



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALINE LAMBERTI STUQUE

**LEVANTAMENTO DAS CONTRIBUIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO DOS
INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Uberlândia
2022

ALINE LAMBERTI STUQUE

**LEVANTAMENTO DAS CONTRIBUIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO DOS
INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho apresentado como requisito de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior

Assinatura do Orientador

Uberlândia
2022

ALINE LAMBERTI STUQUE

**LEVANTAMENTO DAS CONTRIBUIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO DOS
INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho apresentado como requisito de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, 12 de agosto de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior (Orientador)

Prof. Eduardo Tavares Silvério

Prof. Lucas Rodrigues de Almeida

Dedico este trabalho aos meus pais,
Eusímio da Silva Stuque e Sandra Regina
Lamberti carinho e compreensão, à toda
minha família pelo incentivo e aos meus
amigos pelo apoio e pelo amparo durante
toda essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir mais uma vitória nessa nova etapa da minha vida.

Ao Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior pelo apoio, pela paciência e pelos ensinamentos, durante a orientação para a execução deste trabalho.

À toda a equipe do Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica pelo suporte em diversos momentos em que surgiram dificuldades.

Em especial aos meus pais, minha irmã Ana Carolina Lamberti Staque e meu namorado Bruno Lemos Neves pelo todo apoio, carinho e compreensão que foi imprescindível para a conclusão desta etapa da graduação.

Por fim, a todos que estiveram direto ou indiretamente envolvidos na realização deste trabalho.

RESUMO

O trabalho tem como objetivo apresentar um estudo do comportamento dos inversores de sistemas fotovoltaicos quando submetidos a condições de curto-circuito que podem ocorrer quando estes estão conectados à rede de distribuição local. Os inversores são amplamente utilizados como elemento de interface entre a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos e a rede da concessionária nos sistemas de geração de energia elétrica proveniente da radiação solar. Para melhorar a tecnologia e qualidade desses equipamentos, o estudo de seus parâmetros e monitoramento dinâmico das variáveis operacionais mostram-se de fundamental importância no uso seguro da energia elétrica. Com isso, foi desenvolvido um simulador de falta de tensão e realizado ensaios com oito inversores diferentes quanto a marca e a potência nominal. Dessa forma, foi possível analisar o comportamento de cada inversor diante de um curto-circuito.

Palavras-chave: inversores de sistemas fotovoltaicos, sistemas fotovoltaicos conectados à rede, ensaios de curto-circuito em inversores.

ABSTRACT

The objective of this work is to present a study of the behavior of solar inverters when subjected to power failure conditions that can occur when they are connected to the local distribution network. Inverters are widely used as an interface element between the energy produced by photovoltaic modules and the utility grid in systems for generating electricity from solar radiation. To improve the technology and quality of this equipment, the study of its parameters and dynamic monitoring of the operational variables are of fundamental importance in the safe use of electric energy. With this, a voltage failure simulator was developed and tests were carried out with eight different inverters in terms of brand and rated power. In this way, it was possible to analyze the behavior of each inverter in the face of a short circuit.

Keywords: solar inverter, on-grid photovoltaic systems, short-circuit tests in inverters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.....	11
Figura 2 – Imagem de sistema fotovoltaico off grid.....	12
Figura 3 – Principais componentes de um sistema fotovoltaico on grid.....	13
Figura 4 – Diagrama funcional dos principais elementos constituintes do sistema de simulação.....	14
Figura 5 – Fonte programável CC – modelo IT6006C-800-25.....	15
Figura 6 – Circuito eletrônico.....	16
Figura 7 – Foto do sistema de simulação de falta de energia	17
Figura 8 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor APSystems YC600 com 25% da potência de saída.....	18
Figura 9 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor APSystems YC600 com 50% da potência de saída.....	19
Figura 10 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor APSystems YC600 com 100% da potência de saída.....	19
Figura 11 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Growatt MIC 1000TL-X com 25% da potência de saída.....	20
Figura 12 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Growatt MIC 1000TL-X com 50% da potência de saída.....	21
Figura 13 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Growatt MIC 1000TL-X com 100% da potência de saída.....	21
Figura 14 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Hoymiles MI-1200 com 25% da potência de saída.....	23
Figura 15 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Hoymiles MI-1200 com 50% da potência de saída.....	23
Figura 16 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Hoymiles MI-1200 com 100% da potência de saída.....	24
Figura 17 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor REFUone 1.6k-1T com 25% da potência de saída.....	25

Figura 18 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor REFUone 1.6k-1T com 50% da potência de saída.....	26
Figura 19 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor REFUone 1.6k-1T com 100% da potência de saída.....	26
Figura 20 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Solis-mini-2000-4G com 25% da potência de saída.....	28
Figura 21 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Solis-mini-2000-4G com 50% da potência de saída.....	28
Figura 22 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Solis-mini-2000-4G com 100% da potência de saída.....	29
Figura 23 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Sunny Boy – SB3.0 -1AV-41 com 25% da potência de saída.....	30
Figura 24 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Sunny Boy – SB3.0 -1AV-41 com 50% da potência de saída.....	31
Figura 25 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Sunny Boy – SB3.0 -1AV-41 com 100% da potência de saída.....	31
Figura 26 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q com 25% da potência de saída.....	33
Figura 27 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q com 50% da potência de saída.....	33
Figura 28 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q com 100% da potência de saída.....	34
Figura 29 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor FRONIUS PRIMO 3.0-1 com 25% da potência de saída.....	35
Figura 30 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor FRONIUS PRIMO 3.0-1 com 50% da potência de saída.....	36
Figura 31 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor FRONIUS PRIMO 3.0-1 com 100% da potência de saída.....	36

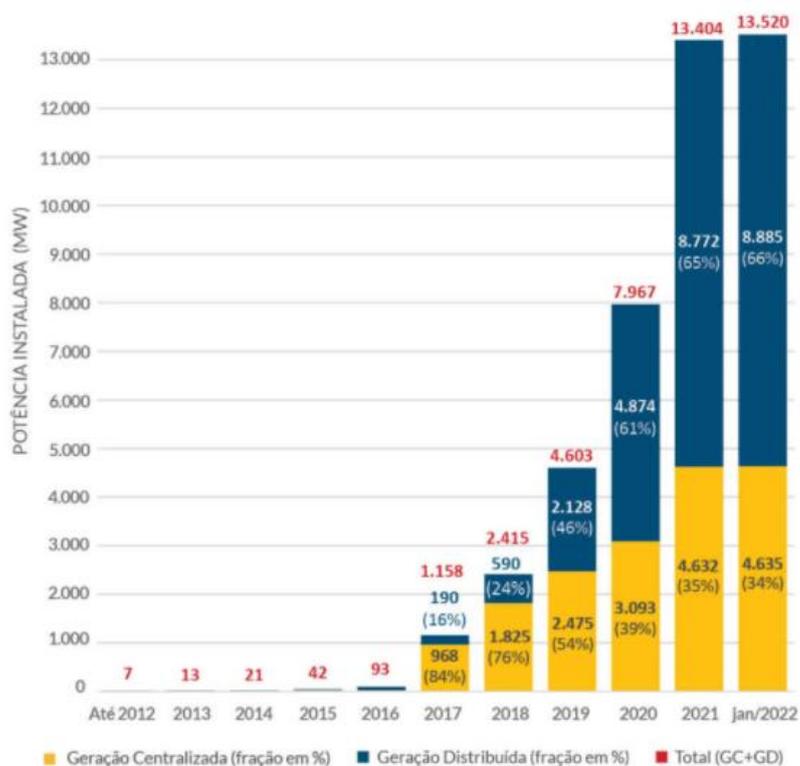
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	METODOLOGIA	14
2.1	FONTE PROGRAMÁVEL CC	14
2.2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	15
2.3	SIMULADOR DE FALTA	16
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	17
3.1	INVERSOR APSYSTEMS YC600.....	18
3.2	INVERSOR GROWATT MIC 1000TL-X.....	20
3.3	INVERSOR HOYMILES MI-1200.....	22
3.4	INVERSOR REFUONE 1.6K – 1T.....	25
3.5	INVERSOR SOLIS-MINI-2000-4G.....	27
3.6	INVERSOR SUNNY BOY – SB3.0-1AV-41.....	30
3.7	INVERSOR ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q.....	32
3.8	INVERSOR FRONIUS PRIMO 3.0-1	35
4	CONCLUSÃO.....	37
5	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica por fonte fotovoltaica no Brasil desenvolveu-se de forma significativa nos últimos anos. Esse avanço ocorreu tanto na geração centralizada como na distribuída. A geração centralizada é caracterizada por usinas de uma alta potência e que distribuem essa energia para muitos consumidores. Já a geração distribuída se trata de usinas menores que estão próximas ou no local de consumo. Na Figura 1 é possível notar o aumento da produção de energia solar fotovoltaica ao longo dos anos no Brasil.

Figura 1 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil



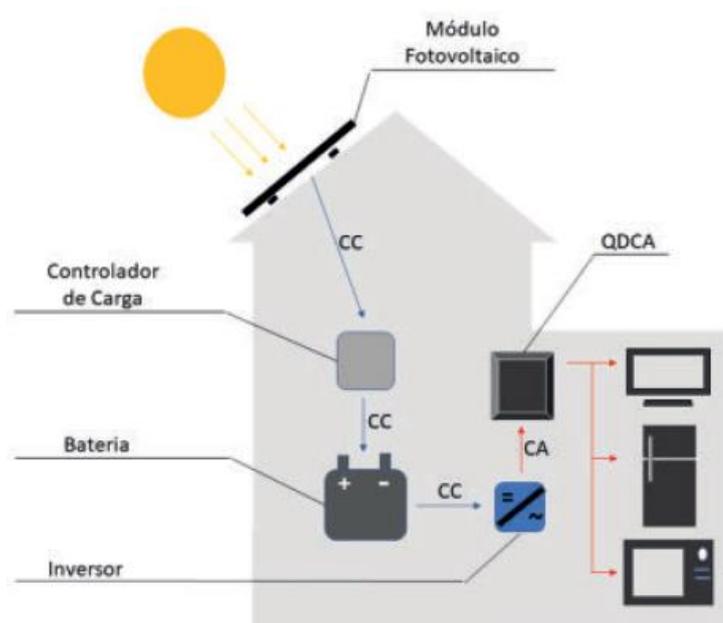
Fonte ABSOLAR, 2022.

Toda essa evolução teve seu marco inicial no ano de 2012 devido a publicação da Resolução Normativa 482 da ANEEL, que possibilitou a auto geração e compartilhamento da energia elétrica. No último ano foi perceptível um grande aumento nessa fonte de energia, o qual representa quase 70% comparado com o ano de 2020.

Atualmente essa fonte de energia representa 2,4% de toda a matriz energética do Brasil. Esse avanço trouxe vários benefícios como mais de 405 mil novos empregos, mais de R\$ 72,3 bilhões em novos investimentos privados e mais de 17,7 milhões de toneladas de CO evitadas (ABSOLAR, 2022).

O sistema de geração distribuída é dividido em duas diferentes formas que se diferenciam basicamente pela conexão à rede de distribuição da concessionária local. O primeiro deles, conhecido como sistema off-grid, é caracterizado pelo uso isolado do sistema e que o armazenamento de energia é realizado por meio de baterias. A Figura 2 ilustra o sistema fotovoltaico off-grid.

