

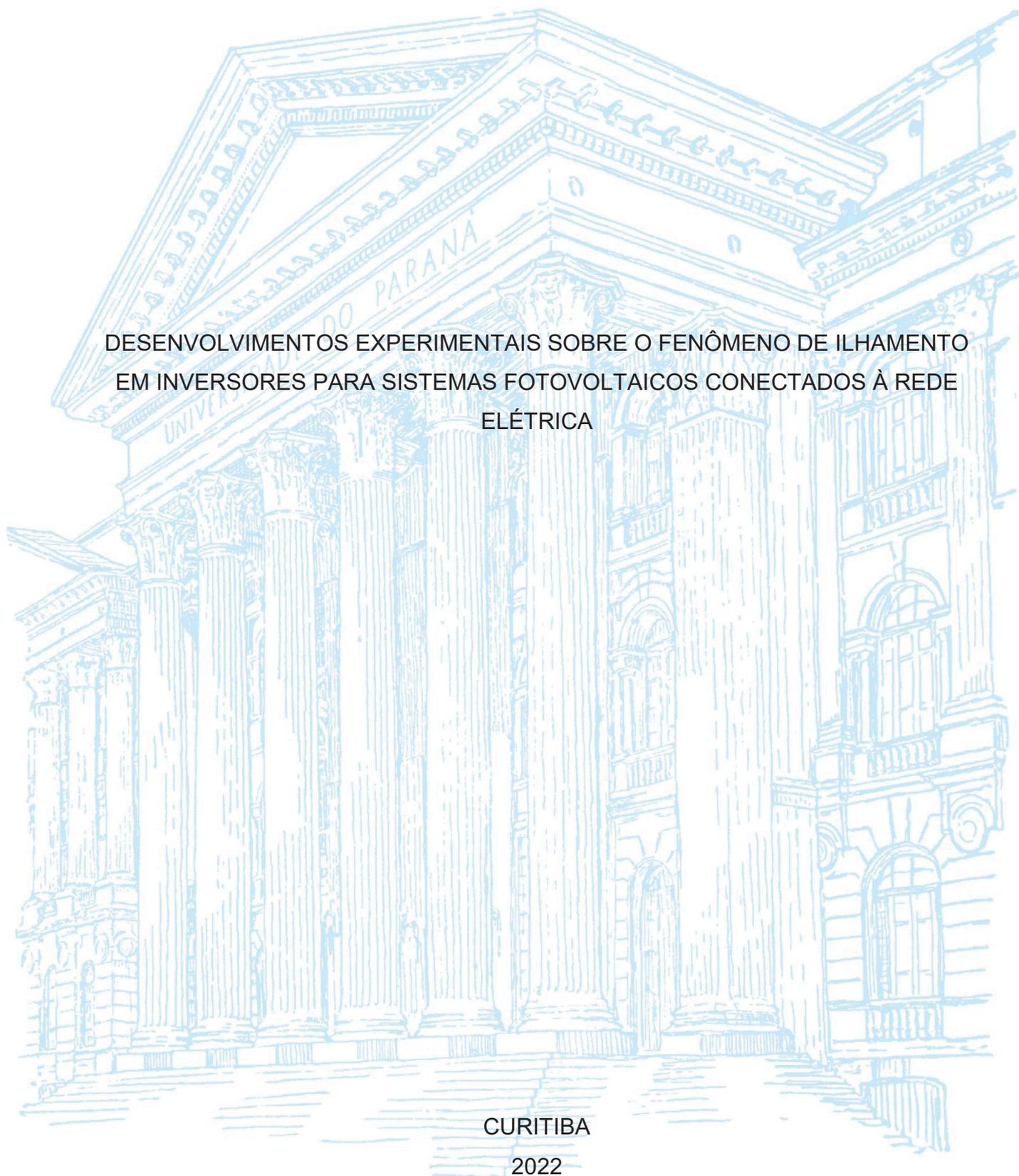
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME DUTRA BALBÉ

DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS SOBRE O FENÔMENO DE ILHAMENTO
EM INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE
ELÉTRICA

CURITIBA

2022



GUILHERME DUTRA BALBÉ

DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS SOBRE O FENÔMENO DE ILHAMENTO
EM INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE
ELÉTRICA

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção de título de Especialista, curso de Especialização em Eficiência Energética e Geração Distribuída, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rogers Demonti

CURITIBA

2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA -
40001016317E1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Monografia de Especialização de GUILHERME DUTRA BALBÉ intitulada: DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS SOBRE O FENÔMENO DE ILHAMENTO EM INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de especialista está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 18 de fevereiro de 2022.

Rogers Demonti

Presidente da Banca Examinadora

Prof. Dr. Rogers Demonti
Servidor Docente do Depto. de Engenharia Elétrica
Matrícula: UFPR 201875

Mateus Duarte Teixeira

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Prof. Dr. MATEUS DUARTE TEIXEIRA
Docente do Departamento de Eng. Elétrica
Matrícula UFPR 203334

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao professor Rogers Demonti pela prestatividade e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional, paciência e incentivo ao longo do período em que estive no curso.

Agradeço à minha namorada Gabriela pelo companheirismo e incentivo demonstrados durante a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos Alice e Marcelo pelo apoio que sempre demonstraram.

A todos os meus amigos e colegas que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

“Grande é a verdade, mas ainda maior, do ponto de vista prático, é o silêncio em torno da verdade.” (ALDOUS HUXLEY, 1932)

RESUMO

A popularização das fontes de geração distribuída vem ganhando cada vez mais atenção, principalmente se considerarmos a quantidade de benefícios que elas trazem consigo. Porém, apesar de todos benefícios atrelados a ela, a inserção de novas fontes geradoras na rede elétrica faz com que novas variáveis sejam adicionadas ao sistema, aumentando a sua complexidade e trazendo novos desafios e fenômenos a serem investigados. Dentre estes fenômenos está o de ilhamento, que ocorre quando a fonte de geração distribuída continua a fornecer energia à rede elétrica após a ocorrência de uma falta no fornecimento de energia. Este fenômeno, quando não planejado, é indesejado pois pode resultar em problemas nos dispositivos presentes na rede elétrica, pessoas responsáveis pela manutenção da mesma e nos equipamentos conectados a ela. Dada a relevância do tema, este trabalho tem por finalidade realizar o estudo sobre o fenômeno de ilhamento e desenvolver um roteiro de testes baseado na norma ABNT NBR IEC 62116, que define os procedimentos de ensaio anti-ilhamento, visando a sua aplicabilidade na realização de testes práticos utilizando-se de um inversor real no Laboratório de Geração Distribuída (LabGD) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Para a realização do projeto, foram abordados temas como energias renováveis e fontes de geração distribuída, o fenômeno de ilhamento, funcionamento e homologação de inversores fotovoltaicos no Brasil, que foram discutidos ao longo do curso de Especialização em Eficiência Energética e Geração Distribuída ministrada pela Universidade Federal do Paraná.

Palavras-chave: Ilhamento. Geração Distribuída. Inversor. ABNT NBR IEC 62116.

ABSTRACT

The popularization of distributed generation resources has been gaining more and more attention, especially if we consider the amount of benefits they bring with them. However, despite all the benefits associated with it, the insertion of new generation sources in the electrical network causes new variables to be added to the system, increasing complexity and bringing new challenges and phenomena to be investigated. Among these phenomena is islanding, which occurs when the distributed generation source continues to supply energy to the grid after a failure in the energy supply. This phenomenon, when unplanned, is undesired and may result in problems in the devices present in the electrical network, as well as in the equipment connected to it and, potentially, cause injuries to the maintenance workers. Given the relevance of the topic, this work aims to carry out a study on the islanding phenomenon and develop a test script based on the ABNT NBR IEC 62116 standard, which defines the anti-islanding test procedures, aiming at its applicability in carrying out tests using a real inverter at the Laboratório de Geração Distribuída (LabGD) of the Universidade Federal do Paraná (UFPR). In order to carry out the project, topics such as renewable energy and sources of distributed generation, the phenomenon of islanding, operation and approval of photovoltaic inverters in Brazil, which were discussed during the Specialization course in Energy Efficiency and Distributed Generation given by the Universidade Federal do Paraná.

Keywords: Islanding. Distributed generation. Inverter. ABNT NBR IEC 62116.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FENÔMENO DE ILHAMENTO	22
FIGURA 2 – CIRCUITO BÁSICO DE UM INVERSOR.....	25
FIGURA 3 – 1º ESTÁGIO DE FUNCIONAMENTO DE UM INVERSOR.....	25
FIGURA 4 – 2º ESTÁGIO DE FUNCIONAMENTO DE UM INVERSOR.....	26
FIGURA 5 – TENSÃO ALTERNADA NA SAÍDA DE UM INVERSOR ONDA QUADRADA.....	26
FIGURA 6 – FUNCIONAMENTO DE UM INVERSOR CONECTADO NA REDE ELÉTRICA.....	27
FIGURA 7 – CIRCUITO DE ENSAIO	33
FIGURA 8 – SIMULADOR DE GERADOR FV	34
FIGURA 9 – COMPUTADOR DO LABGD COM SOFTWARE SASCONTROL	35
FIGURA 10 – FONTE DE ALIMENTAÇÃO CA MX30-PI	37
FIGURA 11 – CARGA RLC PV-RLC-385-30K	38
FIGURA 12 – ANALISADOR DE POTÊNCIA WT5000	39
FIGURA 13 – OSCILOSCÓPIO KEYSIGHT INFINIIVISION DSOX4034A	40
FIGURA 14 – INVERSOR XANTREX GT4.0N-NA-240/208 UL-05.....	41
FIGURA 15 – RESULTADO ENSAIO 1	48
FIGURA 16 – RESULTADO ENSAIO 2	49
FIGURA 17 – RESULTADO ENSAIO 3	50
FIGURA 18 – RESULTADO ENSAIO 4	51
FIGURA 19 – RESULTADO ENSAIO 5	52
FIGURA 20 – RESULTADO ENSAIO 6	53
FIGURA 21 – RESULTADO ENSAIO 7	54
FIGURA 22 – RESULTADO ENSAIO 8	55
FIGURA 23 – RESULTADO ENSAIO 9	56
FIGURA 24 – RESULTADO ENSAIO 10	58
FIGURA 25 – RESULTADO ENSAIO 11	59
FIGURA 26 – RESULTADO ENSAIO 12	60
FIGURA 27 – RESULTADO ENSAIO 13	61
FIGURA 28 – RESULTADO ENSAIO 14	62
FIGURA 29 – RESULTADO ENSAIO 15	63

FIGURA 30 – RESULTADO ENSAIO 16	64
FIGURA 31 – RESULTADO ENSAIO 17	65
FIGURA 32 – RESULTADO ENSAIO 18	66
FIGURA 33 – RESULTADO ENSAIO 19	67
FIGURA 34 – RESULTADO ENSAIO 20	68
FIGURA 35 – RESULTADO ENSAIO 21	70
FIGURA 36 – RESULTADO ENSAIO 22	71
FIGURA 37 – RESULTADO ENSAIO 23	72
FIGURA 38 – RESULTADO ENSAIO 24	73
FIGURA 39 – RESULTADO ENSAIO 25	74
FIGURA 40 – RESULTADO ENSAIO 26	75
FIGURA 41 – RESULTADO ENSAIO 27	76
FIGURA 42 – RESULTADO ENSAIO 28	77
FIGURA 43 – RESULTADO ENSAIO 29	78
FIGURA 44 – RESULTADO ENSAIO 30	79
FIGURA 45 – RESULTADO ENSAIO 31	80
FIGURA 46 – CORRENTE NA SAÍDA DO INVERSOR PARA A CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO B	83

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PARÂMETROS A SEREM MEDIDOS.....	32
QUADRO 2 – CONDIÇÕES DE ENSAIO	41
QUADRO 3 – DESEQUILÍBRIO DE CARGA PARA A CONDIÇÃO DE ENSAIO A..	43
QUADRO 4 – DESEQUILÍBRIO DE CARGA PARA AS CONDIÇÕES DE ENSAIO B E C.....	43
QUADRO 5 – RESULTADO DE TODOS OS ENSAIOS	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES DO SIMULADOR DE GERADOR FV	34
TABELA 2 – REQUISITOS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO CA.....	36
TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES DA FONTE CA MX30-PI	36
TABELA 4 – ESPECIFICAÇÕES DA CARGA PV-RLC-385-30K.....	38
TABELA 5 – ESPECIFICAÇÕES DO ANALISADOR DE POTÊNCIA WT5000	39
TABELA 6 – ESPECIFICAÇÕES DO OSCILOSCÓPIO KEYSIGHT DSOX4034A ...	40
TABELA 7 – ESPECIFICAÇÕES DO INVERSOR XANTREX GT4.0N-NA.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
ESE	- Equipamento Sob Ensaio
ENCE	- Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
FV	- Fotovoltaico
GD	- Geração Distribuída
GW	- Gigawatt
IEC	- International Electrotechnical Commission
IEEE	- Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
kW	- Quilowatt
MW	- Megawatt
NBR	- Norma Brasileira
SEP	- Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

- I_C - Corrente de carga capacitiva
- I_{CA} - Corrente da rede CA
- I_{CC} - Corrente de entrada do ESE
- I_L - Corrente de carga indutiva
- I_R - Corrente de carga resistiva
- P_{CA} - Potência ativa da rede
- P_{CC} - Potência de entrada do ESE
- P_{ESE} - Potência ativa de saída do ESE
- P_R - Potência ativa resistiva na carga RLC
- Q_C - Potência reativa capacitiva na carga RLC
- Q_{CA} - Potência reativa da rede
- Q_{ESE} - Potência reativa de saída do ESE
- Q_f - Fator de qualidade
- Q_L - Potência reativa indutiva na carga RLC
- t_r - Tempo de permanência da alimentação
- V_{CC} - Tensão de entrada do ESE
- V_{ESE} - Tensão na saída do ESE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
1.3	METODOLOGIA.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	ENERGIAS RENOVÁVEIS E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	20
2.2	FENÔMENO DE ILHAMENTO	22
2.3	INVERSORES FOTOVOLTAICOS.....	24
2.4	CERTIFICAÇÃO DE INVERSORES NO BRASIL.....	28
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	34
3.1.1	Simulador de gerador FV.....	34
3.1.2	Fonte de alimentação CA	36
3.1.3	Carga RLC.....	37
3.1.4	Instrumentos de medição	38
3.1.5	Inversor fotovoltaico.....	40
3.2	CONDIÇÕES DE ENSAIO E ROTEIRO DE TESTES	41
3.2.1	Condições de ensaio	41
3.2.2	Roteiro de testes.....	43
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	46
4.1	CONDIÇÃO A.....	46
4.2	CONDIÇÃO B.....	56
4.3	CONDIÇÃO C.....	68
4.4	QUADRO FINAL.....	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

De acordo com os números apresentados pela ANEEL (2019), a geração distribuída no Brasil ultrapassou a marca de 1 Gigawatt de potência instalada, divididas em micro e mini geração distribuída de energia elétrica. Ainda segundo a agência, a fonte mais utilizada pelos consumidores brasileiros é a solar fotovoltaica, com 82,6 mil micros e mini usinas e cerca de 870 megawatts (MW) de potência instalada (ANEEL, 2019). O advento das fontes de geração distribuídas no Brasil trouxe inúmeros benefícios ao sistema elétrico brasileiro, como a aproximação das cargas às fontes geradoras, maior estabilidade do serviço de energia elétrica, incentivo a geração de energias limpas e renováveis e a inserção do sistema de compensação de energia elétrica.

Apesar dos benefícios que vieram com a sua chegada, as fontes de geração distribuída fotovoltaicas trouxeram consigo novos elementos e conseqüentemente novos fenômenos e desafios, como por exemplo a elevação de distorção harmônica no entorno da inserção do gerador distribuído, problemas de proteção quanto a sua efetividade e coordenação, variação na frequência da rede, flutuações de tensão causadas pela intermitência em sua geração (MIYAMOTO; BRAGA; SOUZA; FORTES; DIAS, 2018) e o fenômeno de ilhamento.

O fenômeno de ilhamento ocorre quando a fonte de geração distribuída está produzindo energia e a rede elétrica é desligada, de forma programada ou não, e o sistema fotovoltaico continua a injetar energia na rede. A ocorrência de ilhamento não intencional em fontes de geração distribuída pode resultar em problemas de qualidade de energia, danificação de equipamentos e riscos à segurança de operadores responsáveis pela manutenção da rede elétrica (YE; DAME; KROPOSKI, 2005).

