

PROPOSTA DE UMA NOVA ESTRATÉGIA ATIVA DE ANTI-ILHAMENTO BASEADA EM REALIMENTAÇÃO POSITIVA DE FREQUÊNCIA

Ênio C. Resende¹, Henrique T. M. Carvalho¹, Ernane A. A. Coelho¹, Luiz C. G. Freitas¹

¹Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), Uberlândia-MG, Brasil
e-mails: eniocostaresende@gmail.com, lcgfreitas@yahoo.com.br

Resumo – O fenômeno do ilhamento ocorre quando um Sistema de Geração distribuída permanece energizado após a interrupção da rede da concessionária. A ocorrência de ilhamento não intencional pode acarretar em diversos problemas relacionados à segurança dos usuários e operadores do sistema elétrico e perda da qualidade de energia elétrica. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um novo método ativo de Proteção Anti-Ilhamento (PAI) com realimentação positiva de frequência. Para atestar a efetividade da estratégia, será realizado um estudo comparativo entre o algoritmo proposto e outras técnicas conhecidas na literatura: *Active Frequency Drift* (AFD), *Sandia Frequency Shift* (SFS) e uma variante do AFD proposta em 2013. Os ensaios experimentais serão realizados empregando um inversor CC-CA de 1 kW, a rede da concessionária e uma carga RLC, projetada segundo as recomendações da norma ABNT NBR 62116. Os resultados obtidos comprovarão que a técnica proposta apresenta uma redução da Zona de Não de Detecção, do tempo de detecção do ilhamento e do conteúdo harmônico inserido na corrente de saída do inversor.

Palavras-Chave – *Anti-Ilhamento, Desvio de Frequência, Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Tempo de Detecção, Zona de Não Detecção.*

PROPOSAL OF A NEW ACTIVE ANTI-ISLANDING STRATEGY BASED ON POSITIVE FREQUENCY FEEDBACK.

Abstract – The islanding phenomenon occurs when a distributed generation system remains energized after the utility grid interruption. The occurrence of unintentional islanding can lead to several problems related to the safety of users and operators of the electrical system and loss of power quality. In this context, this work presents a new active method of Anti-Islanding Protection (AIP) with positive frequency feedback. In order to attest the strategy's effectiveness, will be performed a comparative analysis between the proposed algorithm and other techniques known in the literature: *Active Frequency Drift* (AFD), *Sandia Frequency Shift* (SFS) and a variant of AFD proposed in 2013. Experimental tests will be carried out employing a 1 kW DC-AC inverter, the utility grid and an RLC load, designed according to the ABNT

NBR 62116 recommendations. The results obtained will prove that the proposed technique presents a reduction of the Non-Detection Zone, the time of islanding detection and harmonic content of the inverter current.

Keywords – *Anti-Islanding, Detection Time, Frequency Drift, Grid Tied Photovoltaic Systems, Non-Detection Zone*

NOMENCLATURA

C	Capacitância da Carga.
C_f	Capacitância do Filtro LCL.
C_{min}, C_{max}	Curvas Limitrofes da ZND.
C_{norm}	Capacitância Normalizada.
c_f, c_{f_0}	Fator de Corte e Fator de Corte Inicial.
f	Frequência nominal da rede.
f'	Frequência do sistema após implementação do método AFD.
f_{min}, f_{max}	Frequências mínima e máxima permitida pelos textos normativos.
f_0	Frequência de Ressonância.
f_{pll}	Frequência medida pelo PLL.
i_{AFD}	Referência de corrente distorcida.
i_{inv}	Corrente de saída do inversor.
I_{pic}	Pico de corrente.
I_{rede}	Corrente da rede.
K	Ganho da realimentação de frequência.
Q_f	Fator de qualidade da carga.
L	Indutância da carga.
$L1, L2$	Primeira e segunda indutância do filtro LCL.
R	Resistência da carga.
R_f	Resistência de amortecimento.
R_{L1}, R_{L2}	Resistência de L1 e L2.
t, t_z	Tempo / Tempo morto.
T	Período.
θ_{inv}	Fase da corrente do inversor.
V_{cc}	Tensão do barramento CC.
V_{ent}	Tensão de entrada do inversor.
V_{inv}	Tensão de saída do inversor.
V_{min}, V_{max}	Tensões mínima e máxima permitida pelos textos normativos.
V_{rede}	Tensão da rede.
θ_z, θ_{z_0}	Salto de fase/Salto de fase inicial.
ω	Velocidade angular da rede.
$\omega_{min}, \omega_{max}$	Velocidades angulares mínima e máxima permitida pelos textos normativos.

I. INTRODUÇÃO

A adoção de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) deve obedecer a critérios de qualidade de energia elétrica e de segurança dos operadores e usuários estabelecidos pelas normas vigentes. Esses documentos têm por finalidade estipular os limites de tensão, frequência, Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTi) e Tensão (DHTv) e fator de potência em que o inversor deve operar para evitar a degradação da qualidade de energia elétrica, além dos pré-requisitos para evitar acidentes elétricos e danos aos equipamentos conectados à rede elétrica. Um dos principais tópicos de segurança elétrica abordados por essas recomendações é a proteção Anti-Ilhamento (PAI) [1]-[4].

O ilhamento ocorre quando o SFCR permanece energizado mesmo após a desconexão da rede da concessionária [2]. A operação ilhada pode acarretar no aumento da DHTv no PAC (em virtude das interações entre a corrente do inversor e a impedância da carga), acidentes com trabalhadores e usuários do sistema elétrico, oscilações de frequência e tensão. Além disso, se o SFCR permanece operando de forma ilhada, é possível que a reconexão da rede ocorra fora de sincronismo com o sistema de Geração Distribuída [5].

Dessa forma, a pesquisa acadêmica e industrial concentrou esforços, ao longo das últimas décadas, para propor algoritmos capazes de detectar a desconexão da rede e promover o rápido desligamento do inversor em operação ilhada. Torna-se necessário, portanto, categorizá-los de acordo com suas características essenciais. Nesse contexto, as estratégias de PAI podem ser divididas entre Passivas e Ativas [6].

Os métodos passivos são caracterizados pelo puro monitoramento de alguma grandeza elétrica de operação do inversor e pelo consequente desligamento do mesmo caso alguma anormalidade seja detectada por tempo suficiente [7]. Dentre os principais representantes desse grupo de soluções destacam-se: a detecção de tensão e frequência [8], a detecção do salto de fase [9], detecção da distorção harmônica [10], detecção da taxa de variação da frequência [11] ou tensão [12]. As principais vantagens dessas estratégias residem no fato de não serem intrusivas em relação à qualidade de energia elétrica, ou seja, não inserem nenhuma distorção nas grandezas elétricas de operação do inversor conectado à rede [13]. No entanto, os métodos passivos se mostram ineficazes para detectar a desconexão da rede quando existe um equilíbrio entre a geração de energia fotovoltaica e a potência demandada pelas cargas locais [14].

No intuito de aprimorar as técnicas de PAI, garantindo a detecção da interrupção da rede, mesmo em condições de equilíbrio entre a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico e a exigida pelas cargas locais, foram propostas as técnicas ativas. Além do monitoramento de alguma grandeza elétrica específica, elas têm como característica a inserção de pequenas distorções nos parâmetros de operação do inversor [6]. Esses métodos, em geral, possuem como principal vantagem a redução da chamada Zona de Não Detecção (ZND), que será detalhada adiante. Dentre as principais soluções ativas, destacam-se: *Active Frequency Drift* (AFD) [15], *Sandia Frequency Shift* (SFS) [16], *Slip Mode Shift* (SMS) [17] e *Active Frequency Drift with Pulsating Chopping Factor* (AFDPCF) [18].

É necessário ressaltar que a primeira PAI ativa proposta na literatura técnica foi o AFD, caracterizado pela inserção de um tempo morto no final de cada semiciclo da corrente de saída do inversor [15]. Embora se tratasse de uma evolução em relação às soluções passivas, o método em questão era permeado de diversas desvantagens como: alta DHTi e elevada ZND. Entretanto, o AFD clássico foi a base para diversas outras estratégias de PAI's ativas. Nesse contexto, alguns autores substituem a parametrização fixa pela parametrização dinâmica. O método SFS [16], por exemplo, adiciona ao referido algoritmo uma realimentação positiva de frequência, conferindo-lhe maior robustez na detecção da desconexão da rede. Diversos trabalhos [19]-[20] demonstram que o SFS apresenta melhores resultados em termos de DHTi e tempo de detecção, além de uma redução da ZND.

Vale destacar que, em [18], é proposta a solução denominada *AFDPCF* que possui fator de corte pulsante. Apesar de uma considerável redução da ZND, o método apresenta tempo de detecção elevado em relação à outras estratégias, como o método SFS, por exemplo [21]. Por outro lado, outros autores mantêm a parametrização fixa. Em [22], por exemplo, os autores apresentam uma nova forma de distorção aplicada à corrente de saída do inversor. Foram fornecidos resultados de simulação nos quais o método proposto obteve resultados de DHTi e tempo de detecção melhores que o AFD clássico.

