



VIII IEEE ESW-Brasil 2019

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

16 a 18 de julho de 2019 – Salto, SP

SISTEMA PARA ENSAIO DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS DE ACORDO COM A NORMA IEC 62109-2

Henrique Bizzi Morari
Universidade Federal de Santa Maria
henriquemorari@gmail.com

Lucas Vizzotto Bellinaso
Universidade Federal de Santa Maria
lucas@gepoc.ufsm.br

Leandro Michels
Universidade Federal de Santa Maria
michels@gepoc.ufsm.br

RESUMO

A segurança do usuário é uma das principais preocupações ligadas a sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem transformador. Para garantir a proteção contra incêndio e choque elétrico, a norma IEC 62109-2 requer a avaliação através de ensaios de resistência de isolamento e da corrente residual dos inversores fotovoltaicos. Para tanto, os testes empregam uma carga RC variável conectada ao lado c.c. do inversor. Embora essas cargas sejam fundamentais para os ensaios de segurança de sistemas fotovoltaicos, não foram encontrados estudos relacionados às topologias dessa carga RC, estudos de caso apresentando resultados experimentais, bem como estudos de parâmetros que podem impactar na repetibilidade dos resultados. Este artigo propõe o uso de uma carga RC chaveada eletronicamente, e estuda a possibilidade de parâmetros de ensaio influenciarem na medida de corrente residual. A carga RC proposta foi validada experimentalmente e se mostraram adequados para a realização dos ensaios de segurança. Além disso, um inversor fotovoltaico monofásico sem transformador foi ensaiado para verificar a sensibilidade do ensaio de corrente residual a características de formas de onda de tensão c.a. Resultados de tempo de atuação do inversor mostraram-se sensíveis à fase da tensão c.a. no qual a falha ocorre, parâmetro de ensaio que não é abordado na IEC 62109-2. Portanto, dependendo das características do inversor sendo ensaiado, a definição dos parâmetros de ensaio é importante para garantir a repetibilidade dos resultados.

1.0 – INTRODUÇÃO

Inversores fotovoltaicos sem transformador têm sido amplamente adotados para aumentar a eficiência e reduzir os custos de sistema fotovoltaico. Grande parte das topologias de inversores sem transformador caracterizam-se por elevada corrente de fuga de modo comum [1]. Essa corrente de fuga dificulta a detecção de choques elétricos no lado c.c. e pode aumentar o risco de incêndio.

Para minimizar os problemas de segurança, a norma IEC 62109-2 [2] define requisitos e procedimentos de teste para inversores fotovoltaicos conectados à rede. Os procedimentos de teste de corrente de fuga definidos pela IEC 62109-2 requerem uma carga RC variável. A literatura científica apresenta poucos trabalhos sobre sistemas de teste de corrente de fuga de inversores fotovoltaicos. As patentes [3]-[7] empregam diferentes métodos de variação de carga para realizar este teste, como reostatos eletromecânicos, semicondutores operando na região linear e comutação mecânica entre cargas fixas. Em [8], o autor propõe uma carga resistiva variável usando resistências ponderadas para realizar testes dinâmicos de fontes de energia. Em [9], uma carga resistiva com resistências ponderadas foi usada para controlar a frequência de um micro-gerador hidráulico. Nenhum estudo foi encontrado com resultados experimentais de um sistema de teste de segurança com inversores fotovoltaicos.

Este artigo aborda dois grupos de testes exigidos pela IEC 62109-2: testes de resistência de isolamento e testes de corrente de fuga. Uma carga RC comutada de estado sólido foi desenvolvida para realizar todos esses testes. A solução proposta é composta de resistências ponderadas e capacitâncias, similares às cargas de [8] e [9], usando dispositivos de comutação com

semicondutores. Este método de controle de carga é diferente daqueles reivindicados nas patentes registradas [3]-[7], e tem a vantagem de controlar a resistência e a capacitância através de software supervisor. Resultados experimentais foram obtidos para validar a carga RC proposta. Além disso, um inversor fotovoltaico comercial monofásico sem transformador foi testado com os procedimentos da norma IEC 62109-2 [2]. A sensibilidade dos tempos de atuação da proteção contra choque elétrico do inversor ao ângulo da tensão da rede durante o qual ocorre falta também foi avaliada.