Figura 2 – Imagem de sistema fotovoltaico off-grid

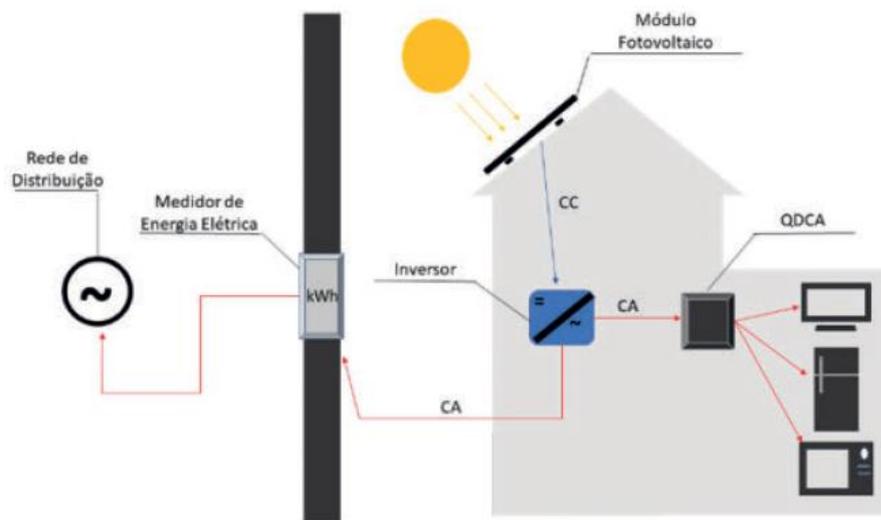


FONTE: AYRÃO, 2018.

A Figura 2 permite verificar os principais equipamentos presentes no sistema off grid. Entre eles pode-se citar os módulos fotovoltaicos, controlador de carga, baterias e inversor isolado responsável pela a alimentação das cargas em corrente alternada.

Já o sistema on-grid não armazena energia como no off-grid, esse sistema injeta o excedente de energia gerada na rede de distribuição da concessionária local. A Figura 3 permite verificar os principais equipamentos do sistema on-grid.

Figura 3 – Principais componentes de um sistema fotovoltaico on-grid.



FONTE: AYRÃO, 2018.

Analisando a figura os principais componentes integrantes deste sistema são módulos fotovoltaicos, inversor e a rede de distribuição da concessionária. Esse inversor deve seguir as exigências de segurança de maneira a proteger tanto a unidade consumidora como a rede.

A principal função dos inversores presentes nesses dois tipos de sistema é a conversão da energia elétrica de corrente contínua para corrente alternada em tensão e frequência compatíveis com a rede elétrica da concessionária. Além disso, alguns deles também permitem fazer o acompanhamento da geração do sistema a partir dos sistemas de monitoramento presente. Uma outra função que os inversores devem ter para serem homologados é ter a função anti-ilhamento, a qual faz o desligamento do inversor na ocorrência de interrupção de energia elétrica da rede de distribuição.

Mesmo com essa proteção existente e obrigatória do inversor de sistema fotovoltaico, é importante avaliar qual o impacto que a rede elétrica existente poderia sofrer na ocorrência de um curto-circuito. Pois com o aumento e popularização da geração distribuída, como pode ser visto na Figura 1, é possível que ocorra aumento das correntes de curto-circuito o que ocasionaria falha na proteção da rede existente.

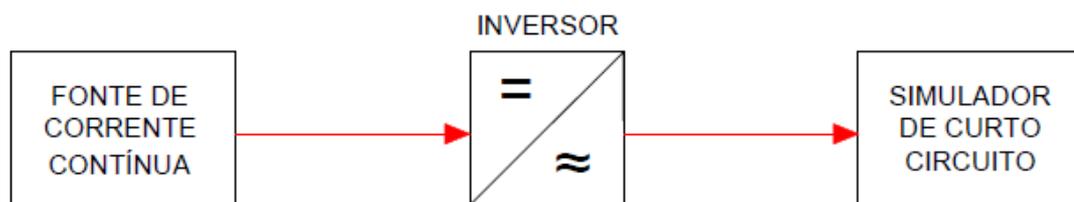
Com o objetivo de manter a segurança, qualidade e confiabilidade da energia elétrica os estudos referentes aos inversores mostram-se de fundamental importância. Estudá-los possibilita conhecer e desenvolver novas estratégias para aperfeiçoar sua operação. Portanto, o objetivo desse trabalho consiste em verificar as contribuições dos inversores on grid durante a ocorrência de faltas na rede de distribuição.

2 METODOLOGIA

Para auxiliar nos estudos referentes às tecnologias de inversores de sistemas fotovoltaicos, foi desenvolvido um sistema de simulação no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE). O sistema é capaz de simular condições de faltas na rede de distribuição de energia elétrica.

Visando garantir a integridade bem como a segurança do operador, a bancada conta com sistema de proteção adequado contra possíveis falhas que possam ocorrer durante a realização dos ensaios. A Figura 4 apresenta o diagrama funcional que integra os principais elementos constituintes do sistema existente no Laboratório.

Figura 4 – Diagrama funcional dos principais elementos constituintes do sistema de simulação



Fonte: Autor

O sistema é composto por uma fonte controlada, o inversor de sistemas fotovoltaicos a ser analisado e um sistema simulador de falta. Os principais dispositivos que compõem o sistema serão brevemente descritos a seguir.

2.1 FONTE PROGRAMÁVEL CC

A fonte programável que compõe o sistema é um equipamento de alta eficiência que fornece uma saída precisa com mínima distorção. O modelo IT6006C-800-25 fabricado pela ITECH, permite que seus parâmetros de saída possam ser ajustados por meio do seu painel frontal.

O modelo utilizado oferece uma saída de até 800V, uma corrente de 25A e uma potência ativa de até 6000W. A Figura 5 abaixo apresenta a fonte utilizada.

Figura 5 – Fonte programável CC - modelo IT6006C-800-25



Fonte: ITECH, 2022.

A fonte tem o objetivo de simular diferentes condições de geração das células de geração fotovoltaica. Assim, as condições de geração (25%, 50% e 100%) podem ser obtidas pela variação da corrente imposta pela fonte programável à entrada CC do inversor em estudo.

2.2 INVERSOR DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Uma vez apresentada a fonte de corrente contínua faz-se necessário a interface dessa energia com a rede tradicional (em corrente alternada). Para isso é utilizado o inversor de sistemas fotovoltaicos com o objetivo de inverter a corrente proveniente da fonte para corrente alternada. O sistema de ensaio é adequado para simulação em inversores monofásicos. A Tabela 1 apresenta os inversores utilizados nos ensaios com as respectivas potências nominais de saída.

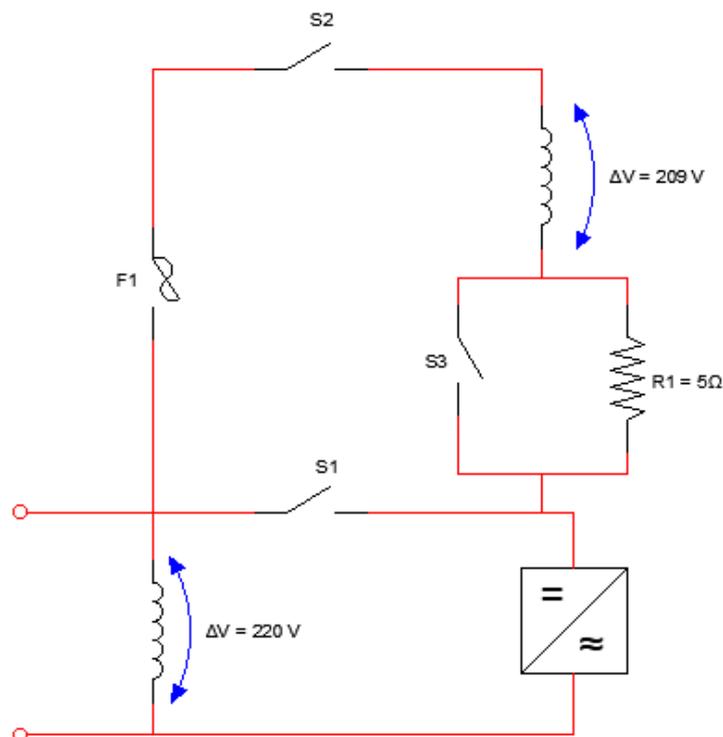
Tabela 1 – Inversores utilizados nos ensaios com sua respectiva potência nominal de saída

Modelo	Potência nominal de saída (W)	Corrente nominal (A)
APsystems – YC600	600	2,50
Growatt – MIC 1000TL-X	1000	4,80
Hoymiles – MI-1200	1200	5,45
REFUSol – REFUone 1.6k – 1T	1600	7,70
Solis – Solis-mini-2000-4G	2000	8,70
SMA – Sunny Boy 3.0	3000	16,00
ABB – UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q	3300	14,50
Fronius – Primo 3.0-1	3000	13,00

2.3 SIMULADOR DE FALTA

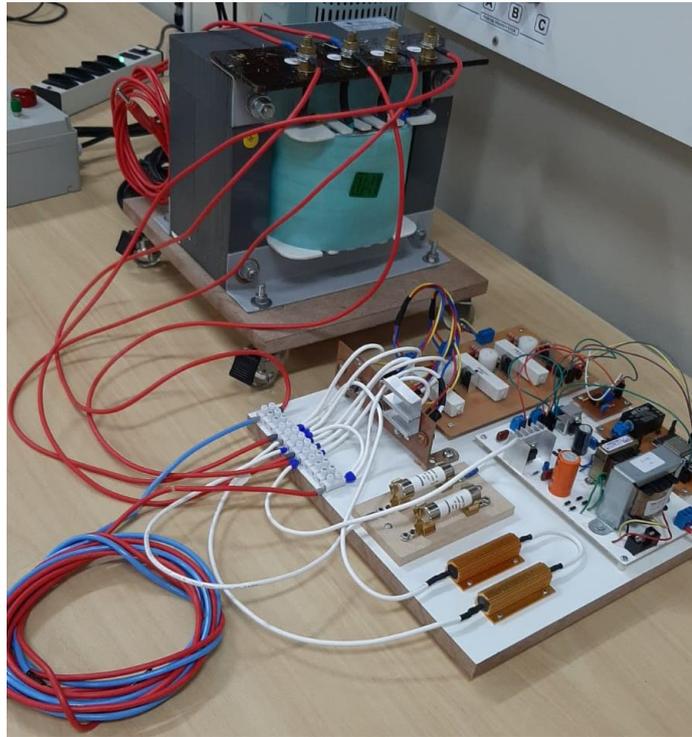
No que se refere a simulação de curto-circuito, foram utilizados um autotransformador e um circuito eletrônico com o objetivo de reduzir instantaneamente a tensão a um intervalo de tempo configurável. O autotransformador utilizado possui a relação de transformação de 220 V para 209V. A conexão foi ajustada de maneira subtrativa em que a tensão de saída passou a ser de 11V (5% da tensão de referência 220V). A montagem experimental é apresentada pela Figura 6 e na Figura 7 uma foto do sistema utilizado para as simulações.

Figura 6 – Circuito eletrônico



Fonte: Autor

Figura 7 – Foto do sistema de simulação de falta de energia



Fonte: Autor

Os dados experimentais permitem avaliar o comportamento dos inversores utilizados conforme será abordado no tópico a seguir.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos presentes nos tópicos a seguir permitem observar o comportamento dos inversores de diferentes marcas durante uma ocorrência de curto-circuito. Primeiramente, foi verificado o comportamento do inversor com 25% da potência de saída, logo após com 50% e por último com 100%. Dessa forma, é possível verificar qual a contribuição do inversor com o curto-circuito em diferentes condições de geração.

Os gráficos abaixo apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de aplicação de uma tensão de 11V no lado de corrente alternada do inversor. Na prática, a maioria dos curtos circuitos que ocorrem na rede possuem impedâncias, mesmo que pequenas, e por isso ocorre uma diferença de potencial.