Diante do exposto, destaca-se que o principal objetivo deste trabalho é propor uma nova estratégia de detecção de ilhamento que combinará o método proposto em [22] com uma realimentação positiva de frequência para redução da ZND. Além disso, foi realizado o detalhamento matemático do novo método, promovendo a demarcação de sua ZND e propondo uma metodologia de parametrização do algoritmo. Para validação do método proposto, é realizado um estudo comparativo entre os métodos já conhecidos na literatura técnica tendo como base três indicadores de desempenho: DHTi, ZND e tempo de detecção.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na Seção II, é apresentada a teoria geral sobre o método AFD clássico e as variações que sofreu nos últimos anos e, a seguir, será apresentado o conceito de ZND e os procedimentos para sua determinação; na seção III, é apontada a implementação experimental e a metodologia de testes para o pior caso (carga RLC em ressonância com a frequência nominal) e na seção IV são apresentados os resultados dos testes e uma breve discussão sobre a eficácia de cada estratégia, considerando seus forças e fraquezas; na seção V é apresentada a conclusão do trabalho com uma pequena revisão da teoria apresentada e dos resultados obtidos.

II. MÉTODOS DE ANTI-ILHAMENTO

A. Zona de Não Detecção (ZND)

A ZND pode ser definida como o conjunto de condições de carga nas quais um método de anti-ilhamento não é capaz de detectar a desconexão da rede. A determinação dessa região é consideravelmente dependente das contribuições de potência da rede para a carga. Diversas metodologias de mapeamento da ZND foram propostas na literatura técnica. O plano $\Delta P \times \Delta Q$, por exemplo, relaciona as parcelas de potência ativa e

reativa que fluem da rede para as cargas locais na iminência da desconexão [23].

No entanto, é necessário ressaltar que essa metodologia não é adequada para os métodos ativos [24]. Em [25], foi proposta a estratégia de mapeamento $L \times C_{norm}$ que relaciona a indutância da carga local com a capacitância normalizada. Contudo, a principal desvantagem dessa técnica reside na necessidade de plotar a ZND para cada um dos possíveis valores do parâmetro resistivo (R) da carga. A segunda metodologia dedicada às PAI's ativas é o plano $Q_f \times f_0$ que relaciona valores de frequência de ressonância da carga com diferentes fatores de qualidade [26]. Uma vez que o valor de Q_f depende do valor de R , é possível mapear a ZND utilizando apenas um gráfico. Por outro lado, a principal desvantagem advém das recomendações normativas que estabelecem a necessidade da realização de diversos testes de anti-ilhamento nos quais se exigem pequenas variações em um dos parâmetros reativos (capacitância ou indutância) [1]-[3]. Dessa forma, foi proposto em [27], o plano $Q_f \times C_{norm}$ que relaciona a capacitância normalizada com diversos valores de fatores de qualidade. O fator de qualidade da carga é definido por (1) e a capacitância normalizada pode ser obtida por (2).

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1)$$

$$C_{norm} = \frac{C}{\omega^2 L} \quad (2)$$

Matematicamente, a ZND no plano $C_{norm} \times Q_f$, é a área compreendida entre duas curvas, relativas aos limiares superior e inferior de variação de frequência. A curva inferior refere-se à máxima frequência permitida pelos textos normativos e é representada pela equação (3), enquanto a curva superior refere-se à frequência de operação mínima permitida pelos textos normativos conforme (4).

$$C_{min} = 1 - \frac{2(\omega_{max})}{\omega} + \frac{tg(\theta_{inv})}{Q_f} \quad (3)$$

$$C_{máx} = 1 + \frac{2(\omega_{min})}{\omega} + \frac{tg(\theta_{inv})}{Q_f} \quad (4)$$

Por fim, a ZND do método é descrita por (5).

$$C_{min} < C_{norm} < C_{máx} \quad (5)$$

B. Active Frequency Drift (AFD)

O método *AFD*, proposto em [15], é um método ativo de PAI que produz um desvio de frequência após a desconexão da rede. Sua implementação depende da inserção de um tempo morto (t_z) ao fim de cada semi-ciclo de condução de corrente, conforme mostrado pela Figura 1, que compara uma referência de corrente idealmente senoidal com a referência de Anti-Ilhamento (AI), que é a referência distorcida pelo algoritmo AFD.

A Figura 2, por sua vez, apresenta uma alternativa de implementação do método AFD em blocos.

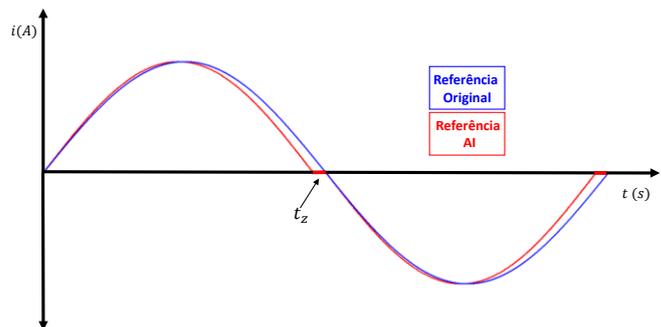


Fig. 1. Referência de corrente AFD.

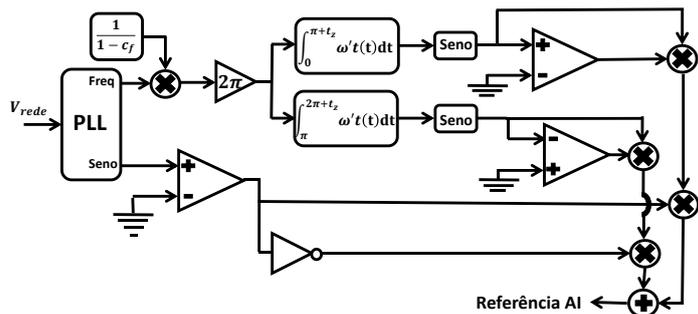


Fig. 2. Diagrama de Blocos do método AFD.

O correto dimensionamento do algoritmo depende do parâmetro c_f , definido como o dobro do tempo morto de cada semi-ciclo e o período da forma de onda da corrente conforme a equação (6). Faz-se necessário destacar que a escolha correta de c_f deve levar em consideração a relação de compromisso entre a DHTi e a efetividade do desvio da frequência [15].

$$c_f = \frac{2t_z}{T} \quad (6)$$

Matematicamente, a corrente de saída do inversor, após a implementação do método AFD, é dada por:

$$i_{afd}(t) = \begin{cases} I_{sen}(2\pi f' t), & 0 < \omega t \leq \pi - t_z \\ 0, & \pi - t_z < \omega t \leq \pi \\ I_{sen}(2\pi f' t), & \pi < \omega t \leq 2\pi - t_z \\ 0, & 2\pi - t_z < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

onde:

$$f' = \frac{f}{1 - c_f} \quad (8)$$

A distorção inserida na corrente de saída do inversor cria uma diferença de fase entre a corrente de saída do inversor e a tensão do PAC conforme demonstrado pela equação (9). A ZND do método AFD, por sua vez, é obtida por intermédio da substituição de (9) em (3) e (4). A Figura 3 demonstra a ZND do método para diferentes valores de c_f . Como pode ser percebido, o valor de c_f tem pouco impacto sobre o tamanho da ZND, alterando apenas a posição da mesma no plano $Q_f \times C_{norm}$.

$$\theta_{inv} = \frac{\pi c_f}{2} \quad (9)$$

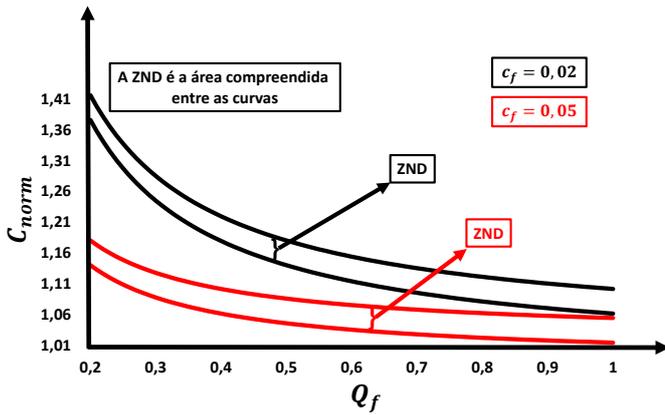


Fig. 3. ZND do método AFD no plano $Q_f \times c_{norm}$.

A principal vantagem do método AFD é resumida pela simplicidade de sua implementação digital. No entanto, sua eficácia depende de uma forte injeção de DHTi [28] e perda de desempenho em condições em que o ilhamento ocorre em porções do sistema elétrico com mais de um inversor conectado ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) [29]. Além disso, trabalhos comparativos [21], [22], [28] demonstram que a técnica AFD apresenta tempos de detecção maiores que de outras estratégias descritas na literatura.

C. Sandia Frequency Shift (SFS)

A necessidade de corrigir os problemas do algoritmo AFD, reduzindo a DHTi e o tempo de detecção, norteou o desenvolvimento de diversos métodos de PAI ativos. Nesse contexto, foi proposto o método SFS, que incorpora, à estratégia AFD, uma realimentação positiva de frequência na parametrização do algoritmo. Assim, o parâmetro c_f da técnica, é dado por (10).

$$c_f = c_{f_0} + K(f_{pll} - f). \quad (10)$$

A Figura 4, por sua vez, apresenta uma alternativa de implementação do método SFS em blocos.

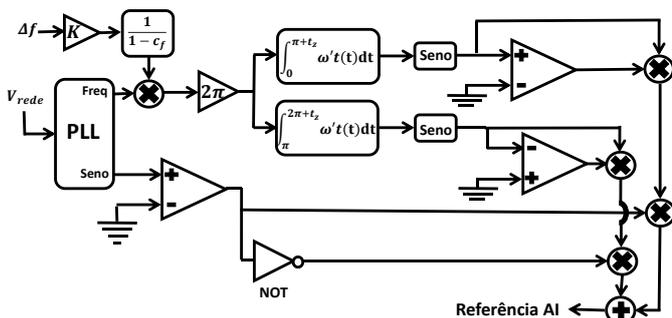


Fig. 4. Diagrama de blocos do método SFS

A parametrização do método SFS depende da escolha de duas variáveis: c_{f_0} e K . A primeira tem impacto negativo relacionado ao conteúdo harmônico inserido na corrente de saída do inversor, enquanto o ganho K tem impacto na estabilidade do conversor [30], podendo ocasionar a atuação inadequada da proteção.