As principais contribuições deste estudo são: i) propor uma nova topologia de carga RC a ser aplicada nos testes de resistência de isolamento e corrente de fuga da IEC 62109-2; ii) analisar os parâmetros de teste, como tensão c.c., tensão c.a. e ângulo de fase c.a. em que a falha ocorre e sua influência nos resultados de teste de um inversor fotovoltaico monofásico sem transformador. Este estudo é importante para a indústria de inversores fotovoltaicos, laboratórios de teste e comitês de normas técnicas.

2.0 – NORMA IEC 62109-2

A norma IEC 62109-2 trata de requisitos de segurança e procedimentos de ensaio para inversores fotovoltaicos autônomos (*off-grid*) e conectados à rede (*grid-tie*).

2.1 – RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO

Para inversores não isolados, a norma determina que antes de o inversor iniciar sua operação e conectar-se à rede, o mesmo deve medir a resistência entre a entrada do módulo fotovoltaico e a terra. Se o valor da resistência de isolamento medido for inferior a $(V_{PV,max} / 30 \text{ mA}) \Omega$, onde $V_{PV,max}$ é a tensão de entrada máxima do inversor, o inversor deve indicar a ocorrência de uma falta e não se conectar à rede. Dessa maneira, evita-se a conexão do inversor com a rede na ocorrência de diversos problemas como aterramento indevido do lado c.c., falha de isolamento, contato humano com terminal do sistema fotovoltaico, entre outros. Caso a resistência mude para um valor superior ao limite permitido, é permitida a conexão com a rede.

O ensaio para verificar se o inversor cumpre os requisitos de proteção contra resistência de isolamento consiste na inserção de uma resistência conectada entre os terminais do sistema fotovoltaico e a terra. O inversor é aprovado no requisito caso indique a falha na isolamento e não se conecte quando a resistência inserida é inferior à permitida.

2.2 – CORRENTE RESIDUAL

Inversores não isolados devem monitorar constantemente o valor eficaz (rms) da corrente de fuga sempre que estiverem conectados à rede.

Para inversores com potência de até 30 kW, se a corrente de fuga medida apresentar um valor eficaz constante superior a 300 mA, o mesmo deve desconectar-se da rede. Inversores de potência superior a 30 kW devem desconectar-se ao medir uma corrente de fuga constante superior a 10 mA por kW de potência. A desconexão com a rede deve ocorrer em no máximo 0,30 s e a falha deve ser indicada pelo inversor. O inversor pode reconectar-se à rede se medir uma resistência de isolamento superior ao limite.

Conforme definido em [2], o inversor deve desconectar-se da rede caso detecte uma elevação súbita no valor rms da corrente de fuga. A Tabela 1 apresenta os valores e de variação e os respectivos tempo máximo de desconexão.

TABELA 1. TEMPO DE DESCONEXÃO, DEFINIDO PELA NORMA, DEVIDO À AUMENTOS RÁPIDOS NA CORRENTE RESIDUAL

Magnitude da variação súbita da corrente de fuga	Tempo máximo para desconexão
30 mA	0,3 s
60 mA	0,15 s
150 mA	0,04 s

A Fig. 1 apresenta o circuito elétrico indicado pela norma IEC 62109-2 a ser empregado nos ensaios. O procedimento para ensaiar a proteção contra corrente de fuga constante excessiva, indicado pela norma, segue os seguintes passos:

- Uma resistência ajustável é conectada entre a terra e um dos terminais de entrada do inversor;
- A resistência é reduzida lentamente até que a corrente de fuga do inversor exceda o limite máximo e o inversor desconecte-se da rede;
- A resistência é ajustada para conduzir uma corrente de fuga de aproximadamente 10 mA inferior à corrente em que a proteção atuou;
- Outra resistência é conectada em paralelo, ajustada para conduzir uma corrente de fuga de aproximadamente 20 mA.

No passo “b” é obtido o valor da corrente de fuga em que a proteção do inversor atua, que deve ser inferior àquela definida na norma. No passo “c” é obtido o tempo de atuação da proteção do inversor. O tempo de atuação deve ser medido a partir do momento em que a segunda resistência é inserida até o momento em que a corrente chega a zero.