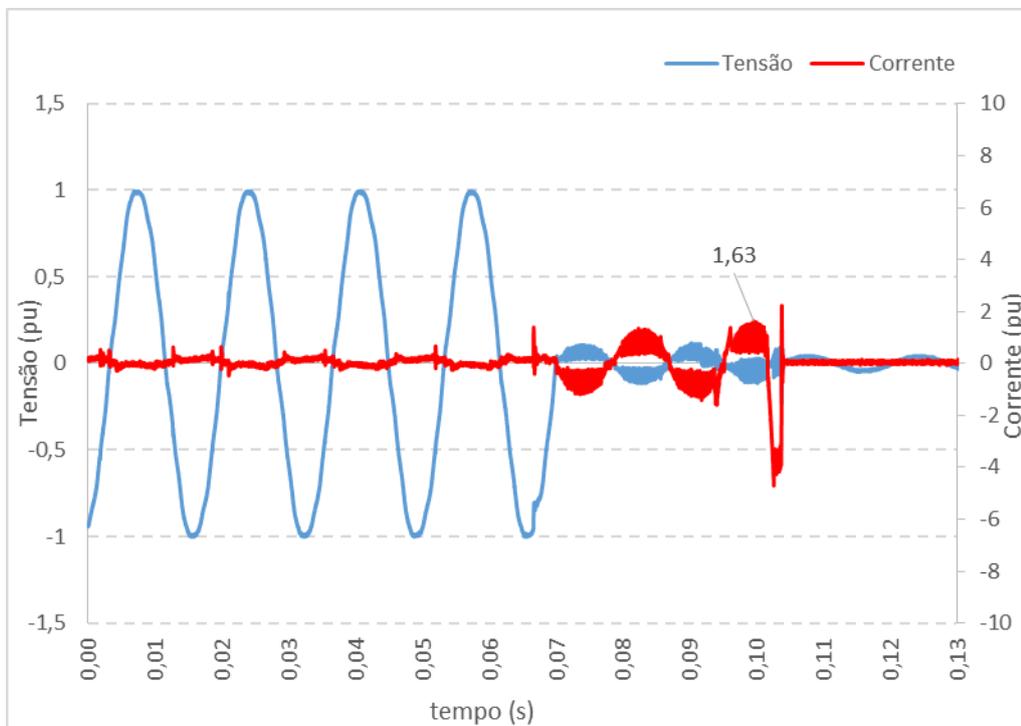
Para que os valores sejam melhores analisados, os gráficos foram todos plotados considerando as grandezas em pu e tomando como base a tensão e corrente nominal de cada

inversor. Esses valores de referência podem ser consultados na Tabela 1 mencionada anteriormente.

3.1 INVERSOR APSYSTEMS YC600

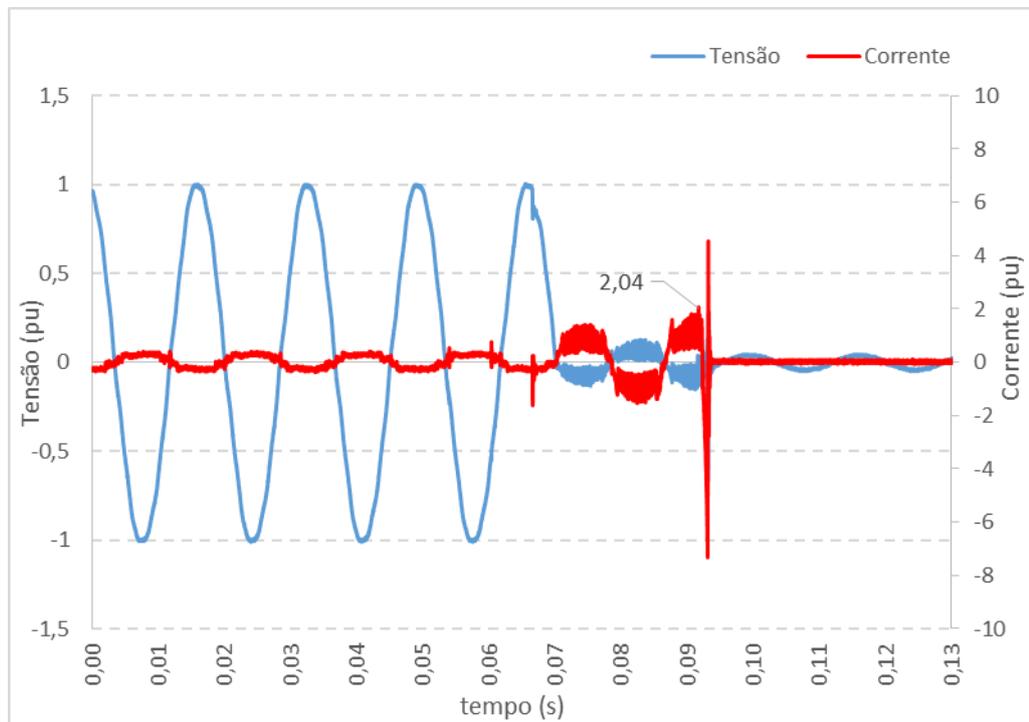
As figuras 8, 9 e 10 apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de simulação de um curto-circuito (de aplicação de uma tensão de saída de 11V) para o inversor APSystems YC600 (corrente nominal de 2,5A e potência de 600W).

Figura 8 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor APSystems YC600 com 25% da potência de saída



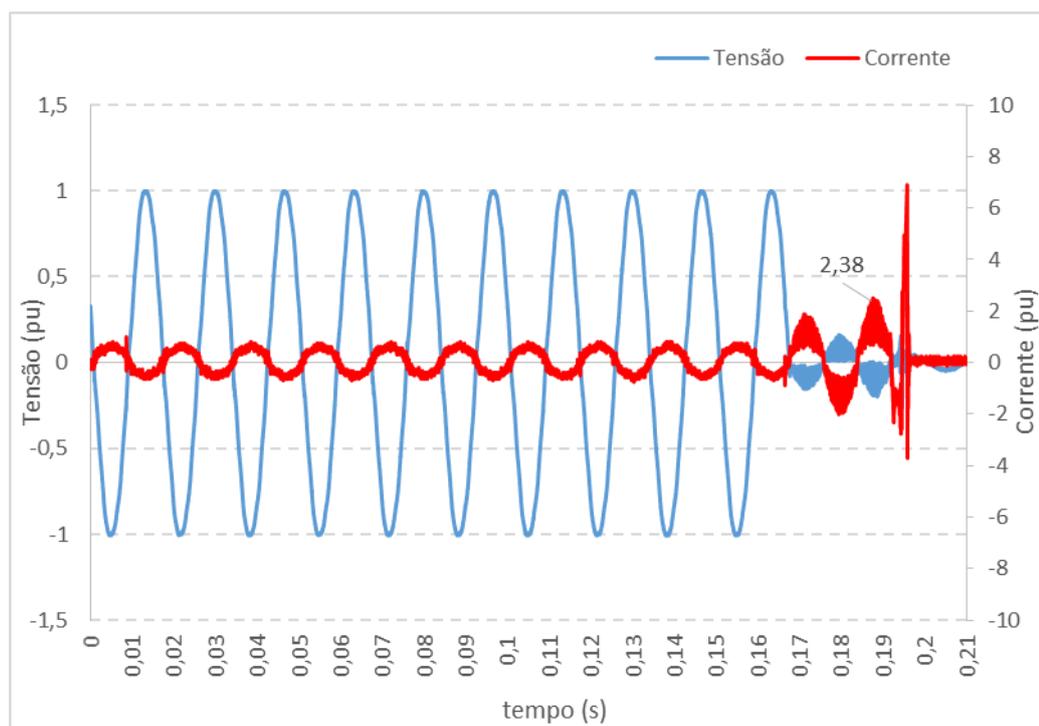
Fonte: Autor

Figura 9 - Formas de onda de corrente e tensão do inversor APSystems YC600 com 50% da potência de saída



Fonte: Autor

Figura 10 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor APSystems YC600 com 100% da potência de saída



Fonte: Autor

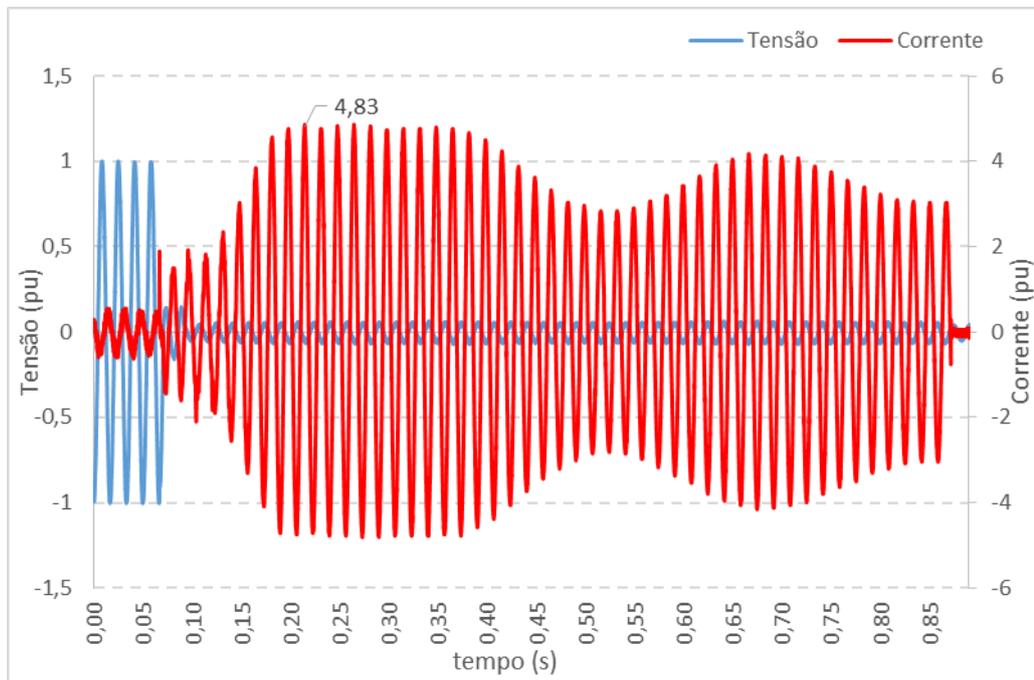
Analisando primeiramente a condição de 25% da potência de saída (Figura 8), após a tensão da rede tornar-se 5% do valor nominal (11V) o inversor contribuiu com o curto durante dois ciclos e com um pico máximo de aproximadamente 1,6 pu. Já na condição de 50% da potência de saída (Figura 9), o inversor contribuiu por um tempo menor, sendo este de 1,5 ciclo, porém o pico foi de 2 pu, maior do que se comparado a condição de 25%. Por fim, na condição de plena geração (100%), o inversor teve comportamento similar à condição de 50% e contribuiu com um pico máximo de corrente de aproximadamente 2,4 pu.

Neste inversor em particular, foi possível perceber que, nas três condições de geração, o inversor contribuiu com a ocorrência do curto entre 1,5 e 2 ciclos.

3.2 INVERSOR GROWATT MIC 1000TL-X

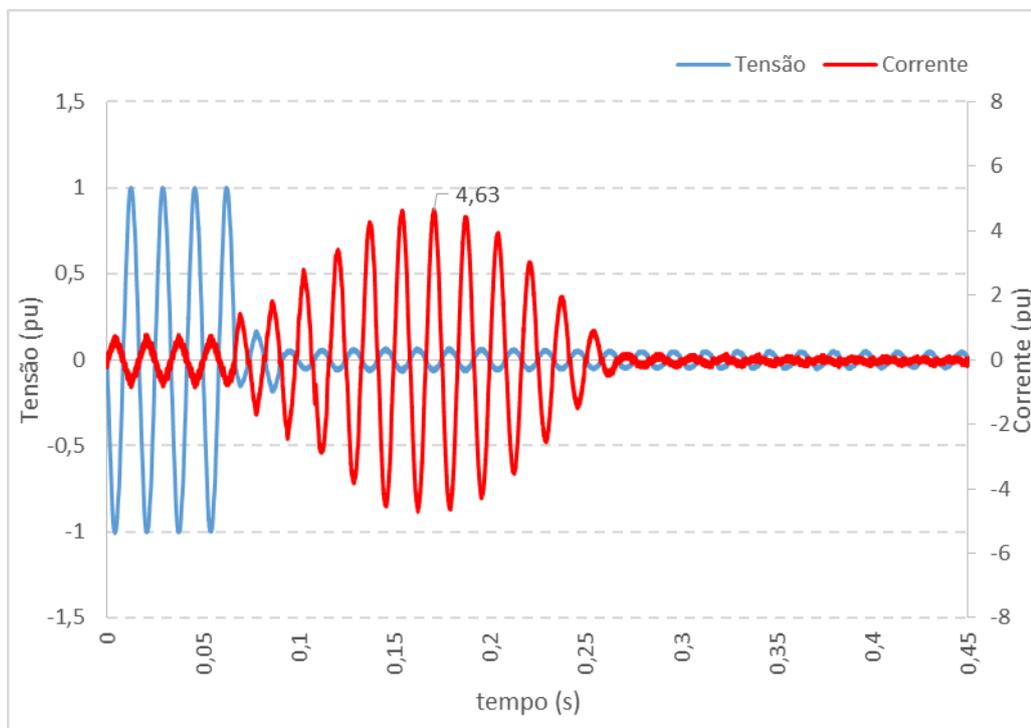
As figuras 11, 12 e 13 apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de simulação de um curto-circuito (de aplicação de uma tensão de saída de 11V) para o inversor Growatt MIC 1000TL-X (corrente nominal de 4,80A e potência de 1000W).

