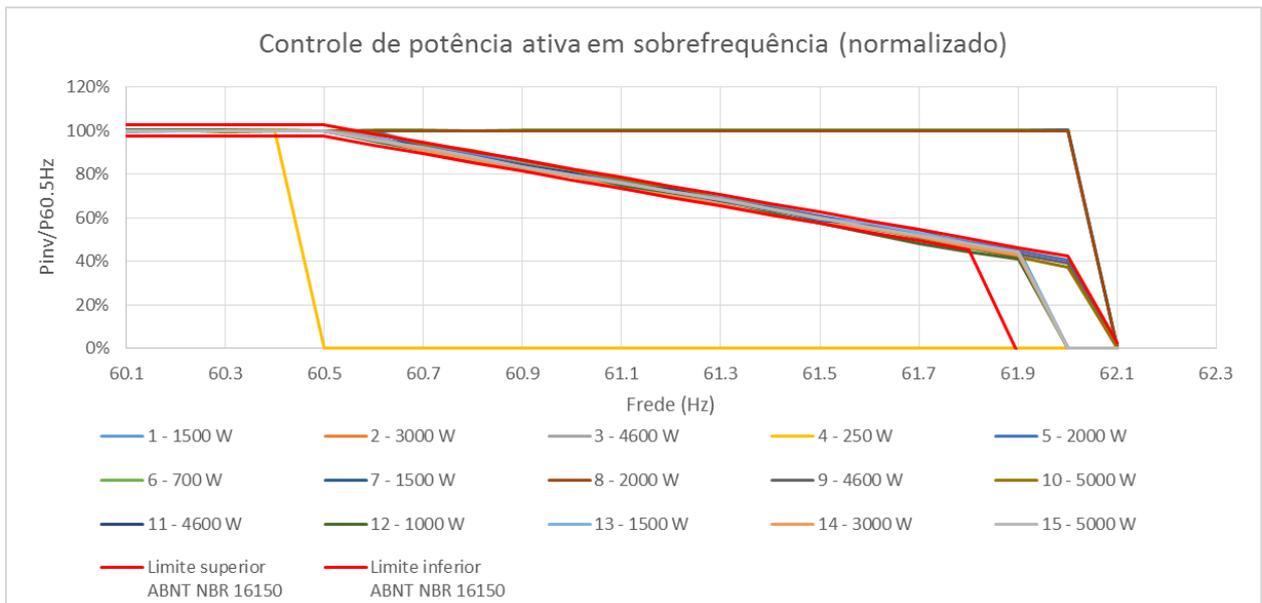
O inversor de número quatro não possuía nenhum tipo de sistema para configuração dos parâmetros do inversor. Então, sua parametrização ficou como responsabilidade do fornecedor do equipamento. O resultado da Tabela 4-19 mostra a última configuração do equipamento antes de serem suspensos os ensaios neste modelo.

Pelos resultados contidos na Tabela 4-19, apenas um modelo de inversor não está de acordo com os limites estabelecidos pela norma, ainda assim a Figura 4-15 mostra os resultados das potências entregues para cada patamar de frequência. Para uma melhor interpretação dos resultados a Figura 4-16 mostra os valores de potência normalizados pela potência entregue pelo inversor a frequência de 60,5 Hz.

A análise da Figura 4-16 revela que alguns dos modelos, mesmo em conformidade com os valores de desconexão e tempo de desconexão, não atendem os requisitos de controle de potência ativa em sobrefrequência avaliados pelo próximo ensaio.



**Figura 4-15 - Resultados para as potências entregues em regime de sobrefrequência para os inversores testados no LSF.**

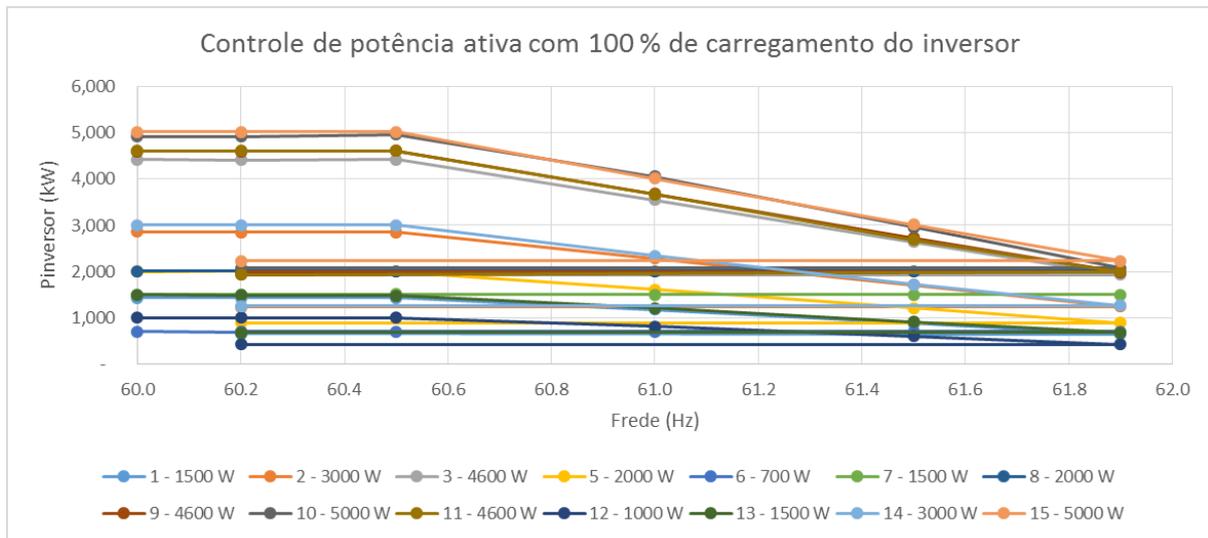


**Figura 4-16 - Resultados normalizados para as potências entregues em regime de sobrefrequência para os inversores testados no LSF.**

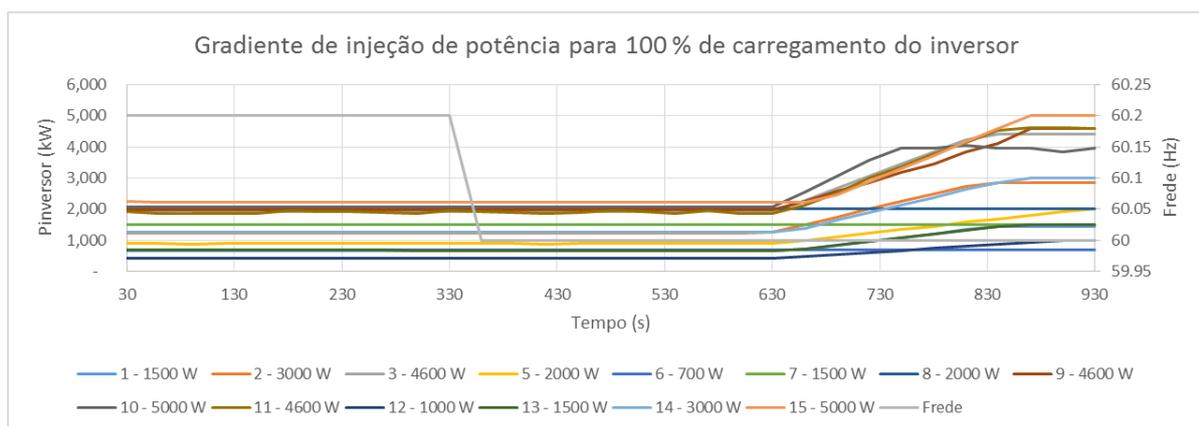
#### 4.2.2. 8º Ensaio – Controle da potência ativa em sobrefrequência

Os ensaios de controle de potência ativa em sobrefrequência foram realizados segundo as orientações das normas brasileiras. A Figura 4-17 mostra os resultados dos ensaios para análise do controle de potência ativa nos pontos de frequência especificados na norma ABNT

NBR 16150. A Figura 4-18 mostra a manutenção da potência reduzida até o retorno das condições normais de rede e gradiente de injeção de potência ativa no tempo.

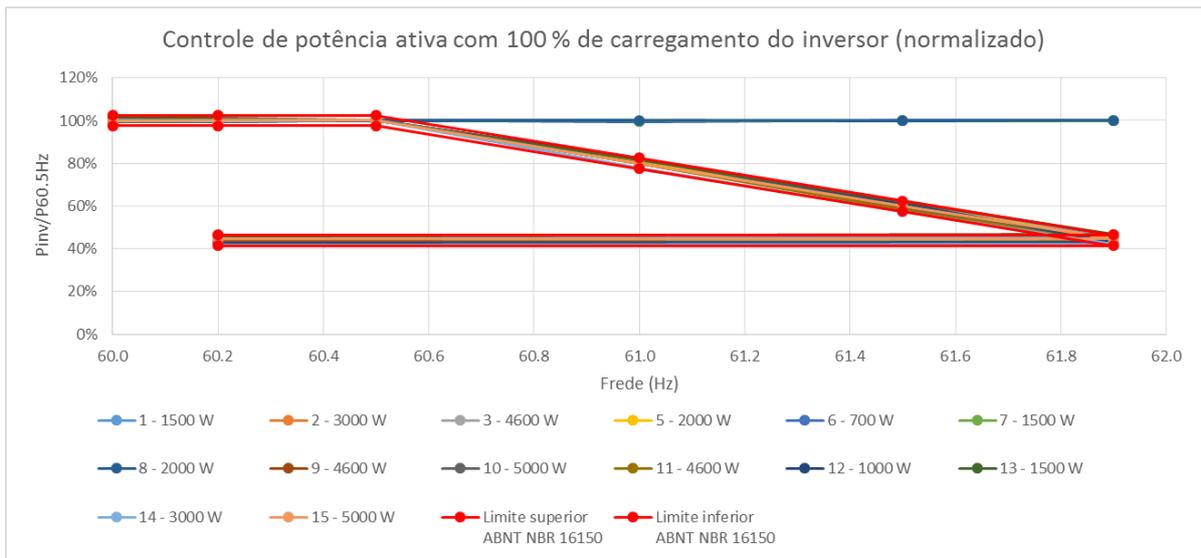


**Figura 4-17 - Primeira parte dos resultados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF.**

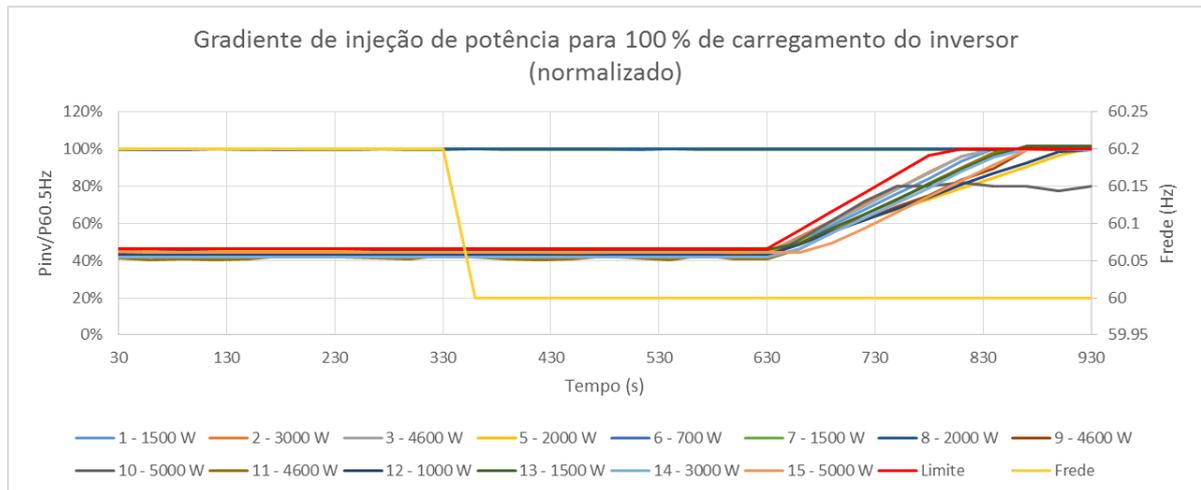


**Figura 4-18 - Segunda parte dos resultados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF.**

De maneira similar à normalização dos resultados mostrados pela Figura 4-16, os resultados do ensaio de controle de potência ativa foram normalizados para identificar a conformidade com os limites das normas brasileiras. A Figura 4-19 mostra os resultados do controle de potência ativa nos pontos de frequência normalizados pela potência entregue pelos inversores a 60,5 Hz. A Figura 4-20 mostra os resultados do gradiente de potência normalizados pelo mesmo fator.



**Figura 4-19 - Primeira parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF.**



**Figura 4-20 - Segunda parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF.**

As figuras normalizadas mostram os limites estabelecidos pelas normas brasileiras para as duas partes do ensaio. Desta forma, durante a primeira parte, os inversores que apresentaram uma injeção de potência acima ou abaixo das linhas limites não estavam em conformidade com os requisitos do ensaio. De forma similar, na segunda parte do ensaio, os inversores que apresentaram um gradiente de injeção de potência que ultrapasse a linha limite ou possuam uma inclinação superior à da linha limite também não estão em conformidade com os requisitos da norma.

A Figura 4-21 e a Figura 4-22 mostram os resultados obtidos para os ensaios realizados com os inversores na condição de 50 % de carregamento.

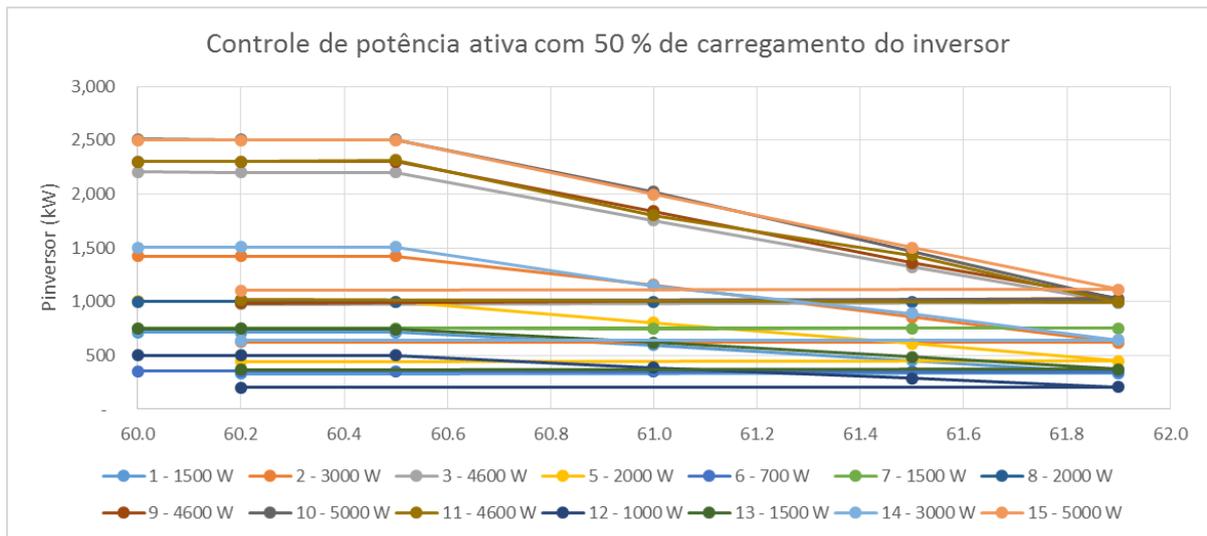


Figura 4-21 - Primeira parte dos resultados dos ensaios de controle de potência ativa em 50 % de carregamento para os inversores testados no LSF.

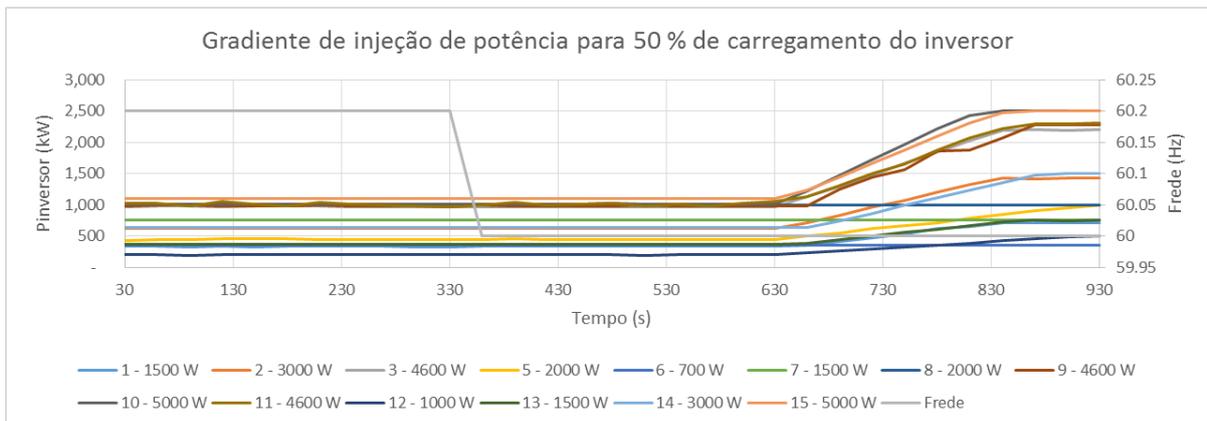
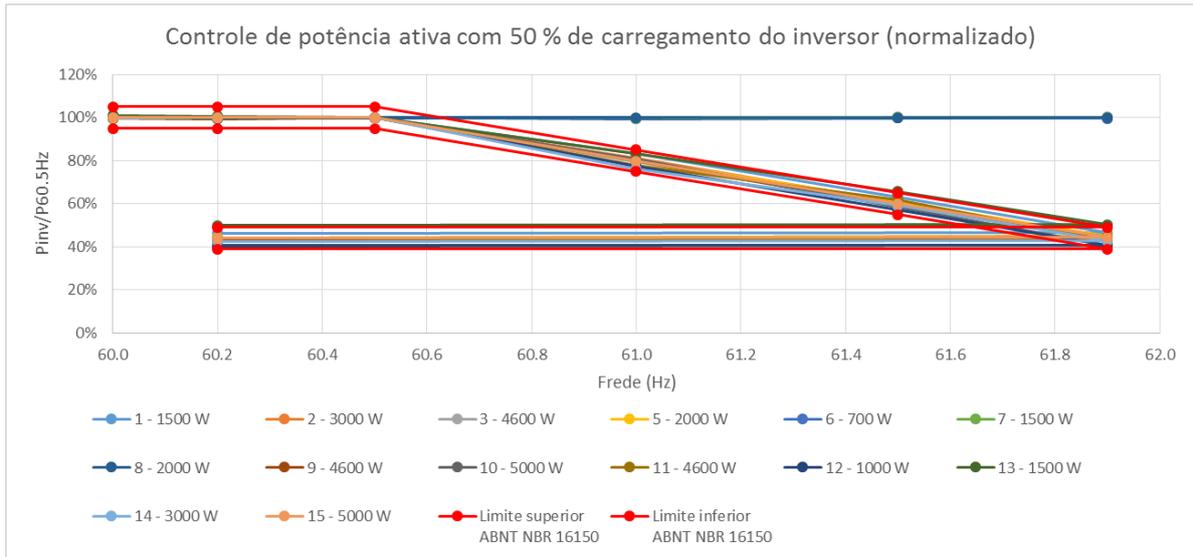
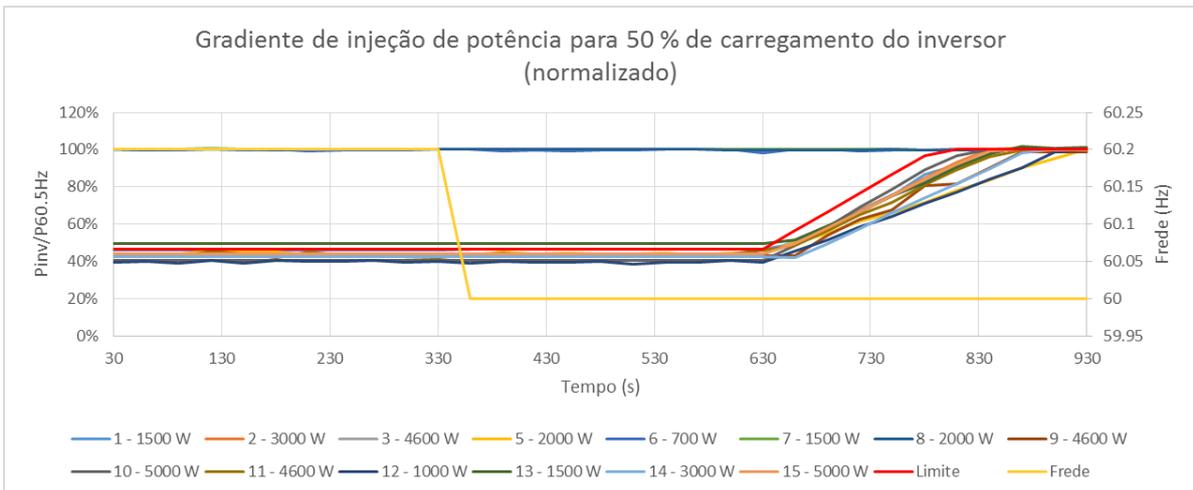


Figura 4-22 - Segunda parte dos resultados dos ensaios de controle de potência ativa em 50 % de carregamento para os inversores testados no LSF.