Para ensaiar a proteção contra variações bruscas na corrente de fuga, o procedimento é o seguinte:

- Um capacitor variável é conectado entre um dos terminais de entrada do inversor e a terra;
- O valor da capacitância é aumentado até que o inversor desconecte da rede devido à corrente de fuga constante excessiva;
- A capacitância é, então, reduzida de forma que a corrente de fuga seja aproximadamente 150% do valor da variação de corrente sendo testada (45 mA para o teste de variação de 30 mA, 90 mA para o teste de 60 mA e 225 mA para o teste de 150 mA) inferior à corrente em que a proteção atuou;
- Uma resistência variável, ajustada para conduzir 30 mA, 60 mA ou 150 mA é conectada em paralelo com o capacitor.

O tempo de atuação da proteção do inversor deve ser medido a partir do momento em que a resistência é conectada até o momento em que a corrente vai a zero. O ensaio deve ser realizado para os três valores de corrente definidos na Tabela 1 (30 mA, 60 mA e 150 mA).

Por fim, destaca-se que caso ocorra a desconexão do inversor pelos motivos expostos nessa seção, o mesmo pode reconectar-se à rede quando identificar que identifique que a resistência de isolamento é superior ao limite mínimo estabelecido em [3]. Para tanto, é necessário realizar um procedimento de medição da resistência de isolamento.

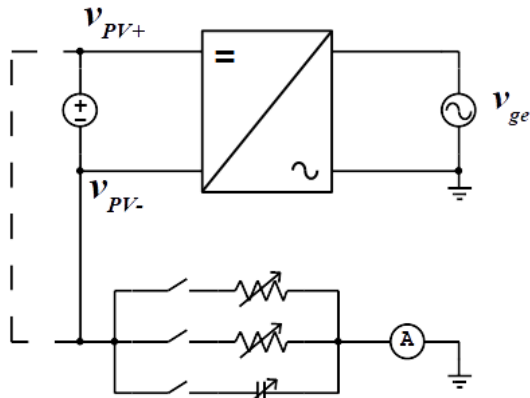


Fig. 1 - Carga RC variável conectada no lado CC do inversor fotovoltaico, de acordo com IEC 62109-2.

3.0 – SISTEMA DE ENSAIO

O sistema de ensaio desenvolvido neste trabalho é composto por uma carga RC variável controlada eletronicamente e um sistema supervisor, como mostrado na Fig. 2. O hardware desenvolvido permite a verificação dos requisitos apresentados nas Seções 2.1 e 2.2.

3.1 – CARGA RC VARIÁVEL

Em [8], é proposta uma carga resistiva variável controlada eletronicamente, utilizando 8 resistores em série, com valores de resistência em escala binária, ou seja, se a primeira resistência for de R , as outras serão de $2 \cdot R$, $4 \cdot R$, $8 \cdot R$, e assim por diante. Com 10 resistores, é possível obter 1024 diferentes combinações de resistências.

Neste trabalho, as resistências e capacitâncias também é utilizada a escala binária, porém os elementos são conectados em paralelo. São empregadas 10 resistências acionadas por chave semicondutora bidirecional, totalizando 1024 combinações. Na carga capacitiva, são empregadas 8 capacitâncias acionadas por triac, totalizando 256 combinações.

Os valores das resistências R_n do circuito da Fig. 3(a) são definidos por (6), e as capacitâncias C_n do circuito da Fig. 3(b) por (7). R e C são a resistência e a capacitância bases para a definição dos resistores e capacitores utilizados no circuito. $d_{R,n}$ e $d_{C,n}$ representa o estado de cada chave do circuito, e pode assumir os valores 0 (chave aberta) e 1 (chave fechada). As correntes de fuga através das cargas resistiva e capacitiva são calculadas pelas expressões (8) e (9), respectivamente. A corrente de fuga total é a soma das correntes nas duas cargas, como em (10).

$$R_n = R / 2^n \quad (6)$$

$$C_n = C \cdot 2^n \quad (7)$$

$$i_{cm,rms,R} = \sum_{n=0}^7 \left[v_{cm,rms} \cdot d_{R,n} \cdot \frac{2^n}{R} \right] \quad (8)$$