Figura 11 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Growatt MIC 1000TL-X com 25% da potência de saída



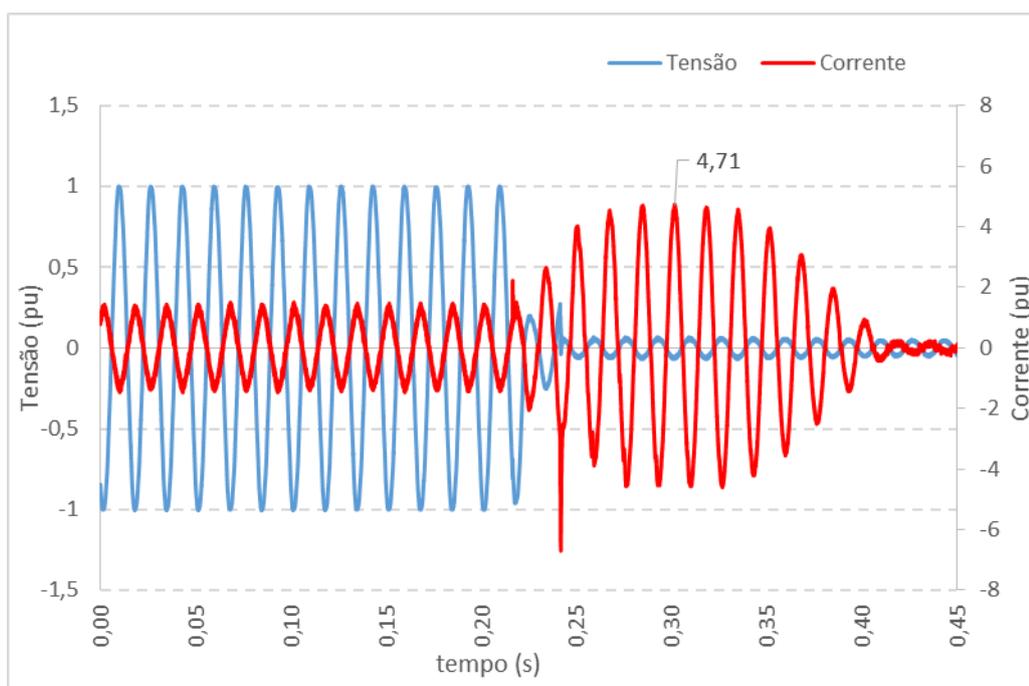
Fonte: Autor

Figura 12 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Growatt MIC 1000TL-X com 50% da potência de saída



Fonte: Autor

Figura 13 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Growatt MIC 1000TL-X com 100% da potência de saída



Fonte: Autor

Analisando primeiramente a condição de 25% da potência de saída (Figura 11), após a tensão da rede tornar-se 5% do valor nominal (11V) o inversor continuou contribuindo com o curto durante aproximadamente 48 ciclos. Apesar do comportamento da forma de onda da corrente assemelhar-se a uma senoide, é possível perceber que esta sofreu alterações de amplitude ao longo do tempo e o pico máximo foi de aproximadamente 4,8 pu.

Já na condição de 50% da potência de saída (Figura 12), o inversor contribuiu por um tempo menor (aproximadamente 12 ciclos), porém o pico foi levemente menor (4,6 pu) do que se comparado a condição de 25%. Nesta condição o comportamento da forma de onda também foi semelhante a uma senoide, porém a amplitude foi sofreu um aumento e uma diminuição em um menor intervalo de tempo.

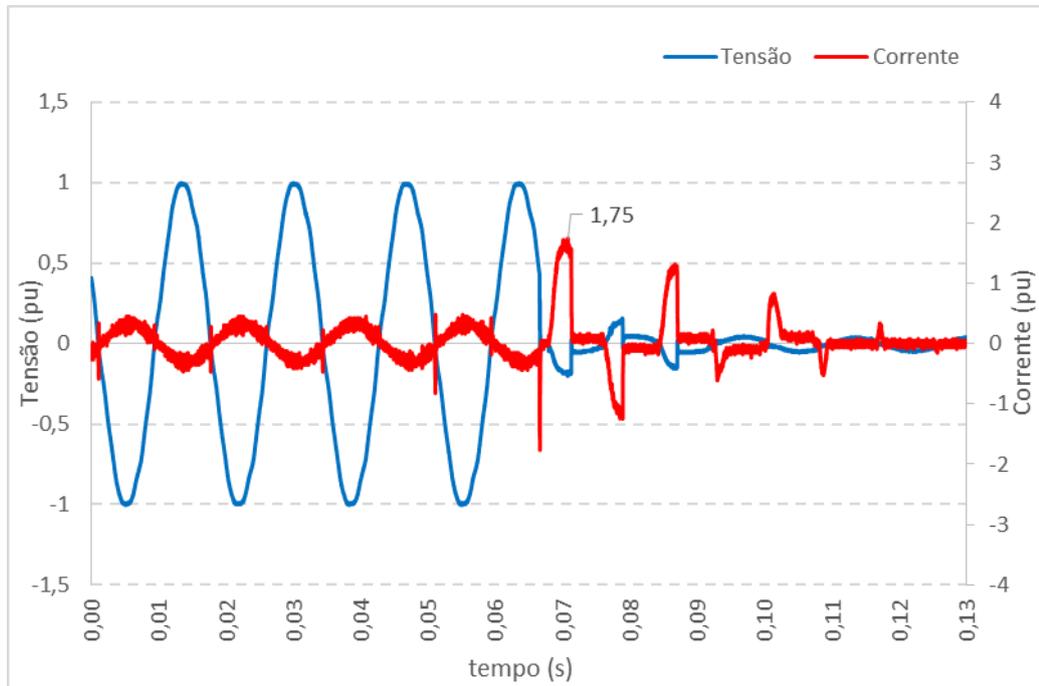
Por fim, na condição de plena geração (100%), o inversor teve comportamento similar à condição de 50% em termos de duração (aproximadamente 12 ciclos) e amplitude da corrente.

Neste inversor em particular, foi possível perceber que, entre as três condições de geração, a maior contribuição em termos de tempo de duração foi na condição de 25% de geração. As outras duas condições tiveram um comportamento semelhante no que tange o tempo e amplitude da corrente.

3.3 INVERSOR HOYMILES MI-1200

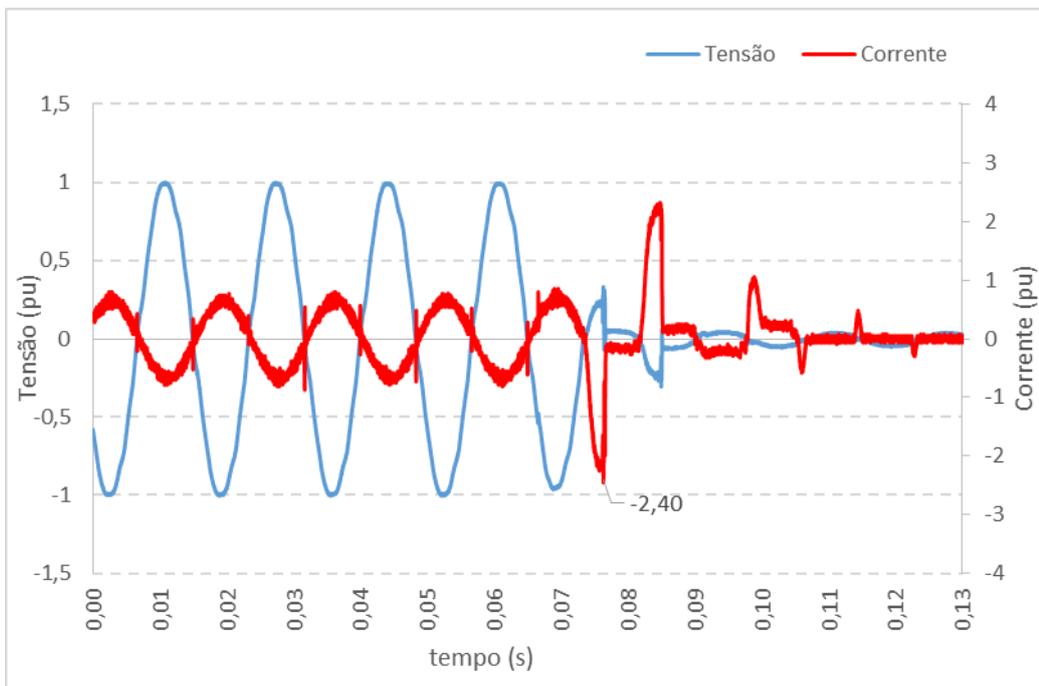
As figuras 14, 15 e 16 apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de simulação de um curto-circuito (de aplicação de uma tensão de saída de 11V) para o inversor Hoymiles MI-1200 (corrente nominal de 5,45A e potência de 1200W).

Figura 14 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Hoymiles MI-1200 com 25% da potência de saída



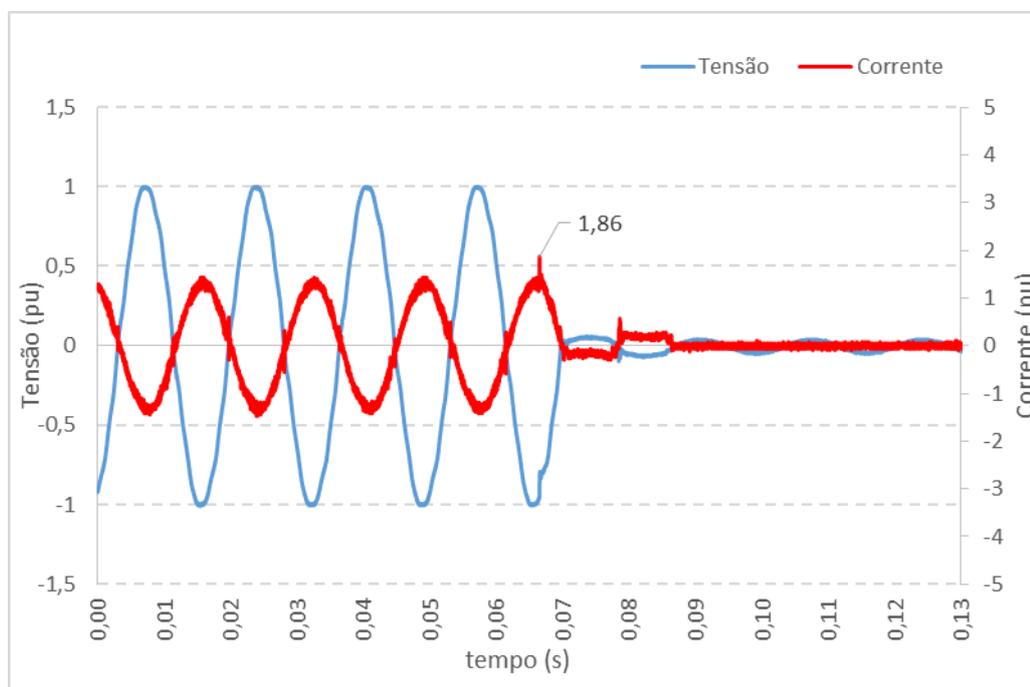
Fonte: Autor

Figura 15 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Hoymiles MI-1200 com 50% da potência de saída



Fonte: Autor

Figura 16 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Hoymiles MI-1200 com 100% da potência de saída



Fonte: Autor

Analisando primeiramente a condição de 25% da potência de saída (Figura 14), após a tensão da rede tornar-se 5% do valor nominal (11V) o inversor continuou contribuindo com o curto durante aproximadamente 3 ciclos. Pela análise do gráfico do comportamento da corrente nesse inversor, é possível perceber que, na condição de 25%, ocorreu um pico de cerca 1,75 pu no instante que ocorreu o curto-circuito.