**Figura 4-23 - Primeira parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 50 % de carregamento para os inversores testados no LSF.**



**Figura 4-24 - Segunda parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF.**

#### 4.2.1. 9º Ensaio – Reconexão

Os ensaios de reconexão foram realizados de acordo com as orientações das normas brasileiras, porém, adotou-se como prática de laboratório a interpretação do texto da norma ABNT 16149 onde o período de reconexão do inversor deve estar entre 20 s e 300 s. A Tabela 4-20 resume os valores obtidos nos ensaios realizados no LSF.

**Tabela 4-20 - Resumo dos resultados para ensaios de reconexão realizados no LSF.**

Inversor	Potência (W)	Tempo de reconexão (s)	
		Sobretensão	Subtensão
1	1.500	52	59
2	3.000	46	44
3	4.600	58	60
4*	250	X	X
5	2.000	35	34
6	700	212	195
7	1.500	196	195
8	2.000	195	194
9	4.600	137	137
10	5.000	82	82
11	4.600	42	42
12	1.000	26	26
13	1.500	47	47
14	3.000	47	47
15	5.000	45	45

\* Não foi realizado o ensaio para este equipamento

Todos os inversores ensaiados no LSF foram capazes de atender a conformidade com os valores das normas brasileiras para a avaliação de tempo de reconexão do inversor com a rede elétrica, com exceção do inversor número quatro em que não foi medido o tempo de reconexão devido aos resultados dos níveis de desconexão por variação de frequência.

#### 4.2.2. 10° Ensaio – Religamento automático fora de fase

Os ensaios de religamento automático fora de fase foram realizados de acordo com a orientações das normas brasileiras. Como o procedimento descrito pela ABNT NBR 16150 admite a desconexão do inversor e não é especificado pelas normas o que caracteriza suportar o descolamento de fase da tensão, no caso de uma desconexão adotou-se como prática de laboratório considerar o tempo de reconexão do inversor no ensaio. A Figura 4-25 mostra o resultado do ensaio de deslocamento do ângulo de fase da tensão de rede em 90° para um inversor de 5 kW ensaiado no LSF, a Figura 4-26 mostra o resultado para o deslocamento de 180° do mesmo inversor.

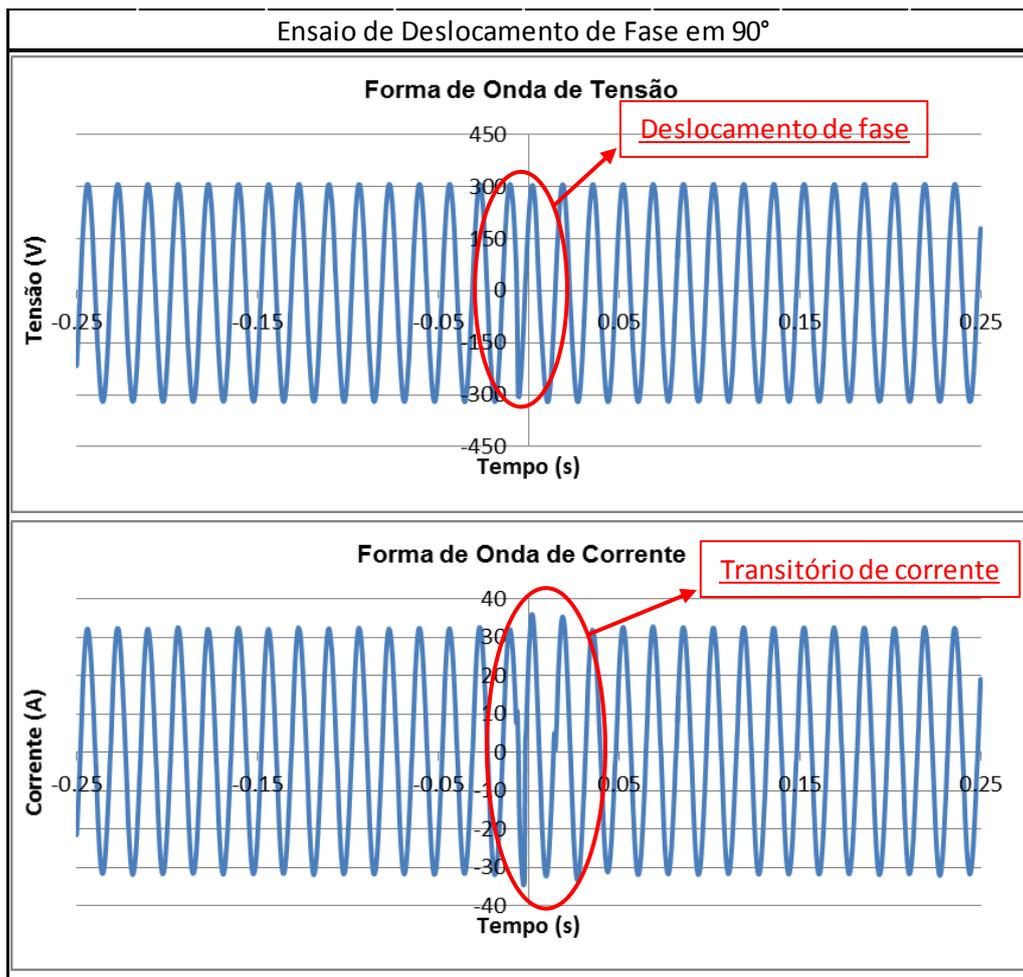


Figura 4-25 - Resultado do ensaio de deslocamento do ângulo de fase de tensão em 90° para um inversor de 5 kW ensaiado no LSF.

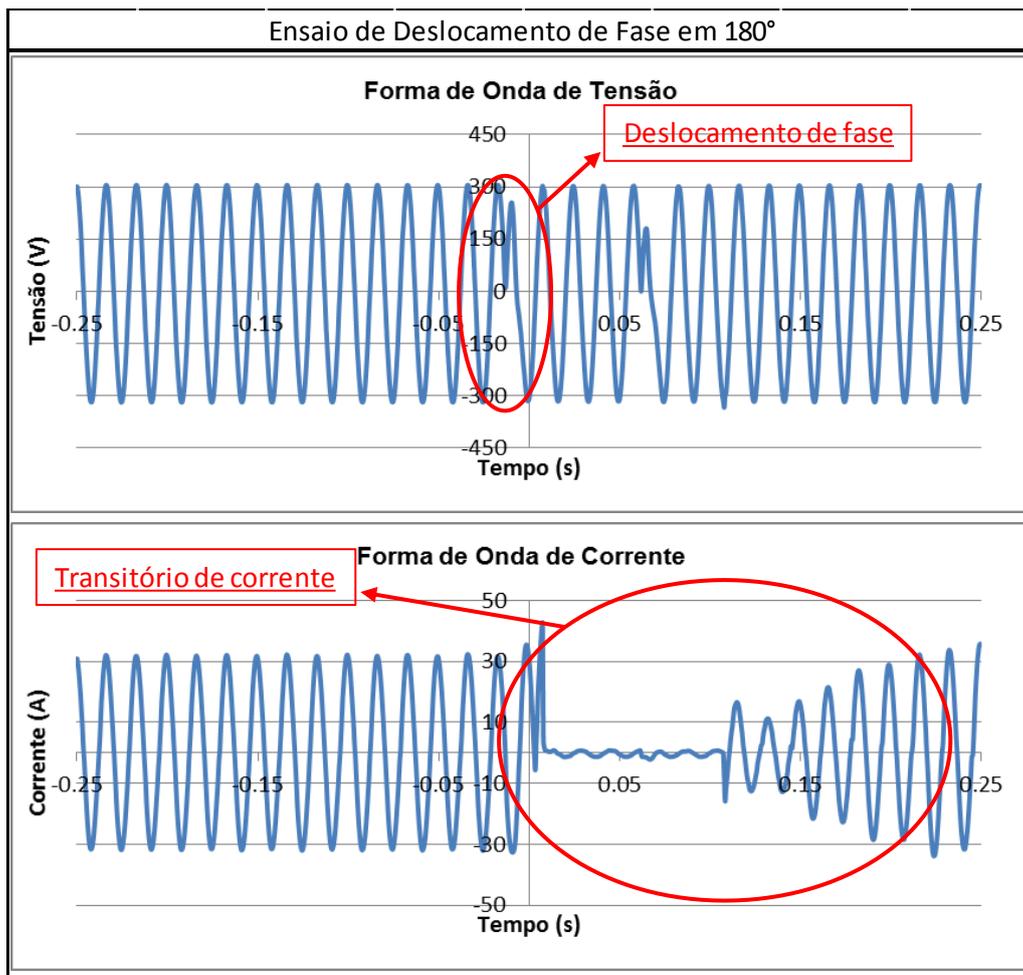


Figura 4-26 - Resultado do ensaio de deslocamento do ângulo de fase de tensão em  $180^\circ$  para um inversor de 5 kW ensaiado no LSF.

Nas figuras acima o inversor foi submetido a deslocamentos de fase da tensão e a injeção de potência foi observada através da forma de onda da corrente. Assim, para o inversor em questão, após os eventos de deslocamento de fase de tensão houveram perturbações na corrente injetada na rede, porém a corrente se estabilizou após alguns ciclos da senoide de tensão configurando a conformidade do equipamento com os requisitos de norma. Esta conformidade será discutida mais à frente neste trabalho.

Como a avaliação do ensaio consiste na observação do funcionamento do inversor após ser submetido aos eventos de deslocamento de fase, considerando o tempo de reconexão, todos os inversores ensaiados no LSF atenderam as condições exigidas pela norma. A Tabela 4-21 resume os resultados obtidos para o deslocamento de  $90^\circ$  no ângulo de fase da tensão e a Tabela 4-22 mostra os resultados para o deslocamento em  $180^\circ$ .

Tabela 4-21 - Resumo dos resultados do ensaio de deslocamento do angulo de fase de tensão em 90° realizados no LSF.

Inversor	Potência (W)	Deslocamento de fase em 90°			
		Corrente de saída do inversor (A)		Desconexão do sistema	Tempo de reconexão (s)
		Antes do pulso	Após o pulso		
1	1.500	6,50	6,50	Não	X
2	3.000	12,80	12,80	Não	X
3	4.600	20,22	20,11	Não	X
4*	250	X	X	X	X
5	2.000	9,59	0,11	Sim	39
6	700	3,16	3,13	Não	X
7	1.500	6,98	6,92	Não	X
8	2.000	8,69	8,62	Não	X
9	4.600	21,10	17,25	Não	X
10	5.000	22,51	22,55	Não	X
11	4.600	20,65	0,52	Sim	40
12	1.000	4,64	0,21	Sim	35
13	1.500	6,83	0,54	Sim	1
14	3.000	7,26	0,53	Sim	1
15	5.000	21,39	0,68	Sim	1

\* Não foi realizado o ensaio para este equipamento

Tabela 4-22 - Resumo dos resultados do ensaio de deslocamento do angulo de fase de tensão em 180° realizados no LSF.

Inversor	Potência (W)	Deslocamento de fase em 180°			
		Corrente de saída do inversor (A)		Desconexão do sistema	Tempo de reconexão (s)
		Antes do pulso	Após o pulso		
1	1.500	6,50	6,52	Sim	54
2	3.000	12,80	12,80	Não	X
3	4.600	20,14	0,00	Sim	53
4*	250	X	X	X	X
5	2.000	9,26	0,21	Sim	42
6	700	3,15	3,09	Não	X
7	1.500	6,92	0,17	Sim	193
8	2.000	8,64	0,22	Sim	195
9	4.600	21,02	20,71	Não	X
10	5.000	22,21	22,70	Não	X
11	4.600	20,55	0,18	Sim	40
12	1.000	4,59	0,11	Sim	26
13	1.500	6,78	6,31	Não	X
14	3.000	13,43	13,80	Não	X
15	5.000	22,45	22,38	Não	X

\* Não foi realizado o ensaio para este equipamento

#### 4.2.3. 11º, 12º e 13º Ensaio – Modulação de potência ativa, modulação de potência reativa e desconexão do sistema fotovoltaico da rede

Este grupo de três ensaios se encaixam sob o mesmo item da norma ABNT 16149, e correspondem a controles de injeção de potência necessários a inversores fotovoltaicos que devem ser acionados por meio de comandos provenientes de uma fonte externa ao inversor.

Como o LSF não recebeu inversores com potência nominal igual ou superior a 6 kW para ensaios, não foram realizados ensaios de modulação de potência ativa e reativa durante os três anos de operação do laboratório, somente foram realizados ensaios de desconexão do sistema fotovoltaico da rede. A Tabela 4-23 mostra um resumo dos resultados obtidos para o ensaio de desconexão dos inversores por meio de telecomando.

**Tabela 4-23 – Resumo dos resultados para ensaios de desconexão realizados no LSF.**

Inversor	Potência (W)	Potência entregue a rede (W)	
		Antes do comando	Após o comando
1	1.500	1.500	0
2	3.000	3.000	0
3	4.600	4.600	0
4*	250	X	X
5	2.000	2.000	-9
6	700	703	-1
7	1.500	1.498	-1
8	2.000	2.020	0
9	4.600	4.598	-1
10	5.000	4.622	0
11	4.600	4.598	-1
12	1.000	1.000	-4
13	1.500	1.501	-1
14	3.000	3.002	-1
15	5.000	5.006	-1

\* Não foi realizado o ensaio para este equipamento

Os inversores ensaiados no LSF apresentaram a desconexão e reconexão por telecomando conforme as orientações das normas brasileiras, com exceção do inversor número quatro que não possuía nenhum tipo de meio de comunicação para envio de comandos externos. Cabe ressaltar que entre os demais inversores, a maioria não dispunha de *software* comercial para a realização do envio do comando de desconexão / reconexão e foi necessário requerer as equipes técnicas de cada equipamento o desenvolvimento de um *software* para realização deste ensaio. Durante a desconexão alguns inversores ainda apresentaram algum fluxo de

potência, porém abaixo de 1 % a potência nominal do inversor e foram considerados em desconexão.

#### 4.2.4. 14º Ensaio – Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede

Conforme mencionado no item 4.2.3 o LSF não recebeu equipamentos com potência nominal igual ou superior a 6 kW para ensaios de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede. O item 4.3.12 apresenta os comentários pertinentes a esse ensaio com base nas experiências dos ensaios de subtensão realizados no laboratório.

#### 4.2.5. 15º e 16º Ensaio – Proteção contra inversão de polaridade e sobrecarga

Os ensaios de proteção contra inversão de polaridade e sobrecarga foram realizados de acordo com as orientações da Portaria 357. A Tabela 4-24 mostra o resumo dos resultados dos ensaios de inversão de polaridade realizados no LSF, a Tabela 4-25 apresenta os resultados para os ensaios de sobrecarga.

**Tabela 4-24 - Resumo dos resultados para ensaios de inversão de polaridade realizados no LSF.**

Inversor	Potência (W)	Potência entregue a rede (W)	
		Polaridade invertida	Polaridade correta
1	1.500	-1	1.440
2	3.000	0	2.872
3	4.600	3	4.473
4*	250	X	X
5	2.000	-2	2.000
6	700	-1	703
7	1.500	-1	1.506
8	2.000	-1	2.021
9*	4.600	X	X
10	5.000	-1	4.994
11	4.600	-1	4.609
12	1.000	-3	1.003
13	1.500	-1	1.496
14	3.000	-1	2.999
15	5.000	-1	4.993

\* Não foi realizado o ensaio para este equipamento

**Tabela 4-25 - Resumo dos resultados para ensaios de sobrecarga realizados no LSF.**

Inversor	Potência (W)	Potência entregue a rede (W)	
		Em sobrecarga	Operação normal
1	1.500	1.504	1.435
2	3.000	3.016	2.874
3	4.600	4.634	4.416
4*	250	X	X
5	2.000	1.996	1.991
6	700	738	704
7	1.500	1.608	1.507
8	2.000	2.080	2.019
9*	4.600	X	X
10	5.000	5.072	4.924
11	4.600	4.658	4.608
12	1.000	1.085	996
13	1.500	1.531	1.498
14	3.000	3.022	3.003
15	5.000	5.070	5.000

\* Não foi realizado o ensaio para este equipamento

Os valores mostrados na Tabela 4-24 e na Tabela 4-25 correspondem a potência entregue pelo inversor ao final do período de medição especificado pela Portaria 357 para cada situação de ensaio. Os inversores ensaiados no LSF apresentaram conformidade com os requisitos expostos na Portaria 357. Durante a inversão de polaridade alguns inversores ainda apresentaram algum fluxo de potência, porém abaixo de 1 % a potência nominal do inversor e foram considerados em desconexão.

Os inversores de números quatro e nove não foram ensaiados para estes requisitos, pois são ensaios que podem causar algum tipo de dano ao equipamento sob ensaio. Desta forma, como estes equipamentos estavam sob ensaios de desenvolvimento, não foram realizados ensaios que pudessem danificar as amostras até que os demais requisitos das normas brasileiras fossem ensaiados com sucesso.

#### 4.2.6. 17º Ensaio – Anti-ilhamento

O ensaio para avaliação da proteção do inversor em relação a uma situação de ilhamento é orientado pelo texto da norma ABNT NBR/IEC 62116, os ensaios realizados no LSF seguiram as orientações da norma. Mas devido à falta de integração entre os requisitos desta norma e da norma ABNT 16149, algumas práticas de laboratório foram adotadas a fim de

viabilizar os ensaios em inversores. A Tabela 4-26 apresenta o resultado do ensaio para um inversor de 4,6 kW de potência nominal e a Tabela 4-27 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os inversores ensaiados no LSF, com os tempos de desconexão dos inversores para as três condições de equilíbrio do sistema.