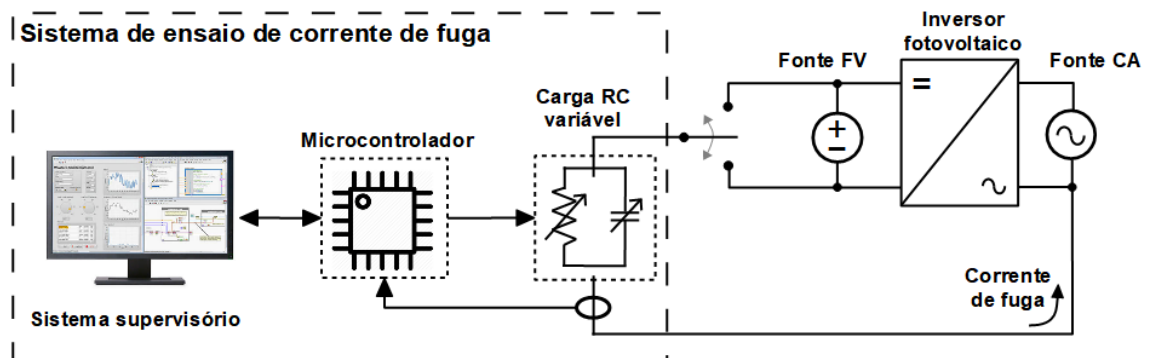


Fig. 2 - Sistema de ensaio.

$$i_{cm,rms,C} = \sum_{n=0}^7 [v_{ge,rms} \cdot \pi \cdot f \cdot d_{C,n} \cdot C \cdot 2^n] \quad (9)$$

$$i_{cm,rms,C} = i_{cm,rms,C} + i_{cm,rms,C} \quad (10)$$

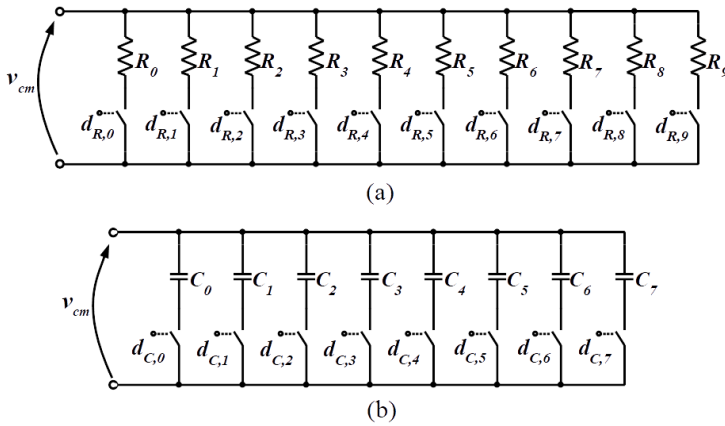


Fig. 3 - Carga RC projetada: (a) carga resistiva; (b) carga capacitiva.

Dessa forma, as cargas resistiva e capacitiva podem apresentar 256 valores diferentes de resistência e capacitância equivalentes, que podem, teoricamente, ser variadas de forma linear, dependendo do estado das chaves semicondutoras que controlam a condução de cada elemento.

4.2 – SISTEMA SUPERVISÓRIO

A carga RC é controlada através do Kit de desenvolvimento FRDM KL25z, da fabricante NXP, e de um software supervisor desenvolvido em Labview. O microcontrolador KL25z possui as seguintes funções:

- Amostrar a corrente de fuga medida em um sensor de efeito hall de 300 ma.
- Calcular o valor médio e RMS da corrente de fuga através de janela móvel.
- Obter o ângulo instantâneo da tensão da rede.
- Comunicar-se com o software supervisor através de comunicação serial.
- Enviar comando às chaves semicondutoras para acionar as combinações de resistência e capacitância;

O sistema supervisor Labview possui as seguintes funções:

- Receber do KL25z o valor RMS e valor médio da corrente de fuga.
- Aplicar os procedimentos dos ensaios da norma IEC 62109-2.
- Enviar a resistência e capacitância desejada para o microcontrolador KL25z.