De modo a evitar os problemas citados e satisfazer os requisitos técnicos exigidos pelos fornecedores de energia elétrica, os inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica utilizam-se de diversas normas de detecção e prevenção do ilhamento (ABNT, 2012). O procedimento de ensaio necessário para avaliar a eficácia dos sistemas de prevenção do ilhamento em inversores fotovoltaicos é descrito na norma ABNT NBR IEC 62116. Esta norma será utilizada como base no desenvolvimento deste trabalho, pois ela descreve as diretrizes para a verificação do desempenho das medidas automáticas de prevenção de ilhamento empregados nos inversores fotovoltaicos, onde aqueles que satisfizerem os requisitos presentes na

mesma são considerados equipamentos com função anti-ilhamento (ABNT, 2012). Além disso, os procedimentos descritos nela fazem parte dos requisitos de avaliação de conformidade (RACs) necessários para a certificação de inversores fotovoltaicos no país.

Este trabalho consiste na elaboração de um roteiro de testes práticos a partir dos procedimentos descritos na norma ABNT NBR IEC 62116, que auxilie na montagem de um circuito de ensaio que seja capaz de simular o efeito de ilhamento em laboratório e permita a realização de ensaios de verificação dos mecanismos de proteção anti-ilhamento de um inversor fotovoltaico real.

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA

A principal motivação deste trabalho consiste na importância do estudo de técnicas de proteção e detecção de ilhamento, de modo que ele possa contribuir no desempenho da operação das redes de energia elétrica. Para isso, será desenvolvido um roteiro de testes seguindo a norma ABNT NBR IEC 62116 que seja capaz de verificar se o inversor a ser testado é capaz de detectar condições de ilha e interromper o fornecimento de energia para a rede.

Espera-se que este estudo possa vir a contribuir para alunos e professores interessados nas medidas de proteção que devem ser adotadas para que os inversores evitem o fenômeno de ilhamento. Além disso, o roteiro de testes a ser desenvolvido bem como os desafios enfrentados ao longo deste trabalho podem ser de grande utilidade para estudos futuros envolvendo sistemas de proteção anti-ilhamento e, possivelmente, para a criação de laboratórios capazes de realizar a homologação de inversores no país.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção contém os objetivos gerais e específicos do trabalho, que serão apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Estudar os mecanismos de proteção anti-ilhamento em inversores fotovoltaicos e desenvolver um plano de testes que seja capaz de verificar se os inversores fotovoltaicos atendem à norma ABNT NBR IEC 62116.

1.2.2 Objetivos específicos

O desenvolvimento deste trabalho busca atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Descrever os requisitos técnicos necessários aos mecanismos de proteção anti-ilhamento de inversores fotovoltaicos para a certificação e homologação.
- b) Elaborar um roteiro de testes seguindo os procedimentos definidos pela norma ABNT NBR IEC 62116.
- c) Executar os testes propostos em laboratório utilizando-se do roteiro desenvolvido no trabalho visando a sua aplicabilidade no atendimento à norma ABNT NBR IEC 62116.

1.3 METODOLOGIA

O principal desafio a ser tratado neste trabalho consiste no desenvolvimento de um roteiro de testes confiável que possa ser utilizado como guia para ensaios de detecção anti-ilhamento de inversores fotovoltaicos em laboratório. Sendo assim, são levantadas as seguintes questões:

- a) O roteiro de testes desenvolvido é capaz de verificar se os equipamentos testados possuem proteção anti-ilhamento adequados?
- b) O inversor possui proteção anti-ilhamento?

Visando propor uma solução para as hipóteses levantadas, o método de procedimentos utilizado neste trabalho seguirá as seguintes etapas:

- Revisão Bibliográfica: realização da pesquisa e levantamento de referências bibliográficas a respeito de fontes de geração distribuída,

fenômeno de ilhamento, inversores fotovoltaicos e processo de homologação. Serão utilizados livros, artigos científicos, teses e dissertações além de normas técnicas como base teórica.

- Desenvolvimento do plano de testes: levantamento dos materiais necessários e desenvolvimento de um roteiro de testes para a realização dos ensaios em laboratório, seguindo a norma ABNT NBR IEC 62116.
- Execução dos testes em laboratório: montagem dos equipamentos em laboratório e execução dos testes seguindo o roteiro desenvolvido.
- Coleta de dados: obtenção e registro de todas as grandezas exigidas pela norma ABNT NBR IEC 62116.
- Análise dos resultados: avaliação dos resultados obtidos em laboratório e verificação se o roteiro desenvolvido apresenta resultados confiáveis.

Por meio da realização dos itens acima será possível obter as informações necessárias para o cumprimento dos objetivos definidos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O tema energias renováveis vem ganhando cada vez mais força dentro do debate público há algumas décadas, sendo inclusive um dos principais temas discutidos em congressos e convenções governamentais pelo mundo. A relevância desse assunto está principalmente na ameaça representada pelas mudanças climáticas, que, em grande parte, é impulsionada pela queima de combustíveis fósseis. Dessa maneira, entende-se que as sociedades precisam de uma transição na forma como produzir e consumir energia (YORK; BELL, 2019).

Além de poluírem o meio ambiente quando utilizadas como fontes de energia, sabe-se que as reservas de petróleo, gás natural e carvão reduzem à medida que são usadas e são, portanto, consideradas fontes de energia não renováveis. As fontes de energia renováveis, por outro lado, são aquelas que não se apoiam em recursos que são sabidamente limitados e cuja utilização não causa seu esgotamento (VILLALVA, 2015), utilizando do fluxo de energia do ecossistema da Terra, a partir da irradiação solar, vento, movimento da água, biomassa e energia geotérmica do planeta (UNDP, 2000).

Outro fator importante das fontes de energia renováveis é que elas possibilitam a criação de pequenas usinas geradoras instaladas no local de consumo ou próximas a ele, opondo-se ao método tradicional de geração de energia baseado em grandes usinas construídas em locais distantes dos consumidores. A este modelo de geração descentralizado dá-se o nome de geração distribuída (VILLALVA, 2015). As fontes de geração distribuída permitem que geradores sejam instalados em telhados de residências, empresas, escolas e centros comerciais que podem ser conectadas diretamente nas redes de distribuição de baixa tensão, sem necessidade de transformadores ou linhas de transmissão (VILLALVA, 2015). Além disso, de acordo com Laghari et al. (2013) as fontes de geração distribuída trouxeram inúmeros benefícios, como por exemplo:

- O uso de GDs resultam no aprimoramento na eficiência energética;
- Redução nos custos de transmissão e distribuição;

- A utilização de fontes de geração distribuída reduz consideravelmente a emissão de gases de efeito estufa;
- Redução de perdas na transmissão de energia, uma vez que a fonte está mais próxima da carga;
- Melhora no perfil de tensão dos sistemas elétricos de potência;
- Custo reduzido e menor tempo de construção quando comparado a outras fontes de energia, como hidrelétricas, termoelétricas e etc;
- Adicionalmente, podem ser instaladas e prover energia a áreas consideradas remotas ou isoladas, de difícil acesso a linhas de transmissão e distribuição (DIAS; BOROTNI; HADDAD, 2002).

Devido ao fato de utilizar a luz do sol como fonte primária de energia e a disponibilidade e abundância desse recurso natural, além da facilidade e custo reduzido de sua instalação, a implementação de sistemas fotovoltaicos tornou-se muito atrativa e fez com que esse sistema de geração ganhasse muita expressão ao redor do mundo nos últimos anos (PEREIRA; GONÇALVES, 2008). Atualmente, a Alemanha, por exemplo, disponibiliza subsídios federais e estaduais para a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências privadas e empresas, e estima-se que serão instalados até 100 GW de potência de energia fotovoltaica até 2030 (CANAL SOLAR, 2021).

No Brasil, a energia fotovoltaica ultrapassou a marca histórica de 10 GW de potência operacional em 2021, o que representa cerca de 70% da potência da usina hidrelétrica de Itaipu, levando o país à 14ª colocação entre os países com maior capacidade instalada de energia solar (G1, 2021). A alta incidência de radiação solar no país e as suas dimensões territoriais fazem com que o potencial deste tipo de geração no Brasil seja inegável (VILLALVA, 2015).

Porém, apesar de todas as vantagens citadas, a crescente penetração de fontes de geração distribuída na rede, especialmente a fotovoltaica, exige que a configuração do sistema elétrico atual seja alterada, além do surgimento de novos problemas técnicos que surgem com a sua implementação. Um problema de grande relevância está no fenômeno de ilhamento (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2009).

2.2 FENÔMENO DE ILHAMENTO

O fenômeno de ilhamento consiste na condição em que parte da rede elétrica que contém carga e um gerador distribuído permanece energizado de forma isolada do restante do sistema elétrico, onde a concessionária não possui controle direto sobre a fonte geradora (IEEE, 2000). Geralmente o ponto isolado na condição de ilha ocorre nas linhas de baixa tensão, mas ela também pode acontecer em redes de distribuição de alta tensão ou linhas de transmissão quando um grande número de fontes de GD está presente (DA SILVA, 2016).

FIGURA 1 – FENÔMENO DE ILHAMENTO



FONTE: <http://primariaenergia.com/blog/Antiilhamento> (2020).

De forma a evitar a condição de ilha, as fontes de geração distribuída devem ser capazes de detectar condições em que os níveis de tensão ou frequência estão fora dos valores indicados pela distribuidora e cessar o fornecimento de energia para a rede de distribuição (IEEE, 2000). A condição de ilha pode ocorrer de forma intencional ou não intencional.

O ilhamento intencional pode ocorrer quando redes planejadas para atuarem isoladas detectam uma falta e propositalmente continuam a fornecer energia a uma porção da rede afetada pela queda de energia. O subsistema formado pela carga e fonte pode ser qualquer combinação de sistemas de uso particular e pertencente à distribuidora, desde que haja acordo entre as partes (ABNT, 2012).

Visto que a conexão de geradores distribuídos retirou da rede principal o papel de ser a única fonte geradora, o interesse do uso pleno desta no fornecimento de energia elétrica tem sido observado. Por isso, quando planejado e controlado, o ilhamento intencional pode tornar-se uma alternativa viável e eficiente na ocorrência de perda no fornecimento da energia elétrica (LIMA, 2018). No entanto, para que seja possível explorar os benefícios do ilhamento intencional, existem muitos desafios técnicos a serem explorados uma vez que os sistemas de distribuição atuais foram inicialmente projetados com apenas uma fonte de energia (MENDONÇA, 2014).

Por outro lado, o ilhamento não-intencional ocorre quando o gerador dentro da ilha permanece energizando a rede elétrica de forma indevida e deve ser evitado, especialmente quando há o equilíbrio entre a carga e a geração fotovoltaica (ABNT, 2012). De acordo com Bower e Ropp (2002), as principais causas de ilhamento não-intencional são:

- Desconexão intencional para reparos e manutenção na linha de transmissão;
- Abertura acidental da linha de distribuição em função da falha de algum equipamento;
- Desligamento da rede de distribuição quando uma falha é detectada pela concessionária, mas este não é detectado pelo GD;
- Falha humana;
- Falha decorrente de fenômenos naturais.

Os autores Walling e Miller (2002) ressaltam ainda que o ilhamento não-intencional pode ocasionar inúmeros problemas comerciais, na segurança, na qualidade de energia e na integridade na rede, uma vez que:

- Após a perda do fornecimento de energia por parte da concessionária, a ilha permanecerá energizando parte do sistema elétrico sem o conhecimento da mesma, levando grande perigo aos operadores responsáveis pela manutenção e restabelecimento de energia da fonte primária.

- A concessionária não possui controle sobre os níveis de tensão e frequência geradas pela ilha e aos consumidores ligados à ela, apesar de legalmente ser responsável por esses consumidores.
- As correntes de curto-circuito tendem a reduzir seus valores drasticamente por meio da perda da conexão com a concessionária, podendo ocasionar a perda de coordenação dos dispositivos de proteção contra curto-circuito existentes dentro da ilha.
- A perda de conexão com a concessionária pode resultar no aterramento inadequado na operação do sistema ilhado.
- Os disjuntores e religadores presentes na rede elétrica podem reconectar a ilha ao sistema primário mesmo que ela esteja fora de fase.
- O ilhamento pode interferir na restauração manual ou automática do serviço por parte da concessionária (BOWER; ROPP, 2002).

Levando em consideração a relevância dos problemas citados, é necessário que os inversores possuam sistemas de proteção anti-ilhamento adequados, devendo cessar o fornecimento de energia quando a rede elétrica está fora das condições normais de tensão e frequência. No Brasil, a norma que define os procedimentos de ensaio anti-ilhamento com o foco em avaliar o desempenho das medidas de proteção de ilhamento em inversores fotovoltaicos é a ABNT NBR IEC 62116.

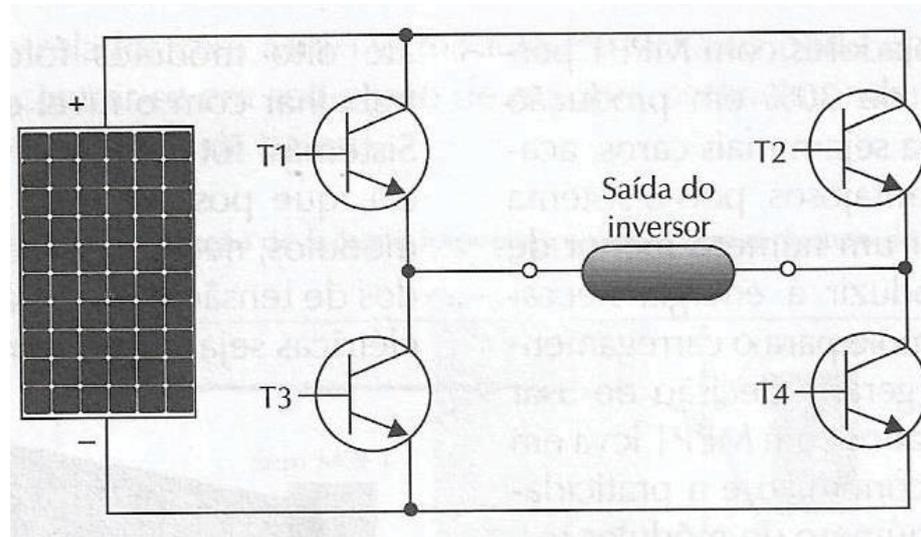
2.3 INVERSORES FOTOVOLTAICOS

Os inversores são dispositivos responsáveis pela conversão de corrente contínua para corrente alternada. Eles são equipamentos essenciais nos sistemas fotovoltaicos, uma vez que a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos é gerada em corrente contínua e a rede elétrica funciona em corrente alternada. Em sistemas autônomos, projetados para alimentar diretamente os consumidores ligados a eles, os inversores funcionam como fontes de tensão enquanto que para sistemas conectados na rede elétrica estes dispositivos funcionam como fontes de corrente (VILLALVA, 2015).

O princípio básico de funcionamento de um inversor consiste em quatro transistores funcionando como chaves eletrônicas, que são controladas para abrir e

fechar e transferir a tensão e a corrente da fonte CC (módulos fotovoltaicos) para os terminais da saída do inversor, como pode ser conferido abaixo:

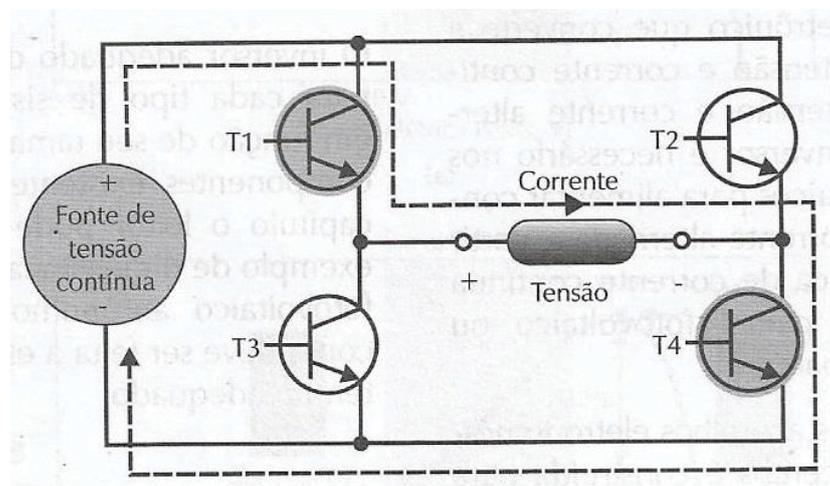
FIGURA 2 – CIRCUITO BÁSICO DE UM INVERSOR



FONTE: Villalva (2015, p. 118).

Os transistores são ligados e desligados em pares, de forma a variar a polarização dos terminais de saída do inversor. Na figura 3 abaixo, os transistores T1 e T4 estão ligados e, portanto, permitem a passagem de corrente por eles. Já os transistores T2 e T3 estão desligados e em circuito aberto, não permitindo a passagem de corrente pelos mesmos. Podemos chamar esta etapa de funcionamento de 1º estágio.