**Tabela 4-26 - Resultado do ensaio de anti-ilhamento para um inversor de 4,6 kW ensaiado no LSF.**

Proteção Contra Ilhamento								
	Min	Máx						
Tensão de MPPT (V)	125	550						
Tensão CC Máxima (V)	580							
Potência Nominal (kW)	4.600							
	Condição A		Condição B		Condição C			
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx		
Pese (kW)	4.600	4.600	2.300	3.036	1.150	1.518		
Vcc (V)	430	464	265	324	125	159		
Nº	Pese (%)	Ql (%)	Pca (%)	Qca (%)	Tempo de Permanência da Alimentação (ms)	Pese (kW)	Qf efetiva	Vcc (V)
1	100%	101%	0,1%	-0,6%	123	4.606	1,006	446
2	58%	58%	0,8%	1,0%	123	2.660	1,000	293
3	29%	29%	0,3%	-0,4%	141	1.341	0,988	141
4	100%	100%	-5,1%	-3,6%	207	4.599	1,000	446
5	100%	100%	-4,0%	0,6%	114	4.600	1,000	445
6	100%	100%	-4,8%	3,7%	156	4.597	1,000	445
7	100%	100%	-0,7%	-4,6%	93	4.596	1,005	445
8	100%	100%	0,7%	5,1%	162	4.597	1,005	445
9	100%	100%	3,8%	-4,3%	78	4.597	1,006	445
10	100%	101%	3,7%	-1,0%	123	4.593	1,010	445
11	100%	100%	4,4%	5,5%	96	4.593	1,006	445
12	58%	58%	0,4%	-4,9%	174	2.661	1,001	294
13	58%	58%	0,7%	-3,8%	192	2.661	1,000	294
14	58%	58%	0,5%	-1,9%	222	2.662	1,000	294
15	58%	58%	0,0%	-2,7%	117	2.662	1,000	294
16	58%	58%	0,5%	-2,0%	210	2.662	1,001	294
17	58%	58%	0,7%	0,8%	168	2.662	1,001	294
18	58%	58%	0,6%	0,5%	219	2.662	0,998	293
19	58%	58%	0,2%	3,7%	150	2.662	1,000	294
20	58%	58%	0,0%	3,6%	165	2.661	1,000	294
21	58%	59%	0,0%	5,5%	93	2.694	1,001	293
22	29%	29%	0,4%	-5,0%	162	1.339	0,987	141
23	29%	29%	-0,1%	-4,6%	120	1.339	0,988	141
24	29%	29%	0,1%	-3,1%	144	1.339	0,986	142
25	29%	29%	0,1%	-2,0%	165	1.339	0,987	141
26	28%	28%	0,2%	-1,4%	231	1.306	0,985	141
27	28%	28%	-0,3%	1,5%	273	1.306	0,984	141
28	28%	28%	0,1%	1,9%	138	1.307	0,986	141
29	28%	28%	0,1%	2,4%	174	1.307	0,986	141
30	28%	28%	0,1%	3,7%	228	1.307	0,984	141
31	28%	28%	0,1%	4,5%	264	1.306	0,985	141

Tabela 4-27 - Resumo dos resultados para ensaios de anti-ilhamento realizados no LSF.

Inversor	Potência (W)	Tempo de desconexão (ms)		
		Condição A	Condição B	Condição C
1	1.500	258	232	153
2	3.000	152	185	179
3	4.600	144	136	83
4*	250	X	X	X
5	2.000	111	203	190
6	700	240	216	203
7	1.500	212	201	198
8**	2.000	276	200	192
9***	4.600	X	X	X
10**	5.000	218	219	X
11	4.600	123	123	141
12	1.000	81	54	75
13	1.500	285	276	252
14**	3.000	198	282	138
15**	5.000	123	171	198

\* Não foi realizado o ensaio para este equipamento  
\*\* Não foi possível realizar o ensaio devido a oscilação de potência reativa dos inversores  
\*\*\* O inversor operou em situação de ilhamento

Os resultados mostram que os tempos de desconexão dos equipamentos ensaiados são consideravelmente inferiores ao limite de dois segundos estabelecido pela norma. Isto se deve a falta de integração entre os textos das normas, assim, para atender os limites de desconexão por outros defeitos na rede, como variação de tensão e frequência, os inversores tendem a apresentar tempos de desconexão abaixo de 400 ms. Desta forma o tempo de desconexão não foi um empecilho aos inversores ensaiados no LSF e o ensaio remeteu a avaliação de se o inversor cessa ou não o fornecimento de energia a rede.

Cabe ressaltar que devido a oscilações na potência reativa entregue pelos inversores, em alguns casos não foi possível impor ao sistema as condições de operação descritas pela norma, conforme é apresentado mais a frente neste trabalho.

### **4.3. Considerações aos ensaios realizados**

#### **4.3.1. 1º Ensaio – Cintilação**

O ensaio de avaliação do efeito de cintilação em inversores para SFCR é realizado no LSF seguindo as orientações das normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150 que remetem as normas IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-11 e IEC/TS 61000-3-5.

Conforme a análise da Tabela 4-12, os ensaios de cintilação, da maneira como são avaliados para inversores para SFCR, pouco refletem as características do efeito de cintilação do equipamento sob ensaio.

Segundo Hernández, et al. (2011), embora não possam ser descartados os efeitos de cintilação devido a operação de sistemas elétricos de geração distribuída, estes efeitos são de baixa importância. Ainda assim para efeito de ensaios de conformidade de produtos são levantadas pelos autores as condições de avaliação de cintilação pelo relatório técnico IEC 77A/695A/CD (contido atualmente na norma IEC/TR 61000-3-15), a necessidade de avaliação sob condições desfavoráveis de variação de potência ou corrente e a necessidade de avaliar a operação automática do equipamento.

Estudos conduzidos por Ortega, Hernández e García (2013), Spring, et al. (2013), e Rusinaru, et al. (2015) analisam a contribuição da cintilação causada por SFCR, porém concluem que este tipo de efeito é de baixo impacto quando comparado ao efeito causado pelas cargas ligadas a rede elétrica. Em outro estudo, Dong, et al. (2016) propõe uma metodologia de avaliação do efeito de cintilação baseado no perfil de irradiância do SFCR.

Como principal contribuição para a melhoria dos ensaios desenvolvidos nos laboratórios brasileiros e melhor atendimento do programa de etiquetagem a sociedade, sugere-se uma mudança na redação das normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150 de forma a fazer referência a norma IEC/TR 61000-3-15. A avaliação dos estudos relacionando o efeito de cintilação a operação de inversores para SFCR mostra que devem ser melhor implementadas as condições de ensaio para avaliação deste efeito, como, por exemplo, a variação da potência de entrada do inversor durante o ensaio e o seu impacto na cintilação causada pela corrente de saída do inversor.

Além da recomendação em abordar outros aspectos das normas IEC, é recomendado um estudo dos procedimentos para avaliação de cintilação de forma a criar uma norma de referência similar ao conteúdo das normas IEC, porém visando ao cenário brasileiro.

#### 4.3.2. 2º Ensaio – Injeção de componente contínua

A norma ABNT NBR 16150 apresenta o procedimento de ensaio de injeção de componente contínua e utiliza o termo “deslocar a corrente de saída” em sua descrição, porém, não existe menção no texto desta norma, ou no texto da norma ABNT 16149, de um procedimento a ser utilizado para se obter o efeito de deslocamento da corrente de saída e, por consequência, o aumento do nível de corrente contínua entregue a rede elétrica pelo inversor, para a realização do ensaio.

A norma IEEE 1547 possui descrição e procedimento de avaliação da injeção de componente contínua muito próximos dos textos das normas brasileiras, com a avaliação do nível de componente c.c. em, no máximo, 0,5 % da corrente nominal do inversor e níveis de potência de ensaio em 33 %, 66% e 100% da potência nominal do inversor. Ainda assim a IEEE 1547 não requer nenhum tipo de alteração na corrente entregue pelo inversor a rede durante o ensaio, e, desta forma, o ensaio para avaliação do nível de componente c.c. fica restrito a verificação do nível de componente c.c. entregue abaixo do valor de 0,5 % da corrente nominal do inversor.

Segundo Blewitt, et al. (2010), a injeção de componente c.c. pode ser dividida em duas categorias, a corrente de modo comum e de modo diferencial. As correntes de modo comum são provenientes de correntes de fuga entre os barramentos c.a. e c.c. devido a capacitância parasita entre o arranjo de módulos fotovoltaicos e o aterramento. As correntes de modo diferencial são o resultado de erros em malhas fechadas de medição de corrente, incluindo erros na conversão analógica-digital e de medição do sensor de corrente. Ainda segundo Sharma (2005), existem três fatores que podem levar a injeção de componente c.c. pelo inversor:

- Diferenças nas impedâncias dos terminais de ligação do inversor;
- Componente contínua de corrente presente na corrente de referência do inversor;
- Introdução feita por sensores de Efeito Hall do inversor.

Sendo a injeção de componente c.c. um problema inerente ao uso de inversores conectados à rede elétrica (SALAS et al., 2007), as soluções propostas, descritas por Blewitt, et al. (2010), Sharma (2005), He, Xu, e Chen (2015), e Berba, Atkinson e Armstrong (2014), para mitigação deste problema utilizam a aplicação de componentes como capacitores e técnicas de controle no próprio inversor.

A partir das referências apresentadas é possível constatar que a injeção de componente c.c. pelo inversor é um efeito independente das condições de rede e é causado principalmente pela relação entre a topologia do inversor e seu sistema de controle. Desta forma a injeção de componente contínua é um aspecto do equipamento que depende principalmente do projeto do inversor.

Como a injeção de componente c.c. pelo inversor a ser ensaiado não depende de condições anormais da rede elétrica, o procedimento de ensaio descrito pela norma ABNT NBR 16150 torna necessária a alteração da injeção de componente c.c. pelo inversor através da manipulação do seu sistema de controle, causando uma operação indevida do equipamento.

A necessidade do ensaio em causar uma operação indevida do equipamento ensaiado de forma a verificar se existe proteção contra este efeito, torna a proposta deste procedimento pouco razoável, dado que, o propósito de um ensaio de conformidade é verificar a compatibilidade de operação do equipamento segundo os parâmetros aceitáveis por norma, e a alteração no comportamento da amostra ensaiada remete a invalidação do ensaio realizado por tendência dos dados coletados.

Como não existe um procedimento descrito pelas normas brasileiras para realizar o aumento da componente c.c. entregue pelo inversor fotovoltaico, o procedimento da forma como está apresentado gera incertezas quanto a validade do ensaio, e devido à similaridade entre os textos das normas brasileiras e americanas, adotou-se como uma prática de laboratório o desenvolvimento do ensaio de injeção de componente contínua como a avaliação do nível de componente c.c. em relação ao valor de 0,5 % do valor da corrente nominal do inversor.

Desta forma sugere-se a adequação dos textos das normas ABNT 16149 e 16150 suprimindo a necessidade do “deslocamento” da corrente de saída do inversor e da desconexão deste em até um segundo, tornando a avaliação deste requisito pelas normas brasileiras idêntica ao apresentado pela IEEE 1547. Uma vez adotado o procedimento conforme a norma

americana, sugere-se a inserção do teste de injeção de componente contínua junto ao teste de avaliação de harmônicos e distorção de forma de onda, onde os patamares de potência de ensaio do inversor são maiores, e assim aumentando os níveis de potência do inversor para avaliação deste parâmetro.

Além das observações a respeito do desenvolvimento do ensaio é ressaltado o valor de exatidão do instrumento de medição para componente contínua e harmônicos de corrente. Segundo a norma ABNT NBR 16150 a exatidão do equipamento de medição deve ser 0,5 % para as medições de fator de potência e componente contínua e o equipamento deve estar em conformidade com a norma IEC 61000-4-7.

A norma IEC 61000-4-7 define instrumentos de medição em duas classes de exatidão, sendo a primeira classe sugerida a equipamentos que irão realizar avaliação de conformidade com normativas e outras situações onde medições exatas são necessárias. A segunda classe é destinada a equipamentos de monitoramento. A Tabela 4-28 mostra os valores de exatidão necessários ao instrumento de medição de primeira classe, segundo a IEC.

**Tabela 4-28 - Exatidão do instrumento de medição Classe I segundo a IEC 61000-4-7.**

Medida	Condição	Erro máximo
Tensão	$V_{md} \geq 1 \% V_{fe}$	$\pm 5 \% V_{md}$
	$V_{md} < 1 \% V_{fe}$	$\pm 0,05 \% V_{fe}$
Corrente	$I_{md} \geq 3 \% I_{fe}$	$\pm 5 \% I_{md}$
	$I_{md} < 3 \% I_{fe}$	$\pm 0,15 \% I_{fe}$
Potência	$P_{md} \geq 150 \text{ W}$	$\pm 1 \% P_{md}$
	$P_{md} < 150 \text{ W}$	$\pm 1,5 \text{ W}$

$V_{md}$ ,  $I_{md}$ ,  $P_{md}$ : Tensão, corrente e potência medidas  
 $V_{fe}$ ,  $I_{fe}$ : Tensão e corrente do fundo de escala

Como não são descritas pela norma ABNT NBR 16150 as condições de medição em relação ao valor de 0,5 % para medição de componente contínua, sugere-se que o texto da norma seja alterado de forma a contemplar a exatidão do equipamento para medição de componente contínua conforme os limites da norma IEC 61000-4-7.

#### 4.3.3. 3° Ensaio – Harmônicos e distorção de forma de onda

Os textos das normas que baseiam o ensaio para avaliação de harmônicos e distorção de forma de onda possuem algumas divergências que tornam necessária a adoção de certas adequações para desenvolvimento do ensaio.

Segundo a norma ABNT NBR 16149 a  $DHT_I$  deve ser inferior a 5 % em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor e o conteúdo harmônico deve estar dentro dos limites conforme descrito na Tabela 2-1. Pela norma ABNT NBR 16150 os valores de  $DHT_I$  e  $DHI_I$  devem ser avaliados para seis níveis de potência entregues na saída pelo inversor, sendo os limites estabelecidos pela ABNT NBR 16149 (Tabela 2-1). Desta forma, adotou-se como prática do laboratório a avaliação de todos os níveis de potência conforme os procedimentos descritos pela norma ABNT NBR 16150, mas o critério de conformidade refere-se somente aos valores de  $DHT_I$  e  $DHI_I$  para a situação em que o inversor entrega 100 % de sua potência nominal a rede.

Durante os ensaios realizados no LSF verificou-se a impossibilidade dos inversores em atenderem os critérios de  $DHT_I$  e  $DHI_I$  para níveis mais baixos de potência entregue a rede elétrica.

Conforme verificado por Ortega, Hernández e García (2013), Gallo, Landi e Luiso (2012), Langella, et al. (2016), e Pereira, et al. (2017), é esperado inversores apresentarem altos índices de  $DHT_I$  para baixas potências entregues a rede elétrica (Figura 4-27). Ainda, conforme apresentado por Ahmad e Singh (2017), diversas topologias de inversores, sem transformador e com potência de saída semelhante às amostras testas no LSF, quando trabalhando em sua potência nominal possuem valores de  $DHI_I$  entre 1,8 % e 2,6 %, condizentes aos valores obtidos nos ensaios do LSF (Tabela 4-14), para os inversores que apresentaram conformidade com todos os itens das normas brasileiras.

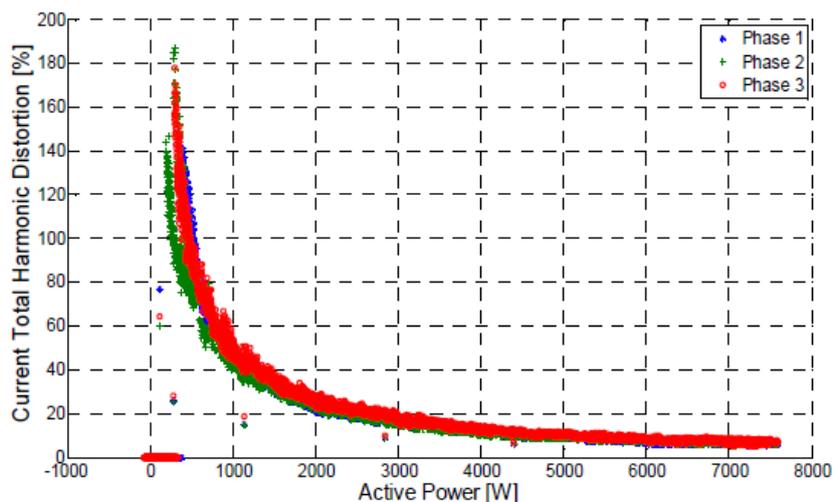


Figura 4-27 – DHT<sub>I</sub> de um SFCR trifásico em função do carregamento (Fonte: Gallo, Landi e Luiso (2012)).

Os estudos realizados por Ortega, Hernández e García (2013), e Langella, et al. (2016) também ressaltam que a condição de DHT<sub>V</sub> de rede também pode afetar a DHT<sub>I</sub> de inversores conectados, porém, os impactos sobre a DHT<sub>V</sub> da rede elétrica causados pela inserção de inversores fotovoltaicos são tidos como de baixa significância, conforme apresentado por Gallo, Landi e Luiso (2012), e Pereira, et al. (2017). A Figura 4-28 mostra o efeito de DHT<sub>V</sub> da rede elétrica em relação ao carregamento do sistema fotovoltaico.

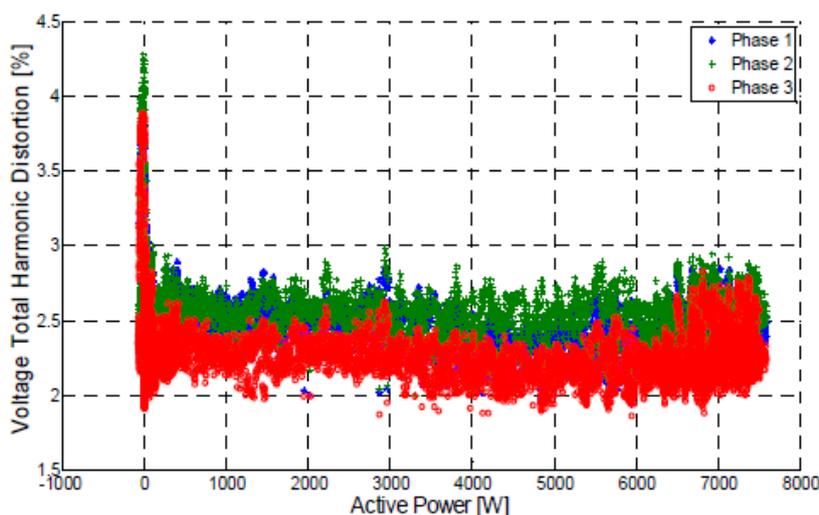


Figura 4-28 - DHT de tensão de uma rede elétrica com SFCR trifásico em função do carregamento (Fonte: Gallo, Landi e Luiso (2012)).

Um dos ensaios de desenvolvimento de produto realizado no LSF obteve resultados de não conformidade em DHT<sub>I</sub> para o produto ensaiado, mesmo na condição de entrega da potência nominal do equipamento. O motivo de não conformidade foi o excedente de DHT<sub>I</sub>. O equipamento então foi ensaiado em duas condições, com o simulador de rede e com a rede

elétrica, ambos de acordo com valores de  $DHT_V$  abaixo do valor de 2,5 % conforme a ABNT NBR 16150.

A Figura 4-29 mostra os valores de distorção harmônica de tensão para o simulador de rede e para a entrada de rede elétrica do laboratório. Como a norma ABNT NBR 16150 não menciona valores de  $DHI_V$  para o simulador de rede utilizado nos ensaios, de forma a caracterizar o simulador e garantir a qualidade dos ensaios realizados, foram comparados os valores de  $DHI_V$  aos valores descritos pela norma IEC 61000-3-2 (Tabela 4-29). A Figura 4-30 mostra o impacto da operação do inversor na distorção harmônica de tensão para os dois casos.

Os resultados da distorção harmônica de corrente exibidos na Figura 4-31 mostram que mesmo com as duas condições de conexão, o equipamento ensaiado não conseguiu cumprir os requisitos de conformidade da norma brasileira. Porém, entre o ensaio de conexão com o simulador de rede e com a rede elétrica, houve diferenças nos valores obtidos para a distorção harmônica de corrente do inversor. Ainda assim não houve diferença significativa no valor de  $DHT_I$  nos dois ensaios.