Já na condição de 50% da potência de saída (Figura 15), o inversor contribuiu por aproximadamente 3 ciclos, porém o pico foi levemente maior (2,4 pu) do que se comparado a condição de 25%. Nota-se que nessa condição de geração o pico de corrente também ocorreu aproximadamente no instante que ocorreu o curto-circuito e foi decaindo com o tempo.

Por fim, na condição de plena geração (100%), o inversor teve comportamento ainda melhor sendo que contribuiu por menos de 2 ciclos. Nessa condição, o pico máximo foi de aproximadamente 1,9 pu. Nos três casos a forma de onda das correntes sofreu elevada distorção o que se pode inferir elevada presença de conteúdo harmônico.

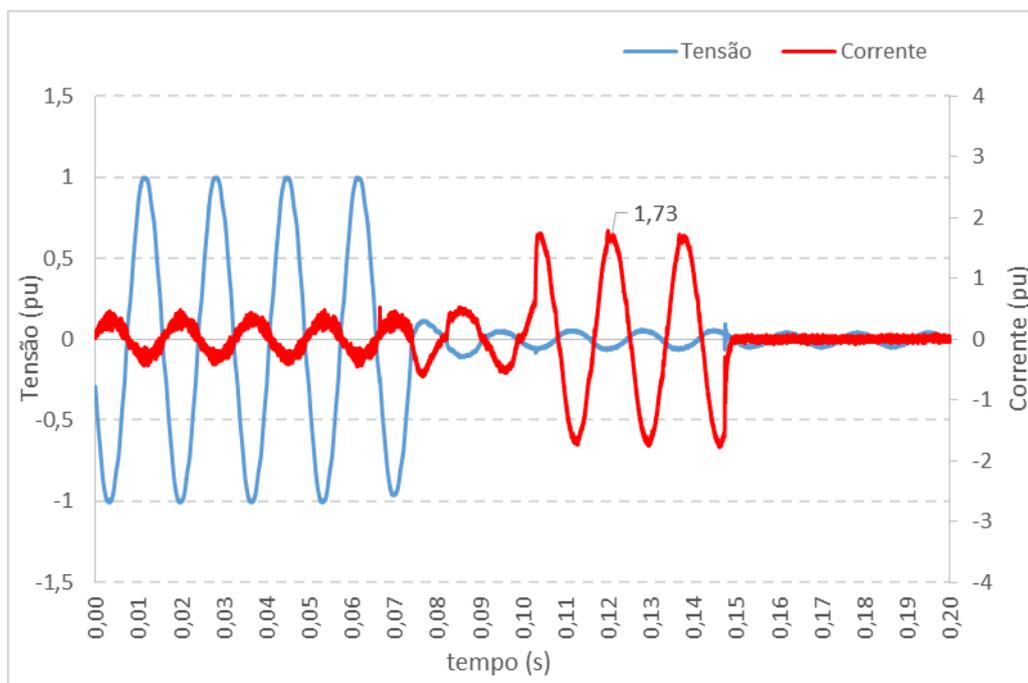
Neste inversor em particular, foi possível perceber que, entre as três condições de geração, a maior contribuição em termos de tempo de duração foi na condição de 25% e 50% de geração. A condição de plena geração foi a que apresentou um melhor comportamento sob

o ponto de vista de proteção pois foi a que apresentou menor pico de corrente e permaneceu contribuindo no menor intervalo de tempo.

3.4 INVERSOR REFUONE 1.6K – 1T

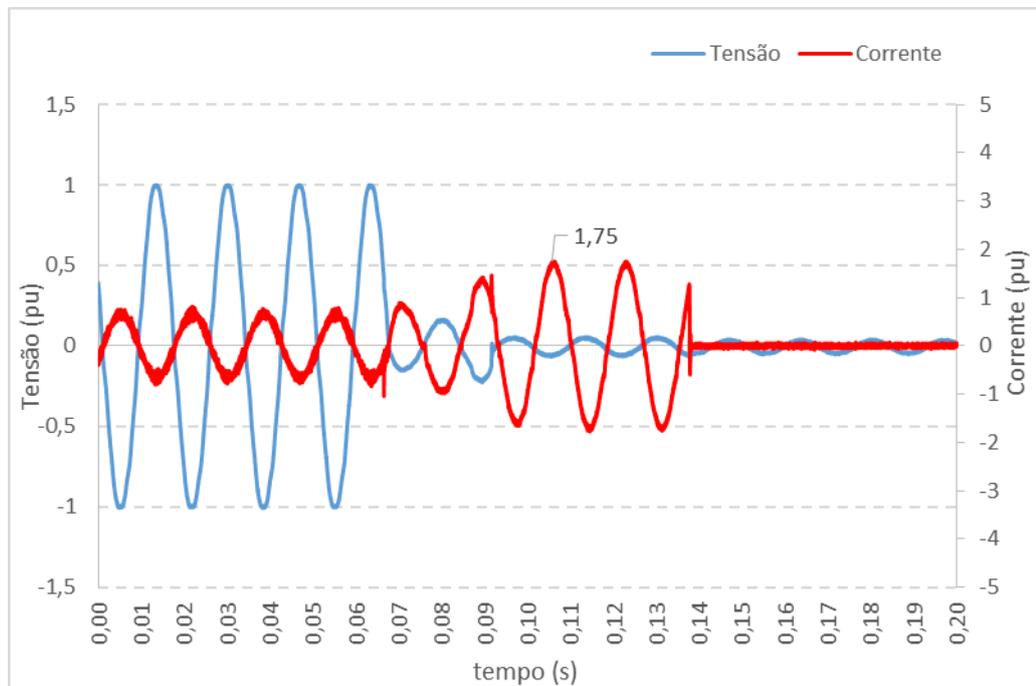
As figuras 17, 18 e 19 apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de simulação de um curto-circuito (de aplicação de uma tensão de saída de 11V) para o inversor REFUone 1.6k – 1T (corrente nominal de 7,70A e potência de 1600W).

Figura 17 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor REFUone 1.6k – 1T com 25% da potência de saída



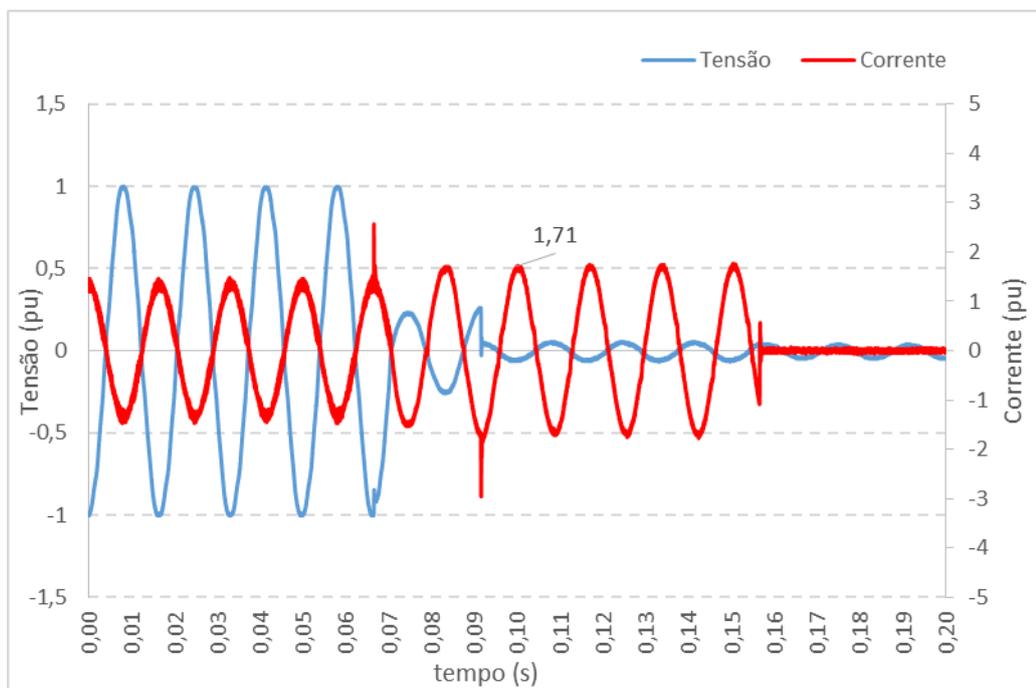
Fonte: Autor

Figura 18 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor REFUone 1.6k – 1T com 50% da potência de saída



Fonte: Autor

Figura 19 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor REFUone 1.6k – 1T com 100% da potência de saída



Fonte: Autor

Analisando primeiramente a condição de 25% da potência de saída (Figura 17), após a tensão da rede tornar-se 5% do valor nominal (11V) o inversor continuou contribuindo com o curto durante aproximadamente 5 ciclos. Pela análise do gráfico do comportamento da corrente nesse inversor, é possível perceber que, na condição de 25%, ocorreu um pico de cerca 1,7 pu no terceiro e quarto ciclo.

Já na condição de 50% da potência de saída (Figura 18), o inversor contribuiu por aproximadamente 5 ciclos e o pico foi de 1,75 pu, assemelhando-se à condição de 25%. Nota-se que nessa condição de geração o pico de corrente também ocorreu aproximadamente no segundo e terceiro ciclo.

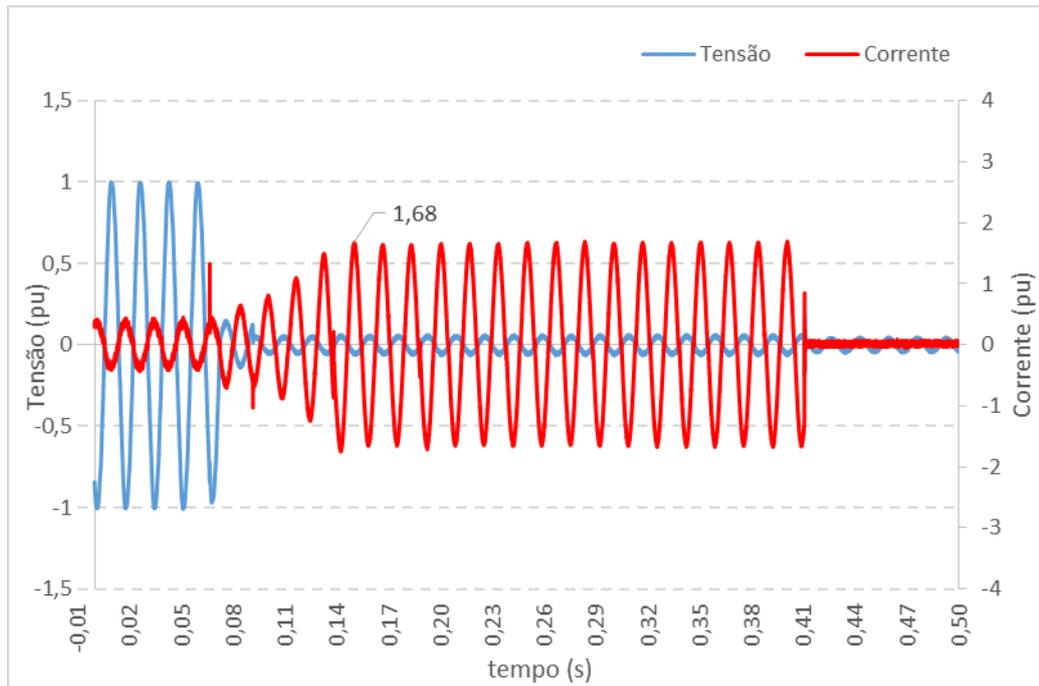
Por fim, na condição de plena geração (100%), o inversor teve comportamento semelhante e contribuiu com o curto-circuito por aproximadamente 5 ciclos. Nessa condição, o pico máximo foi de aproximadamente 1,71 pu. Nos três casos a forma de onda das correntes foi aproximadamente senoidal sendo que na condição de plena geração foi verificado um pico de corrente no momento do curto e outro no segundo ciclo.

Neste inversor, foi possível perceber que, entre as três condições de geração, a contribuição em termos de tempo de duração foi praticamente a mesma nas três condições de geração.

3.5 INVERSOR SOLIS-MINI-2000-4G

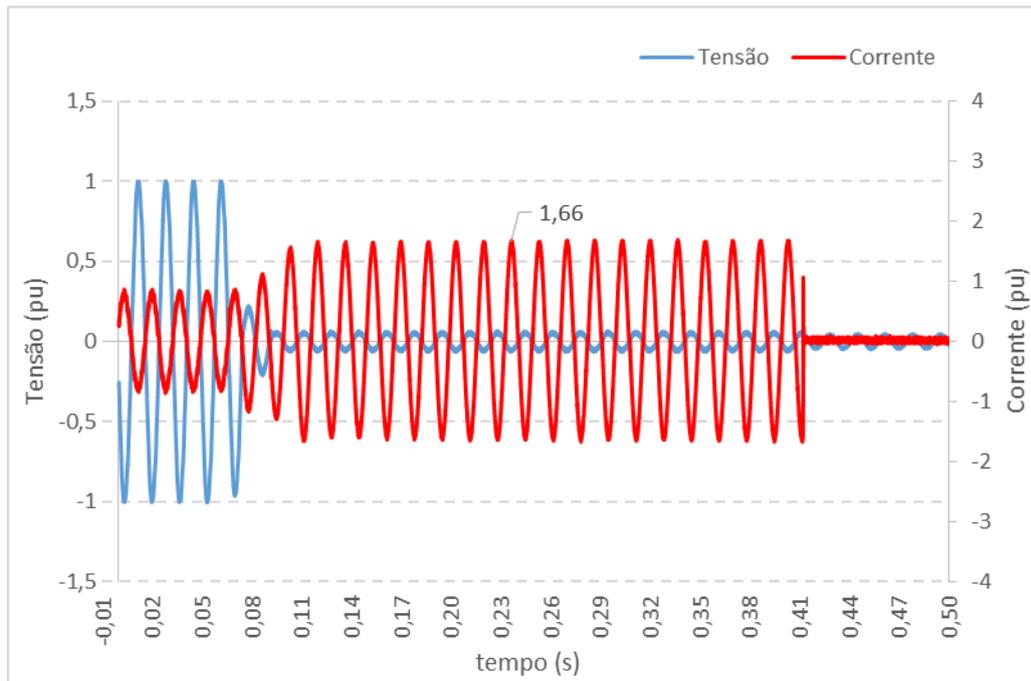
As figuras 20, 21 e 22 apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de simulação de um curto-circuito (de aplicação de uma tensão de saída de 11V) para o inversor Solis-mini-2000-4G (corrente nominal de 8,70A e potência de 2000W).

Figura 20 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Solis-mini-2000-4G com 25% da potência de saída



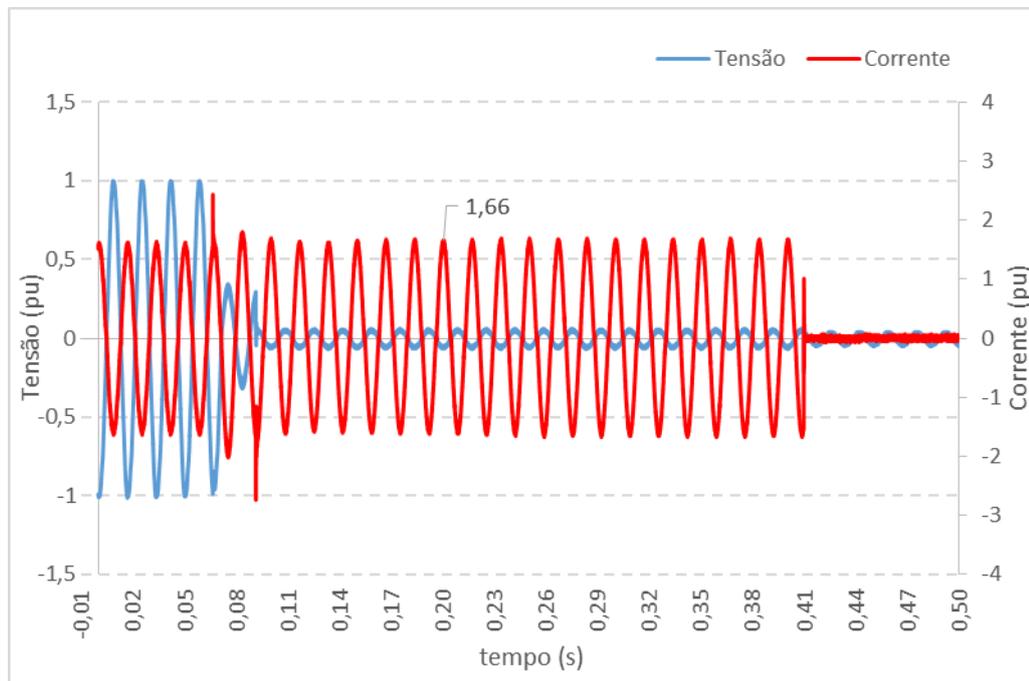
Fonte: Autor

Figura 21 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Solis-mini-2000-4G com 50% da potência de saída



Fonte: Autor

Figura 22 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Solis-mini-2000-4G com 100% da potência de saída



Fonte: Autor

Analisando primeiramente a condição de 25% da potência de saída (Figura 20), após a tensão da rede tornar-se 5% do valor nominal (11V) o inversor continuou contribuindo com o curto durante aproximadamente 20 ciclos. Apesar do comportamento da forma de onda da corrente assemelhar-se a uma senoide, é possível perceber que esta sofreu alterações de amplitude ao longo do tempo e o pico máximo foi de aproximadamente 1,7 pu.

Já na condição de 50% da potência de saída (Figura 21), o inversor contribuiu por um tempo maior (aproximadamente 24 ciclos) e o pico foi aproximadamente o mesmo (1,7 pu) quando se comparado com a condição de 25%. A forma de onda também foi semelhante a uma senoide sendo que esta teve um aumento de amplitude nos 2 primeiros ciclos e manteve-se estável nos demais.

Por fim, na condição de plena geração (100%), o inversor teve comportamento similar à condição de 50% em termos de duração (aproximadamente 24 ciclos). Entretanto, a corrente permaneceu no valor que estava antes da ocorrência do curto e apenas sofreu uma pequena deformação em forma de pico (2,7 pu) no primeiro e segundo ciclo.

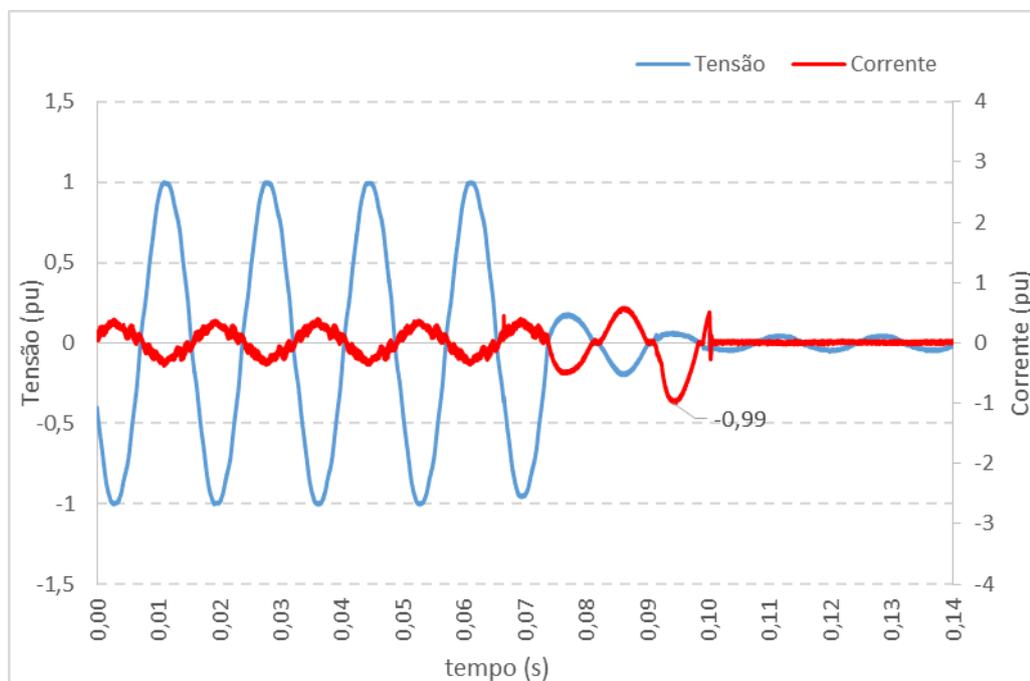
Neste inversor em particular, foi possível perceber que, entre as três condições de geração, a maior contribuição em termos de tempo de duração foi na condição de 25% de

geração. As outras duas condições tiveram um comportamento semelhante no que tange o tempo e a amplitude de contribuição da corrente.

3.6 INVERSOR SUNNY BOY – SB3.0-1AV-41

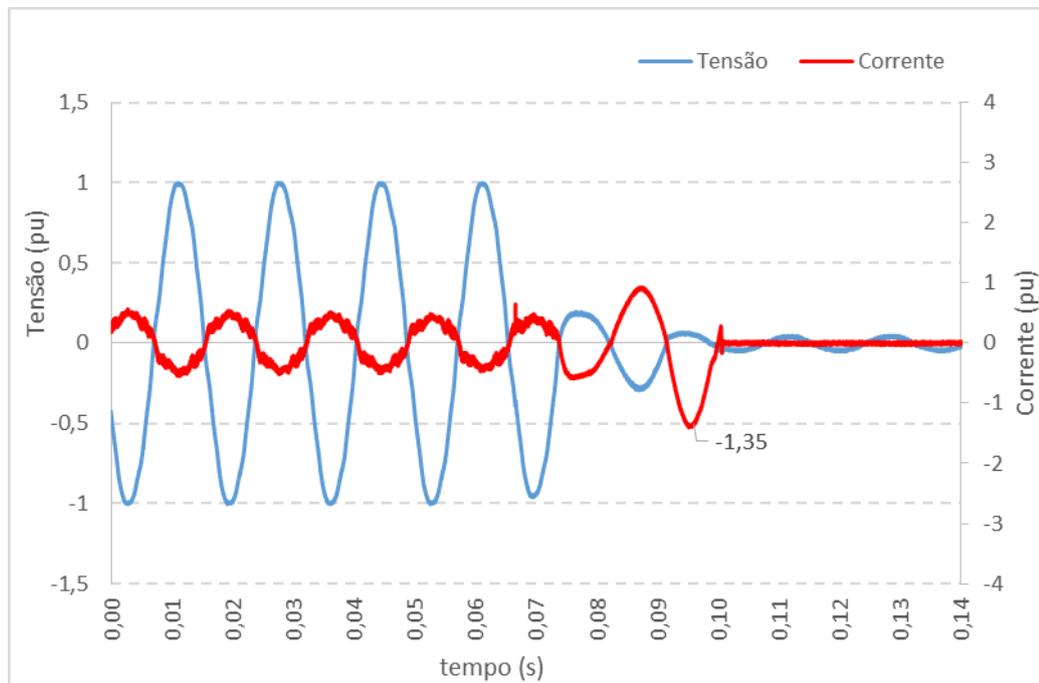
As figuras 23, 24 e 25 apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de simulação de um curto-circuito (de aplicação de uma tensão de saída de 11V) para o inversor Sunny Boy – SB3.0 -1AV-41 (corrente nominal de 16A e potência de 3000W).