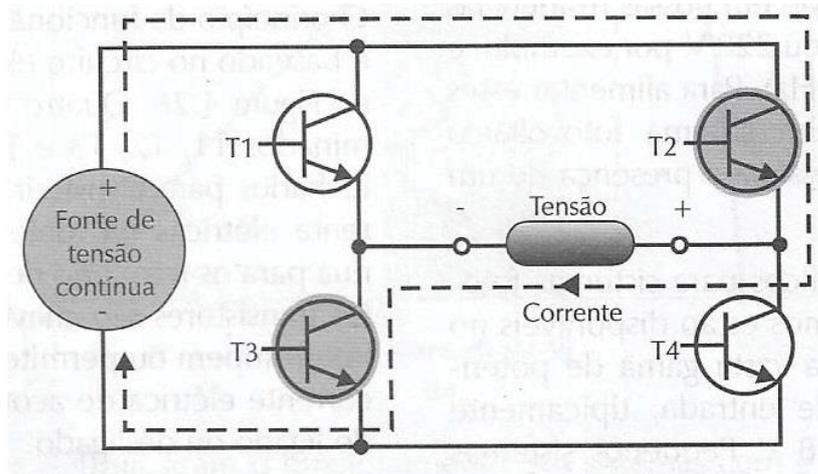
FIGURA 3 – 1º ESTÁGIO DE FUNCIONAMENTO DE UM INVERSOR



FONTE: Villalva (2015, p. 118).

No segundo estágio o funcionamento se inverte, com T1 e T4 sendo desligados e T2 e T3 ligados, criando assim um novo caminho para a passagem da corrente como mostrado na figura abaixo:

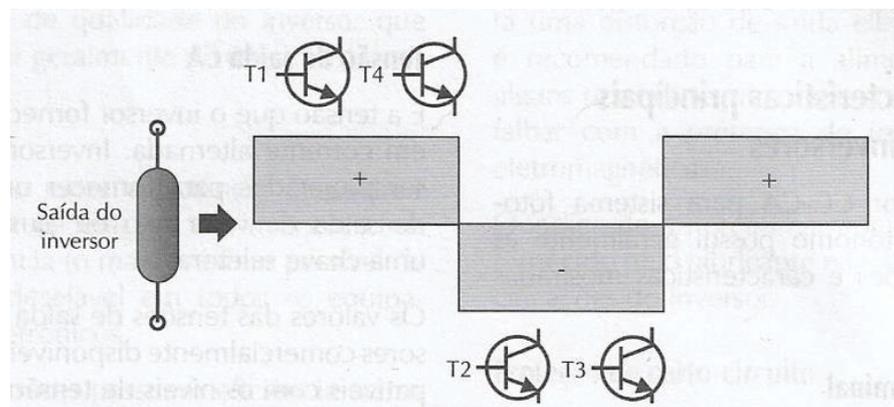
FIGURA 4 – 2º ESTÁGIO DE FUNCIONAMENTO DE UM INVERSOR



FONTE: Villalva (2015, p. 118).

O acionamento alternado dos pares de transistores faz com que a corrente se mova em direções contrárias em cada estágio na saída do circuito, fazendo com que a polaridade se inverta a cada semiciclo, gerando assim tensão alternada. Devido ao formato da onda na saída, este tipo de inversor possui o nome de inversor de onda quadrada (VILLALVA, 2015). A forma de onda gerada na saída pode ser conferida na figura 5.

FIGURA 5 – TENSÃO ALTERNADA NA SAÍDA DO INVERSOR ONDA QUADRADA

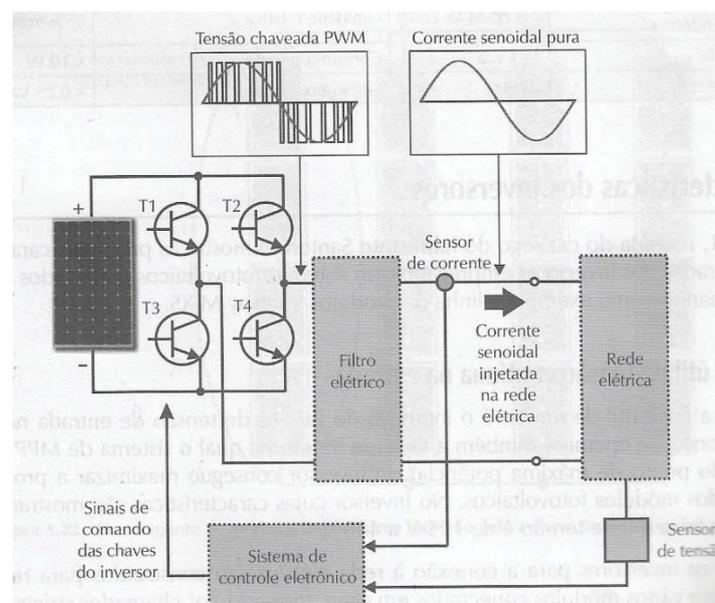


FONTE: Villalva (2015, p. 119).

O inversor de onda quadrada apresentado possui características de funcionamento básicas de um inversor CC-CA. Os inversores disponibilizados comercialmente são muito mais complexos e sofisticados do que este tipo de inversor, pois considerando que eles devem fornecer energia à rede elétrica e esta opera com tensões e correntes senoidais, o inversor de onda quadrada criaria uma elevada e indesejável distorção harmônica na corrente da rede (VILLALVA, 2015).

De forma a evitar este problema e elevar a sua confiabilidade, os inversores do tipo *grid tie* devem produzir em sua saída uma forma de onda mais próxima da senoidal pura possível. A maior parte dos inversores comerciais funcionam a partir do princípio da modulação de largura de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*), que produz uma sequência de pequenas ondas quadradas de alta frequência. Esta sequência é padronizada na saída do inversor, de forma que se consiga atingir um conteúdo senoidal fundamental na frequência desejada com o acréscimo de um conteúdo harmônico de alta frequência. Adicionando um filtro elétrico de alta frequência na saída do inversor é possível obter uma corrente na forma senoidal pura e com baixa distorção harmônica (VILLALVA, 2015). A figura 6 abaixo mostra o funcionamento de um inversor fotovoltaico para conexão com a rede elétrica.

FIGURA 6 – FUNCIONAMENTO DE UM INVERSOR CONECTADO NA REDE ELÉTRICA



FONTE: Villalva (2015, p. 157).

Este tipo de inversor é programado para detectar falhas no fornecimento de energia e desligar-se da rede elétrica de forma a evitar o fenômeno de ilhamento. Dispositivos adicionais podem ser utilizados pelas concessionárias para evitar o ilhamento, como relés baseados em medidas de tensão e frequência (VIEIRA, 2011). Porém, parte das exigências para a certificação e comercialização de inversores no Brasil exige que o próprio inversor possua um sistema de proteção contra o ilhamento. Maiores detalhes sobre a certificação e homologação de inversores pode ser conferido a seguir.

2.4 CERTIFICAÇÃO DE INVERSORES NO BRASIL

De forma a garantir que os consumidores brasileiros não sejam desfavorecidos ao adquirir produtos ofertados no país é necessário que os mesmos estejam padronizados, sendo responsabilidade do INMETRO verificar se as empresas e os seus produtos seguem os padrões predeterminados para o mercado. Para que haja a aprovação do produto por parte da instituição, é necessário que o mesmo passe por um processo de homologação, onde são realizados uma série de testes de segurança e qualidade, além de análises específicas de cada segmento (INOVEGAS, 2018).

A certificação de inversores e demais equipamentos para aplicações fotovoltaicas foi regulamentada pela portaria 004/2011 do INMETRO, que tem como objetivo:

Estabelecer os critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica, através do mecanismo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, atendendo aos requisitos do Programa Brasileiro de Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – PBE, visando à eficiência energética e adequado nível de segurança. (BRASIL, 2011).

O processo de etiquetagem definido pela portaria aplica-se a controladores de carga, módulos fotovoltaicos, baterias, inversores para sistemas autônomos (*off grid*) que possuem potência nominal entre 5 kW e 10 kW e inversores para sistemas conectados à rede (*grid tie*) com potência nominal de até 10 kW. Os inversores com potência nominal superior a 10 kW são isentos de certificação instituído pelo

INMETRO, porém é frequente a exigência da apresentação de certificados de conformidade emitidos por laboratórios internacionais por parte das concessionárias de energia elétrica (CANAL SOLAR, 2020).

O fabricante que deseja obter a certificação do INMETRO para seu equipamento deve cumprir todas as etapas do processo de avaliação de conformidade (BRASIL, 2011), que consiste em:

- a) Assinatura do Termo de Compromisso de etiquetagem com declaração da linha de produtos/modelos: O fornecedor deve assinar e enviar para o INMETRO o Termo de Compromisso declarando toda a sua linha de produtos/modelos de fabricação para conhecimento do INMETRO.
- b) Solicitação para Etiquetagem: O fornecedor deverá encaminhar a Planilha de Especificação Técnica (PET) e a Solicitação de Etiquetagem para um dos laboratórios certificados pelo INMETRO.
- c) Análise da Solicitação de Etiquetagem: Análise inicial realizada pelo laboratório acreditado.
- d) Ensaio para Etiquetagem: Realização dos ensaios para etiquetagem em laboratório. É imprescindível o envio de uma amostra de duas peças do inversor, de mesmo modelo e características.
- e) Aprovação para uso da ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia): constatada a conformidade do produto/modelo e de posse do relatório de ensaios emitido pelo laboratório acreditado e/ou designado, o INMETRO confirma a aposição da etiqueta e divulga os dados através de Tabelas de Eficiência disponibilizadas em seu site, www.inmetro.gov.br.
- f) Registro do produto no INMETRO: A solicitação do registro no INMETRO é realizada, contendo os relatórios de ensaios em anexo e demonstrando a conformidade do objeto.

Os requisitos de avaliação e conformidade (RACs) necessários para a certificação de inversores fotovoltaicos podem ser conferidos no anexo III da portaria 004/2011 e foram definidos com base nos requerimentos mínimos a serem exigidos para estes equipamentos. Os ensaios a serem realizados para inversores fotovoltaicos do tipo *grid-tie* são os seguintes:

1. Cintilação.
2. Injeção de componente contínua.
3. Harmônicos e distorção de forma de onda.
4. Fator de potência.
5. Injeção/demanda de potência reativa.
6. Sobre/sub tensão.
7. Sobre/sub frequência
8. Controle da potência ativa em sobre frequência
9. Reconexão
10. Religamento automático fora de fase.
11. Modulação de potência ativa
12. Modulação de potência reativa
13. Desconexão do sistema fotovoltaico da rede.
14. Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede.
15. Proteção contra inversão de polaridade
16. Sobrecarga
17. Anti-ilhamento

A portaria ainda informa as normas a serem utilizadas para a realização de cada um dos ensaios. Os procedimentos de ensaio para os itens 1 a 14, por exemplo, estão definidos nas normas ABNT NBR 16149:2013 (Sistemas Fotovoltaicos - Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição) e ABNT NBR 16150:2013 (Sistemas Fotovoltaicos - Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio e conformidade). Os procedimentos de ensaio para os itens 15 e 16 são descritos no anexo III do da própria portaria.

Para o item 17, os procedimentos de ensaio estão definidos na norma ABNT NBR IEC 62116:2012 (Procedimento de ensaio anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica) já citada anteriormente. Tanto a norma brasileira quanto a europeia utilizam da mesma metodologia de ensaios anti-ilhamento presente nos padrões definidos pela IEC 62116 (*Utility-interconnected*

photovoltaic inverters – Test procedure of islanding prevention measures) (FIGUEIRA et al., 2015).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A norma ABNT NBR IEC 62116 estabelece os procedimentos de ensaio para avaliar a eficácia de sistemas de prevenção ao ilhamento utilizados por inversores destinados a sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Assim como foi descrito na seção anterior, os ensaios descritos nesta norma fazem parte dos requisitos de avaliação e conformidade do INMETRO e são, portanto, imprescindíveis para que inversores fotovoltaicos possam obter a certificação da instituição. As grandezas a serem medidas na realização dos ensaios podem ser conferidas no Quadro 1 abaixo.

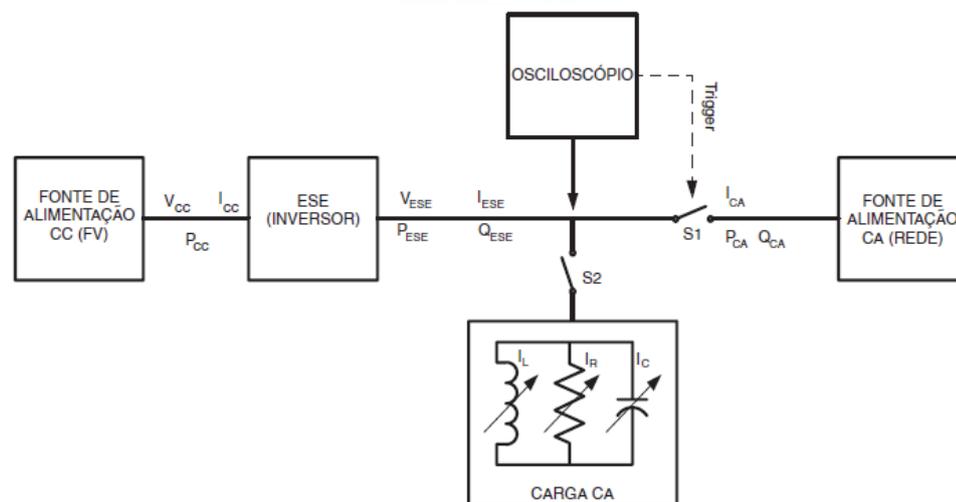
QUADRO 1 – PARÂMETROS A SEREM MEDIDOS

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Entrada CC do Equipamento Sob Ensaio (ESE)		
Tensão CC	V_{CC}	V
Corrente CC	I_{CC}	A
Potência CC	P_{CC}	W
Irradiância	G	W/m ²
Saída CC do ESE		
Tensão CA	V_{ESE}	V
Corrente CA	I_{ESE}	A
Potência ativa	P_{ESE}	W
Potência reativa	Q_{ESE}	VA _r
Forma de onda de tensão		
Forma de onda de corrente		
Sinal de controle de saída do ESE (no caso de utilização de relé)		
Tempo de permanência da alimentação	t_r	s
Sinal de interrupção (se for aplicável)	SS	
Carga de ensaio		
Corrente de carga resistiva	I_R	A
Corrente de carga indutiva	I_L	A
Corrente de carga capacitiva	I_C	A
Fonte de alimentação CA		
Potência ativa da rede	P_{CA}	W
Potência reativa da rede	Q_{CA}	VA _r
Corrente da rede	I_{CA}	A

FONTE: Autor, adaptado da norma ABNT NBR IEC 62116 (2021).

O circuito de ensaio a ser utilizado no experimento consiste em uma fonte geradora CC (podendo ser uma fonte FV real, um simulador de gerador FV ou uma fonte de alimentação CC de bancada), o inversor fotovoltaico a ser testado (ESE), fonte de alimentação CA (rede elétrica da distribuidora ou outra fonte capaz de fornecer determinadas condições especificadas) e uma carga RLC ajustável. Além disso, para a validação das grandezas especificadas e o monitoramento das mesmas ao longo dos ensaios podem ser utilizados multímetros, wattímetros, analisador de potência e um osciloscópio. O circuito de ensaio pode ser conferido na figura 7 abaixo:

FIGURA 7 – CIRCUITO DE ENSAIO



FONTE: ABNT NBR IEC 62116 (2012).

A norma destaca que para inversores com saída trifásica devem ser utilizados circuitos similares. Além disso, ela ressalta ainda que apesar de informar as diretrizes para o ensaio anti-ilhamento de inversores para sistemas fotovoltaicos, os mesmos procedimentos podem ser utilizados para inversores destinados a outras fontes de geração, por meio de algumas modificações.

Para a realização dos ensaios no LabGD, foram utilizados os valores mostrados nos displays dos equipamentos além de um analisador de potência e um osciloscópio, não sendo necessária a utilização de multímetros e wattímetros para a medição das grandezas solicitadas. Todos os materiais utilizados bem como as suas especificações podem ser conferidas na seção a seguir.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Simulador de gerador FV

O equipamento responsável pela geração CC deve ser capaz de fornecer a máxima potência de entrada do inversor nas tensões operacionais mínima e máxima, de forma a possibilitar o inversor a atingir a sua máxima potência de saída. Além disso a norma recomenda que a fonte utilizada nos ensaios permita o ajuste dos limites de tensão e corrente de forma a prover a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto desejadas, de forma a possibilitar manter um valor para o fator de forma entre 0,25 e 0,8 para todas as condições de ensaio.