Em virtude da importância de evitar a degradação harmônica, foram propostas várias técnicas de escolha dos parâmetros do algoritmo SFS [31]-[33], que garantissem que a estratégia funcionasse bem, mesmo sem a parcela c_{f_0} . Em [27], é proposta a equação (11) para parametrização do método que permite escolher um valor de K para eliminar a ZND até um dado valor de Q_f .

$$K > \frac{4Q_f}{\pi f_0}. \quad (11)$$

A equação (11) significa, resumidamente, que o menor valor de K que elimina a ZND para um intervalo de fatores de qualidade de 0 até 0,94 é o de $K = 0,02$, enquanto um ganho $K=0,04$ garante a ausência de ZND para um valores de Q_f de 0 até 1,89.

A Figura 5, adaptada de [31], demonstra a ZND do método SFS para diferentes valores de K e para $c_{f_0} = 0$. Conforme pode ser percebido, cada valor do ganho de realimentação é responsável por eliminar a ZND do método para um dado intervalo de fatores de qualidade.

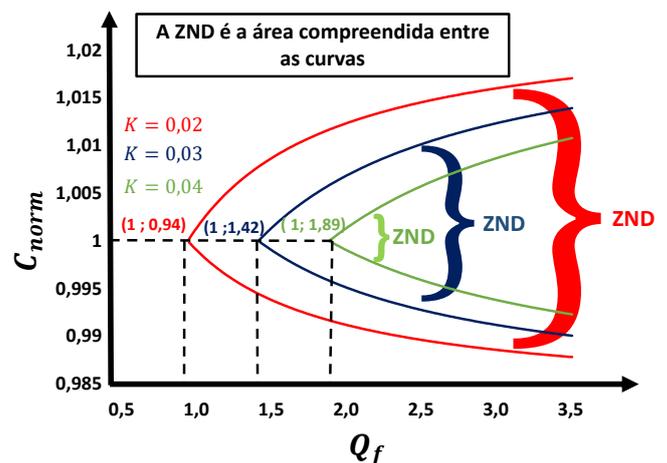


Fig. 5. ZND do algoritmo SFS para diferentes valores de K .

D. AFD Proposto por [22]

Em [22], foi proposta uma variante do método AFD baseada na inserção de um salto de fase no começo de cada semiciclo de corrente conforme mostrado pela Figura 6.

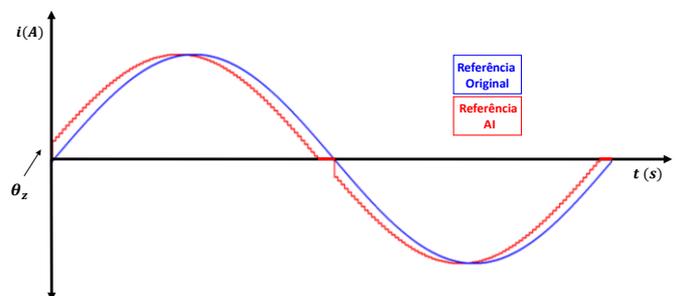


Fig. 6. Referência de corrente AFD proposto por [22].

Matematicamente, representa-se a corrente de saída do conversor é representada pelo sistema de equações (12).

$$i_{afd}(t) = \begin{cases} I_{sen}(2\pi ft + \theta_z), & 0 < \omega t \leq \pi - \theta_z \\ 0, & \pi - \theta_z < \omega t \leq \pi \\ I_{sen}(2\pi ft - \theta_z), & \pi < \omega t \leq 2\pi - \theta_z \\ 0, & 2\pi - \theta_z < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (12)$$

A Figura 7, por sua vez, apresenta uma alternativa de implementação do método proposto por [22].

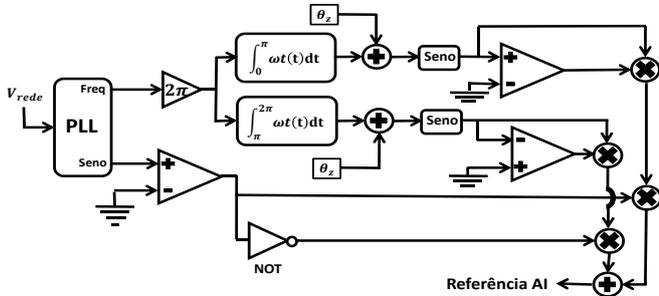


Fig. 7. Diagrama de blocos do método proposto por [22]

Conforme foi mencionado na subseção relativa ao método AFD clássico, a distorção imposta à corrente cria uma diferença de fase na saída do inversor que é definida por (13). Esse valor é importante para determinar a ZND do método.

$$\text{tg}(\phi_{inv}) = \frac{\pi - \theta_z}{1 + (\pi - \theta_z) \cot(\theta_z)} \quad (13)$$

À exemplo do método AFD, a ZND da estratégia é obtida por intermédio da substituição de (13) em (3) e (4). A Figura 8 demonstra a ZND do método para diferentes valores de θ_z . Como pode ser percebido, o método apresenta ZND para todos os valores de fatores de qualidade de carga. Além disso, a exemplo do método AFD, a variação de θ_z tem impacto apenas na posição da ZND do plano $Q_f \times C_{norm}$, não afetando seu cumprimento.

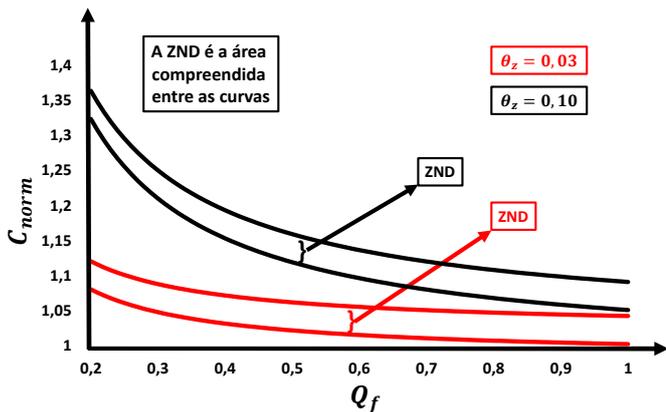


Fig. 8. ZND do algoritmo proposto por [22].

E. Método Proposto

A solução proposta consiste em aplicar o conceito da realimentação positiva de frequência ao método proposto por [22]. O principal objetivo é reduzir a ZND e aprimorar o tempo de detecção da estratégia, atrelando a parametrização da mesma ao erro de frequência, conforme (14).

$$\theta_z = \theta_{z_0} + K(f_{pll} - f) \quad (14)$$

A Figura 9, por sua vez, apresenta uma alternativa de implementação do método proposto por este trabalho.

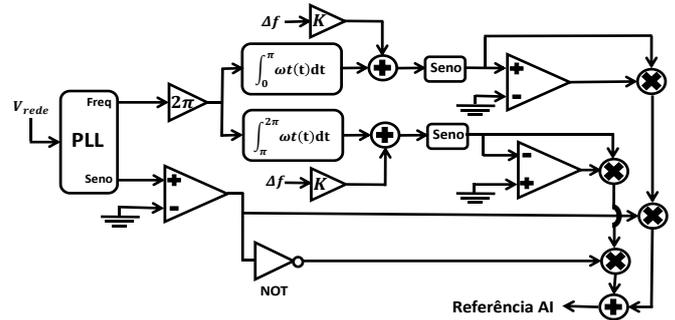


Fig. 9. Diagrama de blocos do método proposto por este trabalho.

A distorção inserida na corrente de saída do inversor cria uma diferença de fase entre a corrente de saída do inversor e a tensão do PAC que pode ser obtida por intermédio da substituição de (14) em (13), conforme (15).

$$\text{tg}(\phi_{inv}) = \frac{\pi - \theta_{z_0} - K(f_{pll} - f)}{1 + (\pi - \theta_{z_0} - K(f_{pll} - f)) \cot(\theta_{z_0} + K(f_{pll} - f))} \quad (15)$$

A parametrização do algoritmo depende de dois parâmetros: θ_{z_0} e K . A exemplo do método SFS, o parâmetro θ_{z_0} tem impacto no conteúdo harmônico da corrente de saída do inversor e o ganho K na estabilidade do conversor. Para reduzir o conteúdo harmônico do inversor, torna-se imperativa a determinação de uma metodologia de parametrização em que $\theta_{z_0} = 0$. A equação (11), dessa forma, poderia ser reescrita segundo (16):

$$\text{tg}(\phi_{inv}) = \frac{\pi - K(f_{pll} - f)}{1 + (\pi - K(f_{pll} - f)) \cot(K(f_{pll} - f))} \quad (16)$$

Dessa forma, substituindo (16) em (3) e (4), percebe-se que a ZND do método proposto é dada por:

$$1 - \frac{2(\omega_{max})}{\omega_0} + \frac{\pi - K(f_{pll} - f)}{Q_f(1 + (\pi - K(f_{pll} - f)) \cot(K(f_{pll} - f)))} < C_{norm} < 1 + \frac{2(\omega_{min})}{\omega_0} + \frac{\pi - K(f_{pll} - f)}{Q_f(1 + (\pi - K(f_{pll} - f)) \cot(K(f_{pll} - f)))} \quad (17)$$

A representação matemática da região indicada pela equação (13), é dada pela Figura 10. Ela é formada por duas curvas concorrentes, relativas aos limiares máximo e mínimo de variação de frequência permitidos pelos textos normativos. Como pode ser percebido, a ZND do método proposto começa a partir do ponto de interseção das duas curvas limítrofes representado por P . Matematicamente, o ponto P é representado pela equação (18).