4.0 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram realizados para: i) validar a carga RC desenvolvida, testando a resolução e o alcance da corrente através da carga; ii) obter os possíveis valores de resistência da carga, para a realização de ensaios de resistência de isolamento; iii) aplicar os ensaios da IEC 62109-2 em um inversor FV monofásico sem transformador comercial, estudando também a influência de parâmetros de teste nos resultados.

4.1 – RESULTADOS PARA A CARGA RC

A fim de validar o funcionamento da carga RC desenvolvida, foi aplicada uma tensão CA 60 Hz nos terminais da carga. A corrente na carga resistiva e na carga capacitiva foi variada continuamente de zero até o valor máximo, com o objetivo de avaliar a faixa de operação da carga.

A carga resistiva foi testada aplicando-se uma tensão de 150 V_{rms}. Na Fig. 4 é mostrada a variação contínua do valor rms da corrente na carga resistiva. Observa-se que a corrente é variada de 0 a 366,14 mA. Os degraus de corrente são de 360 µA, devido à resolução de 10 bits. Essa faixa de operação permite o ensaio de inversores de até 35 kW de potência.

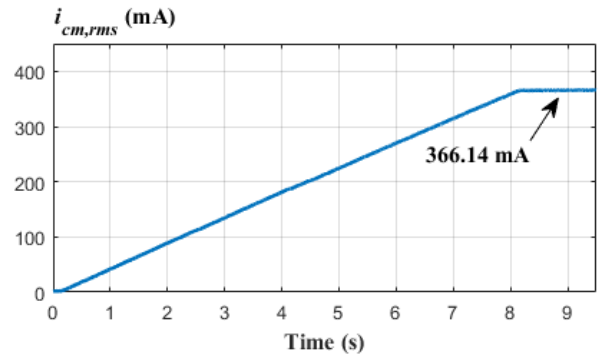


Fig. 4 - Faixa de operação da resistência, para tensão aplicada de 150 V_{rms}.

A carga capacitiva foi testada com uma tensão de 110 V_{rms}, que é a tensão alternada aplicada na carga capacitiva para ensaio de inversores monofásicos de topologia ponte completa com saída CA em 220 V_{rms} [11]. Na Fig. 5 é mostrada a variação contínua do valor rms da corrente na carga capacitiva. Observa-se que a corrente é variada, de 0 a 413,18 mA. Os degraus de corrente são de 1,63 mA, devido à resolução de 8 bits.

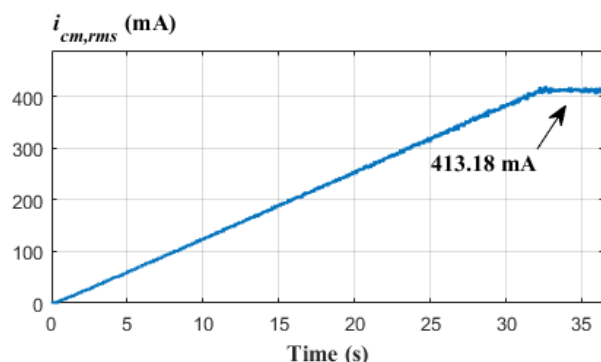


Fig. 5 - Faixa de operação da resistência, para tensão aplicada de 110 V_{rms}.

4.2 – RESULTADOS DE ENSAIO DE INVERSOR

O sistema desenvolvido foi utilizado no ensaio de um inversor fotovoltaico monofásico sem transformador. Os dados de placa do inversor são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. DADOS DE PLACA DO INVERSOR.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	1,5 kW
Tensão c.a. nominal	220 V (rms) / 60 Hz
Faixa de tensão MPPT	125 V – 400 V
Tensão MPP nominal	360 V
Tensão c.c. máxima	450 V

Para a realização do ensaio, os terminais da carga RC foram conectados entre o pólo positivo da entrada do inversor e o terminal de neutro da saída. Para o inversor apresentado foram realizados os ensaios de corrente de fuga constante e de variação rápida de corrente de fuga. Foram avaliados o nível de corrente em que o inversor se desconecta, e os seus tempos de atuação para cada ensaio.

4.2.1 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO

Os procedimentos do ensaio de resistência de isolação foram aplicados ao inversor. De acordo com o procedimento, a carga resistiva foi setada para o valor de 15 kΩ, aplicando-se a máxima tensão de entrada CC (450 V) com o inversor desligado. O inversor não se conectou à rede elétrica e acusou falha de isolamento na entrada CC. Assim, o equipamento foi aprovado no ensaio.

4.2.2 – ENSAIO DE CORRENTE DE FUGA CONSTANTE

Para o ensaio de corrente de fuga constante, foram obtidos os valores do *trip level* (nível de corrente de fuga constante em que o inversor desconectou) e do *trip time* (tempo em que a proteção do inversor atua após a corrente atingir o *trip level*). A Fig. 6 mostra o valor da corrente de fuga do inversor durante a primeira etapa do ensaio, em que a corrente é variada continuamente, através da carga resistiva, até que se desconecte, e a corrente vá a zero. O valor obtido para o *trip level* foi de 127 mA, inferior aos 300 mA que a IEC 62109-2 define como limite.

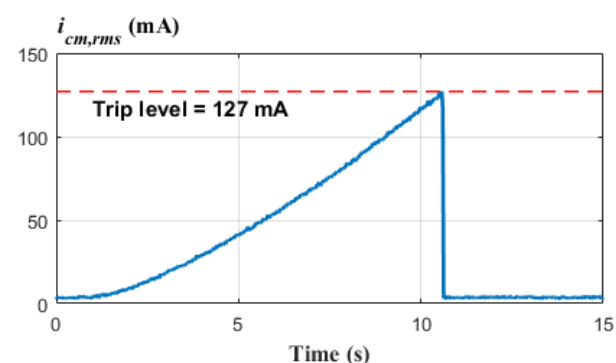


Fig. 6 - Valor rms da corrente de fuga durante o ensaio de corrente de fuga constante.

Na segunda etapa do ensaio, a corrente foi mantida próxima ao *trip level*, com o inversor conectado, e, então, a resistência foi reduzida de modo que a corrente ultrapassasse o *trip level*. O *trip time* é contado a partir do momento da redução da resistência, até o momento em que a corrente vai a zero. A Fig. 7 mostra a forma de onda da corrente, e o seu valor rms, no instante da desconexão. O tempo obtido foi de 42,34 ms, inferior ao limite de 300 ms da norma.

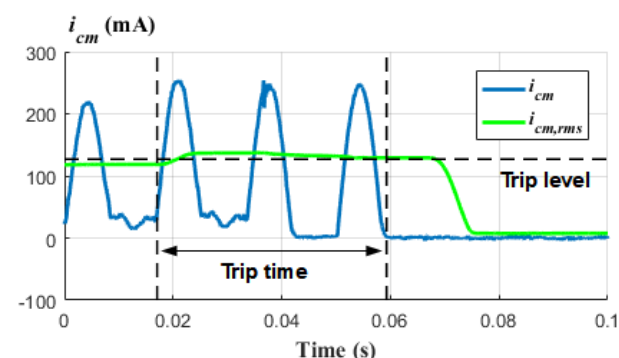


Fig. 7 - Forma de onda da corrente durante o teste de *trip time* para corrente de fuga constante.

4.2.3 – ENSAIO DE VARIAÇÃO RÁPIDA DE CORRENTE

O ensaio de variação rápida de corrente de fuga foi realizado de acordo com o procedimento da norma, para a obtenção dos tempos de atuação da proteção inversor para aumentos rápidos de 30 mA e 60 mA na corrente de fuga.

Com a carga capacitiva conduzindo uma corrente de 82 mA, foi provocada bruscamente a condução de 30 mA através da carga resistiva. O *trip time* obtido foi de 207,43 ms, inferior ao limite de 300 ms da norma. A Fig. 8 mostra a forma de onda da corrente de fuga do inversor no momento da desconexão.

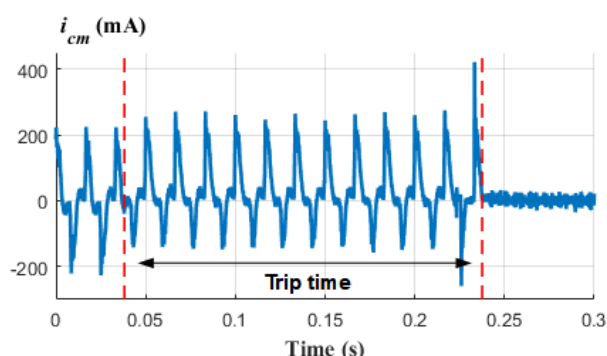


Fig. 8 - Forma de onda da corrente para o ensaio de variação rápida de 30 mA.