No laboratório LabGD da UFPR, o equipamento responsável pela geração CC é o Simulador de Gerador FV Regatron AG modelo TopCon Quadro TC.P.32.1500.50-Q1, onde as suas especificações podem ser conferidas abaixo:

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES DO SIMULADOR DE GERADOR FV REGATRON TC.P.32.1500.50-Q1

Especificações	Valores operacionais
Tensão de entrada	3 x 360 – 440 V
Corrente de entrada	3 x 60 A_{rms}
Tensão de saída	0 – 800 V
Corrente de saída	0 – 50 A
Potência de saída	0 - 32 kW
Eficiência	95%

FONTE: Autor, adaptado do *datasheet* do simulador de gerador FV Regatron TC.P.32.1500.50Q1 (2012).

FIGURA 8 – SIMULADOR DE GERADOR FV REGATRON TOPCON TC.P.32.1500.50-Q1



FONTE: Autor (2021).

Na figura acima é possível ver um cabo do tipo RS-232 saindo do simulador de gerador FV. Este cabo está conectado ao computador do LabGD, onde, por meio do software SASControl, é possível visualizar as medidas de corrente, tensão e potência de saída do simulador, além de permitir a programação da curva de geração fotovoltaica de acordo com a potência desejada. A curva de geração fotovoltaica, responsável pela simulação do funcionamento de um módulo ou painel fotovoltaico real, é programada para operar no ponto de máxima potência considerando constantes os valores de irradiação solar e temperatura, de forma que toda a energia disponível seja utilizada (DEMONTI, 2003). Para a realização dos ensaios foram utilizadas curvas com potência máxima de 4 kW e 3,2 kW. É possível conferir o computador do LabGD com o software SASControl em funcionamento na figura 9 abaixo:

FIGURA 9 – COMPUTADOR DO LABGD COM O SOFTWARE SASCONTROL



FONTE: Autor (2021).

3.1.2 Fonte de alimentação CA

De acordo com a norma ABNT NBR IEC 62116, a fonte CA a ser utilizada nos ensaios pode ser a própria rede elétrica da distribuidora ou outra fonte de alimentação CA, desde que ela consiga satisfazer as condições especificadas na tabela abaixo:

TABELA 2 – REQUISITOS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO CA

Itens	Condições
Tensão	Nominal $\pm 2,0 \%$
THD de tensão	$< 2,5 \%$
Frequência	Nominal $\pm 0,1 \text{ Hz}$
Defasagem(equipamentos trifásicos)	$120^\circ \pm 1,5^\circ$

FONTE: Autor, adaptado da norma ABNT NBR IEC 62116 (2012).

A fonte de alimentação CA a ser utilizada nos ensaios no LabGD responsável pela simulação da rede de distribuição será o MX30-Pi da California Instruments, que possui as seguintes especificações:

TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES DA FONTE MX30-Pi

Especificações	Valores operacionais
Tensão de entrada	208 - 480 V

Especificações	Valores operacionais
Corrente de entrada	60 - 116 A
Frequência	47 - 63 Hz
Fator de potência	0,95
Tensão de saída	0 – 300 V
Corrente de saída	0 – 200 A
Potência de saída	30 kVA

FONTE: Autor, adaptado do *Datasheet* da fonte CA MX30-PI (2021).

FIGURA 10 – FONTE DE ALIMENTAÇÃO CA MX30-PI



FONTE: Autor (2021).

A fonte CA disponibiliza ainda uma saída para trigger, de forma a auxiliar nos ensaios. A função trigger altera o seu valor de tensão quando a fonte é desligada e mesmo apresentando um atraso de 100 ms, serviu para auxiliar na identificação do ponto de corte do fornecimento de energia

3.1.3 Carga RLC

A carga utilizada no circuito de ensaio deverá ser conectada no lado CA do circuito, entre o inversor fotovoltaico e a fonte de alimentação CA e consiste em um circuito ressonante RLC paralelo. Este circuito é utilizado pois pode ser modelado de forma a simular a carga local, além de que cargas do tipo RLC são as que causam a

maior dificuldade de detecção para a maior parte dos métodos de prevenção de ilhamento (BOWER; ROPP, 2002).

De acordo com a norma ABNT NBR IEC 62116, o equipamento responsável por representar a carga RLC deve possuir valores para resistência, indutância e capacitância variáveis, de forma a possibilitar o dimensionamento das mesmas para todas as condições de ensaio e permitir o cálculo de Q_f com certa precisão. O dispositivo utilizado nos ensaios em laboratório é o banco de cargas RLC PV-RLC-385-30K, da marca HSource e suas especificações podem ser conferidas abaixo:

TABELA 4 – ESPECIFICAÇÕES DA CARGA RLC PV-RLC-385-30K

Especificações	Valores operacionais
Potência	30 kVA
Tensão de entrada	400/ 480 V
Carga resistiva (potência)	0 – 33.33 kW
Carga indutiva (potência)	0 – 33.33 kVA
Carga capacitiva (potência)	0 – 33.33 kVA
Resolução (R/L/C)	0.001 kW;kVA

FONTE: Autor, adaptado do *Datasheet* da carga RLC PV-RLC-385-30K (2021).

FIGURA 11 – CARGA RLC PV-RLC-385-30K



FONTE: Autor (2021).

3.1.4 Instrumentos de Medição

Para os instrumentos de medição a norma ABNT NBR IEC 62116 recomenda que sejam utilizados equipamentos com uma taxa de amostragem de pelo menos 10 kHz e com uma precisão de medida igual ou inferior a 1% da tensão nominal de saída e menor ou igual a 1% da corrente de saída do inversor fotovoltaico. Ainda, todas as medições de corrente, potência ativa e potência reativa da chave S1 devem ser feitas na frequência fundamental (60 Hz).

Uma vez que todos os equipamentos utilizados no ensaio possibilitam a verificação dos valores para corrente e tensão de saída em seus respectivos displays, não serão utilizados multímetros para a medição dos mesmos. Para a medição das potências ativa e reativa, será utilizado um analisador de potência, modelo WT5000 da marca Yokogawa, com as especificações mostradas abaixo:

TABELA 5 – ESPECIFICAÇÕES DO ANALISADOR DE POTÊNCIA YOKOGAWA WT5000

Especificações	Valores operacionais
Tensão de entrada	100 – 120 V/ 220 – 240VAC
Máxima tensão (medição)	1.6 kV
Máxima corrente (medição)	90 A
Taxa de amostragem	10 MS/s
Resolução	18 bit
Precisão	0,03%

FONTE: Autor, adaptado do *Datasheet* do analisador de potência Yokogawa WT5000 (2021).

FIGURA 12 – ANALISADOR DE POTÊNCIA WT5000



FONTE: Autor (2021).

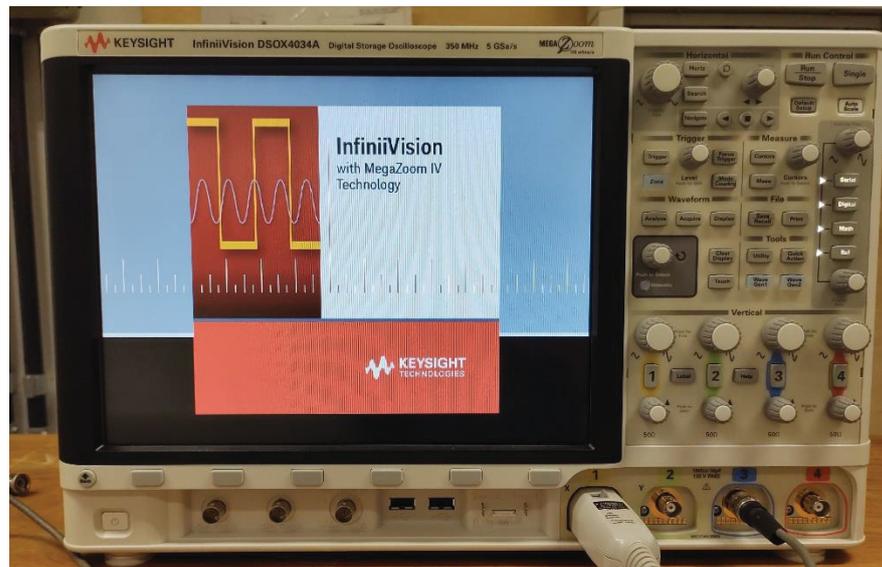
A medição da forma de onda será feita pelo osciloscópio digital Keysight InfiniiVision, que, de acordo com a norma ABNT NBR IEC 62116, deve ser capaz de monitorá-la desde o início do ensaio de ilhamento até a interrupção do fornecimento de energia por parte do inversor fotovoltaico, de forma que seja possível detectar e calcular o tempo de permanência da alimentação após o corte da alimentação CA.

TABELA 6 – ESPECIFICAÇÕES DO OSCILOSCÓPIO KEYSIGHT INFINIIVISION DSOX4034A

Especificações	Valores operacionais
Tensão de entrada	100 – 240 VAC
Largura de banda	0 - 350 MHz
Taxa de atualização	1.000.000/s
Número de canais de entrada	4

FONTE: Autor, adaptado do *Datasheet* do analisador de potência Yokogawa WT5000 (2021).

FIGURA 13 – OSCILOSCÓPIO KEYSIGHT INFINIIVISION DSOX4034A



FONTE: Autor (2021).

3.1.5 Inversor Fotovoltaico

Os ensaios descritos na norma aplicam-se tanto para inversores monofásicos quanto polifásicos, onde para os casos em que houver mais de uma fase deve-se garantir que a carga seja balanceada e a chave S1 da figura 7 esteja conectada a

todas as fases. O inversor fotovoltaico Xantrex GT4.0N-NA-240/208 UL-05 será o ESE nos testes realizados em laboratório e possui as seguintes especificações:

TABELA 7 – ESPECIFICAÇÕES DO INVERSOR XANTREX GT4.0N-NA-240/208 UL-05

Especificações	Valores operacionais
Tensão CC de entrada	240 – 480 Vdc
Máxima tensão de circuito aberto de entrada	600 Vdc
Máxima corrente de entrada	18 Adc
Tensão de saída	240 Vac
Corrente máxima de saída	16,7 A
Potência de saída	4 kW
Eficiência máxima	96%

FONTE: Autor, adaptado do *Datasheet* do inversor Xantrex GT4.0N-NA-240/208 UL-05 (2021).

FIGURA 14 – INVERSOR XANTREX GT4.0N-NA-240/208 UL-05



FONTE: Autor (2021).

3.2 CONDIÇÕES DE ENSAIO E ROTEIRO DE TESTES

3.2.1 Condições de Ensaio

De modo a avaliar o desempenho do equipamento sob ensaio em variadas situações, a norma ABNT NBR IEC 62116 separa os ensaios condições. As condições

são divididas em 3 faixas de operação, variando de acordo com a potência de saída P_{ESE} e a tensão de entrada V_{CC} do inversor e pode ser conferida no Quadro 2 abaixo:

QUADRO 2 – CONDIÇÕES DE ENSAIO

Condição	Potência de Saída do ESE, P_{ESE}	Tensão de Entrada do ESE, V_{CC}	Ajuste do desligamento do ESE
A	Máxima potência (valor nominal)	>90% da faixa de tensão de entrada nominal	Ajustes de desligamento por tensão e frequência especificados pelo fabricante
B	50% – 66% da máxima potência	50% da faixa de tensão de entrada nominal, $\pm 10\%$	Configurar os ajustes de desligamento por tensão e frequência para os valores nominais
C	25% - 33% da máxima potência	< 10% da faixa de tensão de entrada nominal	Configurar os ajustes de desligamento por tensão e frequência para os valores nominais

FONTE: Autor, adaptado da norma ABNT NBR IEC 62116 (2021).

O percentual dado na potência de saída refere-se ao valor nominal do inversor para cada uma das condições de ensaio. Já a faixa de tensão de entrada refere-se a faixa nominal operacional do inversor especificada pelo fabricante. Para descobrir qual o valor de tensão que deve ser utilizado em cada uma das condições de ensaio deve-se realizar o seguinte cálculo: valor da tensão = $X + \left(\frac{\%}{100}\right) (Y - X)$, onde X é o limite inferior de tensão, Y é o limite superior de tensão e % é o valor da porcentagem desejada.

Por exemplo, se a faixa de tensão de operação dada pelo fabricante de determinado inversor varia entre 220 V – 500 V e deseja-se descobrir qual o valor de tensão para a condição A (>90%), deve-se realizar o seguinte cálculo:

$$\text{Valor tensão (90\%)} = 220 + \frac{90}{100} (500 - 220) = 220 + 252 = 472 \text{ V}$$

Sendo assim, sabemos que para a realização dos ensaios na condição A para este inversor a tensão aplicada na entrada deve ser igual ou superior a 472 V.

A norma descreve ainda que para cada uma das três condições citadas anteriormente deve-se realizar um ensaio em condição de equilíbrio, com a carga ajustada para que ela absorva toda energia ativa e reativa gerada pelo inversor e outros ensaios em condição de desequilíbrio, onde as cargas são desbalanceadas de forma proposital. Para a condição de ensaio A, a variação das cargas ativa e reativa ocorre em passos de $\pm 5\%$ do valor da carga em situação de equilíbrio, como mostrado abaixo:

QUADRO 3 – DESEQUILÍBRIO DE CARGA PARA A CONDIÇÃO DE ENSAIO A

Varição em % da carga ativa	Varição em % da carga reativa
0	0
+5	+5
+5	0
+5	-5
0	+5
0	-5
-5	+5
-5	0
-5	-5

FONTE: Autor, adaptado da norma ABNT NBR IEC 62116 (2021).

Para as condições B e C, o valor da carga ativa deve permanecer o mesmo em todos os ensaios, enquanto que a variação da carga reativa deve ocorrer em passos de $\pm 1\%$ do valor da carga em condição equilíbrio como pode ser conferido no Quadro 4:

QUADRO 4 – DESEQUILÍBRIO DE CARGA PARA AS CONDIÇÕES DE ENSAIO B E C

Varição em % da carga ativa	Varição em % da carga reativa
0	-5
0	-4
0	-3
0	-2
0	-1
0	0
0	+1
0	+2
0	+3
0	+4
0	+5

FONTE: Autor, adaptado da norma ABNT NBR IEC 62116 (2021).

3.2.2 Roteiro de Testes

O roteiro de testes desenvolvido foi baseado nos procedimentos de ensaio descritos na seção 6.1 da norma ABNT NBR IEC 62116, com o acréscimo de informações consideradas relevantes para a realização dos ensaios no LabGD da UFPR e pode ser conferido a seguir.

1. Programar a curva FV no Simulador de geração FV no software SASControl, de acordo com a potência desejada.
2. Ligar a fonte CA na saída do ESE, ajustando o valor da tensão da fonte de acordo com o valor de tensão de saída do inversor.
3. Aplicar tensão CC de acordo com a condição desejada na entrada do ESE e aguardar ele entrar em operação.
4. Ajustar as ponteiros do osciloscópio para medir a corrente (I_{ESE}) e tensão (V_{ESE}) de saída do ESE.
5. Ajustar o analisador de potência para medir as potências P_{ESE} , Q_{ESE} e S_{ESE} na saída do inversor.
6. Ajustar a fonte CC para determinar a P_{ESE} para a curva FV, de acordo com a condição desejada.
7. Com o inversor em funcionamento, anotar os valores de P_{ESE} e Q_{ESE} medidos no analisador de potência.

É importante salientar que todos os passos realizados até o momento devem ser realizados sem a carga RLC.

8. Desligar todo o sistema.
9. Ligar a carga RLC e ajustar a potência reativa Q_L manualmente de modo que $Q_L = |P_{ESE}|$ (medida no passo 7).
10. Calcular e então ajustar a potência reativa Q_C manualmente na carga RLC, de modo que $Q_C = Q_L - Q_{ESE}$ (medida no passo 7).
11. Conectar a resistência R de forma que toda a potência ativa demandada pelo circuito RLC seja igual a P_{ESE} .

12. Verificar novamente se as ponteiras do osciloscópio estão conectadas nos locais corretos, para que sejam medidas a corrente de saída do ESE e a tensão no ponto de conexão com a fonte CA.
13. Ligar todos os equipamentos.
14. Para os ensaios em condição de equilíbrio (sem variação de carga), ajustar os valores de P_R , Q_L e Q_C para que I_{CA} esteja com um valor igual ou inferior a $\pm 1\%$ do valor da corrente nominal do ESE. Um detalhe importante nesta etapa é ativar o filtro de harmônicas no display da fonte CA ou por meio do software MX Gui CA Source, de forma a medir o valor da corrente I_{CA} de uma maneira mais precisa. Sem o processo de filtragem não foi possível alcançar um valor dentro da faixa exigida.
15. Desligar a fonte CA (equivalente a abrir a chave S1 no circuito apresentado na figura 7) e medir o tempo necessário para a corrente do ESE cair abaixo de 1% do seu valor nominal.
16. Para a condição de ensaio A, ajustar a carga ativa e somente um dos componentes da carga reativa (Q_C ou Q_L) em 5% para cada uma das condições de desequilíbrio mostrado no Quadro 3.
17. Para as condições de ensaio B e C, variar somente um dos componentes de carga reativa (Q_C ou Q_L) em 1% por ensaio.