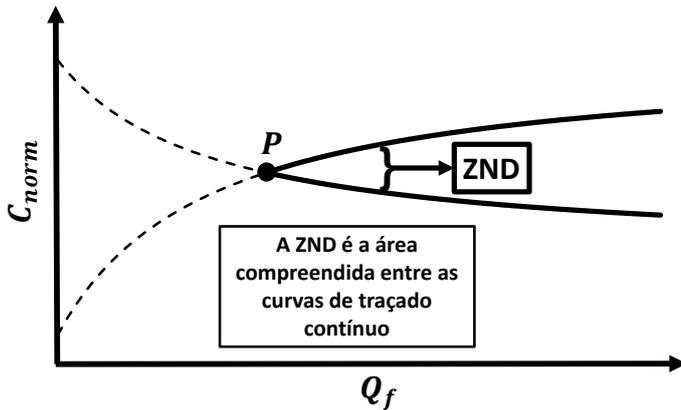


Fig. 10. Representação da ZND do método proposto.

$$\begin{aligned}
 1 - \frac{2(2\pi \cdot 0,5)}{\omega_0} + \frac{\pi - 0,5K}{Q_f(1 + (\pi - 0,5K) \cot(0,5K))} \\
 = 1 + \frac{2(2\pi \cdot 0,7)}{\omega_0} \\
 + \frac{\pi + 0,7K}{Q_f(1 + (\pi + 0,7K) \cot(-0,7K))}. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Torna-se assim possível, manipular algebricamente a equação (18), obtendo (19).

$$\begin{aligned}
 \frac{\pi - 0,5K}{1 + (\pi - 0,5K) \cot(0,5K)} - \frac{\pi + 0,7K}{1 + (\pi + 0,7K) \cot(0,7K)} \\
 = 0,04Q_f. \quad (19)
 \end{aligned}$$

Diante da impossibilidade de resolver analiticamente o ganho K em (15), é possível relacionar cada valor do ganho K ao seu respectivo Q_f e obter a equação que melhor correlaciona os pares ordenados obtidos. A Figura 11 demonstra a existência de uma relação linear entre o ganho K e o valor de Q_f inicial da ZND. Essa relação indica que os pontos podem ser correlacionados a partir de uma função de primeiro grau.

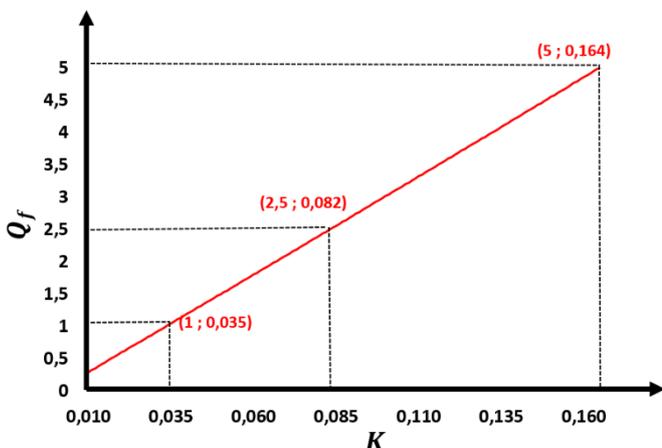


Fig. 11. Relação entre o ganho da realimentação positiva de frequência e o fator de qualidade da carga.

É possível, portanto, realizar uma regressão linear dos pontos para encontrar a equação da reta destacada nessa figura. A forma geral dessa equação é dada por:

$$Q_f = aK + b. \quad (20)$$

Os parâmetros obtidos foram $a = 31,91489$ e $b = -0,11702$. Por fim, a equação do ganho K para eliminação da ZND para um dado valor de Q_f é:

$$K = \frac{Q_f + 0,11702}{31,91489}. \quad (21)$$

Por fim, fica evidenciado que o método proposto apresenta uma evolução em relação aos métodos AFD e aquele proposto por [22], uma vez que consegue eliminar a ZND para um dado intervalo de Q_f . Além disso, os resultados experimentais demonstraram uma evolução em termos de tempo de detecção e DHTi em comparação com os outros métodos.

III. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A plataforma de teste é formada por um inversor conectado à rede com controle típico da corrente de saída e filtro LCL. Junto ao PAC, é conectada uma rede RLC paralela ajustável para representar a carga local. A etapa de entrada em corrente contínua do inversor não será detalhada por não impactar significativamente no escopo do trabalho. Para garantir que o limite normativo da DHTi de 5% não fosse extrapolado, foi escolhido um filtro LCL [34] na saída do inversor. A carga RLC foi calculada para que o parâmetro R drene toda potência ativa advinda do inversor e que o par LC apresente ressonância na frequência nominal da rede da concessionária, conforme exigido pelos textos normativos [2]-[4].

Em relação ao sistema de controle do inversor, faz-se necessário ressaltar que a amplitude da corrente (I_{pic}) de saída do inversor é imposta manualmente para melhor execução dos ensaios. Posteriormente, o sincronismo entre o inversor e a rede é obtido graças à adoção de um *Phase-Locked Loop* (PLL) do tipo SOGI. Essa escolha baseia-se no estudo [35], que concluiu que essa técnica de sincronização é suficientemente robusta para acompanhar as variações de frequência e fase do sinal de entrada. Assim, o controle da potência ativa do inversor é indiretamente realizado a partir da imposição de corrente, enquanto o controle da potência reativa do equipamento é indiretamente realizado pelo sincronismo promovido pelo PLL por meio do controle da fase da corrente de referência.

Posteriormente, o valor da velocidade angular e da referência senoidal advinda do PLL são conectados ao bloco de anti-ilhamento que oferece a referência distorcida de corrente. A correção do erro de frequência, por sua vez, é realizada por um controlador Proporcional Ressonante (PR) e por Compensadores Harmônicos (CH) de terceira, quinta e sétima ordens, que são as componentes mais significativas do conteúdo harmônico da corrente de saída do inversor [36].

A modulação utilizada é o PWM senoidal bipolar convencional, em 10kHz. Por fim, um controlador do tipo *FeedForward* realimenta a tensão do PAC na ação de controle

da malha de corrente do inversor para melhor rejeição de distúrbios e a tensão do barramento CC do inversor também é realimentada para compensação dinâmica do ganho estático do inversor.

Um importante tópico a se destacar é a escolha do método de PAI passiva, que deve estar presente como parte do método de PAI ativo. A parte ativa do algoritmo é responsável pelo desvio de algum parâmetro de operação para fora dos limites estabelecidos, enquanto a parte passiva encarrega-se do efetivo desligamento do inversor por meio da detecção e mensuração de tais desvios. A PAI passiva escolhida foi o método de detecção de sub/sobre frequência que recebe o cálculo de frequência da rede advindo do PLL, compara os valores instantâneos de frequência com os limites normativos

e, caso exista alguma irregularidade, promove o desligamento do equipamento conversor.

As Figuras 12.a e 12.b demonstram, respectivamente, o diagrama de blocos da estrutura de potência ensaiada e da estrutura de controle implementada. O desligamento do inversor, após a detecção do Ilhamento, é promovido pelo sinal “Trip”, que é enviado ao modulador PWM e que apresenta nível lógico 1, em operação conectada à rede e nível lógico 0 caso seja detectado o ilhamento. O sinal “Ilha”, por sua vez, é gerado pelo microprocessador e bloqueia um dispositivo TRIAC, responsável pela interrupção automática da rede. A Figura 13, por sua vez, demonstra o equipamento inversor com seu filtro LCL, enquanto a Figura 14 demonstra a configuração da carga RLC paralela.

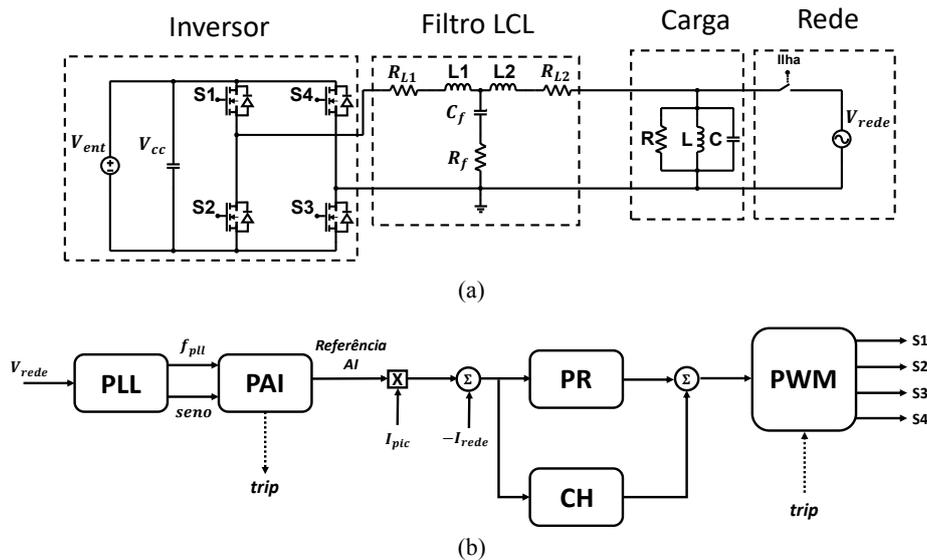


Fig. 12. Diagrama de Blocos do Sistema Ensiado (a) Estrutura de Potência: Inversor, Carga e Rede; (b) Estrutura de Controle: PLL, PAI, Proporcional Ressonante, Compensador Harmônico e Modulação por Largura de Banda

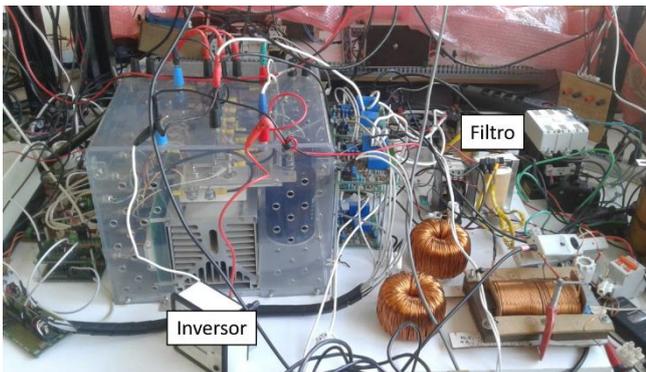


Fig. 13. Montagem experimental do inversor e seu filtro.