Figura 23 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Sunny Boy – SB3.0 -1AV-41 com 25% da potência de saída



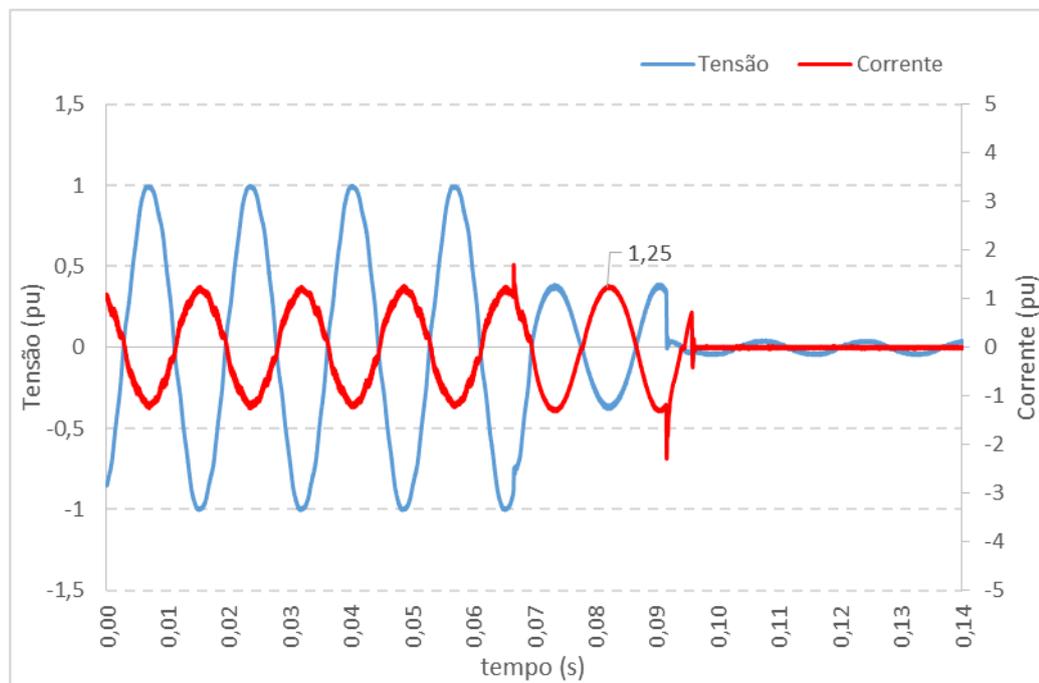
Fonte: Autor

Figura 24 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Sunny Boy – SB3.0 -1AV-41 com 50% da potência de saída



Fonte: Autor

Figura 25 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor Sunny Boy – SB3.0 -1AV-41 com 100% da potência de saída



Fonte: Autor

Analisando primeiramente a condição de 25% da potência de saída (Figura 23), após a tensão da rede tornar-se 5% do valor nominal (11V) o inversor continuou contribuindo com o curto durante aproximadamente 2 ciclos. Pela análise do gráfico do comportamento da corrente nesse inversor, é possível perceber que, na condição de 25%, ocorreu um pico de cerca 1 pu no segundo ciclo.

Na condição de 50% da potência de saída (Figura 24), o inversor contribuiu por aproximadamente 2 ciclos e o pico foi de 1,35 pu, assemelhando-se à condição de 25%. Nota-se que nessa condição de geração o pico de corrente também ocorreu aproximadamente no segundo ciclo.

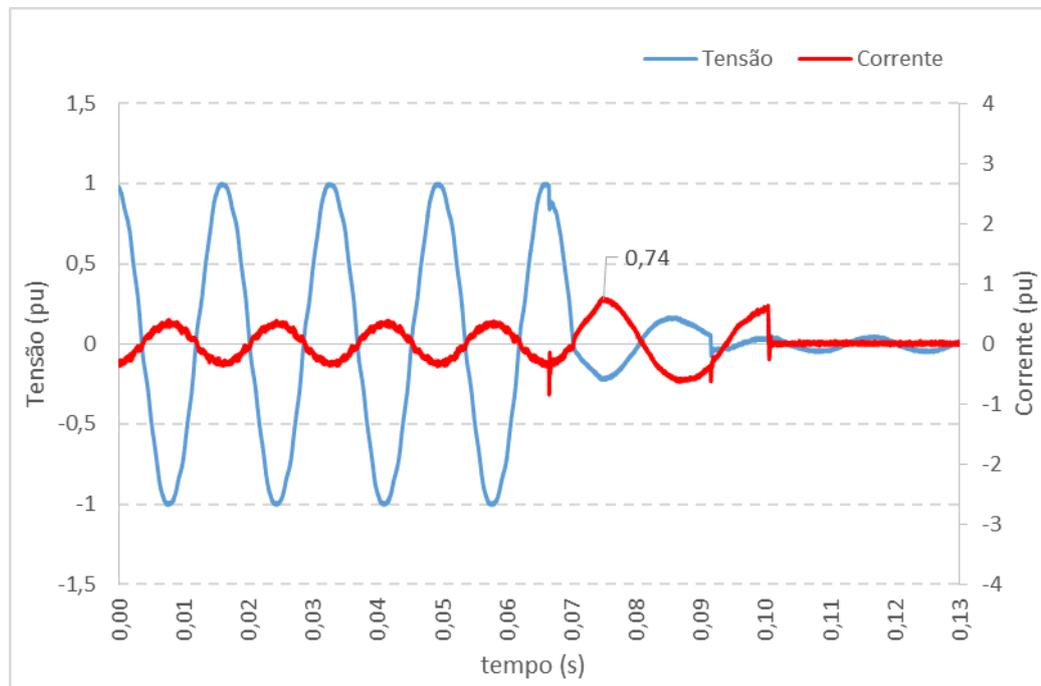
Por fim, na condição de plena geração (100%), o inversor teve comportamento semelhante e contribuiu com o curto-circuito também por aproximadamente 2 ciclos. Nessa condição, o pico máximo foi de aproximadamente 1,25 pu.

Neste inversor, foi possível perceber que, entre as três condições de geração, a contribuição em termos de tempo de duração e pico de corrente foi praticamente a mesma nas três condições de geração.

3.7 INVERSOR ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q

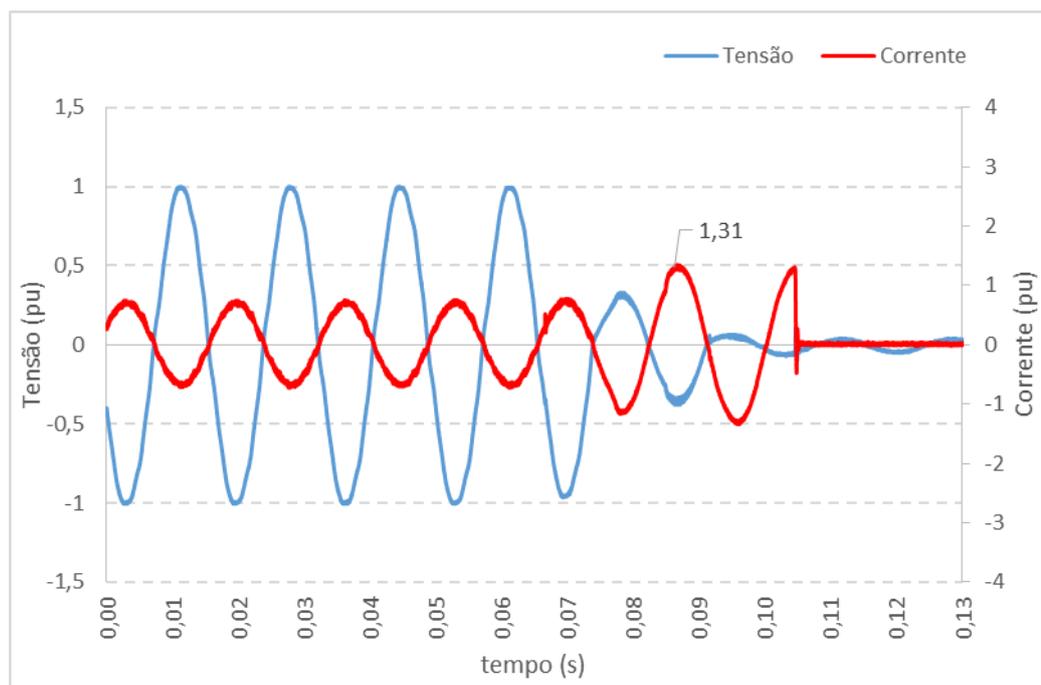
As figuras 26, 27 e 28 apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de simulação de um curto-circuito (de aplicação de uma tensão de saída de 11V) para o inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q (corrente nominal de 14,50A e potência de 3300W).

Figura 26 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q com 25% da potência de saída



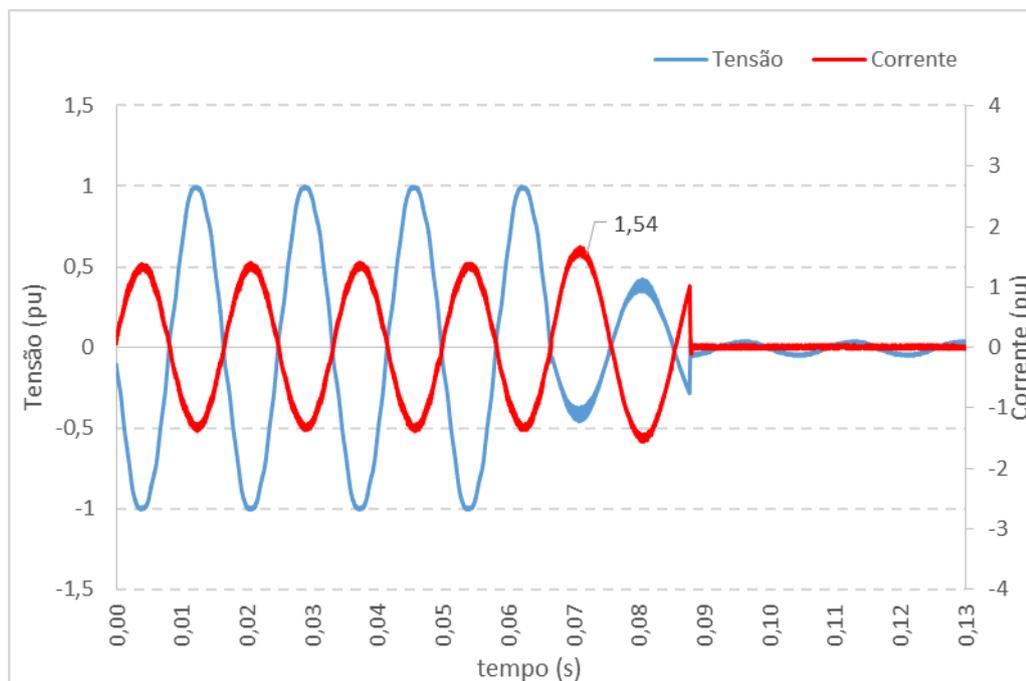
Fonte: Autor

Figura 27 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q com 50% da potência de saída



Fonte: Autor

Figura 28 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-Q com 100% da potência de saída



Fonte: Autor

Analisando primeiramente a condição de 25% da potência de saída (Figura 26), após a tensão da rede tornar-se 5% do valor nominal (11V) o inversor continuou contribuindo com o curto durante aproximadamente 2 ciclos. Pela análise do gráfico do comportamento da corrente nesse inversor, é possível perceber que, na condição de 25%, ocorreu um pico de cerca 0,74 pu no primeiro ciclo.

Na condição de 50% da potência de saída (Figura 27), o inversor contribuiu por aproximadamente 2 ciclos e o pico foi de 1,35 pu, assemelhando-se à condição de 25%. Nota-se que nessa condição o pico de corrente também ocorreu no primeiro ciclo.