Após a realização do ensaio em condição de equilíbrio, basta realizar o cálculo e o ajuste das cargas de acordo com a variação desejada para os ensaios seguintes e então repetir o processo a partir do passo 12. A aplicação do roteiro de testes proposto no LabGD e os resultados obtidos nos ensaios podem ser conferidos na seção a seguir.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão demonstrados os resultados obtidos nos ensaios práticos realizados no LabGD, separados de acordo com as condições definidas. Por se tratar de 31 ensaios no total, eles foram enumerados de forma a facilitar a identificação dos mesmos no Quadro 5, que apresenta um compilado geral de todos os ensaios realizados.

4.1 CONDIÇÃO A

Como informado no Quadro 3, os ensaios da condição A devem ser feitos após a obtenção da máxima potência de saída P_{ESE} e com um valor de pelo menos 90% da faixa de tensão do inversor. Sendo assim, para o inversor Xantrex GT4.0N-NA-240/208 UL-05 os valores a serem considerados para a condição A devem ser de:

$$P_{ESE\ máx} = 4\ kW, \quad \begin{cases} V_{CC\ 90\%} = 456\ V \\ V_{CC\ 100\%} = 480\ V \end{cases}$$

Os ensaios da condição A podem ser conferidos nos itens 1 a 9 e diferem-se entre si na variação das cargas em passos de 5 %, sendo representados por [% da variação da carga ativa, % da variação da carga reativa indutiva] no título de cada ensaio, com a carga reativa capacitiva Q_C permanecendo constante. Os experimentos foram feitos utilizando a curva fotovoltaica de 4 kW de potência máxima com um fator de forma de 0,8 no software SASControl, fornecido pelo simulador de gerador FV.

1) Condição de Equilíbrio [0,0]

Aplicando um valor de tensão $V_{CC} = 463,4\ V$, inicialmente obteve-se os seguintes valores de máxima potência na saída do inversor:

$$\begin{aligned} P_{ESE} &= 3,765\ kW \\ Q_{ESE} &= 0,569\ kVAr \end{aligned}$$

Sabendo os valores de potência na saída do inversor e realizando os cálculos feitos nos passos 9 e 10, temos:

$$\begin{aligned}Q_L &= |P_{ESE}| = 3,765 \text{ kVAr} \\Q_C &= Q_L - Q_{ESE} = 3,765 \text{ k} - 0,569 = 3,196 \text{ kVAr} \\P_R &= P_{ESE} = 3,765 \text{ kW}\end{aligned}$$

Porém, notou-se que para estes valores a corrente I_{CA} vindo da fonte CA era de aproximadamente 0,8 A mesmo após a aplicação do filtro de harmônicas. Uma vez que a norma exige que para as condições de equilíbrio o valor da corrente I_{CA} deve ser inferior a 1% do valor nominal da corrente de saída do inversor, ou seja, inferior a 0,16 A para o inversor utilizado, foi feito o ajuste apresentado no passo 14 para que adequasse ao valor exigido pela norma. Para isso, foi ajustado os valores da carga e obtivemos um valor de 0,083 A com os seguintes valores:

$$P_R = 3.550 \text{ W}, Q_L = 3.300 \text{ VAr} \text{ e } Q_C = 3.169 \text{ VAr}$$

Onde,

P_R : Potência ativa resistiva da carga RLC;

Q_L : Potência reativa indutiva da carga RLC;

Q_C : Potência reativa capacitiva da carga RLC.

E o fator de qualidade calculado a partir dos resultados:

$$Q_{f1} = \frac{1}{P} \sqrt{|Q_L| \times |Q_C|} = \frac{1}{3550} \sqrt{|3300| \times |3169|} = 0,91$$

Sendo assim, os valores acima foram considerados para a condição de equilíbrio do inversor e os demais ensaios para a condição A foram feitos utilizando estes valores como base. Após o desligamento da fonte CA, obteve-se o seguinte resultado no osciloscópio:

FIGURA 15 – RESULTADO ENSAIO 1



FONTES: Autor (2021).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo) e corrente de saída do inversor (verde).

E o tempo de alimentação do inversor após o corte no fornecimento de energia da fonte CA foi de:

$$t_r \cong 140 \text{ ms}$$

2) Condição de desequilíbrio [+5%, +5%]

Para este ensaio, as cargas foram ajustadas para ter uma variação de +5% no valor das potências ativa e reativa. Logo, primeiramente foi realizado o seguinte cálculo:

$$P_{R\ 5\%} = 3.550 \text{ W} \times 0,05\% = 177,5 \text{ W}$$

$$Q_{L\ 5\%} = 3.300 \text{ W} \times 0,05 = 165 \text{ VAr}$$

Considerando que a variação deve ser de +5% para $P_{R\ 2}$ e $Q_{L\ 2}$ neste ensaio, temos:

$$P_{R\ 2} = 3.550 + P_{R\ 5\%} = 3.724,5 \text{ W}$$

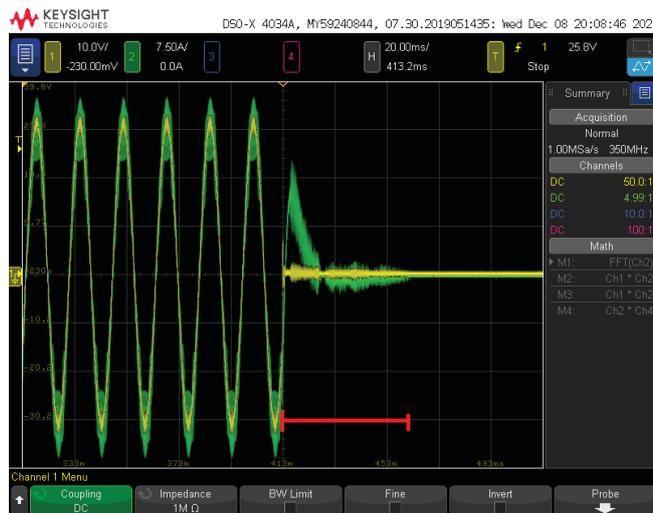
$$Q_{L\ 2} = 3.300 + Q_{L\ 5\%} = 3.465 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 3.169 \text{ VAr}$$

$$Q_{f2} = \frac{1}{3724,5} \sqrt{|3465|x|3169|} = 0,89$$

Aplicando estes valores na carga RLC, obteve-se o seguinte resultado após o desligamento da fonte CA:

FIGURA 16 – RESULTADO ENSAIO 2



FONTE: Autor (2021).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo) e corrente de saída do inversor (verde).

$$t_r \cong 46,67 \text{ ms}$$

3) Condição de desequilíbrio [+5%, 0%]

$$P_{R3} = 3.550 + P_{R5\%} = 3.724,5 \text{ W}$$

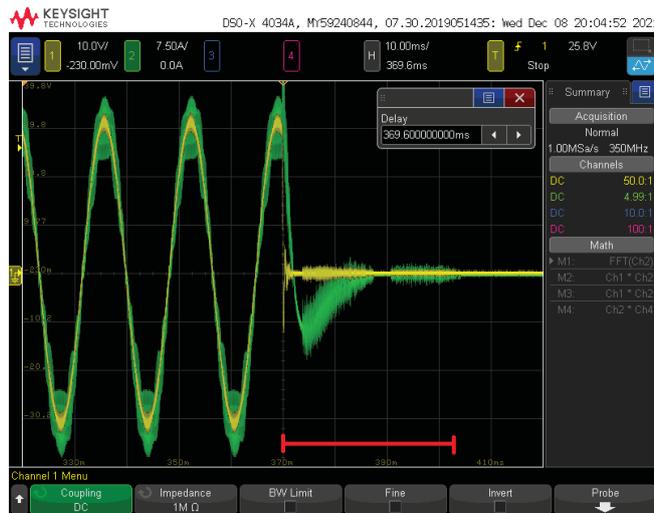
$$Q_{L3} = 3.300 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 3.169 \text{ VAr}$$

$$Q_{f3} = \frac{1}{3724,5} \sqrt{|3300|x|3169|} = 0,86$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 17 – RESULTADO ENSAIO 3



FONTE: Autor (2021).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo) e corrente de saída do inversor (verde).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 32,67 \text{ ms}$$

4) Condição de desequilíbrio [+5%, -5%]

$$P_{R4} = 3.550 + P_{R5\%} = 3.724,5 \text{ W}$$

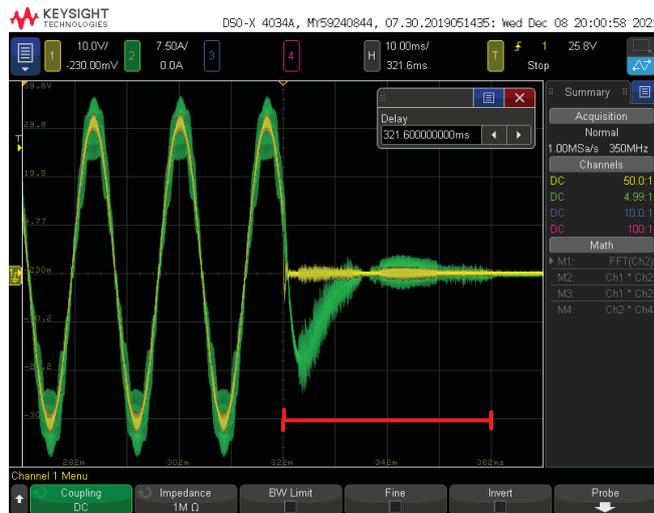
$$Q_{L4} = 3.300 \text{ VAR} - Q_{L5\%} = 3.135 \text{ VAR}$$

$$Q_C = 3.169 \text{ VAR}$$

$$Q_{f4} = \frac{1}{3724,5} \sqrt{|3135 \times 3169|} = 0,84$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 18 – RESULTADO ENSAIO 4



FONTE: Autor (2021).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo) e corrente de saída do inversor (verde).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 40 \text{ ms}$$

5) Condição de desequilíbrio [0%, +5%]

$$P_{R5} = 3.550 \text{ W}$$

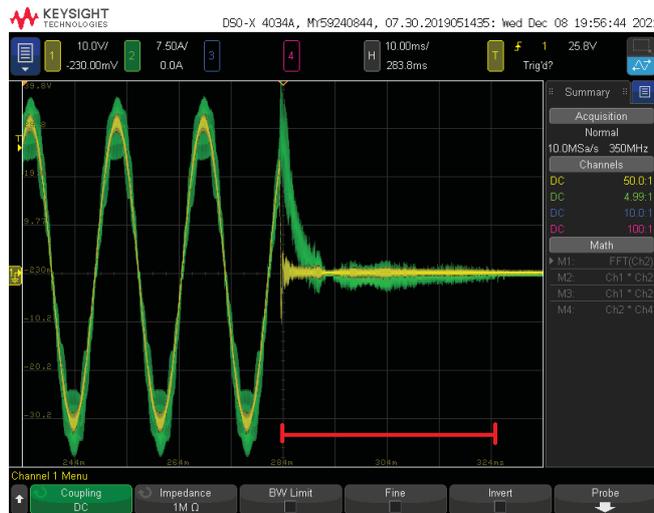
$$Q_{L5} = 3.300 + Q_{L5\%} = 3.465 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 3.169 \text{ VAr}$$

$$Q_{f5} = \frac{1}{3550} \sqrt{|3465| \times |3169|} = 0,93$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 19 – RESULTADO ENSAIO 5



FONTE: Autor (2021).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo) e corrente de saída do inversor (verde).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 41 \text{ ms}$$

6) Condição de desequilíbrio [0%, -5%]

$$P_{R6} = 3.550 \text{ W}$$

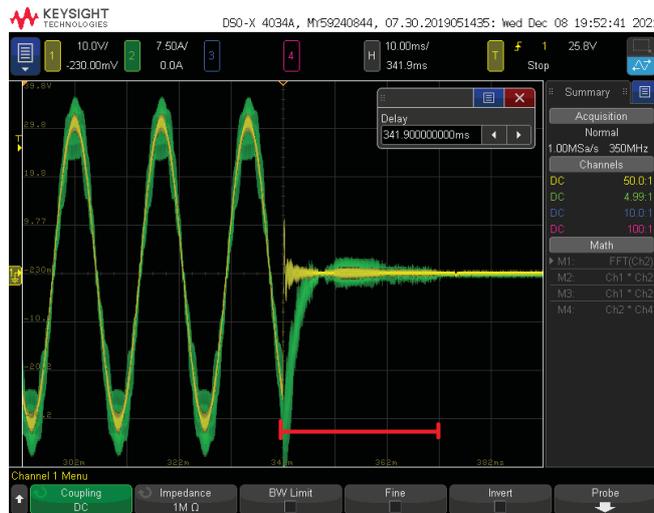
$$Q_{L6} = 3.300 - Q_{L5\%} = 3.135 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 3.169 \text{ VAr}$$

$$Q_{f6} = \frac{1}{3550} \sqrt{|3135| \times |3169|} = 0,88$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 20 – RESULTADO ENSAIO 6



FONTE: Autor (2021).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo) e corrente de saída do inversor (verde).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 70,4 \text{ ms}$$

7) Condição de desequilíbrio [-5%, +5%]

$$P_{R7} = 3.550 - P_{R5\%} = 3.372,5 \text{ W}$$

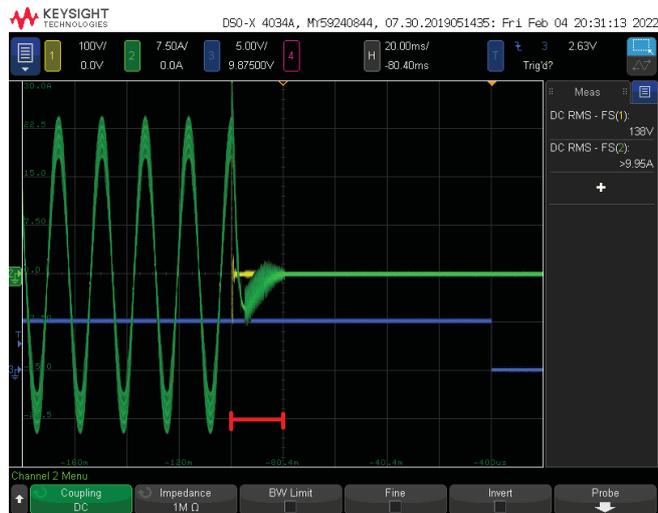
$$Q_{L7} = 3.300 + Q_{L5\%} = 3.465 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 3.169 \text{ VAr}$$

$$Q_{f7} = \frac{1}{3372,5} \sqrt{|3465| \times |3169|} = 0,98$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 21 – RESULTADO ENSAIO 7



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 20,4 \text{ ms}$$

8) Condição de desequilíbrio [-5%, 0%]

$$P_{R8} = 3.550 - P_{R5\%} = 3.372,5 \text{ W}$$

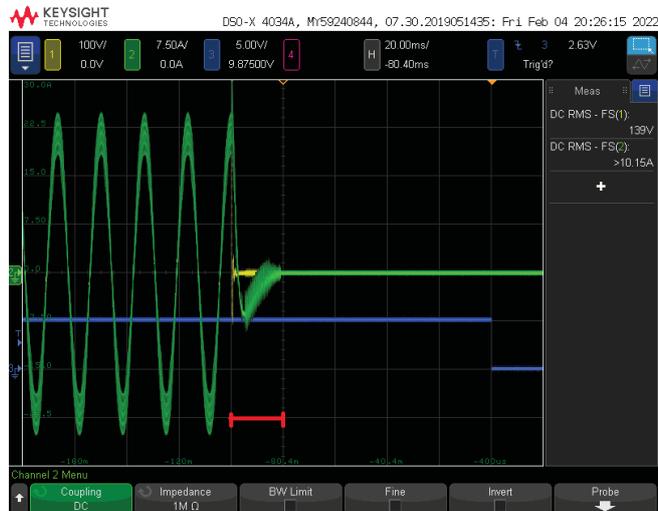
$$Q_{L8} = 3.300 \text{ VAR}$$

$$Q_C = 3.169 \text{ VAR}$$

$$Q_{f8} = \frac{1}{3372,5} \sqrt{|3300|x|3169|} = 0,95$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 22 – RESULTADO ENSAIO 8



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo) e corrente de saída do inversor (verde).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 19 \text{ ms}$$

9) Condição de desequilíbrio [-5%, -5%]

$$P_{R9} = 3.550 - P_{R5\%} = 3.372,5 \text{ W}$$

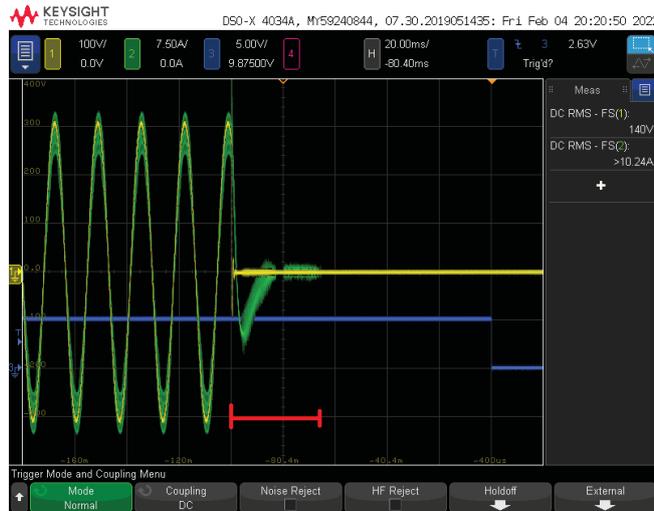
$$Q_{L9} = 3.300 - Q_{L5\%} = 3.135 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 3.169 \text{ VAr}$$

$$Q_{f9} = \frac{1}{3372,5} \sqrt{|3135| \times |3169|} = 0,93$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 23 – RESULTADO ENSAIO 9



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 38 \text{ ms}$$

4.2 CONDIÇÃO B

Na condição B definida pela norma ABNT NBR IEC 62116 o inversor deve operar numa faixa intermediária de potência de saída e tensão de entrada, que para o inversor Xantrex GT4.0N-NA-240/208 UL-05 é de:

$$\begin{cases} V_{CC \ 40\%} = 336 \text{ V} \\ V_{CC \ 60\%} = 380 \text{ V} \end{cases}, \quad \begin{cases} P_{ESE \ 50\%} = 2 \text{ kW} \\ P_{ESE \ 66\%} = 2,640 \text{ kW} \end{cases}$$

Os ensaios da condição B estão presentes nos itens 10 a 20 e diferem-se entre si na variação da carga reativa indutiva Q_L em passos de 1%, com as cargas reativa capacitiva Q_C e ativa resistiva P_R constantes. Os experimentos foram feitos utilizando a curva fotovoltaica de 3,2 kW de potência máxima e fator de forma de 0,8 no software SASControl, fornecido pelo simulador de gerador FV.

10) Condição de Equilíbrio [0%, 0%]

Aplicando um valor de tensão $V_{CC} = 366$ V, obteve-se os seguintes valores de potência na saída do inversor:

$$P_{ESE} = 2,2 \text{ kW}$$

$$Q_{ESE} = 0,366 \text{ kVAr}$$

Realizando os cálculos feitos para os passos 9 e 10, temos:

$$Q_L = |P_{ESE}| = 2,2 \text{ kVAr}$$

$$Q_C = Q_L - Q_{ESE} = 2,2 \text{ k} - 0,366 = 1,854 \text{ kVAr}$$

$$P_R = P_{ESE} = 2,2 \text{ kW}$$

Porém com estes valores de potência de saída, a corrente I_{CA} vindo da fonte CA era de aproximadamente 0,734 A, superior ao 1% da corrente nominal (0,16 A) permitido pela norma. De forma a fazer o ajuste recomendado no passo 14, variou-se os valores de P_R e Q_L na tentativa de fazer com que o valor de I_{CA} ficasse dentro do permitido pela norma, porém sem sucesso. Sendo assim, seguiu-se com os ensaios para a condição de equilíbrio com o menor valor de I_{CA} encontrado que foi de 0,637 A. A potência definida nas cargas após o ajuste que serviu como base para todos os ensaios da condição B foi igual a:

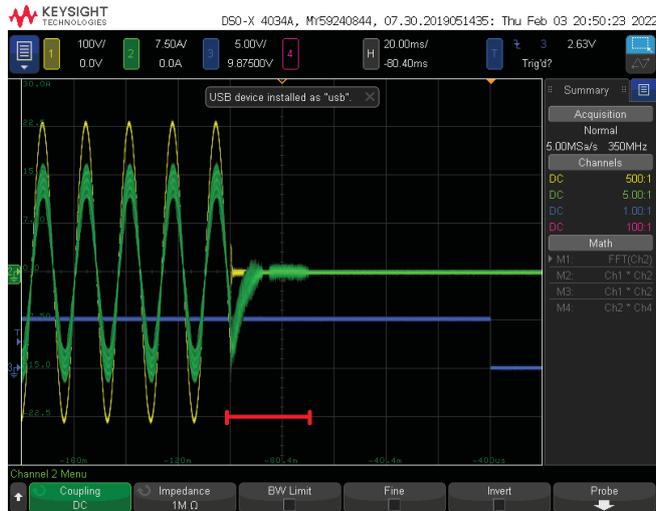
$$P_R = 2.300 \text{ W}, Q_L = 2.100 \text{ VAr} \text{ e } Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

E o fator de qualidade calculado a partir dos resultados:

$$Q_{f10} = \frac{1}{P_R} \sqrt{|Q_L| |Q_C|} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2100| |1900|} = 0,86$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 24 – RESULTADO ENSAIO 10



FORNE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 23 \text{ ms}$$

11) Condição de desequilíbrio [0%, -1%]

Para este ensaio, a carga reativa indutiva Q_L foi ajustada para ter uma variação de 1%. Logo, foi realizado o cálculo:

$$Q_{L\ 1\%} = 2.100 \times 0,01 = 21 \text{ VAr}$$

Considerando que a variação deve ser de -1% para $Q_{L\ 11}$ neste ensaio, temos:

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

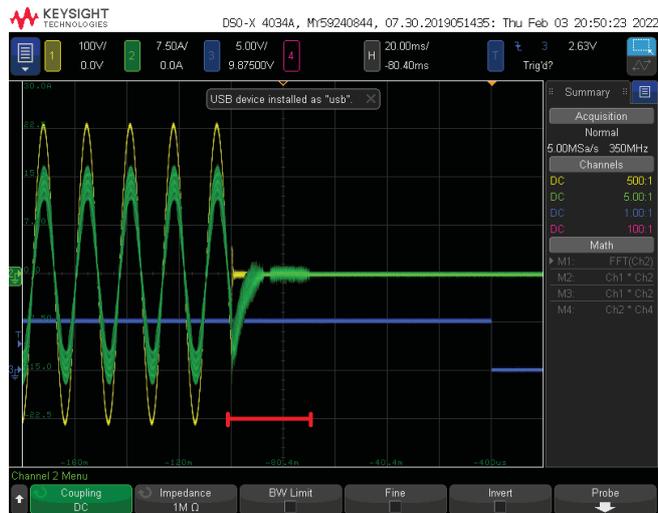
$$Q_{L\ 11} = 2.100 - Q_{L\ 1\%} = 2.079 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 11} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2079| \times |1900|} = 0,86$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 25 – RESULTADO ENSAIO 11



FONTES: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 26,4 \text{ ms}$$

12) Condição de desequilíbrio [0%, -2%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

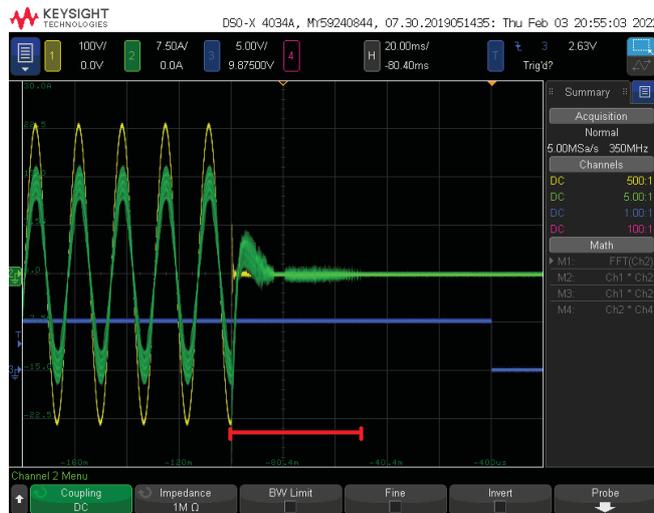
$$Q_{L12} = 2.100 - 2x(Q_{L1\%}) = 2.058 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f12} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2058|x|1900|} = 0,859$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 26 – RESULTADO ENSAIO 12



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 46 \text{ ms}$$

13) Condição de desequilíbrio [0%, -3%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

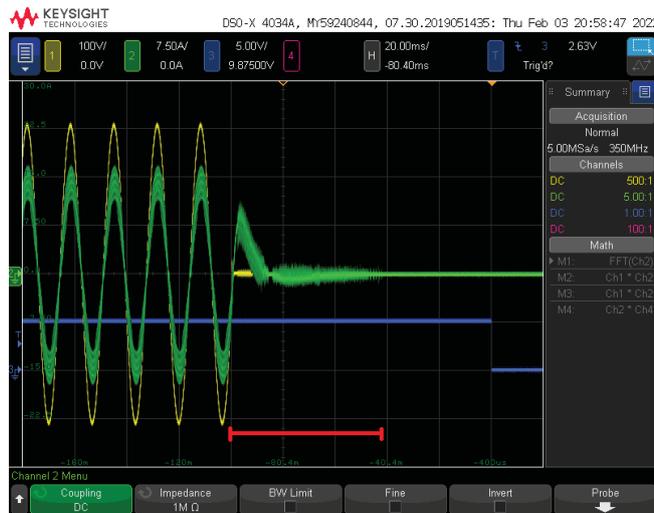
$$Q_{L13} = 2.100 - 3x(Q_{L1\%}) = 2.037 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f13} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2037|x|1900|} = 0,855$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 27 – RESULTADO ENSAIO 13



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 59 \text{ ms}$$

14) Condição de desequilíbrio [0%, -4%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

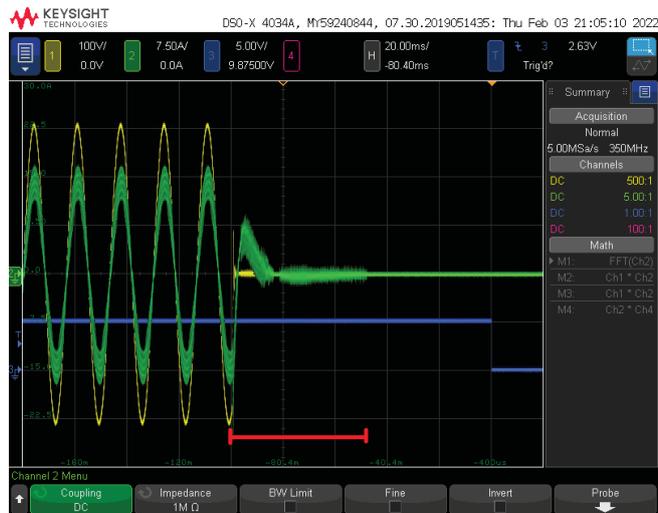
$$Q_{L14} = 2.100 - 4x(Q_{L1\%}) = 2.016 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f14} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2016|x|1900|} = 0,85$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 28 – RESULTADO ENSAIO 14



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 56 \text{ ms}$$

15) Condição de desequilíbrio [0%, -5%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

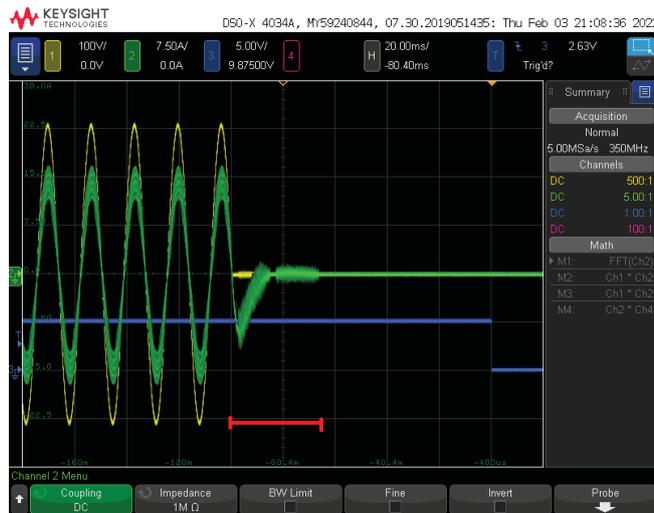
$$Q_{L15} = 2.100 - 5x(Q_{L1\%}) = 1.995 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f15} = \frac{1}{2300} \sqrt{|1995|x|1900|} = 0,846$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 29 – RESULTADO ENSAIO 15



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 37 \text{ ms}$$

16) Condição de desequilíbrio [0%, +1%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

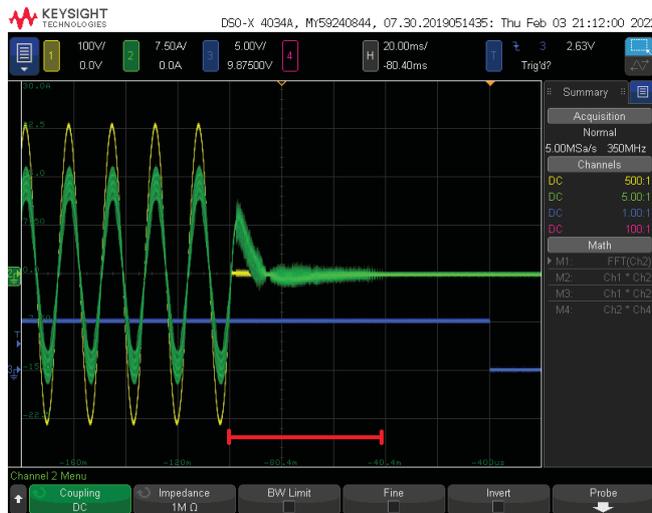
$$Q_{L16} = 2.100 + Q_{L1\%} = 2.121 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f16} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2121|x|1900|} = 0,872$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 30 – RESULTADO ENSAIO 16



FONTES: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 59 \text{ ms}$$

17) Condição de desequilíbrio [0%, +2%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

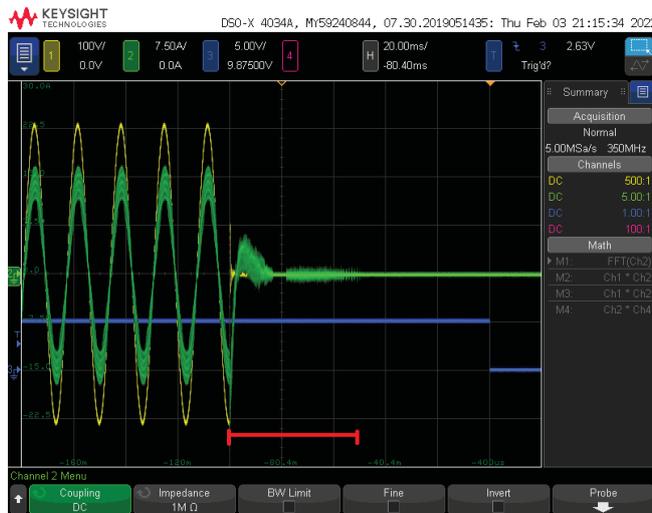
$$Q_{L17} = 2.100 + 2(Q_{L1\%}) = 2.142 \text{ VAR}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAR}$$

$$Q_{f17} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2142|x|1900|} = 0,877$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 31 – RESULTADO ENSAIO 17



FONTES: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 44 \text{ ms}$$

18) Condição de desequilíbrio [0%, +3%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

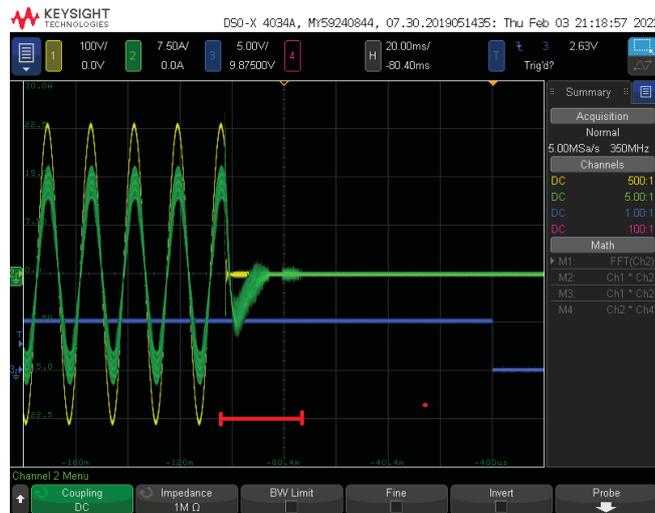
$$Q_{L18} = 2.100 + 3(Q_{L1\%}) = 2.163 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f18} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2163|x|1900|} = 0,881$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 32 – RESULTADO ENSAIO 18



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 32 \text{ ms}$$

19) Condição de desequilíbrio [0%, +4%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