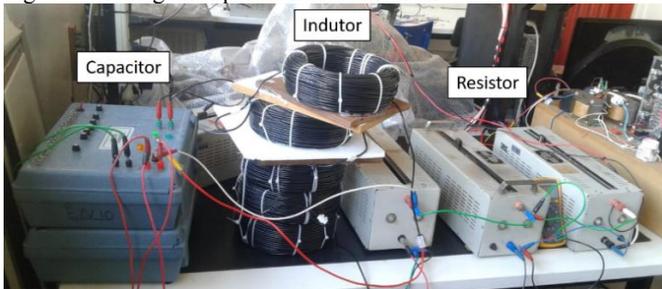


Fig. 14. Montagem experimental da carga RLC.

A Tabela I demonstra os valores de especificação do projeto.

TABELA I
Especificações de Projeto

Parâmetros da Rede	
Tensão Nominal	127Vrms
Frequência Nominal	60 Hz
DHTi	<2,5%
Parâmetros do Inversor	
Tensão de Saída	127 V
Corrente de Saída	7,89 A
Potência	1000 W
Primeira Bobina do Filtro	1,5 mH
Resistência da Primeira Bobina	0,04 Ω
Segunda Bobina do Filtro	10,5 mH
Resistência da Segunda Bobina	0,04 Ω
Resistência de Amortecimento	2 Ω
Capacitor do Filtro	30 μF
Frequência de Chaveamento	10 kHz
Parâmetros da Carga	
Configuração	RLC Paralela
Resistência Equivalente	16,129 Ω
Indutância Equivalente	42,48 mH
Capacitância Equivalente	164,5 μF
Frequência de Ressonância	60,05 Hz
Fator de Qualidade	1,01

IV. NORMAS E METODOLOGIA DE ENSAIO

A. Textos Normativos

O estudo comparativo aqui proposto será baseado nas recomendações dos seguintes textos normativos: ABNT NBR 62116 [1], IEEE 1547-2003 [2] e IEEE 929-2000[3]. A Tabela II apresenta as principais recomendações dos textos [2]-[3].

TABELA II
Limiares Normativos

Parâmetro	IEEE 929		IEEE 1547	
	Limites	Tempo de Detecção	Limites	Tempo de Detecção
Tensão	$V < 50 \%$	6 ciclos	$V < 50 \%$	6 ciclos
	$50 \leq V < 80$ [%]	120 ciclos	$50 \leq V < 80$ [%]	120 ciclos
	$88 \leq V < 110$ [%]	∞	$88 \leq V < 110$ [%]	∞
	$110 \leq V < 137$ [%]	120 ciclos	$V > 115 \%$	2,0 s
	$V \geq 137 \%$	2 ciclos	$V \geq 144 \%$	0,16 s
Frequência	$59,3 \leq V < 60,5$ [Hz]	∞	$59,3 \leq V < 60,5$ [Hz]	∞
			Outro	0,16 s
DHTi	$< 5 \%$	∞	$< 5 \%$	∞
Detecção de Ilhamento	-	1s	-	1s

Para os testes deste trabalho, foram observadas todas as recomendações relativas à qualidade de energia elétrica da rede da concessionária estabelecidos pelo texto [1] e descritos pela Tabela III.

TABELA III
Recomendações para Rede da Concessionária

Parâmetros da Rede	
Tensão	$127 V_{rms} \pm 0,2\%$
Frequência	$60 \pm 0,1$ Hz
DHTv	$< 2,5\%$

B. Metodologia de Testes

A análise comparativa dos métodos aqui abordados será baseada em três critérios: ZND, DHTi e tempo de detecção. Serão realizados ensaios de Anti-Ilhamento em três condições de cargas: $C_{norm} = 0,95$, $C_{norm} = 1$ e $C_{norm} = 1,05$.

É necessário ainda, estabelecer quais serão os critérios de parametrização dos métodos de Anti-ilhamento. O critério da ZND será utilizado para determinação de uma hierarquia entre métodos. Nesse sentido, dividir-se-á os métodos em dois grupos. No primeiro grupo estarão o AFD clássico e o algoritmo proposto por [22], que apresentam ZND para todos os valores de Q_f , conforme exposto pela Figura 15.

A escolha dos parâmetros desses métodos esbarra em uma das já citadas fraquezas do algoritmo AFD Clássico. Em virtude do alto conteúdo harmônico, o maior valor de c_f para garantir o respeito ao limite de DHTi de 5% é o de $c_f = 0,032$. No entanto, conforme exposto pela Figura 15, esse valor não garante proteção anti-ilhamento para a condição em que $C_{norm} = 1,05$, visto que o ponto em que $Q_f = 1$ e $C_{norm} = 1,05$ (destacado com um sinal "X" em verde), está contido na ZND do método AFD Clássico. Isso significa que, para essa

condição, o inversor segue operando mesmo após a interrupção da rede, como será demonstrado na seção de validação experimental. Para o método proposto por [22], escolher-se-á um valor de $\theta_z = 0,1$, que é suficientemente grande para evitar que o método incorra em não detecção para todas as condições de testes.

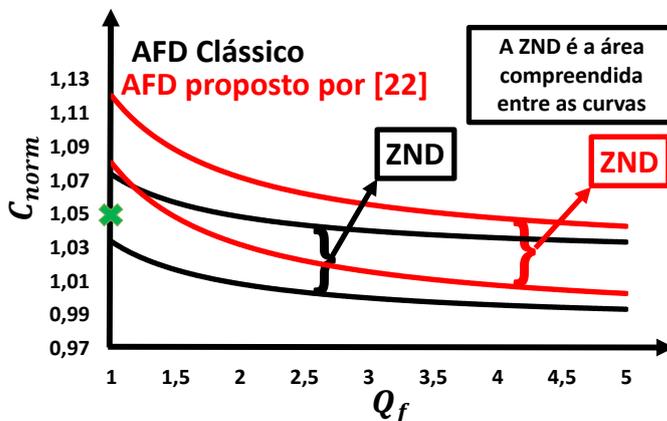


Fig. 15. ZND dos métodos do primeiro grupo.

Para o segundo grupo de estratégias, por outro lado, serão escolhidos valores que eliminem a ZND para o mesmo intervalo de Q_f . O maior valor de K que garante operação estável do inversor sob o método SFS é o de $K = 0,05$. Assim, será escolhido o valor de $K = 0,05$ para o SFS e o de $K = 0,079$ para o método proposto por esse trabalho.

A Figura 16 demonstra a ZND dos dois métodos do grupo II para os parâmetros escolhidos. Como pode ser percebido, para os valores escolhidos, as ZND de ambas as estratégias se iniciam no mesmo valor do eixo de Q_f , o que, por sua vez, garante que os métodos serão testados sob igualdade de condições. A Tabela IV explicita os parâmetros utilizados durante os ensaios, separados pelos grupos hierárquicos.

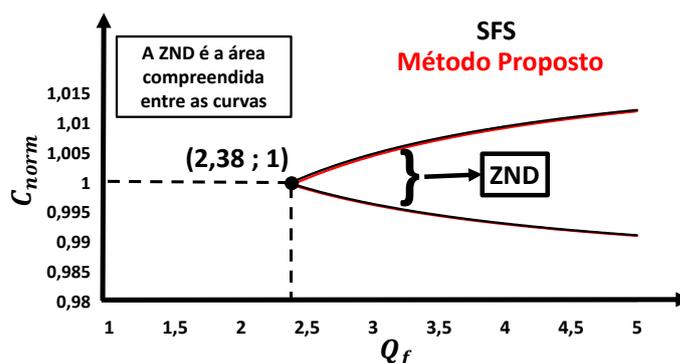


Fig. 16. ZND dos métodos do segundo grupo.

TABELA IV
Parâmetros dos Métodos de Anti-Ilhamento

Grupos	Métodos	Parâmetro
I	AFD Clássico	$c_f = 0,032$
	Proposto por [22]	$\theta_z = 0,1$
II	SFS	$c_{f_0} = 0$ $K = 0,05$
	Método Proposto	$\theta_{z_0} = 0$ $K = 0,079$

Finalmente, a Figura 17 compara as ZND's de todos os métodos analisados, para os parâmetros expostos na Tabela IV. Devido à parametrização utilizada, o método proposto e o algoritmo SFS obtiveram ZND's coincidentes, conforme mostrado pela Figura 16. Uma vez que os métodos do Grupo II eliminam a ZND para um dado valor de Q_f , esses métodos oferecem maior confiabilidade e proteção contra o ilhamento.