Com a carga capacitiva conduzindo uma corrente de 37 mA, foi provocada bruscamente a condução de 60 mA através da carga resistiva. O *trip time* obtido foi de 90,14 ms, inferior ao limite de 300 ms da norma. A Fig. 9 mostra a forma de onda da corrente de fuga do inversor no momento da desconexão.

Não foi possível realizar o ensaio de variação rápida de 150 mA, pois no ensaio de corrente constante da seção 4.2.1, verificou-se o inversor desconecta com 127 mA, inferior a 150 mA. Assim, considera-se que o inversor está automaticamente aprovado no ensaio de variação rápida de 150 mA.

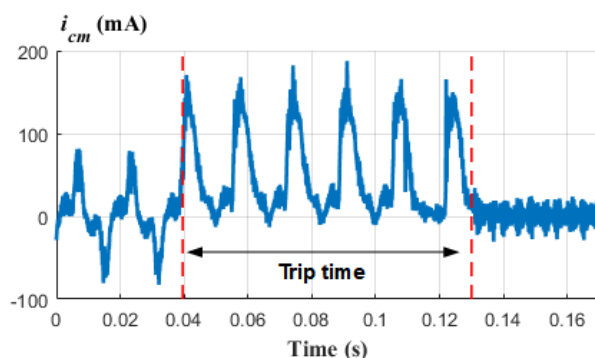


Fig. 9 - Forma de onda da corrente para o ensaio de variação rápida de 60 mA.

4.2.3 – SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS AO ÂNGULO DA TENSÃO DA REDE

De acordo com a norma IEC 62109-2, os ensaios mostrados anteriormente devem ser repetidos cinco vezes, e o inversor deve ser aprovado todas as vezes. Porém, a norma não especifica o instante que deve ser realizada a comutação da resistência nos ensaios de *trip time*. O instante de comutação está relacionado ao ângulo da tensão da rede elétrica em que ocorre a comutação da resistência no lado CC. Assim, o inversor fotovoltaico foi ensaiado cinco vezes para cada um dos seguintes ângulos da tensão da rede: 0°, 90°, 180° e 270°. Os resultados são apresentados na Fig. 10. Os resultados de *trip time* foram analisados através da análise estatística da variância (ANOVA), empregando um nível de significância de 5% [12]. Os seguintes resultados foram obtidos para os ensaios:

- **Ensaio de corrente constante:** o *trip time* foi estatisticamente sensível ao ângulo da tensão da rede em que ocorre a falta. O maior *trip time* (50-60 mA) ocorre para o ângulo de 90°, e o menor *trip time* (42 mA) para o ângulo de 0°. Assim, considera-se que o pior caso ocorre para o ângulo de 90°.

- **Ensaio de variação de corrente de 30 mA e 60 mA:** em ambos os ensaios, não houve diferença estatística nos resultados de *trip time* em função do ângulo da tensão da rede em que ocorre a comutação da resistência. Assim, não existe um ângulo que possa ser considerado como pior caso.

A partir dos resultados da análise estatística do inversor monofásico ensaiado, verifica-se que os resultados de ensaios da IEC 62109-2 podem efetivamente depender do ângulo da tensão da rede em que ocorre a comutação da resistência no lado CC. Assim, é necessário, para cada inversor analisado, encontrar os piores casos de pontos de operação a fim de garantir maior repetibilidade dos ensaios.