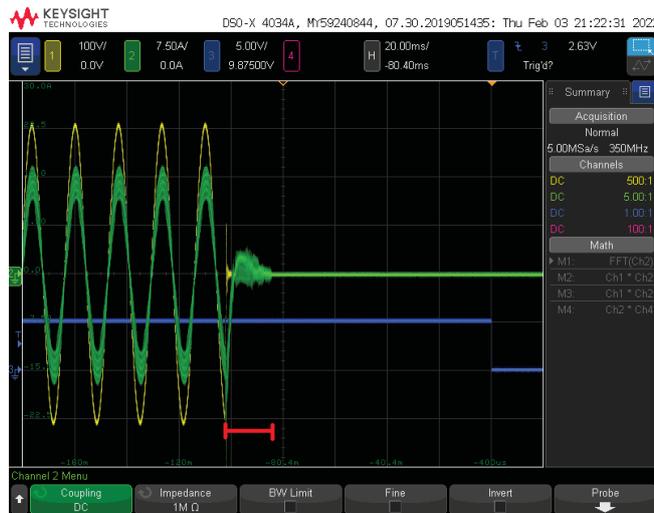
$$Q_{L19} = 2.100 + 4(Q_{L1\%}) = 2.184 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f19} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2184|x|1900|} = 0,885$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 33 – RESULTADO ENSAIO 19



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 19 \text{ ms}$$

20) Condição de desequilíbrio [0%, +5%]

$$P_R = 2.300 \text{ W}$$

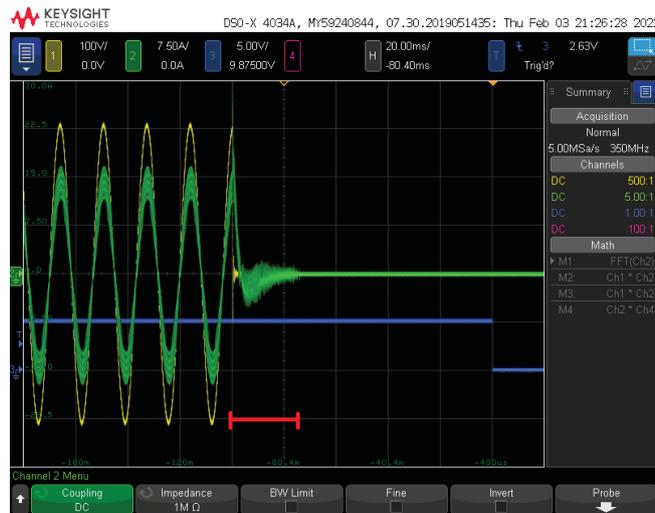
$$Q_{L\ 20} = 2.100 + 5(Q_{L\ 1\%}) = 2.205 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.900 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 20} = \frac{1}{2300} \sqrt{|2205|x|1900|} = 0,889$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 34 – RESULTADO ENSAIO 20



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 26 \text{ ms}$$

4.1.1 CONDIÇÃO C

O inversor deve operar numa faixa mínima de potência de saída e tensão de entrada na condição C, onde para o inversor Xantrex GT4.0N-NA-240/208 UL-05 é igual a:

$$\begin{cases} V_{CC \ 0\%} = 240 \text{ V} \\ V_{CC \ 10\%} = 264 \text{ V} \end{cases}, \begin{cases} P_{ESE \ 25\%} = 1 \text{ kW} \\ P_{ESE \ 33\%} = 1,320 \text{ kW} \end{cases}$$

Os ensaios da condição C são apresentados nos itens 21 a 31 e assim como na condição B, diferem-se entre si na variação da carga reativa indutiva Q_L em passos de 1%, com as cargas reativa capacitiva Q_C e ativa resistiva P_R constantes. Os ensaios foram realizados utilizando-se da curva fotovoltaica de 3,2 kW de potência máxima no simulador de gerador FV.

21) Condição de Equilíbrio [0%, 0%]

Aplicando um valor de tensão $V_{CC} = 252$ V, obteve-se os seguintes valores de potência na saída do inversor:

$$P_{ESE} = 1,32 \text{ kW}$$

$$Q_{ESE} = 0,316 \text{ kVAr}$$

Realizando os cálculos feitos nos passos 9 e 10, temos:

$$Q_L = |P_{ESE}| = 1,32 \text{ kVAr}$$

$$Q_C = Q_L - Q_{ESE} = 1,32 \text{ k} - 0,316 = 1,004 \text{ kVAr}$$

$$P_R = P_{ESE} = 1,32 \text{ kW}$$

Com os valores de potência de saída mostrados acima, a corrente I_{CA} vindo da fonte CA foi de aproximadamente 0,655 A, superior aos 0,16 A definidos pela norma para este inversor. Foi feito ajuste recomendado no passo 14, variando novamente o valor de Q_L na tentativa de fazer com que o valor de I_{CA} ficasse dentro do permitido pela norma, porém também não se obteve sucesso. Sendo assim, os ensaios para a condição de equilíbrio com o menor valor de I_{CA} encontrado foi de 0,303 A. A potência definida nas cargas após o ajuste que serviu como base para todos os ensaios da condição C é igual a:

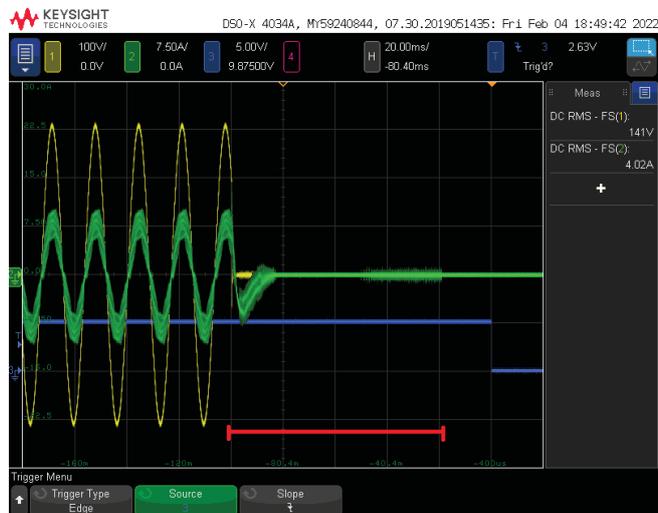
$$P_R = 1.320 \text{ W}, Q_L = 1.150 \text{ VAr} \text{ e } Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

E o fator de qualidade calculado a partir dos resultados:

$$Q_{f21} = \frac{1}{P_R} \sqrt{|Q_L| \times |Q_C|} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1150| \times |1004|} = 0,814$$

Resultado obtido no ensaio:

FIGURA 35 – RESULTADO ENSAIO 21



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 81 \text{ ms}$$

22) Condição de desequilíbrio [0%, -5%]

Assim como para a condição B, a carga reativa indutiva Q_L foi ajustada para ter uma variação de 1%. Então:

$$Q_{L\ 1\%} = 1.150 \times 0,01 = 11,5 \text{ VAr}$$

Considerando que a variação deve ser de -5% para $Q_{L\ 22}$ neste ensaio, temos:

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

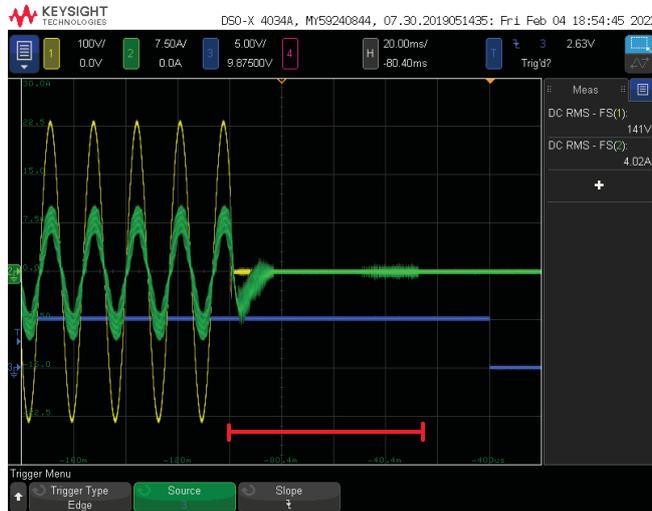
$$Q_{L\ 22} = 1.150 - 5x(Q_{L\ 1\%}) = 1.092,5 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 22} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1092,5|x|1004|} = 0,79$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 36 – RESULTADO ENSAIO 22



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 75 \text{ ms}$$

23) Condição de desequilíbrio [0%, -4%]

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

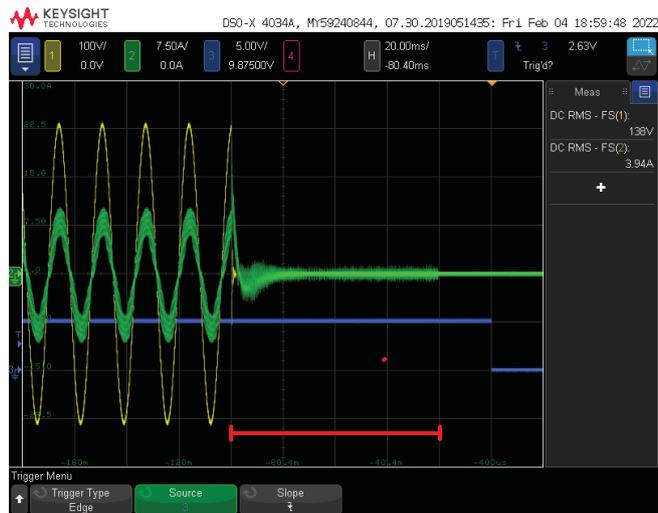
$$Q_{L\ 23} = 1.150 - 4x(Q_{L\ 1\%}) = 1.104 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 23} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1104|x|1004|} = 0,797$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 37 – RESULTADO ENSAIO 23



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 81 \text{ ms}$$

24) Condição de desequilíbrio [0%, -3%]

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

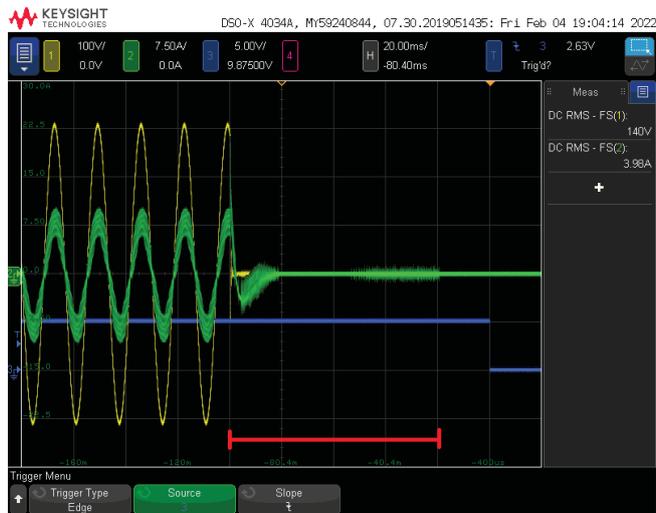
$$Q_{L24} = 1.150 - 3x(Q_{L1\%}) = 1.115,5 \text{ VAR}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAR}$$

$$Q_{f24} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1115,5|x|1004|} = 0,801$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 38 – RESULTADO ENSAIO 24



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 80 \text{ ms}$$

25) Condição de desequilíbrio [0%, -2%]

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

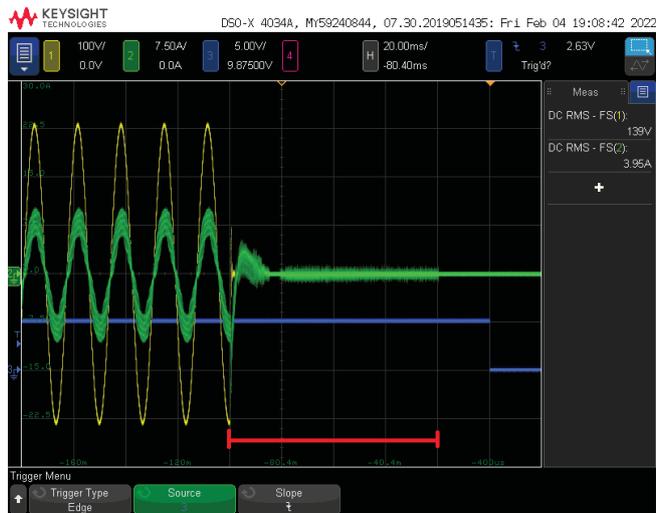
$$Q_{L\ 25} = 1.150 - 2x(Q_{L\ 1\%}) = 1.127 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 25} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1127|x|1004|} = 0,805$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 39 – RESULTADO ENSAIO 25



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 80 \text{ ms}$$

26) Condição de desequilíbrio [0%, -1%]

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

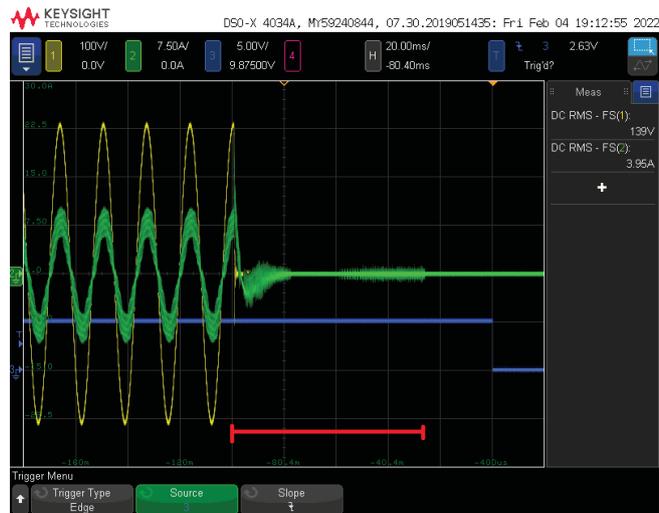
$$Q_{L\ 26} = 1.150 - Q_{L\ 1\%} = 1.138,5 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 26} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1138,5|x|1004|} = 0,809$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 40 – RESULTADO ENSAIO 26



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 76 \text{ ms}$$

27) Condição de desequilíbrio [0%, +1%]

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

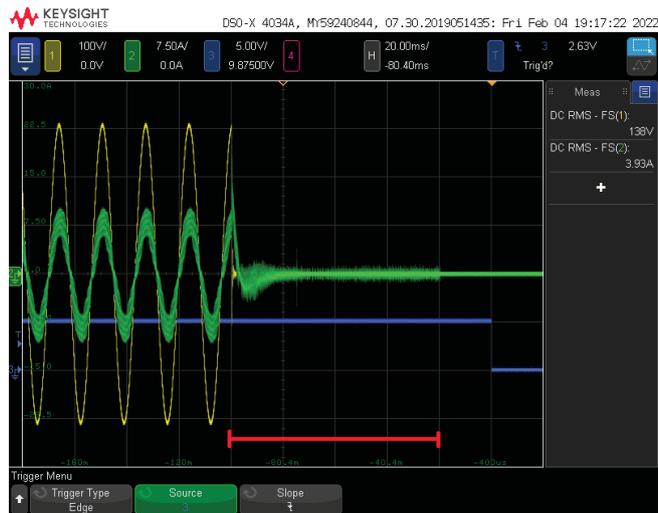
$$Q_{L27} = 1.150 + Q_{L1\%} = 1.161,5 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f27} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1161,5|x|1004|} = 0,818$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 41 – RESULTADO ENSAIO 27



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 80 \text{ ms}$$

28) Condição de desequilíbrio, [0%, +2%]

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

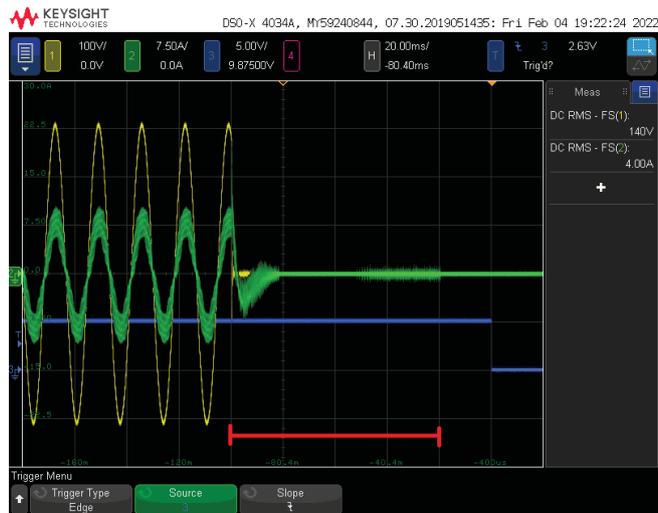
$$Q_{L\ 28} = 1.150 + 2x(Q_{L\ 1\%}) = 1.173 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 28} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1173|x|1004|} = 0,822$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 42 – RESULTADO ENSAIO 28



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 81 \text{ ms}$$

29) Condição de desequilíbrio [0%, +3%]

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

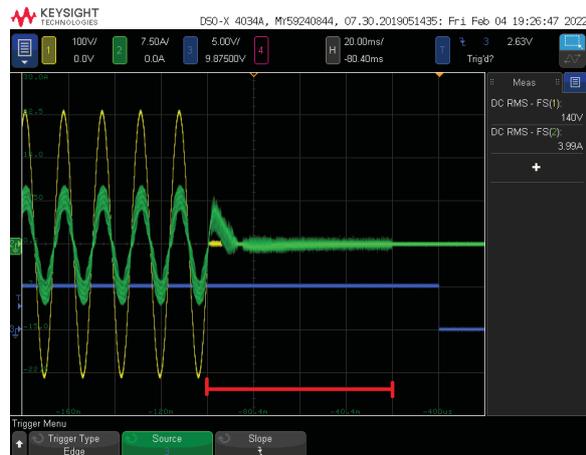
$$Q_{L\ 29} = 1.150 + 3x(Q_{L\ 1\%}) = 1.184,5 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 29} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1184,5|x|1004|} = 0,826$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 43 – RESULTADO ENSAIO 29



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 82 \text{ ms}$$

30) Condição de desequilíbrio [0%, +4%]

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

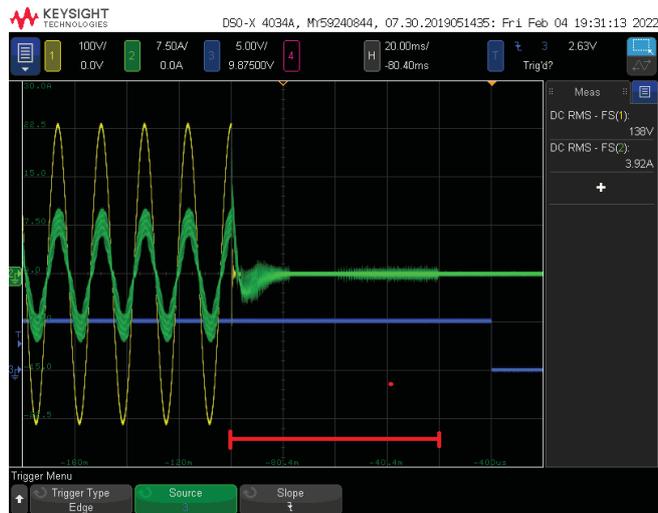
$$Q_{L\ 30} = 1.150 + 4x(Q_{L\ 1\%}) = 1.196 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 30} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1196|x|1004|} = 0,83$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 44 – RESULTADO ENSAIO 30



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 81 \text{ ms}$$

31) Condição de desequilíbrio [0%, +5%] (31 – scope 23)

$$P_R = 1.320 \text{ W}$$

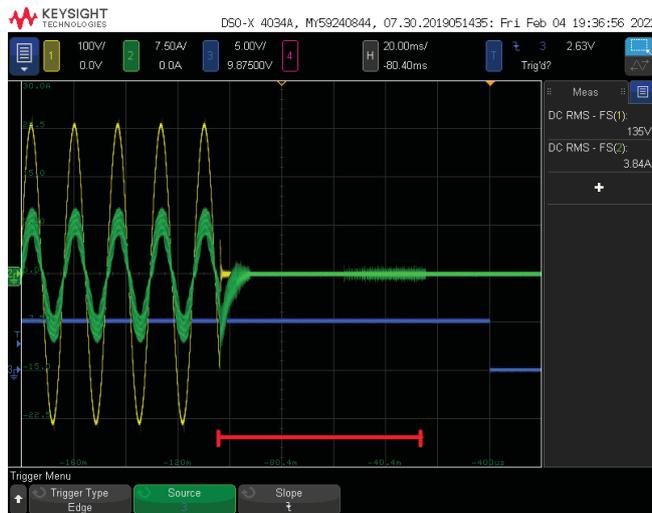
$$Q_{L\ 30} = 1.150 + 5x(Q_{L\ 1\%}) = 1.207,5 \text{ VAr}$$

$$Q_C = 1.004 \text{ VAr}$$

$$Q_{f\ 30} = \frac{1}{1320} \sqrt{|1207,5|x|1004|} = 0,834$$

Resultado do ensaio:

FIGURA 45 – RESULTADO ENSAIO 31



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Tempo de permanência de alimentação:

$$t_r \cong 78 \text{ ms}$$

4.4 QUADRO FINAL

O Quadro 5 consiste na junção de todas as informações obtidas dos ensaios realizados, com o acréscimo das medições de potência de saída (P_{ESE}) e tensão de entrada (V_{CC}) do inversor registradas em cada um dos experimentos. O quadro mostrado abaixo foi desenvolvido com base no exemplo de documentação indicada pela norma ABNT NBR IEC 62116, presente no capítulo 7 da mesma.

QUADRO 5 – RESULTADOS DE TODOS OS ENSAIOS

Nº	P_{ESE} (% da nominal do ESE)	Carga reativa (% de Q_L)	P_R (% da nominal)	Q_L (% da nominal)	Tempo de permanência (ms)	P_{ESE} (W)	Q_f efetiva	V_{CC} (V)
1	100	100	0	0	140	3.550	0,91	463,4
2	100	100	+5	+5	46,4	3768	0,89	463,2
3	100	100	+5	0	32,67	3755	0,86	457,6
4	100	100	+5	-5	40	3734	0,84	464,4
5	100	100	0	+5	41	3759	0,93	456,8
6	100	100	0	-5	70,4	3761	0,88	455,8
7	100	100	-5	+5	20,4	3758	0,98	455

Nº	P_{ESE} (% da nominal do ESE)	Carga reativa (% de Q_L)	P_R (% da nominal)	Q_L (% da nominal)	Tempo de permanência (ms)	P_{ESE} (W)	Q_f efetiva	V_{CC} (V)
8	100	100	-5	0	19	3757	0,95	455,2
9	100	100	-5	-5	38	3560	0,93	477,3
10	66	66	0	0	23	2280	0,86	366
11	66	66	0	-1	26,4	2278	0,86	362,6
12	66	66	0	-2	46	2279	0,859	360,4
13	66	66	0	-3	59	2271	0,855	360,2
14	66	66	0	-4	56	2272	0,85	359,6
15	66	66	0	-5	37	2280	0,846	363,2
16	66	66	0	+1	59	2279	0,872	357,4
17	66	66	0	+2	44	2285	0,877	362,4
18	66	66	0	+3	32	2284	0,881	361,2
19	66	66	0	+4	19	2276	0,885	361,6
20	66	66	0	+5	26	2270	0,889	363,2
21	33	33	0	0	81	1324	0,814	252
22	33	33	0	-5	75	1307	0,79	250,2
23	33	33	0	-4	81	1310	0,797	252,4
24	33	33	0	-3	80	1270	0,801	257,4
25	33	33	0	-2	80	1303	0,805	253,2
26	33	33	0	-1	76	1325	0,809	253,8
27	33	33	0	+1	80	1314	0,818	252
28	33	33	0	+2	81	1319	0,822	251,8
29	33	33	0	+3	82	1325	0,826	251,4
30	33	33	0	+4	81	1302	0,83	250,6
31	33	33	0	+5	78	1305	0,834	250,2

FONTE: Autor, adaptado da norma ABNT NBR IEC 62116 (2022).

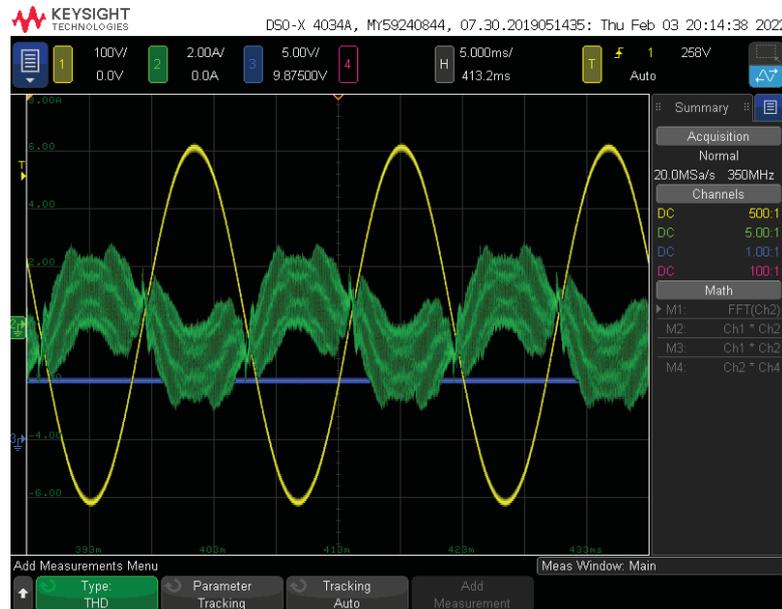
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho permitiu identificar a relevância do fenômeno de ilhamento em sistemas de geração distribuída, a partir das consequências da sua ocorrência para o sistema elétrico e, com a crescente inserção de fontes deste tipo, fazem com que o tema ganhe ainda mais importância. Não à toa, novos métodos de detecção de ilhamento permanecem sendo amplamente estudados e desenvolvidos para que o problema seja identificado o quanto antes e nas piores condições possíveis. Além do mais, pode-se identificar a importância do processo de certificação dos inversores fotovoltaicos por meio da validação do atendimento às normas brasileiras e sua padronização, pois somente dispositivos mais seguros e capazes de prover energia sem comprometer a sua qualidade serão comercializados no Brasil.

Considerando que todos os requisitos para os equipamentos utilizados no ensaio atendem ao que é requerido pela norma e que todos os passos apresentados nos procedimentos de ensaio da ABNT NBR IEC 62116 foram seguidos no roteiro de testes desenvolvido, é possível afirmar que ele é capaz de verificar se os equipamentos testados possuem proteção anti-ilhamento adequados. Além disso, os comentários adicionados podem ser de grande relevância para a realização dos ensaios no LabGD, uma vez que foram utilizados os equipamentos do laboratório.

De um modo geral o inversor Xantrex GT4.0N-NA-240/208 UL-05 apresentou ótimos resultados na detecção e proteção anti-ilhamento, com t_r variando entre 19 e 140 ms para todos os ensaios, muito abaixo dos 2 segundos permitido pela norma. Porém, não foi possível atingir um valor para I_{CA} dentro da faixa determinada pela norma ABNT NBR IEC 62116 nos ensaios de condição de equilíbrio (piores casos) para as condições B e C (ensaios números 10 e 21) mesmo com a aplicação do filtro de harmônicas, onde pode-se verificar que a forma de onda da corrente na saída do inversor estava longe de ser senoidal (Figura 46) causadas pelas correntes harmônicas geradas pelo sistema, o que muito provavelmente impactou nos valores medidos nos ensaios.

FIGURA 46 – CORRENTE NA SAÍDA DO INVERSOR PARA A CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO B



FONTE: Autor (2022).

LEGENDA: tensão da fonte CA (amarelo), corrente de saída do inversor (verde) e trigger da fonte CA (azul).

Acreditamos que é possível alcançar um valor inferior ao determinado pela norma ajustando os valores da carga RLC. Apesar de não termos conseguido aplicar os ajustes sugeridos anteriormente na execução dos testes, é muito provável que com este refinamento se consiga alcançar os valores exigidos pela norma e o inversor demonstre que possui proteção anti-ilhamento adequado.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a execução do trabalho pode-se constatar que o LabGD da UFPR possui ótimos equipamentos e infraestrutura, uma vez que permitiu a execução de todos os ensaios necessários utilizando apenas o que já é oferecido por ele. Porém, existem alguns pontos que podem ser considerados para a execução de trabalhos futuros, como:

- Utilização de conectores: os pontos de ligação entre os equipamentos foram feitos através de emendas simples, utilizando-se de uma fita

isolante como proteção. Para trabalhos futuros, seria interessante a utilização de conectores de cerâmica ou algum outro disponível no mercado, de forma a facilitar a visualização das conexões feitas e trazer mais proteção aos operadores.

- Medição das variáveis no osciloscópio: Após a realização de cada ensaio é feita a análise do tempo de permanência da alimentação do inversor no osciloscópio. Apesar de termos conseguido fazer a análise do tempo e dos valores para a corrente de saída, ela foi feita de forma aproximada uma vez que foram utilizados apenas as divisórias presentes na tela do osciloscópio. Sendo assim, sugiro que para trabalhos futuros sejam utilizadas funções de medição disponíveis no osciloscópio para verificar o momento exato em que a corrente gerada pelo inversor se reduz até 1% de seu valor nominal e o tempo que ela demorou até atingir este valor.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Sala de Imprensa. Disponível em https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877#:~:text=O%20Brasil%20ultrapassou%20a%20marca,2012%20e%20687%2F2015). Acesso em 18 ago. 2021.
- ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 62116**: Procedimento de ensaio anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Rio de Janeiro, 2012.
- BOWER, W.; ROPP, M. **Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems**. International Energy Agency, 2002. Relatório Técnico.
- BRASIL. **Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011**. Revisão dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica - INMETRO. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 4 jan. 2011
- CANAL SOLAR. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/alemanha-um-dos-maiores-produtores-de-energia-solar-do-mundo/>. Acesso em 20 nov. 2021.
- DA SILVA, H. T. **Estudo sobre a interação de métodos anti-ilhamento para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão com múltiplos inversores**. 2016. 150 f. Dissertação (Mestre em Ciências) - Área de Concentração: Sistemas de Potência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2016.
- DEMONTI, R. Processamento da energia elétrica proveniente de módulos fotovoltaicos, 2003. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- DIAS, M. V. X.; BOROTNI, E. DA C.; HADDAD, J. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. **Revista Brasileira de Energia**, v. 11, n. 2, p. 1-11, 2005.
- FIGUEIRA, H. H.; HEY, H. L.; SCHUCH, L.; RECH, C.; MICHELS, L. Brazilian grid-connected photovoltaic inverters standards: A comparison with IEC and IEEE. **2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**, Búzios, p. 1104–1109, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7281626>. Acesso em 28 out. 2021.
- G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/08/24/energia-solar-atinge-marca-historia-em-capacidade-instalada-no-brasil.ghtml>. Acesso em 05 jan. 2022.

IEEE. Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. **IEEE Std. 929-2000**, 2000. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/836389>. Acesso em 19 out. 2021.

IEEE. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. **IEE Std. 1547-2003,2003**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1225051>. Acesso em 15 set. 2021.

LAGHARI, J. A., MOKHLIS, H., BAKAR, A. H. A., KARIMI, M. A new islanding detection technique for multiple mini hydro based on rate of change of reactive power and load connecting strategy. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 215-224, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890413004044>. Acesso em 20 out. 2021.

LIMA, R. L. Metodologias para determinar a viabilidade técnica do ilhamento intencional de geradores distribuídos em sistemas de distribuição de energia elétrica. 2018. 144 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-17122018-142339/es.php>. Acesso em 10 set. 2021.

MAHAT, P.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B. A Hybrid Islanding Detection Technique Using Average Rate of Voltage Change and Real Power Shift. **IEEE Transactions on Power Shift**, v. 24, p. 764-771, 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4797808>. Acesso em: 29 set. 2021.

MENDONÇA, L. P. **Proposta de sistema de automação para ilhamento intencional de redes de distribuição com geração distribuída**. 2014. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2014. Disponível em: <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2014062401.pdf> . Acesso em 25 out. 2021.

MIYAMOTO, H. K.; BRAGA, F. R.; SOUZA, G. R.; FORTES, M. Z.; DIAS, D. H. N. Impacts on distributed generation with harmonics analysis – Case study. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, p. 1-6, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8395868>. Acesso em 15 jan. 2022.

PEREIRA, O. L. S.; GONÇALVES, F. F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 01, p. 25-45, 2008.

UNDP. **World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability**. United Nations, 2000. Relatório técnico.

VIEIRA, J. C. M. Detecção de ilhamento de geradores distribuídos: Uma revisão bibliográfica sobre o tema. **Revista Eletrônica de Energia**. v. 1, n. 1, p. 3-14, 2011.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2015.

WALLING, R. A.; MILLER, N. W. Distributed Generation Islanding – Implications on Power System Dynamic Performance. In: 2002 IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1., 2002, Chicago. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], p. 92-96. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1043183>. Acesso em 12 set. 2021.

YE, Z.; KROPOSKI, B.; DAME, M. **Grid-Connected Inverter Anti-Islanding Test Results for General Electric Inverter-Based Interconnection Technology**. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2005. Relatório técnico.

YORK, R.; BELL, S. E. Energy transitions or additions? **Energy Research & Social Service**, v. 51, p. 40-43, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629618312246>. Acesso em 15 dez. 2021.