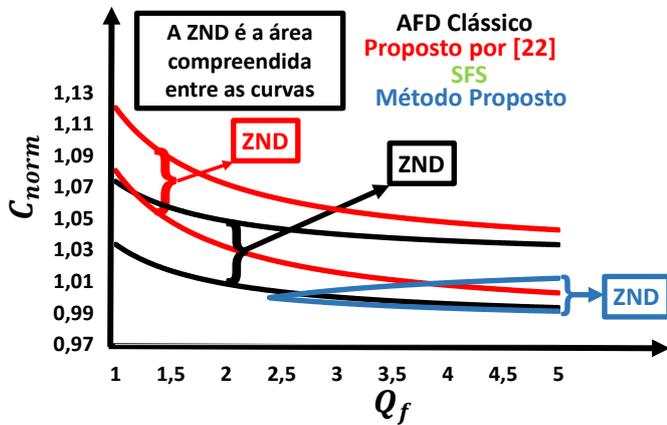


Fig. 17. ZND dos métodos implementados.

V. ENSAIOS DE ANTI-ILHAMENTO

A. Implementação dos Métodos

A Figura 18 demonstra os resultados de tensão do PAC, da corrente de saída do inversor e a corrente que flui da rede para a carga RLC. Os resultados foram obtidos por medição realizada por um osciloscópio TEKTRONIX TPS 2024.

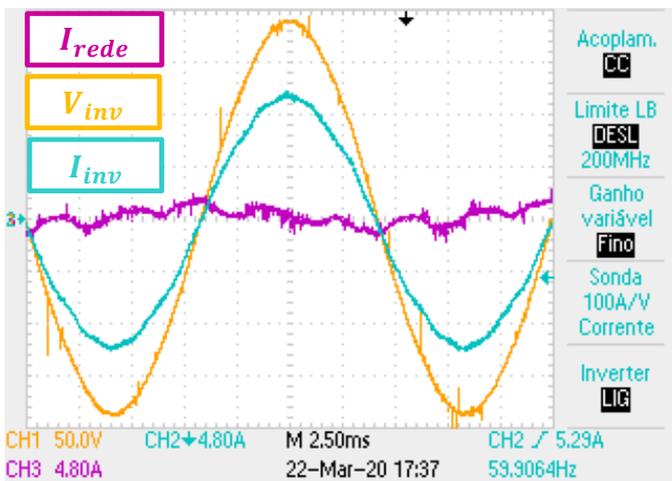


Fig. 18. Tensão do PAC, Corrente do Inversor e corrente da rede sem implementação de métodos ativos de Anti-Ilhamento.

É possível perceber que a tensão do PAC e a corrente de saída do inversor apresentam-se em fase. Além disso, é necessário ressaltar que a carga RLC paralela foi projetada para drenar toda potência ativa fornecida pelo inversor e para que o par LC apresentasse ressonância em 60 Hz, conforme as recomendações normativas [1]-[3]. Nessas condições, a componente fundamental da corrente que flui da rede para a carga (I_{rede}) é idealmente zero, logo todo conteúdo desse sinal, visto na Figura 11, é formado por componentes harmônicas que não são fornecidas pelo inversor [1].

As Figuras 19 e 20 apresentam os valores instantâneos de tensão do PAC e da corrente de saída do inversor sob a implementação dos métodos AFD clássico e daquele proposto por [22], respectivamente. Os resultados demonstram que o inversor é capaz de impor uma corrente distorcida à carga local semelhante àquelas descritas na seção II, pelas Figuras 1 e 6.

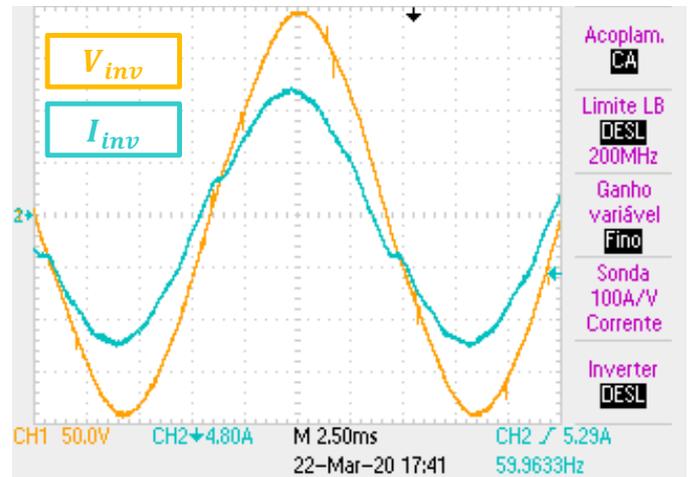


Fig. 19. Tensão do PAC e Corrente do Inversor sob implementação do método AFD Clássico.

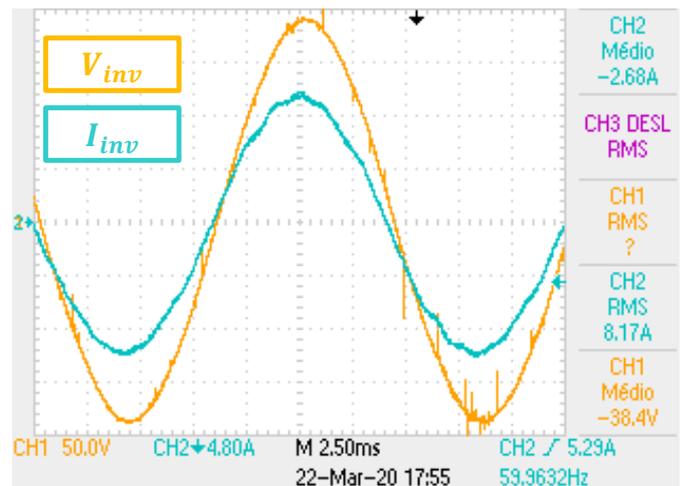


Fig. 20. Tensão do PAC e Corrente do Inversor sob implementação do método proposto por [22].

Não serão mostrados os resultados de tensão do PAC e corrente de saída do inversor dos métodos SFS e daquele proposto por esse trabalho para evitar redundâncias, uma vez que eles são, respectivamente, variações do método AFD e daquele proposto por [22].

B. Resultados Experimentais: Grupo I

As Figuras 21 e 22 demonstram, para os métodos AFD clássico e para aquele proposto por [22], os resultados de tensão do PAC, corrente de saída do inversor e os sinais "Ilha" e "Trip" que marcam, respectivamente, a interrupção da rede e a detecção do Ilhamento, para a condição em que $C_{norm} = 1$.

Como pode ser percebido, para $C_{norm} = 1$, o método proposto por [22] apresenta tempo de detecção de 142 ms, enquanto o AFD demanda 222 ms para desabilitar o inversor após a desconexão da rede. Essa tendência foi verificada para

os demais testes, já que o método proposto por [22] apresentou tempos de detecção menores para todas as condições. Além disso, evidenciou-se que o algoritmo AFD clássico não foi capaz de detectar o Ilhamento para o ensaio com $C_{norm} = 1,05$, visto que, para essa condição, o algoritmo AFD incorre em ZND, conforme discutido anteriormente, na Figura 15.

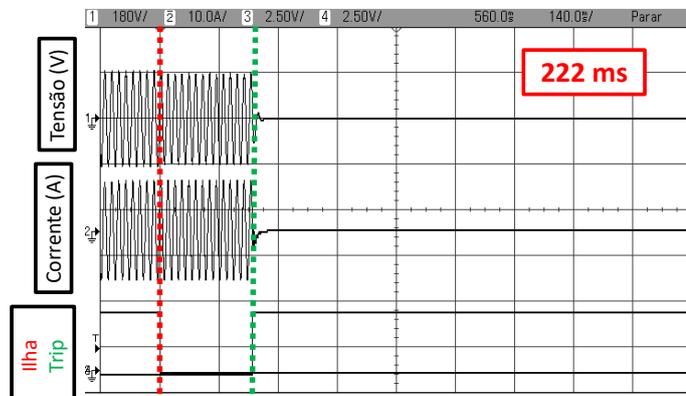


Fig. 21. Resultados de Anti-Ilhamento do método AFD Clássico.

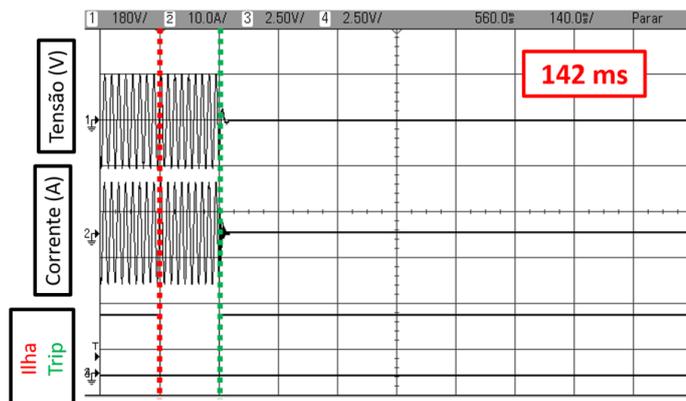


Fig. 22. Resultados de Anti-Ilhamento do método proposto por [22].

A Figura 23 demonstra o comportamento da frequência da tensão do PAC, sob implementação do método AFD, para $C_{norm} = 1,05$. Como pode ser percebido, o método é incapaz de desviar a frequência para além dos limites permitidos pelos textos normativos e o inversor segue operando mesmo após a desconexão da rede.