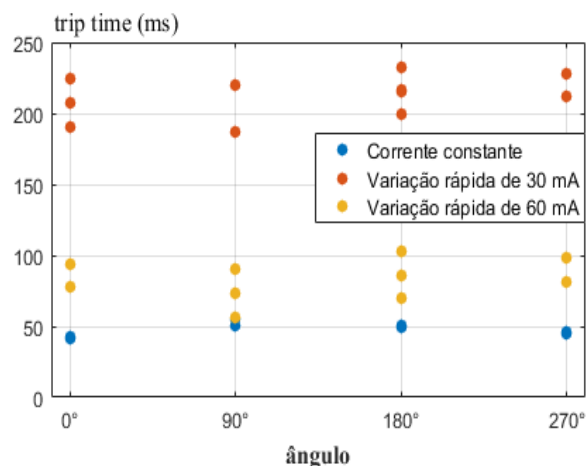


Fig. 10 - Resultados de *trip time* em função do ângulo instantâneo da tensão da rede em que ocorre

6.0 – CONCLUSÕES

A corrente de fuga é um grande problema de segurança em inversores fotovoltaicos. Esse trabalho apresentou as causas do problema e os requisitos da norma IEC 62109 referentes à proteção contra a corrente de fuga em inversores fotovoltaicos, bem como os procedimentos para a realização de ensaios a fim de certificar a adequação dos inversores aos requisitos de segurança.

Nesse trabalho foi apresentado um sistema para ensaio de inversores fotovoltaicos de acordo com os procedimentos descritos na IEC 62109. Para isso foram desenvolvidos uma carga RC variável, e um sistema supervisorio.

Através de resultados experimentais, a solução de sistema de ensaio desenvolvida se mostrou adequada. Com a carga RC desenvolvida para é possível realizar ensaios de corrente de fuga de inversores de até 35 kW.

Foram apresentados resultados de ensaios de corrente de fuga em um inversor fotovoltaico comercial, utilizando o sistema desenvolvido, o qual foi aprovado nos testes. Além disso, foi analisado o comportamento do inversor frente a diferenças no ângulo de fase da tensão da rede em determinadas etapas dos ensaios. Dessa forma é possível determinar o ponto de operação do inversor em que o seu comportamento é menos satisfatório, e, assim, garantir a repetibilidade dos resultados.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. S. Figueredo, K. C. M. de Carvalho, N. R. N. Ama, and L. Matakas, "Leakage current minimization techniques for single-phase transformerless grid-connected PV inverters — An overview," in *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, 2013, pp. 517–524.
- [2] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Safety of power converters for use in photovoltaic power systems. Part 2 - Particular requirements for inverters. IEC 62109-2, 2011.
- [3] SHANGHAI ELECTRICAL APPARATUS RES INST GROUP CO LTD. GUO XINXIN; LI XINQIANG; ZHENG LUHAI; WANG AIGUO; JU DINGLI. Tester for detecting residual current of photovoltaic grid-connected inverter. CN203929851, 05 nov. 2013.
- [4] GLARUN POWER CO LTD. HU XU; PEI LE. Test platform for small photovoltaic grid-connected inverter. CN202870278, 10 abr. 2013.
- [5] GUANGDONG EAST POWER CO LTD. CHEN SHUSHENG. Photovoltaic inverter leakage current protection action test device. CN105223519, 06 jan. 2016.
- [6] ZHONGNENG YIDIAN NEW ENERGY TECH CO LTD. CHEN SHUSHENG. Photovoltaic inverter leakage current protection motion automatic testing device. CN105445590, 30 mar. 2016.
- [7] GUANGZHOU SANJING ELECTRIC CO. SANFU MO. Residual current and insulation test system of grid-connected inverter. CN202362435U, 01 ago. 2012.
- [8] Oliveira, R. G., Ferreira, L. H. C., & Ribeiro, E. R. (2017). Modeling and simulation of controllable AC series resistive load. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257311>
- [9] Castillo, G., Ortega, L., Pozo, M., & Dominguez, X. (2016). Control of an island Micro-hydropower Plant with Self-excited AVR and combined ballast load frequency regulator. In *2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETCM.2016.7750868>
- [10] Vazquez, N., Rosas, M., Hernandez, C., Vazquez, E., & Perez-Pinal, F. J. (2015). A New Common-Mode Transformerless Photovoltaic Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), 6381–6391. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2426146>
- [11] Morari, H. B., Bellinaso, L. V., Frohlich, R., (2018). Leakage current testing system applied to photovoltaic inverters – design and simulation. In *2018 11th Seminar on power electronics and control (SEPOC)*.
- [12] Sawyer, S. F. Analysis of Variance: The Fundamental Concepts. *The Journal of Manual & Manipulative Therapy* Vol. 17 No. 2 (2009), E27-E38.