Tabela 4-29 - Valores de  $DHI_V$  de tensão do simulador de rede pela IEC 61000-3-2

Critério de $DHI_V$ de tensão do simulador de rede - IEC 61000-3-2	Limite
3º Harmônico	< 0,9 %
5º Harmônico	< 0,4 %
7º Harmônico	< 0,3 %
9º Harmônico	< 0,2 %
Harmônicos pares - 2º a 10º	< 0,2 %
Harmônicos - 10º a 40º	< 0,1 %

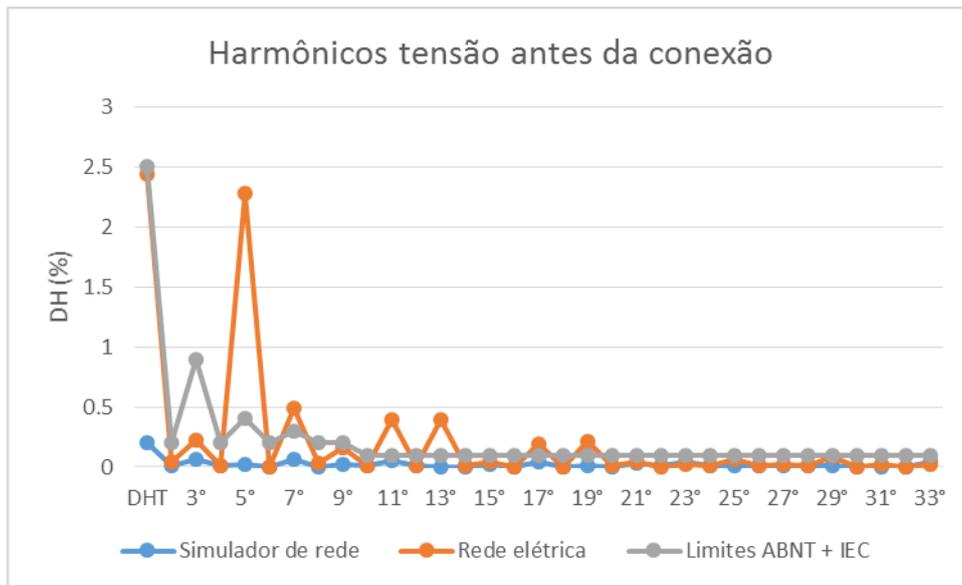


Figura 4-29 - Distorção harmônica de tensão antes da conexão do inversor de 4,6 kW.

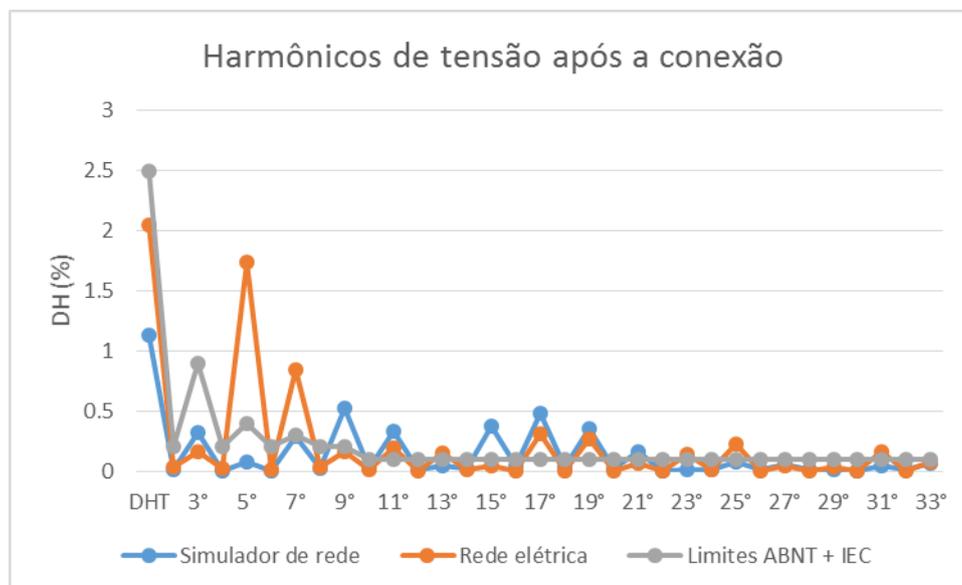
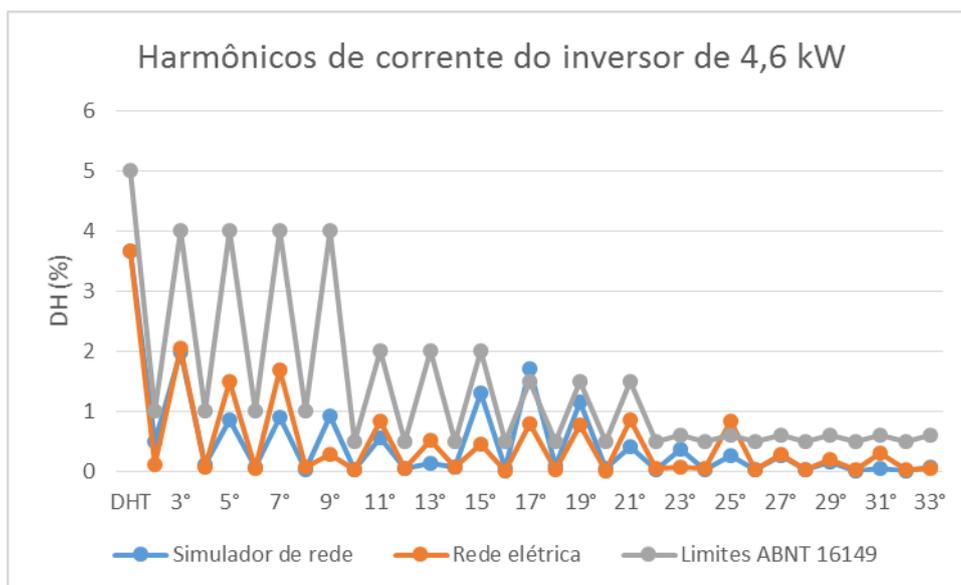


Figura 4-30 - Distorção harmônica de tensão após a conexão do inversor de 4,6 kW.



**Figura 4-31 - Distorção harmônica de corrente do inversor de 4,6 kW para as conexões com o simulador de rede e rede elétrica.**

As informações apresentadas permitem concluir que os resultados obtidos nos ensaios de distorção harmônica do laboratório estão dentro do esperado para a avaliação dos inversores para SFCR. Porém, uma mudança nas condições de rede pode gerar alterações no espectro de distorção de corrente do inversor. Desta forma, recomenda-se uma adequação das normas brasileiras para uma melhor especificação das características de distorção harmônica de tensão a que o inversor é conectado, uma vez que isto pode impactar nos resultados obtidos.

Em relação aos valores de carregamento do inversor para avaliação de conformidade com os valores  $DHT_I$  e  $DHI_I$  de norma, como mencionado anteriormente, adotou-se como prática de laboratório a avaliação para a condição de entrega de 100 % da potência nominal do inversor. Ainda assim, o inversor, em sua condição normal de operação, varia a potência entregue a rede de acordo com a irradiância solar ao longo do dia, desta forma, a fim de definir de forma clara os níveis de avaliação de conformidade do ensaio de distorção harmônica e propor uma melhoria na avaliação do ensaio, recomenda-se por meio de adendos no texto da portaria 357 a menção dos níveis de potência a serem avaliados neste ensaio.

Como sugestão para esta definição, com base nos resultados dos ensaios realizados e no perfil de irradiância brasileiro definido por Pinto Neto (2012), sugere-se o valor mínimo de adequação aos parâmetros de norma a condição de 50 % de entrega da potência nominal do inversor.

Os resultados da Tabela 4-15 mostram que para níveis acima de 50 % de entrega da potência nominal, existem inversores em conformidade com todos os aspectos avaliados pelas normas brasileiras, como também existem inversores que atendem os requisitos de distorção harmônica para carregamentos acima de 75 %. Ainda assim estes não atingem os requisitos necessários para metade do carregamento por uma pequena margem, sendo o carregamento a 50 % um limiar de distorção harmônica verificado entre os inversores ensaiados no LSF.

Segundo Pinto Neto (2012) o perfil de irradiância brasileiro é dado conforme a Figura 4-32, e a contribuição para a irradiação anual de cada faixa de irradiância e a frequência de ocorrência desta faixa podem ser vistos na Figura 4-33. Ainda segundo a análise realizada pelo estudo, mais de 40 % da irradiação anual é proveniente de irradiâncias maiores que 750 W/m<sup>2</sup> e mais de 70 % da irradiação provêm de irradiâncias superiores a 500 W/m<sup>2</sup>. Assim, embora a condição de operação do inversor para SFCR varie de acordo com o projeto do sistema e questões comerciais, a caracterização realizada por Pinto Neto (2012) infere que inversores para SFCR instalados em território brasileiro tendem a operar a maior parte do seu tempo em regimes acima de 50 % de carregamento, reforçando a recomendação de avaliação da conformidade de operação para esta condição de operação.

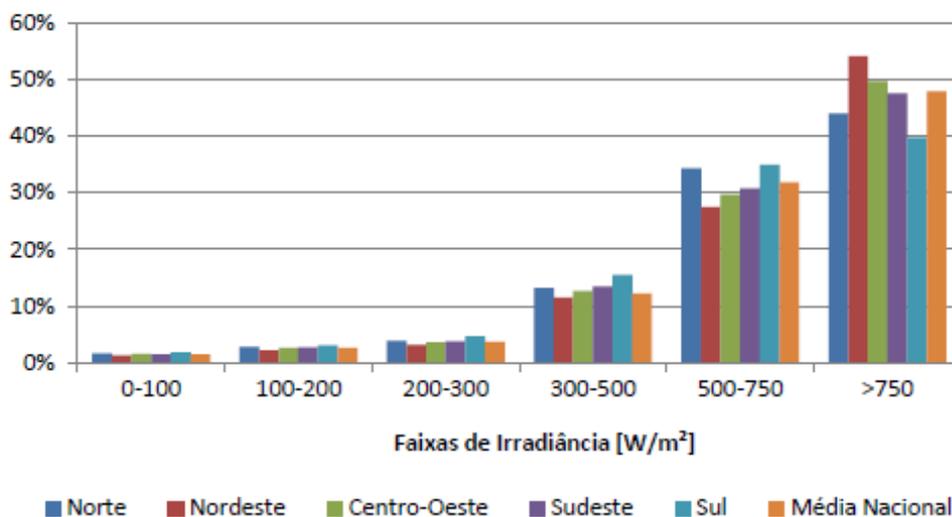


Figura 4-32 - Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiação anual para a média nacional por faixas (Fonte: Pinto Neto (2012))

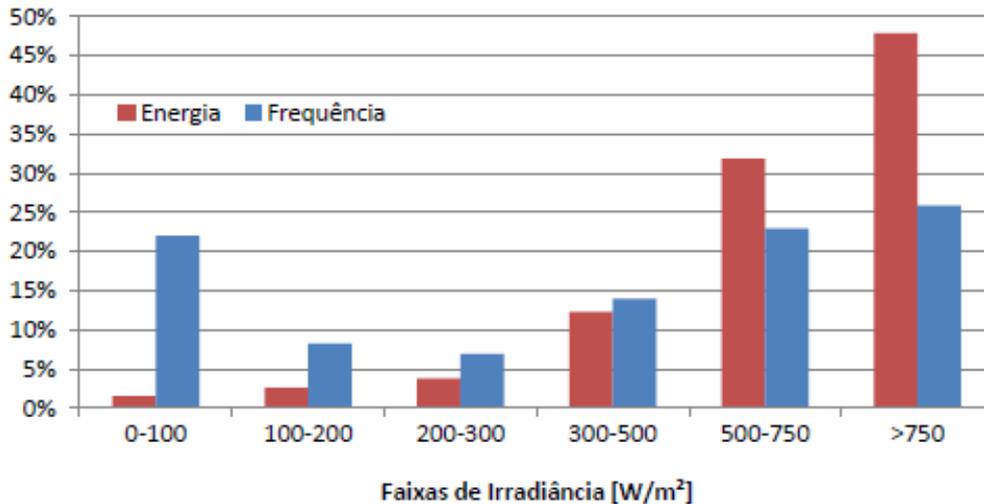


Figura 4-33 - Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiação anual para a média nacional por faixas (Fonte: Pinto Neto (2012))

#### 4.3.4. 4º Ensaio – Fator de potência

O ensaio de fator de potência segundo o procedimento descrito pela norma ABNT NBR 16150 descreve a necessidade de alterar o fator de potência dos inversores entre os valores 1, 0,98 indutivo e 0,98 capacitivo, com um valor de tolerância de  $\pm 0,025$ . Porém o texto da norma ABNT NBR 16149 descreve que os inversores fotovoltaicos com potência nominal igual ou menor do que 3 kW devem ter o fator de potência ajustado em 1 e com tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo a 0,98 capacitivo.

Durante os ensaios de inversores verificou-se que, nas condições de ajuste descritas pelo procedimento, os valores de fator de potência poderiam variar entre 1 e 0,955 (capacitivo ou indutivo). Desta forma, como a faixa de tolerância para estes ensaios se mostrou demasiadamente abrangente, adotou-se como procedimento de ensaio a realização somente da avaliação do fator de potência ajustado de fábrica com valor unitário e tolerância de  $\pm 0,025$  e assim os valores medidos deveriam estar entre 1 e 0,975 capacitivo ou indutivo.

Com isso para a realização do ensaio de fator de potência conforme os procedimentos da norma ABNT 16150 recomenda-se uma revisão no texto da norma ABNT 16149 de forma a deixar claro a necessidade de controle do fator de potência em valores entre 0,98 indutivo e 0,98 capacitivo, e reduzir a tolerância nos valores de fator de potência para  $\pm 0,01$ .

#### 4.3.5. 5º Ensaio – Injeção e demanda de potência reativa

Os procedimentos de curva de fator de potência e injeção / demanda de reativos foram agrupados sob o mesmo ensaio devido as relações feitas pelas normas brasileiras entre os procedimentos de ensaios e definição do fator de potência.

A norma ABNT NBR 16149 deixa a livre escolha, para os inversores com potência nominal superior a 6 kW, a possibilidade de operação de acordo com a curva de fator de potência ou com controle de potência reativa, e conforme a definição de fator de potência pelos textos das normas ABNT NBR 16149 e 16150, tem-se que o fator de potência consiste em uma divisão entre a energia ativa e reativa trocadas pelo inversor com a rede, assim a seguinte relação pode ser descrita pela equação [1].

$$FP = \frac{E_{ATIVA}}{\sqrt{E_{ATIVA}^2 + E_{REATIVA}^2}} = \frac{P_{ATIVA} * T}{\sqrt{T^2 * (P_{ATIVA}^2 + P_{REATIVA}^2)}} = \frac{P_{ATIVA}}{\sqrt{P_{ATIVA}^2 + P_{REATIVA}^2}} \quad [1]$$

Onde:

FP: Fator de potência;

E<sub>ATIVA</sub>: Energia ativa entregue pelo inversor no intervalo de tempo considerado;

E<sub>REATIVA</sub>: Energia reativa entregue pelo inversor no intervalo de tempo considerado;

P<sub>ATIVA</sub>: Potência ativa entregue pelo inversor no intervalo de tempo considerado;

P<sub>REATIVA</sub>: Potência reativa entregue pelo inversor no intervalo de tempo considerado;

T: Intervalo de tempo considerado.

Como o fator de potência é uma relação entre potência ativa e reativa do inversor, o ensaio de curva de fator de potência foi considerado como um ensaio de injeção \ demanda de reativos.

Conforme o disposto no Item 4.2.5 os ensaios realizados pelo procedimento de curva de fator de potência foram realizados com sucesso em todos os inversores ensaiados. Porém, foi necessário a implementação da rotina de controle nos equipamentos números nove e dez. Durante os ensaios de desenvolvimento notou-se uma dificuldade em expor as necessidades do ensaio de curva de fator de potência a equipes técnicas estrangeiras. Isto porque os parâmetros de ajuste da curva são descritos no texto, mas não são destacados de forma

técnica. A fim de resolver este problema é recomendada a adoção, pelo texto da norma ABNT NBR 16149, da descrição dos parâmetros da curva conforme a Tabela 4-30.

**Tabela 4-30 - Parâmetros de ajuste de curva de fator de potência conforme a ABNT NBR 16149.**

Parâmetros de ajuste da curva de fator de potência		
	Intervalo de variação	Valor padrão de fábrica
Operação com curva de fator de potência	Habilitado/ Desabilitado	Desabilitado
Fator de potência	1 ~ 0,95* / 0,90**	0,95* / 0,90**
Característica do fator de potência	Indutivo / Capacitivo	Indutivo
Tensão de ativação da curva de fator de potência	100 % ~ 110 % Vnom	104 % Vnom
Tensão de desativação da curva de fator de potência	90 % ~ 100 % Vnom	100 % Vnom
Ponto A - Potência mínima para controle de FP ***	20 % ~ 100 % Pnom	20 % Pnom
Ponto B - Potência de início da curva de FP ***	20 % ~ 100 % Pnom	50 % Pnom
Ponto C - Potência de fim da curva de FP ***	20 % ~ 100 % Pnom	100 % Pnom

Vnom, Pnom: Tensão e potência nominal do ensaio  
 \* Inversores com potência nominal maior que 3 kW e menor ou igual a 6 kW  
 \*\* Inversores com potência nominal maior que 6 kW  
 \*\*\* Assume-se  $A \leq B \leq C$

A Tabela 4-30 apresenta mais informações sobre os parâmetros necessários ao inversor em relação ao texto da norma ABNT NBR 16149, pois não é descrito pela norma o procedimento ou características de ajuste dos valores dos pontos “A”, “B” e “C”. A sugestão dos intervalos de ajuste dos pontos “A”, “B” e “C” será discutida mais adiante neste trabalho.

Como não houve modelos com potência maior do que 6 kW para ensaios no laboratório, os procedimentos de ensaio de injeção e demanda de potência reativa não foram avaliados de forma experimental no laboratório. Porém, a análise do texto da norma ABNT NBR 16150 em conjunto com as experiências no ensaio de curva de fator de potência, permitem redigir algumas sugestões para a abordagem deste ensaio.

De fato, o procedimento de demanda e injeção de potência reativa é idêntico ao procedimento de análise do fator de potência descrito pela norma, sendo o primeiro com uma abordagem do ajuste feito ao inversor pela fixação do valor de potência reativa em relação a

potência ativa entregue a rede elétrica, e o segundo com uma abordagem do ajuste feito ao inversor pelo fator de potência da corrente entregue.

Dado que a potência reativa do inversor equivale a uma proporção constante da potência ativa entregue a rede temos:

$$FP = \frac{P_{ATIVA}}{\sqrt{P_{ATIVA}^2 + (\alpha * P_{ATIVA})^2}} = \frac{P_{ATIVA}}{\sqrt{P_{ATIVA}^2 * (1 + \alpha^2)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad [2]$$

Onde:

FP: Fator de potência;

$P_{ATIVA}$ : Potência ativa entregue pelo inversor no intervalo de tempo considerado;

$\alpha$ : Constante de proporção entre potência ativa e reativa entregue pelo inversor.

Logo manter uma relação fixa entre potência ativa e reativa é equivalente a manter um valor de fator de potência fixo. Assim o ajuste da entrega de potência reativa igual a 48,43 % da potência ativa é equivalente ao ajuste do fator de potência fixo de 0,90.

A partir deste comentário, temos que pelas normas brasileiras é necessário ao inversor operar de duas maneiras distintas dependendo da sua potência nominal, a primeira com o fator de potência fixo e a segunda com fator de potência variável em rampa. A Figura 4-34 mostra um exemplo de operação em fator de potência fixo e a Figura 4-35 mostra um exemplo de operação em rampa.