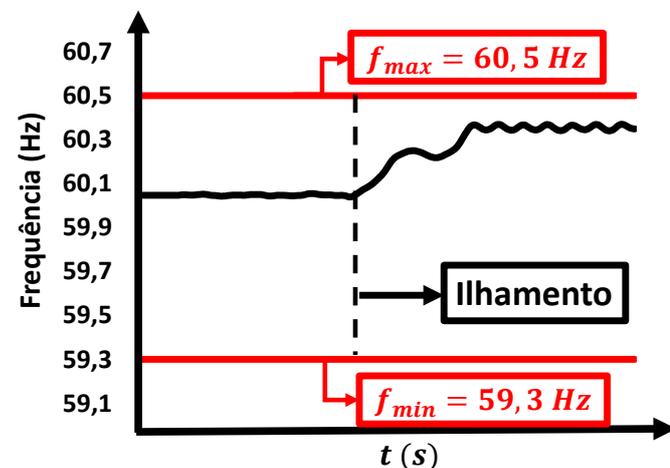


Fig. 23. Comportamento da Frequência do método AFD na ZND

Para que o algoritmo clássico não incorresse em ZND para essa condição, necessitar-se-ia de um $cf = 0,045$ que, por sua vez, implicaria em uma distorção harmônica de 6,07%, que ultrapassa o limiar de 5% permitido pelas normas e expostos pela Tabela II.

Por fim, dentre as estratégias do primeiro grupo, verificou-se que a degradação harmônica causada pelo método proposto por [22] foi menor do que aquela obtida pelo AFD Clássico em todas as suas componentes. De fato, o AFD apresentou DHTi de 4,57% contra os 2,57% obtidos pelo método de [22].

C. Resultados Experimentais: Grupo II

As Figuras 24 e 25 demonstram, respectivamente, os resultados do ensaio de anti-ilhamento, para $C_{norm} = 1$, dos métodos SFS e daquele que foi proposto por este estudo. Não serão fornecidos resultados gráficos para as demais condições para evitar redundâncias. Como pode ser percebido, a estratégia proposta é capaz de reduzir o tempo de detecção de 190 ms para 178 ms. Além disso, o método proposto por esse estudo obteve tempos de detecção menores para todas as condições ensaiadas.

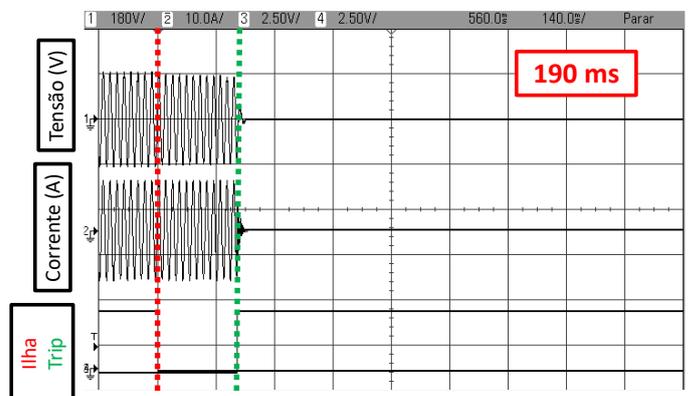


Fig. 24. Resultado de Anti-Ilhamento do método SFS.

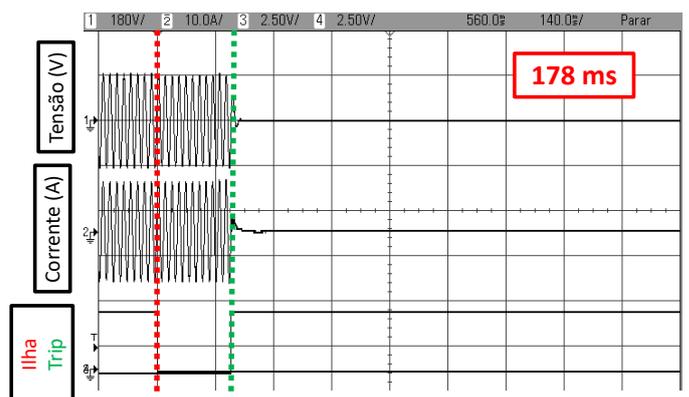


Fig. 25 Resultado de Anti-Ilhamento do método proposto.

Dentre as estratégias do segundo grupo, verificou-se que a degradação harmônica causada pelo método proposto por este trabalho totalizou 2,34%, enquanto o método SFS obteve DHTi de 2,41 %.

D. Resultados Experimentais: Considerações Finais

Por fim, a Tabela V condensa os resultados de conteúdo harmônico total da corrente injetada na rede de tempo de detecção para as três condições de carga. Diante das informações apresentadas, demonstra-se a não efetividade do

algoritmo AFD Clássico enquanto método de Anti-Ilhamento, uma vez que essa solução incorreu em ZND para a condição de carga em que $C_{norm} = 1,05$. Conforme mencionado anteriormente, para detectar a interrupção da rede, seria necessário um valor de $c_f = 0,045$ o que, no entanto, implicaria em uma DHTi superior aos 5% determinados pelas normas.

Além disso, é necessário ressaltar que os tempos de detecção obtidos pelos métodos do primeiro grupo apresentam grande dependência do valor de C_{norm} . Como pode ser verificado, existe uma tendência de crescimento do tempo de detecção atrelada ao crescimento do valor de C_{norm} . O método proposto por [22], por exemplo, tem tempo de detecção de 100 ms para a primeira condição e de 246 ms para a terceira, o que significa um aumento de 146%. Para as estratégias do segundo grupo, por outro lado, foi verificada essa tendência para o algoritmo SFS, mas não para o método proposto por este trabalho que, por sua vez, apresentou um decaimento do tempo de detecção para as condições de carga em que $C_{norm} = 0,95$ e $C_{norm} = 1,05$ em comparação com a condição nominal.

Por fim, os resultados obtidos demonstram que o método proposto representa uma evolução qualitativa em relação aos métodos do primeiro grupo, visto que elimina a ZND para um

dado intervalo de fatores de qualidade. Além disso, apresentou melhor desempenho que o método SFS, seja em relação à DHTi da corrente injetada na rede, seja em relação ao tempo de detecção para todos os valores de C_{norm} .

É importante ressaltar que em [7], é apresentado um estudo comparativo entre métodos ativos de PAI, no qual é analisado o método SMS. Este se baseia numa realimentação positiva de frequência e apresenta bom desempenho pois é capaz de eliminar a ZND para um dado intervalo de fatores de qualidade, a se depender dos valores escolhidos. Em relação aos indicadores de desempenho reportados, destaca-se que o referido algoritmo alcançou distorção harmônica de 2,5% e tempo de detecção de 260 ms. Embora esses valores sejam qualitativamente inferiores aos obtidos pelo método proposto neste trabalho, é necessário ressaltar que esses resultados podem variar de acordo com as condições de ensaio (DHTv da rede, por exemplo), ou dos valores escolhidos para parametrizar os algoritmos. Por essa razão, os referidos resultados não serão apresentados na Tabela V, onde são expostos os principais indicadores de desempenho dos métodos de anti-ilhamento analisados no trabalho de pesquisa e desenvolvimento em pauta.

TABELA V
Síntese dos Principais Indicadores de Desempenho dos Métodos Anti-Ilhamento Analisados

Grupos	Métodos	DHTi	Tempo de Detecção		
			$C_{norm} = 0,95$	$C_{norm} = 1$	$C_{norm} = 1,05$
I	AFD Clássico	4,57%	134 ms	222 ms	ZND
	Proposto por [22]	2,56%	100 ms	140 ms	264 ms
II	SFS	2,41%	110 ms	190 ms	194 ms
	Método Proposto	2,34%	96 ms	178 ms	166 ms

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentados os principais tópicos relativos à teoria do fenômeno do ilhamento de SFCRs. Além disso, discutiu-se a validade dos métodos em suas vantagens e desvantagens, as metodologias de mapeamento da ZND e os principais textos normativos que adereçam a PAI como requisito fundamental para operação dos inversores. Destaca-se ainda que foi proposto um novo método que combina elementos de outras estratégias à realimentação positiva de frequência. Obtém-se assim, uma redução da ZND e do tempo de detecção, uma vez que se atrela o erro de frequência à parametrização do algoritmo.

Os métodos foram divididos em dois grupos hierárquicos, sendo que o primeiro composto por soluções que apresentam ZND para toda extensão do plano $C_{norm} \times Q_f$, enquanto no segundo figuram os métodos que eliminam a região de não detecção para um dado intervalo de Q_f . Os algoritmos avaliados foram submetidos a ensaios de ilhamento onde foram avaliados o tempo de detecção e a DHTi advinda de suas respectivas implementações.