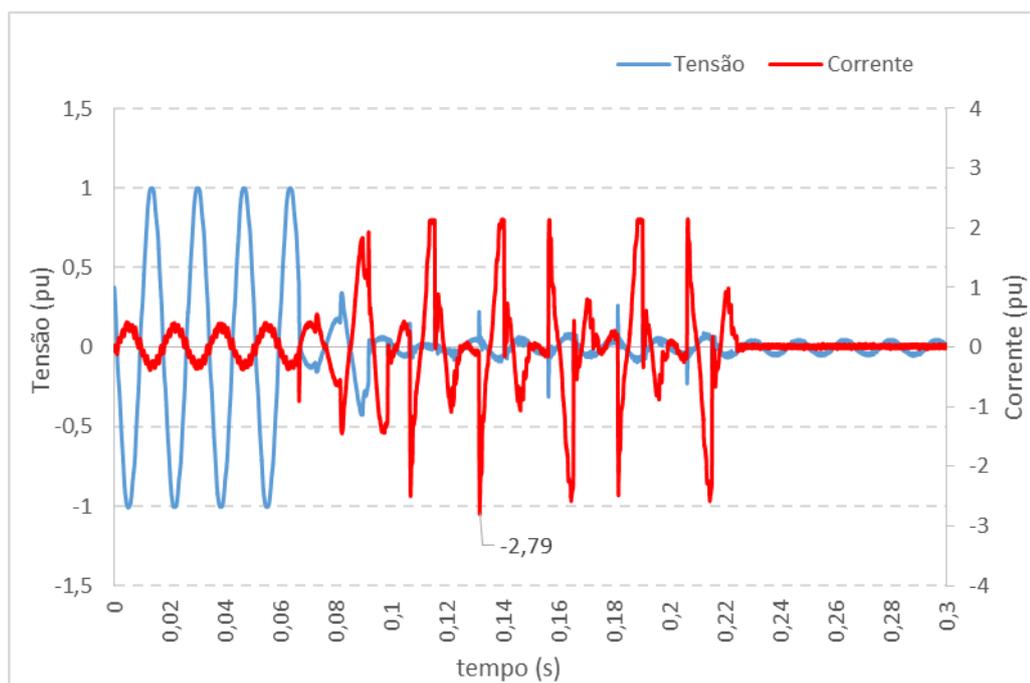
Por fim, na condição de plena geração (100%), o inversor teve comportamento semelhante e contribuiu com o curto-circuito por aproximadamente 1,5 ciclos. Nessa condição, o pico máximo foi de aproximadamente 1,54 pu. Nos três casos a forma de onda das correntes foi aproximadamente senoidal sendo que na condição de plena geração foi verificado a maior amplitude no primeiro ciclo.

Neste inversor, foi possível perceber que a contribuição em termos de tempo de duração foi praticamente a mesma nas três condições de geração. Apesar disso, a condição de plena geração foi a que se diferenciou das demais devido ao maior valor de amplitude de corrente verificado.

3.8 INVERSOR FRONIUS PRIMO 3.0-1

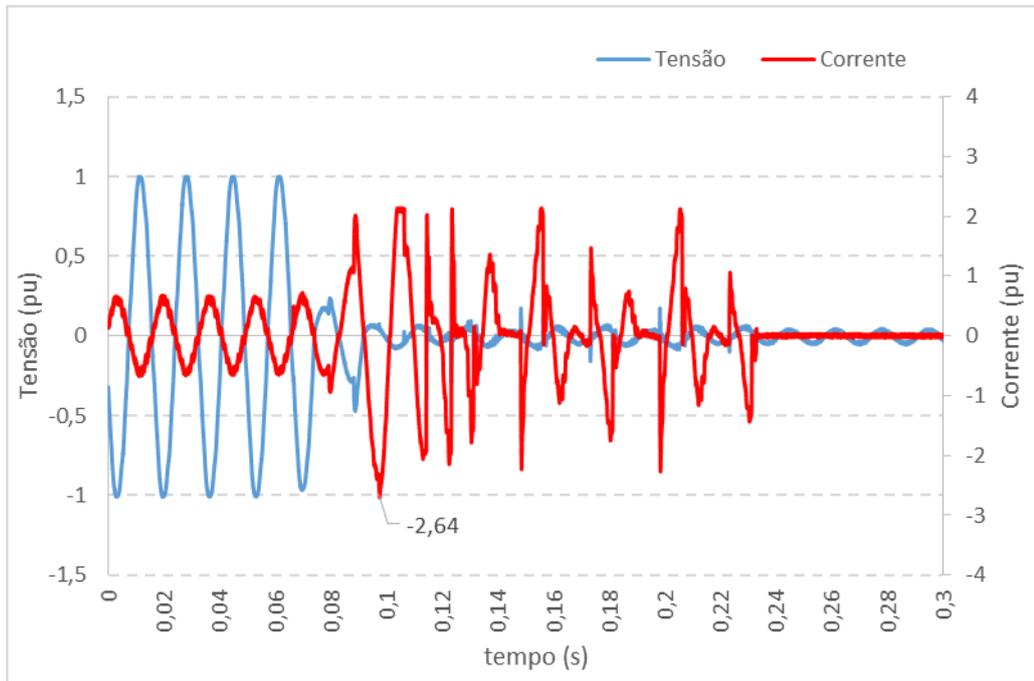
As figuras 29, 30 e 31 apresentam as formas de onda de corrente e tensão na ocorrência de simulação de um curto-circuito (de aplicação de uma tensão de saída de 11V) para o inversor FRONIUS PRIMO 3.0-1 (corrente nominal de 13A e potência de 3000W).

Figura 29 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor FRONIUS PRIMO 3.0-1 com 25% da potência de saída



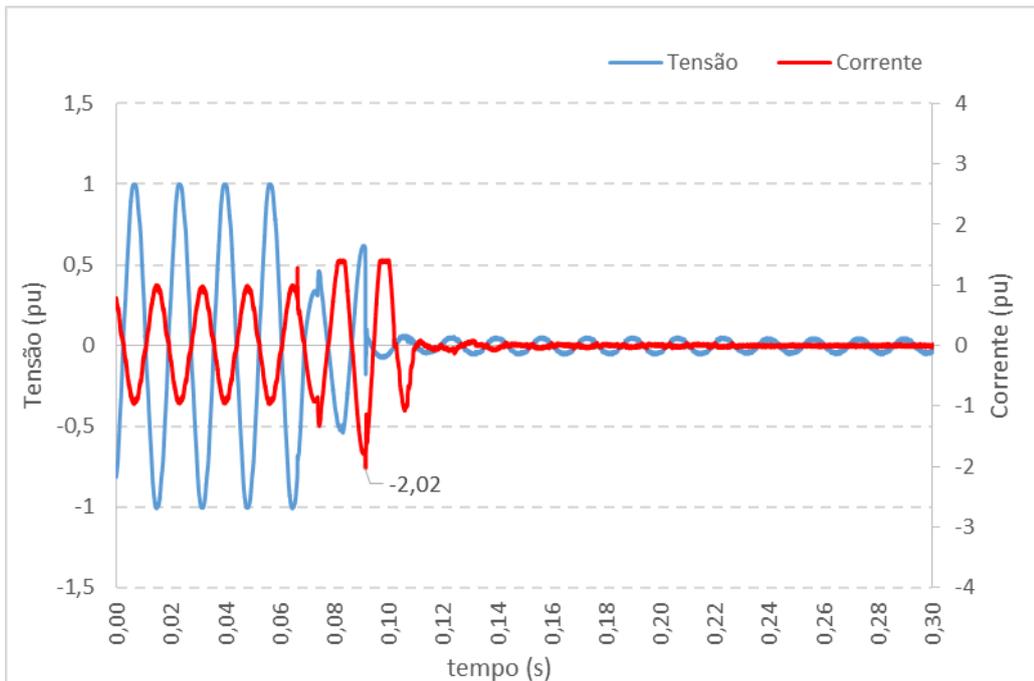
Fonte: Autor

Figura 30 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor FRONIUS PRIMO 3.0-1 com 50% da potência de saída



Fonte: Autor

Figura 31 – Formas de onda de corrente e tensão do inversor FRONIUS PRIMO 3.0-1 com 100% da potência de saída



Fonte: Autor

Analisando primeiramente a condição de 25% da potência de saída (Figura 29), após a tensão da rede tornar-se 5% do valor nominal (11V) o inversor continuou contribuindo com o curto durante aproximadamente 10 ciclos. Pela análise do gráfico do comportamento da corrente nesse inversor, é possível perceber que, na condição de 25%, ocorreu um pico de cerca 2,8 pu no instante que ocorreu o curto-circuito.

Já na condição de 50% da potência de saída (Figura 30), o inversor também contribuiu por aproximadamente 10 ciclos e o pico de corrente foi levemente menor (2,6 pu) do que se comparado a condição de 25%.

Por fim, na condição de plena geração (100%), o inversor teve comportamento um pouco melhor sendo que contribuiu por aproximadamente de 3 ciclos. Nessa condição, o pico máximo foi de aproximadamente 2 pu. Nos três casos a forma de onda das correntes sofreu elevada distorção.

Neste inversor em particular, foi possível perceber que, entre as três condições de geração, a maior contribuição em termos de tempo de duração foi na condição de 25% e 50% de geração. A condição de plena geração foi a que apresentou um melhor comportamento sob o ponto de vista de proteção pois foi a que apresentou menor pico de corrente e permaneceu contribuindo no menor intervalo de tempo.

4 CONCLUSÃO

De acordo com os experimentos realizados com os inversores descritos na Tabela 1, foi possível ter uma visualização da contribuição durante a ocorrência de curtos-circuitos.

O sistema de ensaio se mostrou eficaz e foi capaz de simular condições que podem ocorrer em redes de distribuição. Por meio dos dados coletados, foi possível realizar a interpretação gráfica nos termos das contribuições dos inversores com curto-circuito. A visualização das formas de onda de corrente e tensão permitem uma análise do impacto que a rede e demais consumidores sofreriam.

Pode-se perceber que na ocorrência de um curto-circuito, a contribuição de corrente dos inversores difere-se devido a marca dos equipamentos bem como a condição de geração. Alguns inversores apresentaram comportamento semelhante no que diz respeito a característica da forma de onda da corrente, como pode ser visto nas figuras que apresentam o comportamento dos inversores Growatt, REFUone e Solis.

Outros inversores apresentaram forma de onda de corrente bastante distorcida e com elevado conteúdo harmônico, como pode ser visto nas figuras que apresentam o

comportamento dos inversores APSystems, Hoymiles e Fronius. Já os inversores Sunny Boy e ABB apresentaram formas de ondas semelhantes e com menor duração de tempo.

Todos os inversores obedeceram às normas e critérios estabelecidos para função anti-ilhamento. Entretanto, os resultados apresentados mostram que, apesar de cumprirem os critérios estabelecidos, os inversores dos sistemas fotovoltaicos podem contribuir com o curto-circuito existente na rede. É possível verificar que alguns inversores chegaram a contribuir com pico de corrente de aproximadamente 7 pu. Além disso, o inversor Growatt permaneceu injetando potência na ocorrência do curto por aproximadamente 48 ciclos.

Por fim, uma sugestão para trabalhos futuros se baseia no estudo dos circuitos eletrônicos responsáveis por identificar a falta de tensão e desacoplamento elétrico do inversor. Dessa forma, pode-se pesquisar e desenvolver novas técnicas de controle capazes de fazer identificação e desconexão dos inversores da rede em menor intervalo de tempo. Além disso, podem ser desenvolvidas novas estratégias de reduzir a contribuição da corrente no que se refere a amplitude.

5 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2022). **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 03 de agosto de 2022.

AYRÃO, V. (2018). **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. 1 ed. Rio de Janeiro: Internacional Copper Association Brazil.

ITECH (2022). **IT6000C Bidirectional Programmable DC Power Supply**. Disponível em: <https://www.ohmini.com.br/downloads/catalogos/fonte-bidirecional/Catalogo-IT6000C.pdf>. Acesso em: 03 de agosto de 2022.