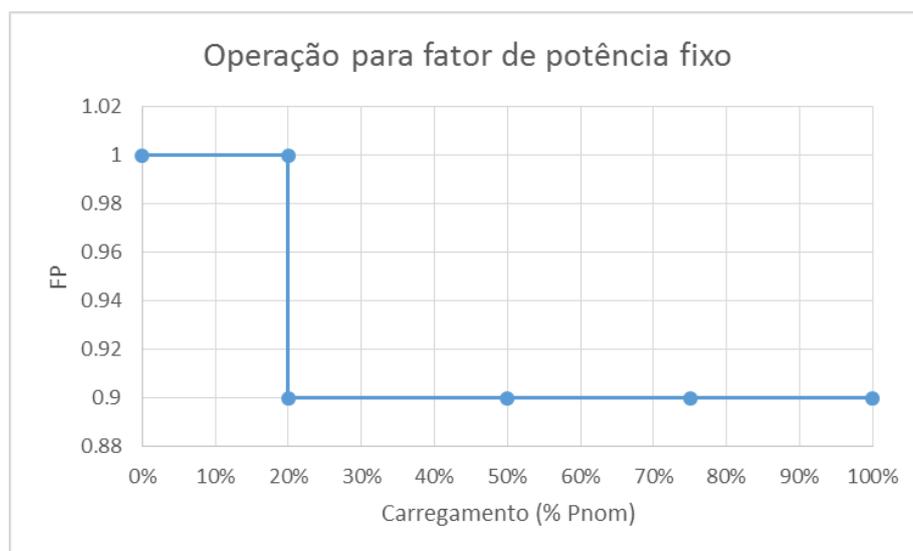
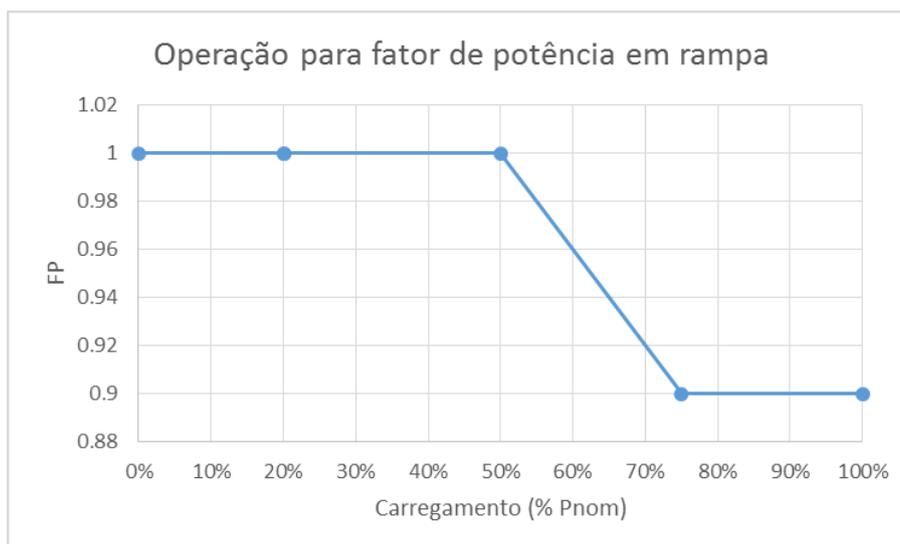


Figura 4-34 - Operação de um inversor com potência superior a 6 kW e fator de potência fixo.



**Figura 4-35 - Operação de um inversor com potência superior a 6 kW e fator de potência em rampa.**

Tendo estes dois métodos de operação para avaliação dos inversores, tem-se que inversores com potência igual ou inferior a 3 kW somente necessitam apresentar o comportamento para operação com fator de potência fixo, inversores com potência nominal superior a 3 kW e igual ou inferior a 6 kW devem apresentar os dois métodos de operação, e inversores com potência superior a 6 kW necessitam operar com fator de potência fixo, mas podem apresentar a operação com rampa de fator de potência. A Tabela 4-31 resume os grupos de inversores e seus modos de operação.

**Tabela 4-31 - Resumo dos modos de operação de FP para inversores.**

Grupo	Característica de potência	Tipo de operação do FP	
		Rampa	Fixo
1	$P_{nom} < 3kW$		X
2	$3kW < P_{nom} < 6kW$	X	X
3	$P_{nom} > 6kW$	Livre escolha	X

Pnom: Potência nominal do inversor

Como última observação a abordagem para dois sistemas de operação e para o texto da norma ABNT 16149, segundo a Figura 2-2, o inversor de potência nominal superior a 6 kW, com controle de reativos, não necessita manter a condição de proporção entre potência ativa e reativa para níveis de carregamento acima de 90 % de sua potência nominal, dependendo da proporção ajustada, e deve reduzir a quantidade de reativos até cessar a troca destes com a rede elétrica, para a condição de carregamento total do inversor.

A norma CEI 0-21 apresenta a Figura 4-36, semelhante à Figura 2-2, porém, pela norma italiana o inversor deve manter a proporção entre potência ativa e reativa mesmo para níveis

mais altos de carregamento. Segundo Benedito (2014), inversores necessitam de um lastro de potência aparente nominal, superior ao valor de potência ativa nominal de forma a permitir a manutenção da proporção entre potência ativa e reativa para níveis de carregamento próximos a 100 % de sua potência ativa nominal.

A norma italiana impõe a todos os inversores, com potência ativa superior a 6 kW, a necessidade de um lastro de energia, de forma que os inversores sejam capazes de manter a proporção entre potências ativa e reativa mesmo para níveis de carregamentos próximos de 100 % de sua potência ativa nominal. A norma brasileira não demanda este lastro de potência, porém não discorre sobre como proceder na avaliação de inversores capazes de manter a relação para níveis de carregamento próximos de 100 %. Desta forma, recomenda-se que haja a alteração do texto da norma ABNT 16149, de forma abordar essa questão tornando facultativa a manutenção da proporção entre potência ativa e reativa entregue em altos níveis de carregamento, porém, caso não haja a capacidade do equipamento em manter esta proporção, ela deve ser reduzida em função do carregamento, mantendo sempre a relação em potências dentro da região em destaque na Figura 4-37.

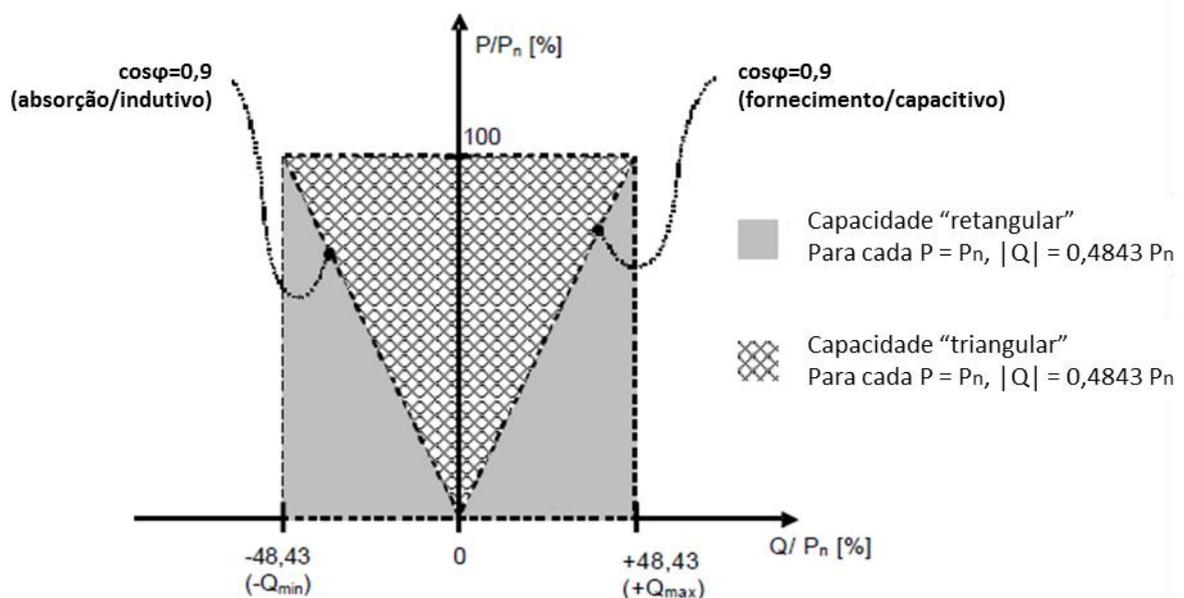


Figura 4-36 - Curva de capacidade "triangular" e "retangular", para inversores com potência nominal total superior a 6 kW

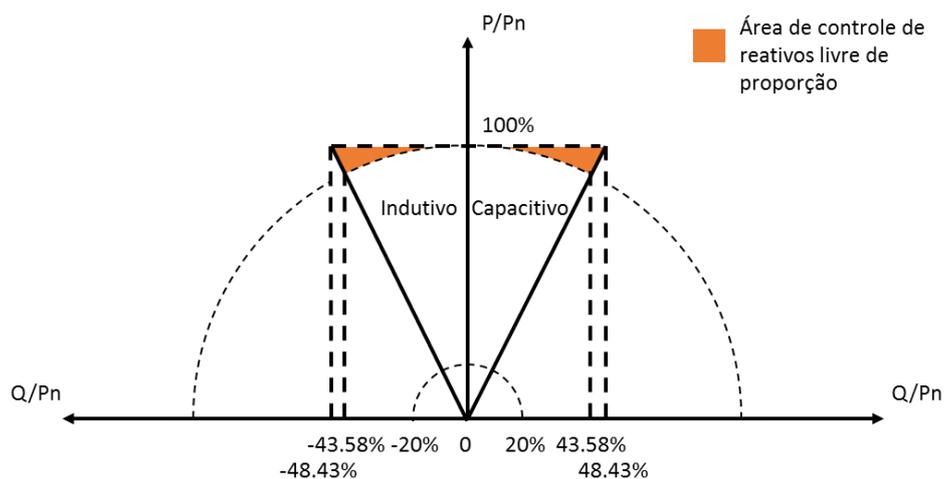


Figura 4-37 - Área de operação para inversores com lastro de potência aparente.

Remetendo a sugestão proposta, para a operação com controle de fator de potência em rampa, temos uma situação em que, acima do carregamento em 90 % da potência nominal, o inversor pode trabalhar com fator de potência dentro da região em destaque da Figura 4-38.

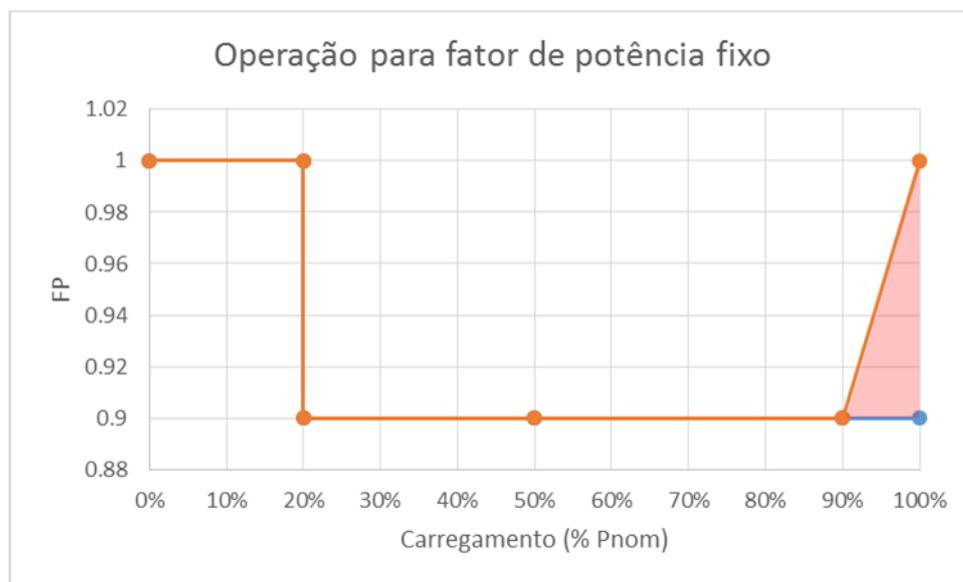


Figura 4-38 - Sugestão de operação para inversores com potência nominal acima de 6 kW com fator de potência fixo.

A partir dos resultados da Tabela 4-17 e das recomendações descritas no Item 4.2.5 recomenda-se também a adoção de uma tolerância dos valores de fator de potência avaliados para  $\pm 0,01$ .

#### 4.3.6. 6º Ensaio – Sobre e subtensão

Conforme descrito no Item 4.2.6 os ensaios de sobre / subtensão foram realizados de acordo com os textos das normas sem a necessidade de adoção de medidas para compatibilizar os textos das normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR 16150.

Como consideração aos critérios de aceitação da norma ABNT 16150 para este ensaio, recomenda-se a mudança do texto da norma de forma a não utilizar o termo “exceder” e remeter os critérios de conformidade aos valores exatos dos níveis de tensão e tempos desconexão descritos pela norma ABNT NBR 16149.

#### 4.3.7. 7º Ensaio – Sobre e subfrequência

Nos ensaios realizados no LSF para avaliação do comportamento do inversor frente a condições anormais de frequência da rede elétrica foi adotado como prática do laboratório a medição e registro de potência para cada patamar de frequência durante a avaliação dos valores de desconexão, desta forma, os resultados do ensaio de desconexão em sobrefrequência são uma avaliação prévia do controle de potência ativa realizado pelo inversor.

Como abordado para os ensaios de variação de tensão é recomendada a mudança do texto da norma ABNT NBR 16150 de forma a não utilizar o termo “exceder” e remeter os critérios de conformidade aos valores exatos dos níveis de frequência e tempos desconexão descritos pela norma ABNT NBR 16149.

#### 4.3.8. 8º Ensaio – Controle da potência ativa em sobrefrequência

Os ensaios de controle de potência ativa em sobrefrequência foram realizados no LSF de acordo com as orientações das normas brasileiras, as informações contidas nas normas são suficientes para completo entendimento e realização do ensaio.

Os resultados obtidos estiveram de acordo com o esperado, alguns modelos testados não realizaram o controle de potência. Porém, nos modelos de inversores que foram submetidos a ensaios de desenvolvimento, e dispunham de acesso para alteração do *software* de controle do

inversor, o controle de potência foi implementado por meio de *software* sem necessidade de alteração no equipamento.

#### 4.3.9. 9º Ensaio – Reconexão

Os textos das normas ABNT NBR 16149 e NBR 16150 possuem algumas divergências em relação aos requisitos reconexão para inversores para SFCR, assim houve a necessidade de assumir as condições de ensaio e avaliação dos valores para conformidade.

Segundo o texto da norma ABNT NR 16149 o sistema fotovoltaico “não pode retomar o fornecimento de energia à rede elétrica (reconexão) por um período de 20 s a 300 s após a retomada das condições normais de tensão e frequência da rede.”. A leitura deste trecho possui uma ambiguidade pelo uso da palavra “pode” em conjunto com os limites de tempo de 20 s e 300 s. Assim, pela leitura não é possível identificar claramente qual o período necessário para a reconexão do equipamento. Desta forma recomenda-se uma alteração no texto da norma a fim de deixar explicitamente que o sistema fotovoltaico deve retomar o fornecimento de energia a rede em um período de tempo superior a 20 s e inferior a 300 s.

O texto da norma ABNT NBR 16149 ainda faz a referência ao tempo de reconexão do sistema fotovoltaico para o retorno as condições normais de tensão e frequência, porém o procedimento da norma ABNT NBR 16150 somente faz menção à avaliação ao tempo de reconexão para os ensaios de variação de tensão e desta forma não é avaliado o tempo de reconexão para condições anormais de frequência. Com isto, recomenda-se a adoção da avaliação do tempo de reconexão também para os ensaios de variação de frequência.

Sobre a reconexão do sistema fotovoltaico, no texto da norma ABNT NBR 16149 há a referência a reconexão do sistema devido a desconexão por sobrefrequência, porém não é claro se após a reconexão do sistema com a rede elétrica a injeção de energia deve se manter em no máximo 40 % do valor de potência entregue na condição de frequência de 60,5 Hz (antes do evento de desconexão) e a partir deste valor aplicar um gradiente de elevação de potência, ou se o gradiente deve ser aplicado a partir do valor nulo de potência. A norma VDE-AR-N 4105:2011-08 apresenta em seu texto que sistemas que sofrerem desconexão por qualquer mecanismo de proteção devem retomar a injeção de potência a rede, uma vez reestabelecidas as condições normais de rede, a partir de um gradiente de 10 % da potência máxima do inversor por minuto.

#### 4.3.10. 10º Ensaio – Religamento automático fora de fase

A descrição da necessidade do sistema fotovoltaico em suportar o religamento automático fora de fase realizada pela norma ABNT NBR 16149 não expõe claramente se a desconexão do inversor após um evento de religamento e a sua reconexão é considerado como um meio de suporte a este tipo de evento. Como o procedimento descrito pela ABNT NBR 16150 admite a desconexão do inversor após um evento de deslocamento de fase da tensão de rede em 90°, prevê a queima de fusíveis após em evento de deslocamento do ângulo de fase e ainda prevê a troca dos fusíveis queimados, foi considerado como prática de laboratório que, caso o inversor se desconecte após um evento de deslocamento do ângulo de fase, uma vez reestabelecidas as condições normais de rede e troca de fusíveis, o inversor está em conformidade com as normas brasileiras se este se reconectar a rede elétrica dentro do tempo de reconexão descrito pela norma ABNT NBR 16149.

Como sugestão para aprimoramento do texto da norma recomenda-se a alteração do texto da norma de forma a caracterizar o comportamento do inversor frente a condições de religamento automático da tensão da rede elétrica.

#### 4.3.11. 11º, 12º e 13º Ensaio – Modulação de potência ativa, modulação de potência reativa e desconexão do sistema fotovoltaico da rede

Como visto anteriormente não foram ensaiados inversores com potência nominal superior a 6 kW, assim não foram realizados ensaios de modulação de potência ativa e reativa no LSF, em relação a controle externo do inversor, somente foram realizados ensaios de desconexão do inversor.

O texto da norma ABNT NBR 16149 deixa livre o tipo de protocolo de comunicação para controle externo do inversor fotovoltaico, pois não é especificado o tipo de protocolo e as condições para adoção de um protocolo a ser definido posteriormente. Ainda em relação ao protocolo de comunicação a ser utilizado nos ensaios o texto da norma ABNT NBR 16150 impõe o uso de um sistema de comunicação inteiramente especificado pelo fornecedor do equipamento a ser ensaiado.

Durante as realizações dos ensaios de desconexão do sistema por controle externo a falta de um texto para a coordenação das necessidades do sistema de controle externo causou atrasos nos ensaios realizados devido ao tempo necessário para requerer ao fornecedor do

equipamento o sistema de comunicação e tempo de estudo para adequar o arranjo do laboratório a fim de realizar os ensaios.

As complicações causadas pela ausência de um texto especificando um protocolo de comando levam a necessidade reavaliação do texto da norma de forma a contemplar essa questão, desta forma, recomenda-se a adoção de um protocolo de comunicação entre computador e inversor similar ao descrito pela a norma ABNT NBR 14522.

A norma ABNT NBR 14522 é uma norma dirigida à comunicação em sistemas de medição de energia. O item 3.5 da norma trata dos protocolos e características de comunicação entre computador e leitor de energia, são expostas as características do sistema de comunicação, conforme exibido a seguir:

- Protocolo
  - Características da transmissão
  - Lei de formação das mensagens
  - Características das informações
  - Regras do protocolo
  - Definição dos tempos
- Formatação dos blocos de dados
  - Definição da palavra de status
  - Comandos e respostas

Com exceção do item “Comandos e respostas”, que é direcionado a operação de um leitor de energia, todos os demais itens podem ser adotados para caracterizar o sistema de comunicação de inversores fotovoltaicos a fim de realizar comandos externos para conexão de desconexão do sistema e controle de potência do inversor. Assim, seria necessário especificar os comandos a serem enviados ao inversor de forma a contemplar a operação de um SFCR conforme as necessidades de operação deste sistema.

Uma vantagem em garantir um sistema de comunicação para inversores para SFCR semelhante ao sistema de comunicação de leitores de medição de energia brasileiros é a maior facilidade de integração dos dados fornecidos pelos equipamentos conectados a uma mesma rede elétrica por um operador do sistema elétrico.

Além das recomendações a respeito da definição do protocolo de comunicação pelas normas brasileiras, alguns comentários podem ser realizados em relação aos procedimentos descritos pela norma ABNT NBR 16150.

O procedimento descrito pela norma para limitação de potência ativa leva a interpretação da redução da potência ativa de saída do inversor em passos de 10 % da própria potência ativa entregue a rede, porém o texto da norma ABNT NBR 16149 expõe que os comandos devem ser expressos em porcentagens da potência nominal do equipamento. Desta forma recomenda-se a alteração do texto do procedimento de limitação de potência ativa a fim de remeter a redução de potência ativa em passos de 10 % da potência nominal do inversor.

O procedimento de comando de potência reativa utiliza um fator de 0,4358 para realizar a modulação de potência reativa, tanto para a característica indutiva como para a característica capacitiva da potência reativa entregue. Este fator não garante a avaliação do funcionamento do inversor de acordo com os limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 16149, isto por que a proporção entre potência ativa e reativa mostrada pela Figura 2-2 corresponde a um fator de 0,4843, conforme visto na Figura 4-37. Assim, recomenda-se uma adequação do texto da norma ABNT NBR 16150 de forma a considerar o fator de 0,4843 no procedimento de ensaio de comando de potência reativa.

Como última observação aos ensaios realizados por meio de controle externo, o texto da norma ABNT NBR 16149 apresenta uma nota, inserida ao final das orientações para controle externo do equipamento, a referente ao termo “cessar o fornecimento de energia.”. Na nota este termo é caracterizado como uma situação em que o inversor continua conectado à rede elétrica para análise das condições da rede e devidas atuações, mas a nota não caracteriza a situação de desconexão do inversor, assim a associação feita pela norma entre os termos “cessar o fornecimento de energia” e “reconexão” leva a interpretação de que a desconexão do sistema está em conformidade com o termo “cessar o fornecimento de energia”. Por esta interpretação, o requisito desconexão do sistema não garante a segurança de operadores durante a manutenção do sistema, pois implica que o sistema ainda está avaliando as condições de rede e pode injetar potência em uma situação indevida durante a manutenção do sistema. Recomenda-se então a alteração do texto da norma de forma definir os termos “conexão”, “desconexão” e “cessar fornecimento de energia” no item apropriado de cada uma das normas brasileiras.

#### 4.3.12. 14º Ensaio – Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede

O texto da norma ABNT NBR 16149 que remete ao ensaio de suportabilidade a subtensões decorrentes de falta na rede possui algumas inconsistências no seu texto, isto se deve, por não ser caracterizada pela norma a situação de desconexão do inversor.

#### 4.3.13. 15º e 16º Ensaio – Proteção contra inversão de polaridade e Sobrecarga

Os ensaios de proteção contra inversão de polaridade e sobrecarga são tratados pelo texto da Portaria 357. Os procedimentos dos dois ensaios foram aplicados para avaliação dos equipamentos nestes requisitos, porém adotou-se como prática do laboratório a medição dos fluxos de potência na entrada e saída dos inversores para embasar as conclusões do relatório de ensaios dos equipamentos, assim recomenda-se a alteração do texto da Portaria 357 de forma a contemplar a medição dos parâmetros na entrada e saída do inversor a cada um minuto.

#### 4.3.14. 17º Ensaio – Anti-ilhamento

Como visto no Item 4.2.6 as diferenças nos valores de tempo de desconexão entre as normas ABNT NBR 16149 e ABNT NBR/IEC 62116 levam a tempos de desconexão avaliados neste ensaio a valores consideravelmente abaixo do limite estabelecido para a proteção contra ilhamento, embora em alguns casos o tempo de desconexão foi registrado em cerca de 1,5 s para eventos isolados em um mesmo equipamento que apresentou tempos de desconexão abaixo de 400 ms para outras condições de consumo da carga RLC.

Mesmo realizando os ensaios conforme o requerido pela norma, muitas vezes foi impossível estabilizar o ponto de consumo de reativos dentro da variação de  $\pm 1,00$  % conforme requisitado pela norma, isto por que para um inversor em conformidade com os valores de fator de potência em conformidade com a norma ABNT NBR 16149 (considerando o valor de 0,975 discutido anteriormente neste trabalho), é permitido variar no mínimo  $\pm 12$  % de sua potência reativa entregue durante sua operação.

As tabelas Tabela 4-32, Tabela 4-33 e Tabela 4-34 mostram a variação do fator de potência em relação à oscilação de potência reativa para as três condições de operação do

inversor descritas pela norma ABNT NBR/IEC 62116, em um inversor com fator de potência avaliado em 0,98.

**Tabela 4-32 - Variação do fator de potência do inversor em relação a oscilação de reativos para condição A de operação.**

Condição A - Fator de potência em relação a variação de reativos entregues pelo inversor					
$\Delta Q/Q_n$	Q/Pn	P/Pn	S/Pn	Cos( $\phi$ )	Sen( $\phi$ )
0,00%	20,20%	100,00%	102,02%	0,9802	0,1980
1,00%	20,40%	100,00%	102,06%	0,9798	0,1999
2,00%	20,61%	100,00%	102,10%	0,9794	0,2018
3,00%	20,81%	100,00%	102,14%	0,9790	0,2037
4,00%	21,01%	100,00%	102,18%	0,9786	0,2056
5,00%	21,21%	100,00%	102,22%	0,9782	0,2075
6,00%	21,41%	100,00%	102,27%	0,9778	0,2094
7,00%	21,62%	100,00%	102,31%	0,9774	0,2113
8,00%	21,82%	100,00%	102,35%	0,9770	0,2132
9,00%	22,02%	100,00%	102,40%	0,9766	0,2150
10,00%	22,22%	100,00%	102,44%	0,9762	0,2169
11,00%	22,42%	100,00%	102,48%	0,9758	0,2188
12,00%	22,63%	100,00%	102,53%	0,9753	0,2207
13,00%	22,83%	100,00%	102,57%	0,9749	0,2225

**Tabela 4-33 - Variação do fator de potência do inversor em relação a oscilação de reativos para condição B de operação.**

Condição B - Fator de potência em relação a variação de reativos entregues pelo inversor					
$\Delta Q/Q_n$	Q/Pn	P/Pn	S/Pn	Cos( $\phi$ )	Sen( $\phi$ )
0,00%	11,72%	58,00%	59,17%	0,9802	0,1980
1,00%	11,83%	58,00%	59,19%	0,9798	0,1999
2,00%	11,95%	58,00%	59,22%	0,9794	0,2018
3,00%	12,07%	58,00%	59,24%	0,9790	0,2037
4,00%	12,19%	58,00%	59,27%	0,9786	0,2056
5,00%	12,30%	58,00%	59,29%	0,9782	0,2075
6,00%	12,42%	58,00%	59,31%	0,9778	0,2094
7,00%	12,54%	58,00%	59,34%	0,9774	0,2113
8,00%	12,65%	58,00%	59,36%	0,9770	0,2132
9,00%	12,77%	58,00%	59,39%	0,9766	0,2150
10,00%	12,89%	58,00%	59,41%	0,9762	0,2169
11,00%	13,01%	58,00%	59,44%	0,9758	0,2188
12,00%	13,12%	58,00%	59,47%	0,9753	0,2207
13,00%	13,24%	58,00%	59,49%	0,9749	0,2225

**Tabela 4-34 - Variação do fator de potência do inversor em relação a oscilação de reativos para condição B de operação.**

Condição C - Fator de potência em relação a variação de reativos entregues pelo inversor					
$\Delta Q/Q_n$	Q/Pn	P/Pn	S/Pn	Cos( $\phi$ )	Sen( $\phi$ )
0,00%	5,86%	29,00%	29,59%	0,9802	0,1980
1,00%	5,92%	29,00%	29,60%	0,9798	0,1999
2,00%	5,98%	29,00%	29,61%	0,9794	0,2018
3,00%	6,03%	29,00%	29,62%	0,9790	0,2037
4,00%	6,09%	29,00%	29,63%	0,9786	0,2056
5,00%	6,15%	29,00%	29,65%	0,9782	0,2075
6,00%	6,21%	29,00%	29,66%	0,9778	0,2094
7,00%	6,27%	29,00%	29,67%	0,9774	0,2113
8,00%	6,33%	29,00%	29,68%	0,9770	0,2132
9,00%	6,39%	29,00%	29,69%	0,9766	0,2150
10,00%	6,44%	29,00%	29,71%	0,9762	0,2169
11,00%	6,50%	29,00%	29,72%	0,9758	0,2188
12,00%	6,56%	29,00%	29,73%	0,9753	0,2207
13,00%	6,62%	29,00%	29,75%	0,9749	0,2225

Conforme visto nas tabelas anteriores, um inversor com fator de potência em conformidade com as normas pode apresentar uma oscilação do valor de reativos entregues à rede que impossibilita manter o consumo de reativos da carga RLC a fim de estabilizar a operação do sistema nos pontos especificados pela ABNT NBR/IEC 62116.

Outro ponto que dificulta os ensaios de proteção contra situações de ilhamento é o valor absoluto de potência reativa necessária para a variação de  $\pm 1,00\%$  em inversores com potências nominal baixas e fator de potência próximo da unidade. Assim, dependendo da potência ativa nominal do inversor os valores de variação de reativos chegam a ser menores do que de 1,00 VAR, a Tabela 4-35 mostra os valores de variação de reativos em função do fator de potência e da potência ativa nominal do inversor.

**Tabela 4-35 - Variação de reativos para adequação aos pontos da norma ABNT NBR\IEC 62116.**

Pnom (W)	FP			
	1,000	0,990	0,980	0,975
	1% Q (VAr)	1% Q (VAr)	1% Q (VAr)	1% Q (VAr)
250	-	0,36	0,51	0,57
300	-	0,43	0,61	0,68
500	-	0,71	1,02	1,14
600	-	0,85	1,22	1,37
1.000	-	1,42	2,03	2,28
1.500	-	2,14	3,05	3,42
2.500	-	3,56	5,08	5,70
3.000	-	4,27	6,09	6,84
4.500	-	6,41	9,14	10,26
5.000	-	7,12	10,15	11,40
6.000	-	8,55	12,18	13,67
7.000	-	9,97	14,21	15,95
8.000	-	11,40	16,24	18,23
9.000	-	12,82	18,28	20,51
10.000	-	14,25	20,31	22,79

Os valores da tabela mostram que as variações de reativos necessárias para a realização dos pontos de ilhamento da norma são sutis para inversores com potências menores e fator de potência elevado. Este fato, associado à oscilação de reativos que o inversor pode apresentar, remete à impossibilidade de atingir os pontos de operação necessários ao ensaio, dependendo da operação do inversor ensaiado.

A partir destas observações e com base nas experiências de ensaio em laboratório recomenda-se que os ensaios de anti-ilhamento sejam aplicados apenas para as situações de equilíbrio para inversores com potência igual ou inferior a 3 kW e para demais inversores que durante os ensaios de fator de potência apresentem fator de potência acima de 0,99.

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados e as experiências obtidas durante três anos de ensaios em inversores para SFCR. A partir da definição deste tipo de inversor, dos equipamentos do laboratório e da leitura das normas brasileiras foram apresentados os resultados compilados dos ensaios realizados de 15 inversores diferentes para os itens pertinentes das normas, tanto para processos de etiquetagem e participação do inversor no PBE quanto para o desenvolvimento do produto final.

A análise dos resultados obtidos mostra que os inversores são capazes de atender as normas brasileiras, porém, é necessário o entendimento dos requisitos das normas e programação correta do equipamento para que o mesmo possua desempenho em conformidade com as normas. As normas brasileiras contemplam a avaliação de inversores em qualidade de energia, segurança em operação com a rede e robustez do equipamento, garantindo que os equipamentos ensaiados não causem danos à rede de energia elétrica e aos operadores do sistema. Ainda assim a experiência na realização dos ensaios revelou que as normas podem se beneficiar de revisões em seu corpo de texto de forma a melhorar a sua interpretação e manter relações mais próximas entre os diferentes textos.

A pesquisa realizada pode relacionar os aspectos das normas com sugestões de adequações propostas e criar o embasamento para futuras revisões das normas brasileiras em relação aos ensaios de inversores para SFCR. O texto apresentado também tem como função orientar a leitura das normas por fornecedores de inversores para SFCR e desta forma garantir que os ajustes nos equipamentos a serem ensaiados para participação no PBE sejam realizados a fim de garantir a conformidade com os requisitos das normas brasileiras.

Com proposta a trabalhos futuros é possível destacar o levantamento de critérios técnicos para avaliação de inversores com sistema de armazenamento de energia, o desenvolvimento da automação dos ensaios em inversores e a complementação das normas existentes a partir das sugestões contidas no APÊNDICE deste documento.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 62116**: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 482**. 17 de Abril de 2012.

Ahmad, Z.; Singh, S.N. Comparative analysis of single phase transformerless inverter topologies for grid connected PV system. **Solar Energy**. v.149, pp. 245-271. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16149**: Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16150**: Sistemas (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 62116**: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. 2012.

BENEDITO, Ricardo da Silva. **Análise de um mecanismo de compensação de reativos incorporado aos inversores de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2014. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Berba, F.; Atkinson, D.; Armstrong, M.. A new approach of prevention of DC current component in transformerless grid-connected PV inverter application. In: IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). **Anais**, p. 7. 2014.

Blewitt, W. M.; Atkinson, D. J.; Kelly, J.; Lakin, R. A.. Approach to low-cost prevention of DC injection in transformerless grid connected inverters. **IET Power Electronics**. pp. 111-119. 2010.

Buticchi, G.; Lorenzani, E.; Franceschini, G.. A DC Offset Current Compensation Strategy in Transformerless Grid-Connected Power Converters. **IEEE Transactions on Power Delivery**. pp. 2743-2751. 2011.

Dong, W.; Huang, J.; Zheng, F.; Zhang, X.. A Flicker Assessment Method for PV Plants Considering Solar Radiation Condition. **2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2016)**. p. 5. 2016.

Dursun, M.; Gorgun, A.. Analysis and performance comparison of DC-DC power converters used in photovoltaic systems. In: 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2017. **Anais**, pp. 113-119. 2017.

Faranda, R.; Leva, S.. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. **Journal of Electromagnetic Analysis and Applications**, v.1, n.3, pp. 152-162. 2009.

Gallo, D.; Landi, C.; Luiso, M.. AC and DC Power Quality of Photovoltaic Systems. In: 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). **Anais**, p. 6. 2012.

He, G.; Xu, D.; Chen, M.. A Novel Control Strategy of Suppressing DC Current Injection to the Grid for Single-Phase PV. **IEEE Transactions on Power Electronics**. pp. 1266-1274. 2015.

Hernández, J. C.; Ortega, M. J.; De la Cruz, J.; Vera, D.. Guidelines for the technical assessment of harmonic, flicker and unbalance emission limits for PV-distributed generation. **Electric Power Systems Research**. pp. 1247-1257. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria nº 004**. 04 de Janeiro de 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria nº 357**. 01 de Agosto de 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **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 condition. 2013.

Langella, R.; Testa, A.; Meyer, J.; Möller, F.; Stiegler, R.; Djokic, S. Z.. Experimental-Based Evaluation of PV Inverter Harmonic and Interharmonic Distortion Due to Different Operating Conditions. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. v.65, n.10, pp. 2221-2232. 2016.

Ortega, M. J.; Hernández, J. C.; García, O. G. Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations. **Electric Power Systems Research**. pp. 23-35. 2013.

Pereira, H. A.; Freijedo, F. D.; Silva, M. M.; Mendes, V. F.; Teodorescu, R.. Harmonic current prediction by impedance modeling of grid-tied inverters: A 1.4 MW PV plant case study. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. v.93, pp. 30-38. 2017.

Pinho, J. T.; Galdino, M. A.. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro : CEPTEL - CRESESB, 2014. L529p.

PINTO NETO, Aimé Fleury de Carvalho. **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012 . 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Rusinaru, D. G.; Manescu, L. G.; Adelaida, D. M.; Bratu, C. C.. Contribution of PV Power Plants to Flicker Severity in Power Distribution Grids. **Recent Advances in Environmental and Earth Sciences and Economics**. pp. 303-307. 2015.

Salas, V.; Olías, E.; Alonso, M.; Chenlo, F.; Barrado, A.. DC Current Injection Into the Network from PV Grid Inverters. In: IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006. **Anais**, pp. 2371-2374. 2007.

Sharma, R.. Removal of DC offset current from transformerless PV inverters connected to utility. In: 40th International Universities Power Engineering Conference. **Anais**, pp. 7-9. 2005.

Spring, A.; Wirth, G.; Becker, G.; Pardatscher, R.; Witzmann, R.; Brantl, J.; Schmidt, S.. Effects of Flicker in a Distribution Grid with high PV Penetration. In: 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. **Anais**, p. 6. 2013.

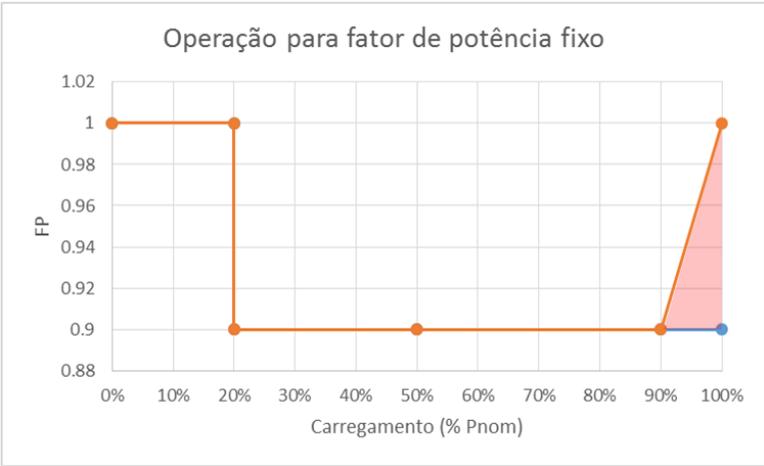
**APENDICE: SUGESTÕES PARA REVISÃO DOS TEXTOS DAS NORMAS  
BRASILEIRAS**

ABNT NBR 16149:2013

Página	Item	Texto	Sugestão de alteração do texto
1	2	"....greater than 75 A."	.... <i>greater than 75 A.</i> IEC TR 61000-3-15, <i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-15: Limits - Assessment of low frequency electromagnetic immunity and emission requirements for dispersed generation systems in LV network.</i>
3	3		<b>3.11</b> <b>Cessar o fornecimento à rede elétrica</b> O inversor permanece conectado a rede elétrica porém mantém o fluxo de energia mínimo necessário para monitoramento dos parâmetros de rede <b>3.12</b> <b>Desconexão da rede elétrica</b> O inversor tem seus contatos abertos não sendo possível nenhum tipo de fluxo de potência ou monitoramento dos parâmetros de rede, a reconexão do inversor deve ser realizada por um operador através de operação do painel do inversor ou comando remoto. <b>3.13</b> <b>Suportar</b> Após um evento que possa causar algum tipo de dano ou atuação de proteção do sistema fotovoltaico, uma vez reestabelecidas as condições normais para operação do sistema e dos equipamentos de proteção, o sistema fotovoltaico deve retomar a operação conforme a operação antes da ocorrência do evento.
3	4.3	"....com corrente superior a 75 A)."	....com corrente superior a 75 A). <i>As condições de ensaio ainda devem estar em conformidade com o especificado nas seções pertinentes da IEC TR 61000-3-15 (para sistemas com corrente até 75 A).</i>

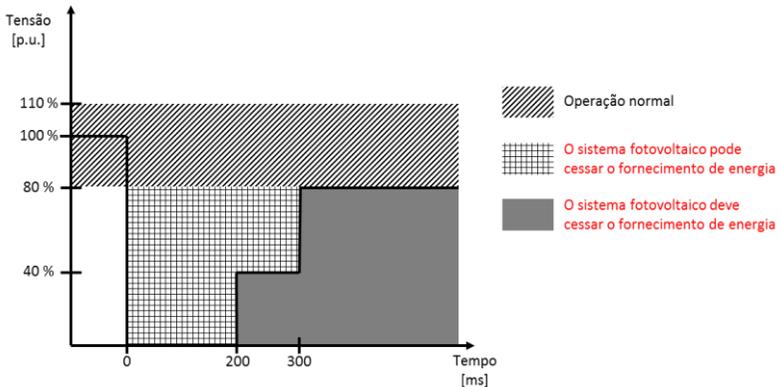
4	4.4	"O sistema fotovoltaico deve parar de fornecer energia à rede em 1 s se a injeção c.c. na rede elétrica for superior a 0,5 % da corrente nominal do inversor."	<p><del>O sistema fotovoltaico deve parar de fornecer energia à rede em 1 s se a injeção c.c. na rede elétrica for superior a 0,5 % da corrente nominal do inversor.</del></p> <p>O sistema fotovoltaico deve apresentar uma injeção de componente c.c. inferior 0,5 % em relação a corrente fundamental para carregamentos entre 100 % e 75 % da potência nominal do inversor.</p>
4	4.6	"A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5 % em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Cada harmônica individual deve estar limitada aos valores apresentados na Tabela 1."	<p>A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5 % em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Cada harmônica individual deve estar limitada aos valores apresentados na Tabela 1.</p> <p>Para o carregamento do sistema entre 100 % e 75 % da potência nominal do inversor, a distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5 % em relação a componente fundamental. Nas mesmas condições de carregamento, cada harmônico individual deve estar limitada aos valores apresentados na Tabela 1.</p>
5	4.7.1	"FP igual a 1 ajustado em fábrica, com tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo."	<p>FP igual a 1 ajustado em fábrica, <del>com tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo.</del></p>
5	4.7.2	"FP igual a 1 ajustado em fábrica, com tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo."	<p>FP igual a 1 ajustado em fábrica, <del>com tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo.</del> com a possibilidade de ajuste para a operação com FP fixo na faixa de 0,90 indutivo à 0,90 capacitivo.</p>

5	4.7.2	"....100 % ajustado em fábrica"	<p>....100 % ajustado em fábrica</p> <p>Para a configuração do modo de operação descrito o inversor fotovoltaico deve apresentar uma forma de alterar os todos os parâmetros da Tabela X (Inserir Tabela 4-30)</p> <table border="1" data-bbox="1305 368 1966 815"> <thead> <tr> <th colspan="3">Parâmetros de ajuste da curva de fator de potência</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Intervalo de variação</th> <th>Valor padrão de fábrica</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Operação com curva de fator de potência</td> <td>Habilitado/ Desabilitado</td> <td>Desabilitado</td> </tr> <tr> <td>Fator de potência</td> <td>1 ~ 0,95* / 0,90**</td> <td>0,95* / 0,90**</td> </tr> <tr> <td>Característica do fator de potência</td> <td>Indutivo / Capacitivo</td> <td>Indutivo</td> </tr> <tr> <td>Tensão de ativação da curva de fator de potência</td> <td>100% ~ 110% Vnom</td> <td>104% Vnom</td> </tr> <tr> <td>Tensão de desativação da curva de fator de potência</td> <td>90% ~ 100% Vnom</td> <td>100% Vnom</td> </tr> <tr> <td>Ponto A - Potência mínima para controle de FP ***</td> <td>20% ~ 100% Pnom</td> <td>20% Pnom</td> </tr> <tr> <td>Ponto B - Potência de início da curva de FP ***</td> <td>20% ~ 100% Pnom</td> <td>50% Pnom</td> </tr> <tr> <td>Ponto C - Potência de fim da curva de FP ***</td> <td>20% ~ 100% Pnom</td> <td>100% Pnom</td> </tr> </tbody> </table> <p>Vnom, Pnom: Tensão e potência nominal do ensaio  * Inversores com potência nominal maior que 3 kW e menor ou igual a 6 kW  ** Inversores com potência nominal maior que 6 kW  *** Assume-se A≤B≤C</p>	Parâmetros de ajuste da curva de fator de potência				Intervalo de variação	Valor padrão de fábrica	Operação com curva de fator de potência	Habilitado/ Desabilitado	Desabilitado	Fator de potência	1 ~ 0,95* / 0,90**	0,95* / 0,90**	Característica do fator de potência	Indutivo / Capacitivo	Indutivo	Tensão de ativação da curva de fator de potência	100% ~ 110% Vnom	104% Vnom	Tensão de desativação da curva de fator de potência	90% ~ 100% Vnom	100% Vnom	Ponto A - Potência mínima para controle de FP ***	20% ~ 100% Pnom	20% Pnom	Ponto B - Potência de início da curva de FP ***	20% ~ 100% Pnom	50% Pnom	Ponto C - Potência de fim da curva de FP ***	20% ~ 100% Pnom	100% Pnom
Parâmetros de ajuste da curva de fator de potência																																	
	Intervalo de variação	Valor padrão de fábrica																															
Operação com curva de fator de potência	Habilitado/ Desabilitado	Desabilitado																															
Fator de potência	1 ~ 0,95* / 0,90**	0,95* / 0,90**																															
Característica do fator de potência	Indutivo / Capacitivo	Indutivo																															
Tensão de ativação da curva de fator de potência	100% ~ 110% Vnom	104% Vnom																															
Tensão de desativação da curva de fator de potência	90% ~ 100% Vnom	100% Vnom																															
Ponto A - Potência mínima para controle de FP ***	20% ~ 100% Pnom	20% Pnom																															
Ponto B - Potência de início da curva de FP ***	20% ~ 100% Pnom	50% Pnom																															
Ponto C - Potência de fim da curva de FP ***	20% ~ 100% Pnom	100% Pnom																															

5	4.7.3	" O sistema fotovoltaico pode operar.... .... B) Controle externo."	<p>O sistema fotovoltaico pode operar.... .... B) Controle externo.  FP igual a 1 ajustado em fábrica, com a possibilidade de ajuste para a operação com FP fixo na faixa de 0,90 indutivo à 0,90 capacitivo. O inversor deve apresentar, como opcional, a possibilidade de operar de acordo com a curva da Figura 1, com FP ajustável de 0,90 indutivo a 0,90 capacitivo.  O controle do FP fixo para carregamentos acima de 90 % fica sujeito a área de operação destacada na Figura X. (Inserir Figura 4-38)  A operação com a curva de FP deve seguir as mesmas condicionantes descritas pelo item 4.7.2.</p> 
7	5.2.1	".... dentro do tempo de desligamento especificado."	<p>.... dentro do tempo de desligamento especificado.  O sistema somente deve voltar a fornecer energia à rede quando a tensão retornar para valores dentro da faixa de regime normal de operação da rede.</p>
8	5.3	"NOTA Os procedimentos de ensaio de anti-ilhamento são objetos da ABNT NBR IEC 62116."	<p>NOTA Os procedimentos de ensaio de anti-ilhamento são objetos da ABNT NBR IEC 62116. Ainda assim a sua aplicação deve ser vinculada aos resultados obtidos para ensaios de FP contidos na norma ABNT NBR 16150.</p>

9	5.4	<p><b>5.4 Reconexão</b> Depois de uma "desconexão" devido a uma.... ..e frequência da rede."</p>	<p><b>5.4 Reconexão Conexão com a rede</b> Depois de uma "desconexão" devido a uma.... ..e frequência da rede. Após cessar o fornecimento de energia à rede elétrica, devido a uma condição de variação de tensão ou diminuição da frequência da rede, o sistema fotovoltaico deve retomar o fornecimento de energia uma vez reestabelecidas as condições normais de operação da rede. Uma vez reestabelecidas estas condições, o sistema fotovoltaico deve aguardar 20 s e então retomar o fornecimento de energia em até 280 s. Nestas condições, a retomada do fornecimento de energia deve obedecer um gradiente de potência de, no máximo, 10% da potência nominal do sistema por minuto.</p>
9	6	<p>"a) o controle de potência ativa e reativa gerada pelo sistema fotovoltaico;"</p>	<p>a) o controle de potência ativa e reativa gerada pelo FP do sistema fotovoltaico (para sistemas com potência nominal superiores a 6 kW);</p>
9	6	<p>"Na ausência de um protocolo.... ..aos requisitos estabelecidos."</p>	<p>Na ausência de um protocolo.... ..aos requisitos estabelecidos. O protocolo de comunicação mínimo necessário deve estar em concordância com as especificações da norma ABNT NBR 14522:2008, com as características de transmissão: Velocidade: 9600 Baud ± 2 % Tipo: Assíncrono Modo: Bidirecional não simultâneo Caractere: 1 start bit 8 bits de dado 1 stop bit Interface: RS232-C - (CCITT - V.24) Sinais necessários: TXD - Dado transmitido RXD - Dado recebido GND - Massa RTS - Pedido para transmitir - Permanentemente desativado DTR - Terminal pronto - Permanentemente ativado</p>

9	6.1	"Se o sistema estiver.... ..potência ativa de saída."	Se o sistema estiver.... ..potência ativa de saída. <b>Caso a potência ativa injetada pelo sistema seja inferior a limitação requerida, o sistema não deve reduzir a sua potência ativa injetada.</b>
9	6.1	".... o recebimento do sinal, com tolerância de $\pm 2,5$ % da potência nominal do sistema, respeitando as limitações...."	.... o recebimento do sinal, com tolerância de $\pm 2,5$ % da potência nominal do sistema, respeitando as limitações....
9	6.2	<b>"6.2 Comando de potência reativa</b> .... deve ser capaz de regular a potência reativa injetada/demandada por meio de telecomandos, ...."	<b>Comando de potência reativa FP</b> .... deve ser capaz de regular a potência reativa injetada/demandada seu FP por meio de telecomandos, ...
9	6.2	"A potência ativa exigida pelo.... .. do sinal, com tolerância de $\pm 2,5$ % da potência nominal do sistema."	A potência ativa exigida <b>O FP exigido</b> pelo.... .. do sinal, com tolerância de $\pm 2,5$ % da potência nominal do sistema.
9	6.3	<b>"6.3 Desconexão/reconexão do sistema fotovoltaico da rede</b> O sistema fotovoltaico deve ser capaz de desconectar-se/reconectar-se da rede elétrica por meio de telecomandos. A desconexão/reconexão deve ser realizada em no máximo 1 min após o recebimento do telecomando."	<b>6.3 Desconexão/reconexão Interrupção do sistema fotovoltaico da rede</b> O sistema fotovoltaico deve ser capaz de desconectar-se/reconectar-se da rede elétrica por meio de telecomandos <b>de receber telecomandos de forma a interromper e retomar o fornecimento de energia à rede elétrica.</b> A desconexão/reconexão <b>interrupção e retomada do fornecimento de energia</b> deve ser realizada em no máximo 1 min após o recebimento do telecomando.
10	7	"Para evitar a desconexão indevida da rede em casos de afundamento de tensão...."	"Para evitar a <b>desconexão interrupção</b> indevida <b>do fornecimento de energia da</b> à rede em casos de afundamento de tensão...."

10	7		<p>Correções no gráfico conforme a figura</p>  <p>O gráfico mostra a tensão em p.u. ao longo do tempo em ms. A tensão começa em 100% e cai para 80% em 0 ms. Entre 0 e 200 ms, a tensão está entre 80% e 110%, classificada como 'Operação normal' (hachurado). Entre 200 e 300 ms, a tensão está entre 40% e 80%, classificada como 'O sistema fotovoltaico pode cessar o fornecimento de energia' (quadrícula). Após 300 ms, a tensão está entre 40% e 80%, classificada como 'O sistema fotovoltaico deve cessar o fornecimento de energia' (sólido escuro).</p>
11	7	<p>"Na área quadriculada, o sistema fotovoltaico não pode se desconectar da rede, porém é permitido cessar o fornecimento de energia. Se a tensão retornar para a faixa de operação normal (– 20 % a + 10 % da tensão nominal), o sistema fotovoltaico deve retornar a injetar a potência ativa e reativa de antes da falta, com tolerância de ± 10 % da potência nominal do sistema fotovoltaico, dentro de 200 ms."</p>	<p>Na área quadriculada, o sistema fotovoltaico não pode se desconectar da rede, porém é permitido cessar o fornecimento de energia. Se a tensão retornar para a faixa de operação normal (– 20 % a + 10 % da tensão nominal), o sistema fotovoltaico deve retornar a injetar a potência ativa e reativa de antes da falta, com tolerância de ± 10 % da potência nominal do sistema fotovoltaico, dentro de 200 ms. Caso o sistema fotovoltaico cesse o fornecimento de energia à rede dentro da área quadriculada da Figura 4 e a tensão de rede retorne a valores de operação normal (– 20 % a + 10 % da tensão nominal) dentro do limiar de tempo de curva da figura (200 ms para subtensão entre 0 % e 40 % da tensão nominal de rede e 300 ms para subtensão entre 40 % e 80 %), o sistema deve retornar a injetar a potência ativa e reativa, conforme a operação anterior a falha de rede, em até 200 ms.</p>

ABNT NBR 16150:2013

Página	Item	Texto	Sugestão de alteração do texto
1	2	"....Particular requirements for inverters"	<p>....Particular requirements for inverters.</p> <p>IEC TR 61000-3-15, <i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-15: Limits - Assessment of low frequency electromagnetic immunity and emission requirements for dispersed generation systems in LV network.</i></p>
3	3		<p><b>3.9</b>  <b>Cessar o fornecimento à rede elétrica</b>  O inversor permanece conectado a rede elétrica porém mantém o fluxo de energia mínimo necessário para monitoramento dos parâmetros de rede</p> <p><b>3.10</b>  <b>Desconexão da rede elétrica</b>  O inversor tem seus contatos abertos não sendo possível nenhum tipo de fluxo de potência ou monitoramento dos parâmetros de rede, a reconexão do inversor deve ser realizada por um operador através de operação do painel do inversor ou comando remoto.</p>
5	6.1	"....com corrente superior a 75 A)."	<p>....com corrente superior a 75 A)- e IEC TR 61000-3-15 (para sistemas com corrente até 75 A).</p>

6	6.2	"É de inteira responsabilidade do fabricante do ESE fornecer uma forma de deslocar.... ..limites estabelecidos na ABNT NBR 16149."	<p>a) Conectar o ESE aos simuladores de gerador fotovoltaico e de rede e, em seguida, acoplar os instrumentos de medição conforme a Figura 2.</p> <p>b) Identificar as potências de entrada do ESE equivalentes a 10 %, 20 %, 30 %, 50 %, 75 % e 100 % da potência nominal de saída, necessitando, dessa forma, simular seis diferentes curvas de um gerador FV.</p> <p>c) Configurar o simulador de gerador fotovoltaico com a menor tensão da faixa de operação do SPMP e para que o ESE forneça um dos seis níveis de carregamento identificados no passo b). O fator de forma é arbitrário.</p> <p>d) Configurar o simulador de rede para absorver até 110 % da potência c.a. máxima do ESE, a 60 Hz e na tensão nominal de ensaio.</p> <p>e) Fechar as chaves seguindo a ordem de conexão ao ESE sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.</p> <p>f) Medir e registrar o valor de componente c.c. da corrente injetada.</p> <p>g) Repetir do passo c) ao f) para cada um dos outros cinco níveis de carregamento do ESE definidos no passo b).</p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se os valores de componente c.c. medidos não excederem os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149.</p>
7	6.3	"b) car as potências de entrada do ESE equivalentes a 10 %, 20 %, 30 %, 50 %, 75 % e 100 % da potência nominal de saída, necessitando, dessa forma, simular seis diferentes curvas de um gerador FV."	b) Identificar as potências de entrada do ESE equivalentes a 10 %, 20 %, 30 %, 50 %, 75 % e 100 % da potência nominal de saída, necessitando, dessa forma, simular seis diferentes curvas de um gerador FV.
7	6.4.1	"a) Configurar o ESE para operar com fator de potência capacitivo mínimo definido na ABNT NBR 16149."	a) Configurar o ESE para operar com fator de potência capacitivo mínimo definido na ABNT NBR 16149. unitário.

8	6.4.1	<p>"i) Repetir do passo a) ao h), porém com o ESE configurado para operar com fator de potência indutivo mínimo definido na ABNT NBR 16149.</p> <p>j) Repetir do passo a) ao h), porém com o ESE configurado para operar com fator de potência unitário."</p>	<p><del>i) Repetir do passo a) ao h), porém com o ESE configurado para operar com fator de potência indutivo mínimo definido na ABNT NBR 16149.</del></p> <p><del>j) Repetir do passo a) ao h), porém com o ESE configurado para operar com fator de potência unitário.</del></p>
9	6.5	<p>"a) Configurar o ESE para fornecer potência reativa igual a 48,43 % da potência ativa de ensaio (operação capacitiva)."</p> <p>"i) Repetir do passo a) ao h), porém com o ESE configurado para demandar potência reativa igual a 48,43 % da potência ativa de ensaio (operação indutiva).</p> <p>j) Repetir do passo a) ao h), porém com o ESE configurado para fornecer apenas potência ativa (operação resistiva).</p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de potência reativa medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de <math>\pm 2,5</math> % da potência nominal do ESE."</p>	<p>a) Configurar o ESE para fornecer potência reativa igual a 48,43 % da potência ativa de ensaio (operação capacitiva). <b>operar com fator de potência unitário.</b></p> <p><del>i) Repetir do passo a) ao h), porém com o ESE configurado para demandar potência reativa igual a 48,43 % da potência ativa de ensaio (operação indutiva).</del></p> <p><del>j) Repetir do passo a) ao h), porém com o ESE configurado para fornecer apenas potência ativa (operação resistiva).</del></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p><del>O ESE é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de potência reativa medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de <math>\pm 2,5</math> % da potência nominal do ESE.</del></p> <p><b>i) Repetir do passo c) ao h), porém com o ESE configurado para operar com fator de potência capacitivo mínimo definido na ABNT NBR 16149.</b></p> <p><b>j) Repetir do passo c) ao h), porém com o ESE configurado para operar com fator de potência indutivo mínimo definido na ABNT NBR 16149.</b></p> <p><b>Critério de aceitação:</b></p> <p><b>O ESE é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de fator de potência medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de <math>\pm 0,025</math>.</b></p>

10	6.6.1	<p><b>"6.6.1 Medição da tensão de desconexão por sobretensão"</b></p> <p>"Medir e registrar o valor de tensão eficaz que provocou a desconexão. "</p> <p><b>"Figura 3 – Procedimento de variação da rede para medição da tensão de desconexão por sobretensão"</b></p> <p>"O ESE é considerado em conformidade se a tensão de desconexão por sobretensão não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de + 2 % da tensão nominal de ensaio."</p>	<p><b>6.6.1 Medição da tensão de desconexão por proteção contra sobretensão</b></p> <p>Medir e registrar o valor de tensão eficaz que provocou a desconexão. <b>a interrupção da corrente injetada na rede.</b></p> <p><b>Figura 3 – Procedimento de variação da rede para medição da tensão de desconexão por sobretensão do valor de tensão da proteção contra sobretensão</b></p> <p>O ESE é considerado em conformidade se a tensão de desconexão por sobretensão não exceder os limites estabelecidos <b>o nível de sobretensão em que este cessa o fornecimento de energia à rede for igual ao limite estabelecido</b> na ABNT NBR 16149, com tolerância de + <math>\pm</math> 2 % da tensão nominal de ensaio.</p>
----	-------	--	---

11	6.6.2	<p><b>"6.6.2 Medição do tempo de desconexão por sobretensão</b></p> <p>a) Elevar a tensão do simulador de rede para um valor 2 V abaixo da tensão que provocou a desconexão.</p> <p>b) Elevar a tensão do simulador de rede, aplicando um único degrau, para um valor superior ao que provocou a desconexão do ESE.</p> <p>c) Medir e registrar a tensão e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do ESE.</p> <p>d) Com os valores de tensão e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão. A Figura 4 ilustra o tempo de desconexão, o qual é medido a partir do momento em que a tensão atinge o valor final do degrau até o momento em que a corrente injetada na rede é interrompida.</p> <p>e) Reduzir a tensão do simulador de rede para a tensão nominal de ensaio e esperar que o ESE reconecte.</p> <p><b>Figura 4 – Representação gráfica do tempo de desconexão por sobretensão</b></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de desconexão por sobretensão não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de + 2 %."</p>	<p><b>6.6.2 Medição do tempo de desconexão por atuação da proteção contra sobretensão</b></p> <p>a) Elevar a tensão do simulador de rede para um valor 2 V abaixo da tensão que provocou a desconexão. <b>interrupção da corrente injetada.</b></p> <p>b) Elevar a tensão do simulador de rede, aplicando um único degrau, para um valor superior ao que provocou a desconexão do ESE. <b>interrupção da corrente injetada pelo ESE.</b></p> <p>c) Medir e registrar a tensão e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do ESE. <b>interrupção da corrente injetada pelo ESE.</b></p> <p>d) Com os valores de tensão e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão <b>atuação da proteção</b>. A Figura 4 ilustra o tempo de desconexão <b>atuação</b>, o qual é medido a partir do momento em que a tensão atinge o valor final do degrau até o momento em que a corrente injetada na rede é interrompida.</p> <p>e) Reduzir a tensão do simulador de rede para a tensão nominal de ensaio e esperar que o ESE reconecte. <b>retome a injeção de corrente na rede.</b></p> <p><b>Figura 4 – Representação gráfica do tempo de desconexão por atuação da proteção contra sobretensão</b></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de desconexão <b>por atuação da proteção contra</b> sobretensão não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de + 2 %.</p>
----	-------	--	--

11	6.6.3	<p><b>"6.6.3 Medição da tensão de desconexão por subtensão"</b></p> <p>"c) Medir e registrar o valor de tensão eficaz que provocou a desconexão."</p> <p><b>"Figura 5 – Procedimento de variação da rede para medição da tensão de desconexão por subtensão"</b></p> <p>"O ESE é considerado em conformidade se a tensão de desconexão por subtensão não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 2\%</math> da tensão nominal de ensaio."</p>	<p><b>6.6.3 Medição da tensão de desconexão por proteção contra subtensão</b></p> <p>c) Medir e registrar o valor de tensão eficaz que provocou a desconexão. <b>interrupção da corrente injetada na rede.</b></p> <p><b>Figura 5 – Procedimento de variação da rede para medição da tensão de desconexão por subtensão do valor de tensão da proteção contra subtensão</b></p> <p>O ESE é considerado em conformidade se a tensão de desconexão por subtensão não exceder os limites estabelecidos <b>o nível de subtensão em que este cessa o fornecimento de energia à rede for igual ao limite estabelecido</b> na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 2\%</math> da tensão nominal de ensaio.</p>
----	-------	---	--

12	6.6.4	<p><b>"6.6.4 Medição do tempo de desconexão por subtensão</b></p> <p>a) Reduzir a tensão do simulador de rede para um valor 10 % acima da tensão que provocou a desconexão.</p> <p>b) Reduzir a tensão do simulador de rede, aplicando um único degrau, para um valor inferior ao que provocou a desconexão do ESE.</p> <p>c) Medir e registrar a tensão e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do ESE.</p> <p>d) Com os valores de tensão e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão. A Figura 6 ilustra o tempo de desconexão, o qual é medido a partir do momento em que a tensão atinge o valor final do degrau até o momento em que a corrente injetada na rede é interrompida.</p> <p><b>Figura 6 – Representação gráfica do tempo de desconexão por subtensão</b></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de desconexão por subtensão não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 2\%</math>."</p>	<p><b>6.6.4 Medição do tempo de desconexão atuação da proteção contra por subtensão</b></p> <p>a) Reduzir a tensão do simulador de rede para um valor 10 % acima da tensão que provocou a desconexão. <b>interrupção da corrente injetada.</b></p> <p>b) Reduzir a tensão do simulador de rede, aplicando um único degrau, para um valor inferior ao que provocou a desconexão do ESE. <b>interrupção da corrente injetada pelo ESE.</b></p> <p>c) Medir e registrar a tensão e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do ESE. <b>interrupção da corrente injetada pelo ESE.</b></p> <p>d) Com os valores de tensão e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão <b>atuação da proteção</b>. A Figura 6 ilustra o tempo de desconexão <b>atuação</b>, o qual é medido a partir do momento em que a tensão atinge o valor final do degrau até o momento em que a corrente injetada na rede é interrompida.</p> <p><b>e) Elevar a tensão do simulador de rede para a tensão nominal de ensaio e esperar que o ESE retome a injeção de corrente na rede.</b></p> <p><b>Figura 6 – Representação gráfica do tempo de desconexão por atuação da proteção contra subtensão</b></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de desconexão <b>por atuação da proteção contra</b> subtensão não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm + 2\%</math>.</p>
----	-------	--	---

14	6.7.1	<p><b>"6.7.1 Medição da frequência de desconexão por sobrefrequência"</b></p> <p>"b) Medir e registrar a frequência que provocou a desconexão. c) Reduzir a frequência do simulador de rede para o valor nominal e esperar que o ESE reconecte."</p> <p><b>"Figura 7 – Procedimento de variação da rede para medição da frequência de desconexão por sobrefrequência"</b></p> <p>"O ESE é considerado em conformidade se a frequência de desconexão por sobrefrequência não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 0,1</math> Hz."</p>	<p><b>6.7.1 Medição da frequência de desconexão por proteção contra sobrefrequência</b></p> <p>b) Medir e registrar a frequência que provocou a desconexão. <b>a interrupção da corrente injetada na rede.</b></p> <p>c) Reduzir a frequência do simulador de rede para o valor nominal e esperar que o ESE reconecte. <b>retome a injeção de corrente na rede.</b></p> <p><b>Figura 7 – Procedimento de variação da rede para medição da frequência de desconexão por sobrefrequência do valor de frequência da proteção contra sobrefrequência</b></p> <p>O ESE é considerado em conformidade se a frequência de desconexão por sobrefrequência não exceder os limites estabelecidos <b>o nível de sobrefrequência em que este cessa o fornecimento de energia à rede for igual ao limite estabelecido</b> na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 0,1</math> Hz.</p>
----	-------	---	--

14	6.7.2	<p><b>"6.7.2 Medição do tempo de desconexão por sobrefrequência</b></p> <p>a) Elevar a frequência do simulador de rede, aplicando um único degrau, para um valor superior ao que provocou a desconexão do ESE.</p> <p>b) Medir e registrar a frequência e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do ESE.</p> <p>c) Com os valores de frequência e corrente registrados, verifi car qual foi o tempo de desconexão. A Figura 8 ilustra o tempo de desconexão, o qual é medido a partir do momento em que a frequência atinge o valor final do degrau até o momento em que a corrente injetada na rede é interrompida.</p> <p>d) Reduzir a frequência do simulador de rede para o valor nominal e esperar que o ESE reconecte.</p> <p><b>Figura 8 – Representação gráfica do tempo de desconexão por sobrefrequência</b></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de desconexão por sobrefrequência não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 2\%</math>."</p>	<p><b>6.7.2 Medição do tempo de desconexão por atuação da proteção contra sobrefrequência</b></p> <p>a) Elevar a frequência do simulador de rede, aplicando um único degrau, para um valor superior ao que provocou a desconexão de ESE. <b>interrupção da corrente injetada.</b></p> <p>b) Medir e registrar a frequência e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão de ESE. <b>interrupção da corrente injetada pelo ESE.</b></p> <p>c) Com os valores de frequência e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão <b>atuação da proteção</b>. A Figura 8 ilustra o tempo de desconexão <b>atuação</b>, o qual é medido a partir do momento em que a frequência atinge o valor final do degrau até o momento em que a corrente injetada na rede é interrompida.</p> <p>d) Reduzir a frequência do simulador de rede para o valor nominal e esperar que o ESE reconecte. <b>retome a injeção de corrente na rede.</b></p> <p><b>Figura 8 – Representação gráfica do tempo de desconexão por atuação da proteção contra sobrefrequência</b></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de desconexão <b>por atuação da proteção contra</b> sobrefrequência não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm + 2\%</math>.</p>
----	-------	--	---

15	6.7.3	<p><b>"6.7.3 Medição da frequência de desconexão por subfrequência"</b></p> <p>"c) Medir e registrar a frequência que provocou a desconexão. d) Elevar a frequência do simulador de rede para o valor nominal e esperar que o ESE reconecte."</p> <p><b>"Figura 9 – Procedimento de variação da rede para medição da frequência de desconexão por subfrequência"</b></p> <p>"O ESE é considerado em conformidade se a frequência de desconexão por subfrequência não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 0,1</math> Hz."</p>	<p><b>6.7.3 Medição da frequência de desconexão por proteção contra subfrequência</b></p> <p>c) Medir e registrar a frequência que provocou a desconexão. <b>a interrupção da corrente injetada na rede.</b></p> <p>d) Elevar a frequência do simulador de rede para o valor nominal e esperar que o ESE reconecte. <b>retome a injeção de corrente na rede.</b></p> <p>Figura 9 – Procedimento de variação da rede para medição da frequência de desconexão por subfrequência <b>do valor de frequência da proteção contra sobrefrequência</b></p> <p>O ESE é considerado em conformidade se a frequência de desconexão por subfrequência não exceder os limites estabelecidos <b>o nível de sobrefrequência em que este cessa o fornecimento de energia à rede for igual ao limite estabelecido</b> na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 0,1</math> Hz.</p>
----	-------	--	---

16	6.7.4	<p><b>"6.7.4 Medição do tempo de desconexão por subfrequência</b></p> <p>a) Reduzir a frequência do simulador de rede, aplicando um único degrau, para um valor inferior ao que provocou a desconexão do ESE.</p> <p>b) Medir e registrar a frequência e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do ESE.</p> <p>c) Com os valores de frequência e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão. A Figura 10 ilustra o tempo de desconexão, o qual é medido a partir do momento em que a frequência atinge o valor nominal do degrau até o momento em que a corrente injetada na rede é interrompida.</p> <p><b>Figura 10 – Representação gráfica do tempo de desconexão por subfrequência</b></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de desconexão por subfrequência não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 2\%</math>."</p>	<p><b>6.7.4 Medição do tempo de desconexão por atuação da proteção contra subfrequência</b></p> <p>a) Reduzir a frequência do simulador de rede, aplicando um único degrau, para um valor inferior ao que provocou a desconexão do ESE. <b>interrupção da corrente injetada.</b></p> <p>b) Medir e registrar a frequência e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do ESE. <b>interrupção da corrente injetada pelo ESE.</b></p> <p>c) Com os valores de frequência e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão <b>atuação da proteção</b>. A Figura 10 ilustra o tempo de desconexão <b>atuação</b>, o qual é medido a partir do momento em que a frequência atinge o valor nominal do degrau até o momento em que a corrente injetada na rede é interrompida.</p> <p><b>d) Elevar a frequência do simulador de rede para o valor nominal e esperar que o ESE retome a injeção de corrente na rede.</b></p> <p><b>Figura 10 – Representação gráfica do tempo de desconexão por atuação da proteção contra subfrequência</b></p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de desconexão por <b>atuação da proteção contra</b> subfrequência não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149, com tolerância de <math>\pm 2\%</math>.</p>
----	-------	--	--

19	6.9	<p><b>"6.9 Reconexão</b></p> <p>Este ensaio deve ser realizado durante os ensaios de 6.6.1, 6.6.3</p> <p>Imediatamente após restabelecer as condições nominais de tensão/frequência, medir e registrar o tempo decorrido até a reconexão."</p> <p>"O ESE é considerado em conformidade se o tempo de reconexão não exceder os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149."</p>	<p><b>6.9 Reconexão Conexão com a rede</b></p> <p>Este ensaio deve ser realizado durante os ensaios de 6.6.1, 6.6.3, 6.7.1.</p> <p>Imediatamente após restabelecer as condições nominais de tensão/frequência, medir e registrar o tempo decorrido até a reconexão. <b>que o ESE retome a injeção de corrente na rede.</b></p> <p><b>Uma vez iniciada a injeção de corrente medir e registrar o gradiente de potência do inversor</b></p> <p>O ESE é considerado em conformidade se o tempo de <del>conexão</del> <b>retomada da injeção de corrente e o gradiente de potência não exceder excederem</b> os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149.</p>
19	6.10	<p>"f) Aplicar um deslocamento no ângulo de fase da tensão igual a 90° e esperar o tempo de reconexão, caso o ESE desconecte-se.</p> <p>g) Medir e registrar a corrente de saída do ESE.</p> <p>h) Aplicar um deslocamento no ângulo de fase da tensão igual a 180°.</p> <p>i) Medir e registrar a corrente de saída do ESE."</p>	<p>f) Aplicar um deslocamento no ângulo de fase da tensão igual a 90° e <del>esperar o tempo de reconexão, caso o ESE desconecte-se.</del></p> <p><b>g) Caso o ESE interrompa o fornecimento de energia, aguardar o tempo de reinjeção de corrente. Caso o inversor se desconecte da rede é necessário a reconexão manual e/ou troca de fusíveis, após o rearme da proteção aguardar o tempo de reinjeção de corrente.</b></p> <p><del>g) h) Medir e registrar a corrente de saída do ESE.</del></p> <p><b>h) i) Aplicar um deslocamento no ângulo de fase da tensão igual a 180°.</b></p> <p><b>j) Caso o ESE interrompa o fornecimento de energia, aguardar o tempo de reinjeção de potência. Caso o inversor se desconecte da rede é necessário a reconexão manual e/ou troca de fusíveis, após o rearme da proteção aguardar o tempo de reinjeção de corrente.</b></p> <p><del>h) k) Medir e registrar a corrente de saída do ESE.</del></p>
20	6.11	<p>"e) Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o ESE reduzir 10 % da potência ativa de saída."</p>	<p>Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o ESE <del>reduzir 10 % da potência ativa de saída.</del> <b>a potência de saída em 10 % da potência nominal do ESE.</b></p>

20	6.12	<p><b>"6.12 Comando de potência reativa"</b></p> <p>"e) Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o ESE operar com potência reativa indutiva igual a 0,4358 (para ESE com potência nominal superior a 6 kW) vez a potência ativa nominal.</p> <p>f) Esperar 10 s, medir e registrar a potência reativa de saída do ESE.</p> <p>g) Enviar um comando externo para o ESE operar com potência reativa nula.</p> <p>h) Esperar 10 s, medir e registrar a potência reativa de saída do ESE.</p> <p>i) Enviar um comando externo para o ESE operar com potência reativa capacitiva igual a 0,4358 (para ESE com potência nominal superior a 6 kW) vez a potência ativa nominal.</p> <p>j) Esperar 10 s, medir e registrar a potência reativa de saída do ESE.</p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de potência medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de <math>\pm 2,5\%</math> da potência nominal do ESE."</p>	<p><b>6.12 Comando de potência reativa fator de potência</b></p> <p>e) Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o ESE operar com <del>potência reativa indutiva igual a 0,4358 (para ESE com potência nominal superior a 6 kW) vez a potência ativa nominal.</del> <b>fator de potência capacitivo mínimo definido na ABNT NBR 16149.</b></p> <p>f) Esperar 10 s, medir e registrar a <del>potência reativa</del> <b>o fator de potência</b> de saída do ESE.</p> <p>g) Enviar um comando externo para o ESE operar com <del>potência reativa nula.</del> <b>fator de potência unitário.</b></p> <p>h) Esperar 10 s, medir e registrar a <del>potência reativa</del> <b>o fator de potência</b> de saída do ESE.</p> <p>i) Enviar um comando externo para o ESE operar com <del>potência reativa capacitiva igual a 0,4358 (para ESE com potência nominal superior a 6 kW) vez a potência ativa nominal.</del> <b>fator de potência indutivo mínimo definido na ABNT NBR 16149.</b></p> <p>j) Esperar 10 s, medir e registrar a <del>potência reativa</del> <b>o fator de potência</b> de saída do ESE.</p> <p>Critério de aceitação:</p> <p>O ESE é considerado em conformidade se a diferença entre os valores <del>de potência medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de <math>\pm 2,5\%</math> da potência nominal do ESE.</del> <b>de fator de potência medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de <math>\pm 0,025</math>.</b></p>
----	------	--	--

21	6.13	<p><b>"6.13 Desconexão e reconexão do sistema fotovoltaico da rede"</b></p> <p>"e) Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o ESE desconectar da rede elétrica. f) Esperar 1 min, medir e registrar a potência ativa de saída do ESE. g) Após 1 min do evento de desconexão do ESE, enviar um comando externo para o ESE reconectar à rede elétrica."</p> <p>"O ESE é considerado em conformidade se desconectar-se e reconectar-se da rede após o comando externo correspondente."</p>	<p><b>6.13 Desconexão e reconexão Interrupção do sistema fotovoltaico da rede</b></p> <p>e) Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o ESE <del>desconectar da rede elétrica.</del> <b>cessar o fornecimento de energia à rede elétrica.</b> f) Esperar 1 min, medir e registrar a potência ativa de saída do ESE. g) Após 1 min do evento de desconexão do ESE, enviar um comando externo para o ESE <del>reconectar à rede elétrica.</del> <b>retomar o fornecimento de energia à rede elétrica.</b></p> <p>O ESE é considerado em conformidade se <del>desconectar-se e reconectar-se da</del> <b>cessar e retomar o fornecimento de energia à</b> rede após o comando externo correspondente.</p>
----	------	---	---

ABNT NBR IEC 62116:2012			
Página	Item	Texto	Sugestão de alteração do texto
9	6.1	<p>"NOTA As potências ativa e reativa são calculadas (utilizando as medições dadas na Tabela 1) separadamente nos terminais de cada ramo R, L e C da carga, de forma que os parâmetros parasitas (e outros efeitos parasitas introduzidos por variações ou autotransformadores) sejam considerados no cálculo de Qf."</p>	<p>NOTA As potências ativa e reativa são calculadas (utilizando as medições dadas na Tabela 1) separadamente nos terminais de cada ramo R, L e C da carga, de forma que os parâmetros parasitas (e outros efeitos parasitas introduzidos por variações ou autotransformadores) sejam considerados no cálculo de Qf. <b>Para ESE que apresente fator de potência de saída acima de 0,99, a potência reativa de saída pode ser considerada nula, neste caso, não é necessário manipular o fluxo de potência reativa entre o ESE e a rede elétrica. Para ESE que apresente fator de potência de saída abaixo de 0,99 e uma potência reativa de saída inferior a 1 VAR, deve ser adotado a variação de 1 VAR para manipulação do fluxo de potência entre o ESE e a rede elétrica.</b></p>