Em relação ao primeiro grupo, verificou-se que o pior desempenho foi o do AFD clássico que incorreu em ZND para a condição em que $C_{norm} = 1,05$. Por outro lado, para os métodos do segundo grupo, verificou-se que os resultados do método proposto, sejam os de DHTi ou os de tempo de detecção, foram qualitativamente superiores aos obtidos pelo método SFS. Por fim, é possível notar que o método proposto

é capaz de conferir maior segurança que as soluções pertencentes ao primeiro grupo, uma vez que elimina a ZND para um dado intervalo de fatores de qualidade, e oferece maior segurança que o método SFS, uma vez que detecta a interrupção da rede com maior velocidade, demandando uma menor parcela de DHTi injetada. Por fim, como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se um estudo comparativo entre o método proposto por esse trabalho e o algoritmo SMS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências de fomento CAPES, CNPq (sob os processos: 304479/2017-9, 406845/2013-1, 304489/2017-4) e FAPEMIG (sob o processo PPM-00485-17 e APQ-03554-16) pelo suporte financeiro e aos professores Luiz Carlos de Freitas, Gustavo Brito de Lima e João Batista Vieira Júnior do NUPEP-FEELT-UFU pelas importantes contribuições no desenvolvimento deste projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] *ABNT NBR Procedimentos de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. ABNT NBR IEC 62116, Mar. 2012.
- [2] *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*. IEEE Std. 929-2000, Jan. 2000, doi: 10.1109/IEEESTD.2000.91304
- [3] *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE. Std

- 1547-2003, Jul. 2003, doi: 10.1109/IEEEESTD.2003.94285.
- [4] ABNT NBR *Sistemas Fotovoltaicos (FV) - Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição*, ABNT NBR 16149, Mar. 2013.
- [5] M. Suman, M. Kirthiga, *Distributed Energy Resources in Microgrids*, Academic Press, 1a Edição, Nova Iorque, 2019, doi: 10.1016/C2018-0-02714-0.
- [6] M. Kim, et al., "Comprehensive Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation Systems", in *Energies*, v. 12, n° 3, Mar. 2019, doi: 10.3390/en12050837.
- [7] M. A. G. Brito, M. G. Alves, L. P. Sampaio, C. A. Canesin, "Estratégias de anti-ilhamento aplicadas a sistemas de geração distribuída fotovoltaica", in *Revista Eletrônica de Potência*, v. 23, n° 3, Jun. 2018, doi: 10.18618/REP.2018.2.2773.
- [8] K. N. E. K. Ahmad et al., "An effective passive islanding detection method for PV single-phase grid-connected inverter", in *Solar Energy*, vol. 97, pp. 155-167, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.08.011
- [9] A. G. Abokhalil, A. B. Awan, A. R. A. Qawasmi, "Comparative Study of Passive and Active Islanding Detection Methods for PV Grid-Connected Systems", in *Sustainability*, vol. 10, n° 1, Mai. 2018, doi: 10.3390/su10061798.
- [10] S. Hu, H. Tsai, T. Lee, "Islanding detection method based on second-order harmonic injection for voltage-controlled inverter", in *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, Fev. 2015, doi: 10.1109/IFEEC.2015.7361564.
- [11] M. Khodaparastan et al. "A Novel Hybrid Islanding Detection Method for Inverter-Based DGs Using SFS and ROCOF", in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, n° 5, pp. 2162–2170, Fev. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2406577.
- [12] P. Gupta, R. S. Bhatia, D. K. Jain, "Active ROCOF Relay for Islanding Detection", in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, n° 1, pp. 420–429, Jun. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2540723.
- [13] F. Mango et al., "Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part I: Passive Methods", in *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1878-1883, Set. 2006, doi: 10.1109/EPEPEMC.2006.4778679.
- [14] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, Wiley-IEEE Press, 2ª Edição, Nova Iorque, Fev. 2011.
- [15] M. E. Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention" in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, n° 3, pp. 810–816, Set. 1999, doi: 10.1109/60.790956.
- [16] M. A. Hosani, Z. Qu, H. H. Zeineldin, "Scheduled Perturbation to Reduce Non detection Zone for Low Gain Sandia Frequency Shift Method", in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, n° 6, Mai. 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2423554.
- [17] Y. Gao and J. Ye, "Improved Slip Mode Frequency-Shift Islanding Detection Method", in *2019 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)*, pp. 152-155, Set. 2019, doi: 10.1109/ICVRIS.2019.00045.
- [18] Y. Jung et al., "A Novel Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention for the grid-connected Photovoltaic Inverter", in *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, Recife, Jun. 2005, doi: 10.1109/PESC.2005.1581893.
- [19] H. Vahedi and M. Karrari, "Adaptive Fuzzy Sandia Frequency-Shift Method for Islanding Protection of Inverter-Based Distributed Generation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, n° 1, pp. 84-92, Jan. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2219628.
- [20] H. H. Zeineldin, M. M. A. Salama, "Impact of Load Frequency Dependence on the NDZ and Performance of the SFS Islanding Detection Method," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n° 1, pp. 139-146, Jan. 2011, doi: 10.1109/TIE.2009.2033482.
- [21] Ê. Resende et al., "A Performance Analysis of Active Anti-Islanding Methods Based on Frequency Drift" in *IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference*, Santos, Brasil, pp. 1-6, Nov. 2019, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065377.
- [22] W. Chen et al., "An improved active frequency drift islanding detection method with lower total harmonic distortion", in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 5248-5252, Out. 2013, doi: 10.1109/ECCE.2013.6647411.
- [23] R. Messenger, A. Abtahi, *Photovoltaic System Engineering*, CRC Press, 4ª Edição, Mar. 2017.
- [24] H. T. Silva, *Estudo sobre a interação de métodos de anti-ilhamento para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão com múltiplos inversores*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas, Unicamp, Brasil, Mar. 2016, doi: 10.11606/D.3.2016.tde-28062016-151006.
- [25] M. E. Ropp et al., "Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and non-detection zones", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 15, n° 3, pp. 290-296, Set. 2000, doi: 10.1109/60.875495.
- [26] L. A. C. Lopes, H. Sun, "Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n° 1, pp. 171-180, Mar. 2006, doi: 10.1109/TEC.2005.859981.
- [27] F. Liu, Y. Kang, S. Duan, "Analysis and optimization of active frequency drift islanding detection method" in *APEC 07 – Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, USA, Mai. 2007, doi: 10.1109/APEX.2007.357696.
- [28] Ê. C. Resende et al., "Computational Implementation of Different Anti-Islanding Techniques Based on Frequency Drift for Distributed Generation Systems", in *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America*, Gramado, Brasil, Nov. 2019, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895430.

- [29] Y. Hong, W. Huang, "Investigation of Frequency drift methods of Islanding Detection with multiple PV inverters", in *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, Shanghai, pp. 429-434, Fev. 2014, doi: 10.1109/PEAC.2014.7037894.
- [30] X. Wang, W. Freitas, "Impact of Positive-Feedback Anti-Islanding Methods on Small-Signal Stability of Inverter-Based Distributed Generation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 23, nº 3, Jul. 2008, doi: 10.1109/TEC.2008.926066 .
- [31] H. H. Zeineldin, S. Kennedy, "Sandia Frequency-Shift Parameter Selection to Eliminate Non detection Zones", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, nº 1, p. 486-487, Jan. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2005362.
- [32] A. Y. Hatata, El-H. Abd-Raboh, Bishoy E. Sedhom, "Proposed Sandia frequency shift for anti-islanding detection method based on artificial immune system", *Alexandria Engineering Journal*, Volume 57, nº 1, 2018, Pages 235-245, Mar. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2391193.
- [33] H. Vahedi, M. Karrari, G. B. Gharehpetian, "Accurate SFS Parameter Design Criterion for Inverter-Based Distributed Generation" *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, nº 3, pp. 1050-1059, Jun. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2391193.
- [34] F. C. Melo, *Projeto e desenvolvimento de um novo inversor solar de estágio único sem transformador adequado para aplicações de baixa potência*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Out. 2017, doi: 10.14393/ufu.te.2017.11.
- [35] M. E. T. Souza, Ê. C. Resende, F. C. Melo, G. B. Lima, L. C. G. de Freitas, "Computational Implementation and Comparative Analysis of Phase-Locked Loop (PLL) Methods Under Different Power Quality Disturbances", in *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America*, pp. 1-6, Sep. 2019, doi: 10.1109/ISGTLA.2019.8895430.
- [36] H. Cha, T. Vu, J. Kim, "Design and control of Proportional-Resonant controller based Photovoltaic power conditioning system", in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, pp. 2198-2205, Nov. 2009, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316374.

Ênio Costa Resende, nascido em Patrocínio (MG), em 1994, é bacharel (2018) e mestre (2020) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Suas áreas de interesse incluem: algoritmos de Anti-Ilhamento e técnicas de sincronismo de inversores.

Henrique T. M. Carvalho, possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica (concentração em Sistemas de Energia pela Universidade Federal de Uberlândia. Seus interesses de pesquisa incluem sistemas fotovoltaicos, controle digital de inversores conectados à rede e em paralelo e controle distribuído de microrredes.

Ernane Antônio Alves Coelho, nascido em Teófilo Otoni, Minas Gerais, em 1962, é engenheiro eletricitista (1987) pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, mestre (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis e doutor (2000) pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Atualmente é professor titular do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais. Sua área de atuação envolve inversores PWM, correção do fator de potência e novas tecnologias usando controle digital.

Luiz Carlos Gomes Freitas, recebeu os títulos de bacharel, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, em 2001, 2003 e 2006, respectivamente. Ele está atualmente no NUPEP, onde tem trabalhado para estabelecer atividades de pesquisa e educação no que diz respeito à eletrônica de potência. Seus interesses de pesquisa incluem conversão de energia de alta frequência, técnicas de correção de fator de potência ativa, retificadores híbridos, qualidade de energia elétrica, aplicações de energia limpa, conversor de eletrônica de potência e técnica de controle para sistemas baseados em fontes de energias renováveis e microrredes. O Dr. Freitas recebeu o prêmio Prize Paper Award do Comitê de Controle e Automação Industrial IEEE-IAS por sua contribuição na área de Retificadores Híbridos em 2012 e é Membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência.